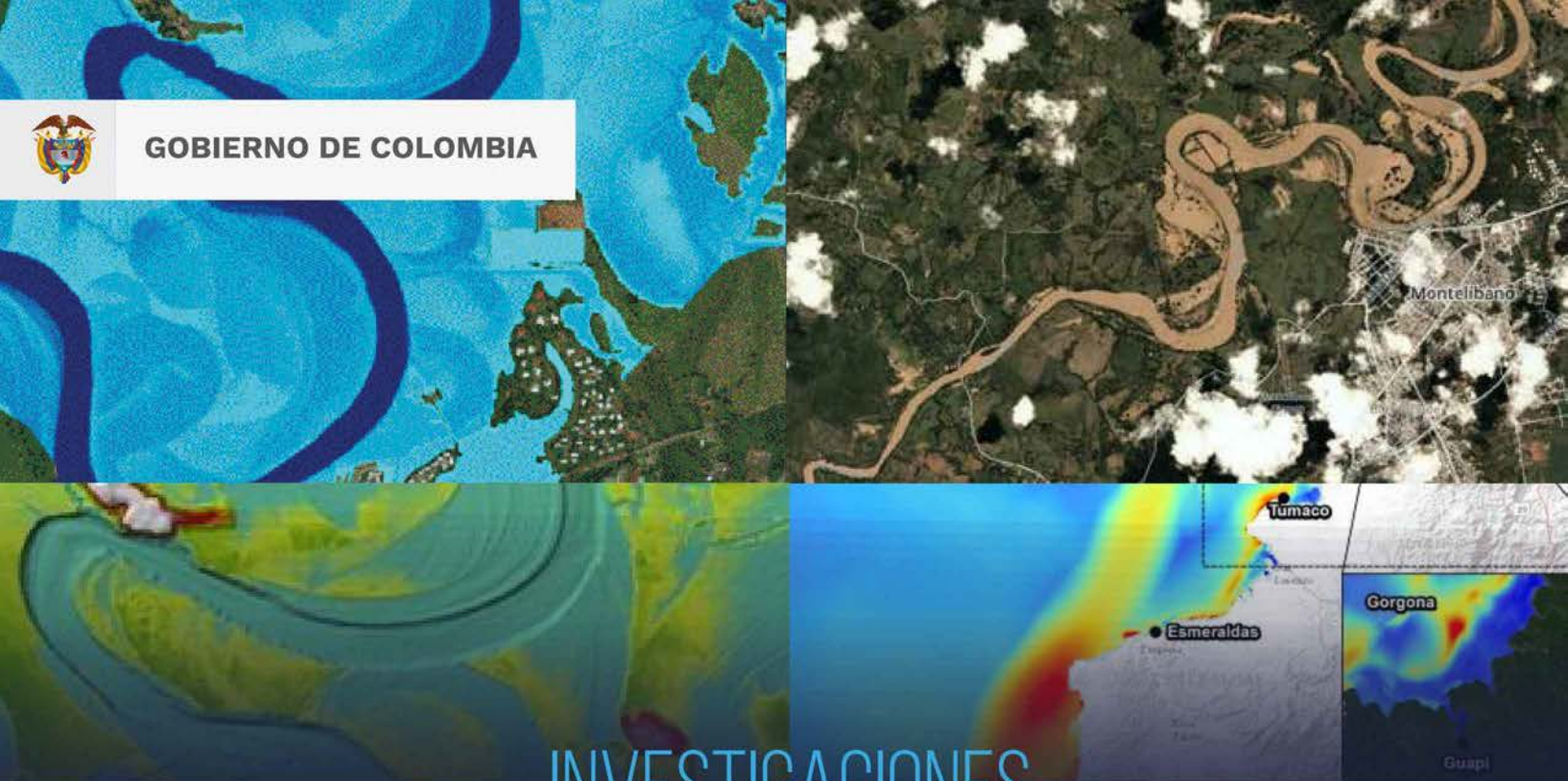




GOBIERNO DE COLOMBIA



INVESTIGACIONES
EN GESTIÓN
DEL **RIESGO DE**
DESASTRES PARA
COLOMBIA

CONTRIBUCIONES LOCALES,
REGIONALES Y NACIONALES

2023

Comisión Nacional Asesora para la Investigación
en Gestión del Riesgo de Desastres - Editores



UNGRD

Unidad Nacional para la Gestión
del Riesgo de Desastres

Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres

INVESTIGACIONES
EN GESTIÓN
DEL **RIESGO DE**
DESASTRES PARA
COLOMBIA

CONTRIBUCIONES LOCALES,
REGIONALES Y NACIONALES

— 2023 —

Comisión Nacional Asesora para la Investigación
en Gestión del Riesgo de Desastres - Editores



UNGRD

Unidad Nacional para la Gestión
del Riesgo de Desastres

Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres

Citación sugerida

Comisión Nacional Asesora para la Investigación en Gestión del Riesgo de Desastres (CNAIGRD). 2023. Investigaciones en gestión del riesgo de desastres para Colombia. Contribuciones locales, regionales y nacionales. Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres. Bogotá, Colombia.

Investigaciones en gestión del riesgo de desastres para Colombia. Contribuciones locales, regionales y nacionales. / Comisión Nacional Asesora para la Investigación en Gestión del Riesgo de Desastres. Bogotá: Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres, 2023.

381 páginas: figuras, tablas.

ISBN (Obra digital): 978-958-5509-27-6

1. Sistemas de acueducto—Riesgo en la calidad del agua potable 2. Amenaza por tsunami—Inundación
3. Remoción en masa—Vulnerabilidad 4. Avenidas torrenciales — Susceptibilidad 5. Teledetección—
Incendios forestales 6. Gestión del riesgo por inundación—Resiliencia 7. Desastre de Armero (Colombia)—
Desastre de Mocoa (Colombia)—Modelo Pressure and Release 8. Percepción del riesgo—Características del
riesgo 9. Gestión del riesgo de desastres—Campesinos 10. Aislamiento sísmico —mitigación del riesgo sísmico
11. Biodiversidad—Servicios ecosistémicos 12. Ecosistemas—Soluciones basadas en la naturaleza 13. Biotecnología
—Suelos degradados 14. Efecto de desastres en la salud—Salud pública 15. Bomberos—Afrontamiento al estrés

Portada. Diseño Johanna Galindo. Figuras de: Sánchez Escobar et al. (Capítulo 4, Fig 6) y Olaya González et al. (Capítulo 6, Figs 12, 15 y 19).

Agradecimientos

Por sus aportes a la producción del libro se agradece al equipo Técnico de la UNGRD: Alvaro Parra, Carolina Herrera, Christian Euscategui, Diana Mendoza, Diana Parra, Doralba Restrepo, Fernando Ramírez, Hugo Vanstralen, James Copete, Jesús Sergei Durán, Johan Stiven Naranjo García, Johanna Galindo, Joana Perez, Juan Carlos López, Lina Dorado González, Luisa Cadena, María Camila Suárez, Miguel Vanegas, Nubia Ramirez, Paola Castañeda, Paola Guzman, Richard Vargas, Sandra Martinez, Sandra Mendoza y Vivian Olarte. También se agradece a pasados delegados de la CNAIGRD: Marta Calvache (SGC), María Angélica Arenas (Minambiente), Lina Ospina Ostios (Universidad del Valle, representante de universidades públicas), Capitán de Corbeta César Grisales (DIMAR), Capitán Leonardo Marriaga y Diana Quintana (DIMAR), y Clara Beatriz Ocampo (Minciencias).

Gustavo Petro Urrego
Presidente de la República

Javier Pava Sánchez
Director General

Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres - UNGRD

Oscar Goyeneche Durán
Subdirector General

Diana Mireya Parra Cardona
Secretario General

Sandra Sotomonte Nopssa
Subdirectora para el Conocimiento del Riesgo

Comisión Nacional Asesora para la Investigación en Gestión del Riesgo de Desastres (CNAIGRD)

EDITORES

Sandra Sotomonte Nopssa, Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD)

Dorotea Cardona Hernández, Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt

Omar Joaquín Agudelo, Universidad Nacional de Colombia

Martha Cecilia Cadena, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM)

Carlos Arturo García Ocampo, Universidad del Quindío, representante universidades públicas

William Oswaldo Gaviria Gutierrez, Universidad de Manizales, Red de universitarios de América Latina y el Caribe para la gestión y la reducción de riesgos de emergencias y desastres (REDULAC/RRD Cap. Colombia)

Enrique Bolívar Guzmán, Ministerio de Educación Nacional (Mineducación)

Jhon Makario Londoño Bonilla, Servicio Geológico Colombiano (SGC)

Juan Leonardo Moreno Rincón, Dirección General Marítima (DIMAR)

Zoraida Piedrahita Calle, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (Minambiente)

Argiro Ramírez Aristizabal, Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación (Minciencias)

Alfonso Mariano Ramos Cañon, Universidad Nacional de Colombia, Pontificia Universidad Javeriana, representante universidades privadas

Leonor Aydé Rodríguez Rojas, Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC)

Coordinación editorial

Mauricio Romero Torres

Supervisión

Luisa Cadena Amado

Diseño editorial

Iván Merchán Rodríguez

Proceso de arbitraje

Revisión por pares doble ciega para cada capítulo

Proceso editorial

Guía básica de procesos editoriales, 2018, Editorial UNAL; APA 4a ed; SSF-CSE 8a ed.

ISBN obra digital: 978-958-5509-27-6

Copyright: © Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres, abril de 2023. Bogotá, Colombia

Todos los derechos reservados. Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como Atribución.

NoComercial-SinDerivadas 2.5 Colombia

Distribución gratuita – versión digital

PRESENTACIÓN

La ciencia, la tecnología y la innovación son fundamentales para tomar decisiones informadas en gestión de riesgos y adaptación al cambio climático. Los riesgos y los efectos del cambio climático no se manifiestan solamente en la exposición de la población y sus bienes a los posibles efectos de una amenaza. Los riesgos se construyen socialmente y constituyen una manifestación o síntoma de un conjunto de procesos de ocupación del territorio, conflicto armado y de explotación de recursos que históricamente han conllevado al incremento de la pobreza, la desigualdad, el deterioro ambiental y al aumento de la vulnerabilidad de la población, riesgos que al materializarse constituyen los desastres. La crisis climática tiene el potencial de exacerbar estas problemáticas conduciendo a crisis de seguridad alimentaria y de migración climática de comunidades vulnerables, con potenciales efectos sobre la estabilidad político-económica regional y nacional.

La temporada de lluvias ocasionada por el fenómeno de La Niña de 2022 ha sido una de las más intensas en los últimos 40 años y ha afectado a todo el país según el IDEAM. Los efectos del ciclón tropical Julia también se hicieron sentir sobre el archipiélago de San Andrés y Providencia. En el marco del desarrollo del fenómeno La Niña, se ha presentado una situación en la cual eventos pequeños y medianos con efectos acumulativos han ocurrido durante un amplio período de tiempo, que aún no se ha cerrado, situación que hizo necesaria la declaratoria de situación de desastre nacional declarada mediante el decreto 2113 de 2022 por parte del Gobierno Nacional.

Describo como “el ciclo fatal” de la gestión de riesgo de desastres como aquel que requiere la inversión continua en cada vez más y más obras, pero sin llevar a una reducción efectiva del riesgo. Quisiéramos creer que aprendemos de cada desastre y que estamos mejor adaptados para manejar el próximo; pero en medio del “ciclo fatal” factores constitutivos del riesgo como la exposición y la vulnerabilidad aumentan a través del tiempo en zonas críticas del país.

Salir del ciclo fatal implica adaptarse a los eventos extremos de variabilidad climática y al cambio climático, pero sobre todo necesita un cambio de paradigma en gestión del riesgo de desastres y el mejor ejemplo es la Mojana.

Invertir en gestión del riesgo con el enfoque tradicional no reduce sustancialmente los daños por inundaciones si las personas continúan asentándose en las zonas inundables, ya que la exposición y la vulnerabilidad están indisolublemente unidas. Las poblaciones expuestas a inundaciones a menudo lo están por necesidad y sin elección propia. Esto significa que independientemente del incremento de las amenazas originadas en variabilidad climática o el cambio climático, su impacto aumentará si no abordamos directamente los factores socioeconómicos que las causan.

Esta es una de las razones por las que iniciamos un programa nacional de reasentamiento que dignifique la calidad de vida de la población vulnerable, donde son centrales el uso de soluciones basadas en la naturaleza y el ordenamiento del territorio en torno al agua, siempre haciendo partícipes a las comunidades.

El libro de investigaciones en gestión del riesgo se ha convertido en un punto de encuentro para la comunidad profesional y científica del país, a quienes invitamos en los próximos años a continuar divulgando sus hallazgos de investigación sobre la ciencia de los desastres y el cambio climático.

Javier Pava Sánchez
Director General

Sandra Sotomonte Nopssa
Subdirectora para el Conocimiento del Riesgo

Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres - República de Colombia

PRÓLOGO

Los desastres no son naturales. Afirmación categórica expresada en el prólogo a la primera edición de este libro y que deseamos sostener en las reflexiones actuales. No podemos olvidar el tortuoso camino recorrido para llegar a esta. Miles de padres y madres cuyos hijos e hijas ahora hacen parte del recuerdo. Miles de hijos e hijas cuyos padres y madres están ahora en un espacio privilegiado de la memoria. Sus partidas no estaban asociadas a la finalización esperada del curso de la vida, se dieron, porque como humanidad, hicimos o dejamos de hacer, todo lo necesario para que la muerte llegara con prontitud.

Reconocer el desastre como construcción psicosocial, política, cultural y económica, de base implica asumir la responsabilidad del adiós prematuro, la complicidad con la lágrima asociada al dolor, la obligación de reconocernos artífices del sufrimiento y el encadenamiento innegable con los cuerpos cuyas vibraciones ya no están en este mundo, que dieron sus últimos suspiros bajo un alud de tierra, una inundación o un colapso estructural.

Entender el desastre como una consecuencia de la acción humana nos acerca a los cuerpos físicos, simbólicos, sociales y psicológicos mutilados, bien sean los propios o ajenos. Esta transformación en la cotidianidad de la vida, la hemos venido leyendo como impactos, aunque las gramáticas usadas para ello enmudecen las estéticas de la existencia. Proyectamos con base en los lenguajes de Eníó, así, calculamos la pérdida por millones de muertes, cosechas, viviendas, vías, dólares, vehículos, estructuras. La escritura del desastre deviene en las letras de la pérdida y somos, como humanidad, los autores y autoras de ello.

“¡No más minutos de silencio por los muertos!. No más horas de silencio. No más meses de silencio: de ahora en adelante por cada muerto un grito que le desgare los oídos a la muerte”, esto escribía Gustavo Wilches-Chaux en 1987; ese grito que tenía por propósito dejar la muerte sorda, constituía un llamado para nuestra sociedad. Era un grito para nosotros, para dejar de matarnos y culpar la naturaleza por la ausencia. Un grito para dejar de hablar de “desastres naturales” y entender que el desastre tiene, en sus causas, todo de humano y nada de natural.

Nos gritamos como sociedad colombiana al ver los cuerpos bañados en polvo y las calles pintadas de sangre durante el desastre ocurrido en 1999 que implicó para el municipio de Armenia una reconstrucción casi total. Volvimos a gritar durante 2010 y 2011 cuando compatriotas sintieron la evanescencia de sus vidas cobijadas por el agua. Gritamos una vez más en 2017 cuando, por varias horas, el estridente silencio del lodo enmudeció el maguaré. Gritamos y lo seguimos haciendo por los desastres de la vida cotidiana, que entre las grandes cifras de los informes de gestión parecen quedar ocultos. Silenciar el desastre implica como país escucharnos de formas otras.

Como línea de fuga para configurar relaciones otras de escucha se edifica la Política Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastre en Colombia (Ley 1523 de 2012). Ello implica un hito para el país, especialmente porque se establecen un conjunto de principios de interacción orientados al reconocimiento, invitación al diálogo y trabajo conjunto entre todos los habitantes del territorio. Si somos constructores de muerte, sin duda alguna podemos ser constructores de vida. Con ello se busca construir un marco de sentido permitiendo que las diferencias territoriales configuren capacidades de acción conjunta y situada.

Esta articulación de capacidades es posible en la medida que nos reconozcamos como territorio e identifiquemos como se va transformando el mismo (Principio de oportuna información). Asumamos la amplitud de nuestras voces, señas, símbolos y signos como elemento privilegiado para la transformación de nuestra realidad (Principio participativo). Nos encontremos en la diferencia y heterogeneidad de saberes. No existe un saber más valioso que el otro, todos permiten la construcción de realidad

(Principio de diversidad cultural). La naturaleza no humana configura un actor de amplia importancia en el territorio, su silenciamiento o desconocimiento es una forma de violencia que debe ser erradicada (Principio de sostenibilidad ambiental).

Así, la armonización de los principios mencionados y los once restantes, marcan un horizonte para dejar atrás la letra muerta del desastre y constituir letra viva en la gestión del riesgo. Esto, querido lector, querida lectora lo encontrarás en el presente libro. Navegarás entre las lecciones aprendidas del dolor vivido en Armenia, la defensa de todas las formas de existencia y devenir en ethos respetuoso a través de la gestión integral de la biodiversidad y las soluciones basadas en la naturaleza. Te encontrarás con los estilos de afrontamiento que tienen los bomberos voluntarios en Quindío y la configuración de mundos posibles de comunidades en La Mojana.

Recorrerás las preguntas por el agua en Bogotá D.C. Guapi y Antioquia, así como los avatares del fuego en la Orinoquía. Transitarás el pasado en nota de presente potencial al revisar lo sucedido en Armero y Mocoa. Te encontrarás con los campesinos de nuestro país y su llamado a una Gestión del Riesgo de Desastres con enfoque diferencial. Estarás en Colombia y sus preguntas contextualizadas, todas ellas centradas en la apuesta por una vida digna y una digna vida.

Entendemos la investigación no como un acto neutro, sino como un proceso que tiene una apuesta ético-política clara. Investigamos, con el propósito explícito de contribuir a la seguridad, el bienestar, la calidad de vida de las personas y al desarrollo sostenible, tal como lo indica el artículo 1 de nuestra política nacional en gestión del riesgo. Por ello, para la Comisión Nacional Asesora para la Investigación en Gestión del Riesgo de Desastres, a través de nosotros como sus representantes, es un honor disponer ante ti el presente libro. Asumimos, el camino para un país sin desastres se va construyendo día a día, pero los pasos hay que darlos con prontitud.

Leonor Ayde Rodriguez Rojas
Profesional especializado

Dirección de Investigación y Prospectiva
Instituto Geográfico Agustín Codazzi

William Oswaldo Gavia Gutierrez
Docente - Investigador
Universidad de Manizales

Integrante
Red Universitaria de las Américas y el Caribe
para la Reducción del Riesgo de Desastres
REDULAC/RRD Capítulo Colombia

CONTENIDO

- 1. Evaluación indicativa del riesgo a la calidad del agua frente a amenazas naturales y antrópicas: el caso de Bogotá** 1
Rafael Fernández, Manuel Rodríguez Susa, Mildred Lemus, Iván Alejandro Giraldo, Lina Porras, Juliana Martínez, Juan Sebastián Echeverry, Carlos Oliveros, Juan Carlos Reyes, Nubia León & Diego Gutiérrez
- 2. Evaluación de la amenaza por tsunami en el litoral Pacífico colombiano: Caso de estudio Guapi, Departamento del Cauca** 39
Ronald Efrén Sánchez Escobar, Paola Andrea Quintero Rodríguez, Fabio Hernán Realpe Martínez, Daniel Ruiz Figueroa & Jhonatan Cristian Paz Quintero
- 3. Metodología para captura de datos y caracterización en estudios de valoración cualitativa multiamenaza en corredores viales apoyada en TIC** 55
Alejandro Franco Rojas, Álvaro Rodríguez Páez, Sandra Yanet Velazco Florez, Juan Pablo Londoño Linares & Orlando Rincón Arango
- 4. Evaluación de la amenaza por avenidas torrenciales en el departamento de Antioquia a escala de cuenca** 92
Edier Aristizábal, Federico Gómez Cardona & María Isabel Arango Carmona
- 5. Comparativo de incendios forestales en Colombia a través de instrumentos de teledetección: caso de estudio en la región de la Orinoquía** 120
Daniela Torinjano Jiménez, Adriana Osorio Mosquera & Alejandro Marulanda Tobón
- 6. Usos de la evaluación integral del riesgo por inundación en la consolidación de comunidades resilientes: caso de estudio en cabeceras municipales de la ecorregión de la Mojana** 140
Juan Camilo Olaya González, Paula Andrea Villegas González, Jairo Andrés Valcárcel Torres, Julián Darío Arbeláez Salazar, Fabián Mauricio Caicedo Carrascal, José Ville Triana García, Lina Dorado Gonzalez, Juan Pablo Forero Acevedo & Maykel Yisseth Gutiérrez
- 7. Análisis de los desastres de Armero 1985 y Mocoa 2017 en Colombia utilizando el modelo Pressure and Release** 191
Diana M. Rodríguez-Coca, Julián Alberto Espejo-Díaz & William J. Guerrero
- 8. Imbricación cultural, espacial y psicosocial en la percepción del riesgo de desastres. Reflexiones sobre casos de estudio en Colombia** 209
Luz Adriana Muñoz-Duque & Óscar E. Navarro Carrascal

9. Gestión del riesgo de desastres en Colombia: una necesaria mirada diferencial para los campesinos y su vida digna	224
Sandra Eliana Alzate Vargas & Sandra Patricia Duque Quintero	
10. Sistemas de control de respuesta estructural para la mitigación del riesgo sísmico en la infraestructura colombiana. Necesidad inmediata de una normativa para el país	242
Carlos Mario Piscal Arevalo & Juan Andrés Oviedo Amezquita	
11. La gestión integral de la biodiversidad y sus servicios ecosistémicos para la gestión del riesgo y el cambio climático	265
Dorotea Cardona Hernández	
12. Retos para incorporar las soluciones basadas en la naturaleza y la reducción del riesgo de desastres con enfoque ecosistémico en la planificación territorial de Colombia	284
Carolina García Londoño, María Angela Echeverry-Galvis, Lina Ospina Ostios, Constanza Ricaurte-Villota, & Mauricio Romero-Torres	
13. Biomineralización como herramienta en la recuperación de las propiedades de un suelo residual compactado sometido a quema	310
Yamile Valencia- González, José Camapum de Carvalho & Luis Augusto Lara-Valencia	
14. Gestión del riesgo en salud en situación de desastres. Lecciones aprendidas en Armenia	327
Olga Alicia Nieto Cárdenas	
15. Preparación de respondedores de emergencias en el Quindío: un estudio sobre los estilos de afrontamiento y factores de resiliencia en un grupo de bomberos voluntarios	343
Olga Liliana Pineda López, Joan Sebastian Arbeláez Caro, Luz Stela Quintana Hernández, Laura Vanessa Corrales Brand, Valentina Ospina Poveda & Carla María Zapata Rueda	
Índice temático	363

LISTA DE AUTORES

Sandra Eliana Alzate Vargas | Facultad de Derecho y Ciencias Políticas, Grupo Estudios de Derecho y Política. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia

María Isabel Arango Carmona | Departamento de Geociencias y Medio Ambiente. Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, Colombia

Joan Sebastian Arbeláez Caro | Universidad de San Buenaventura Medellín, extensión Armenia, Colombia

Julián Darío Arbeláez Salazar | Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD). Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). Universidad de los Andes, Facultad de Ingeniería, Bogotá, D.C., Colombia

Edier Aristizábal | Departamento de Geociencias y Medio Ambiente. Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, Colombia

Fabián Mauricio Caicedo Carrascal | Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD). Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). Pontificia Universidad Javeriana, Facultad de Ingeniería, Bogotá, D.C., Colombia

José Camapum de Carvalho | Doctor en Geotecnia, Profesor Titular, Universidad de Brasilia, Brasil

Dorotea Cardona Hernández | Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. Programa de Gestión Territorial de la Biodiversidad, Bogotá, D.C., Colombia

Laura Vanessa Corrales Brand | Universidad de San Buenaventura, Medellín, Colombia

Lina Dorado González | Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD), Bogotá, D.C., Colombia

Sandra Patricia Duque Quintero | Facultad de Derecho y Ciencias Políticas, Grupo Estudios de Derecho y Política. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia

María Angela Echeverry-Galvis | Facultad de Estudios Ambientales y Rurales, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, D.C., Colombia

Juan Sebastián Echeverry | Centro de Investigación en Materiales y Obras Civiles, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad de los Andes. Bogotá, D.C., Colombia

Julián Alberto Espejo-Díaz | Facultad de Ingeniería, Universidad de La Sabana, Chía, Colombia

Rafael Fernández | Centro de Investigación en Materiales y Obras Civiles, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad de los Andes. Bogotá D.C., Colombia

Daniel Ruiz Figueroa | Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Pacífico (CCCCP), Área de Manejo Integrado de Zona Costera, Tumaco, Colombia

Juan Pablo Forero Acevedo | Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD). I+R Consultores en Ingeniería y Riesgos S.A.S, Bogotá, D.C., Colombia

Carolina García Londoño | Sociedad Colombiana de Geología (SCG), Capítulo Antioquia, Medellín, Colombia

Iván Alejandro Giraldo | Centro de Investigación en Ingeniería Ambiental, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad de los Andes. Bogotá, D.C., Colombia

Federico Gómez Cardona | Departamento de Geociencias y Medio Ambiente. Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, Colombia

William J. Guerrero | Facultad de Ingeniería, Universidad de La Sabana, Chía, Colombia

Maykel Yiseth Gutiérrez | Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD). Bogotá, D.C., Colombia

Diego Gutiérrez | Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá EAAB-ESP, Dirección Ingeniería Especializada. Bogotá, D.C., Colombia

Luis Augusto Lara-Valencia | Doctor en Estructuras, Profesor Asociado, Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, Colombia

Mildred Lemus | Centro de Investigación en Ingeniería Ambiental, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad de los Andes, Bogotá, D.C., Colombia

Nubia León | Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá EAAB-ESP, Dirección Ingeniería Especializada, Bogotá, D.C., Colombia

Juliana Martínez | Centro de Investigación en Ingeniería Ambiental, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad de los Andes, Bogotá, D.C., Colombia

Alejandro Marulanda Tobón | Escuela de Ciencias, Departamento de Ciencias Físicas, Universidad EAFIT, Medellín, Colombia

Luz Adriana Muñoz-Duque | Grupo de Investigación en Psicología Sociedad y Subjetividades, Facultad de Ciencias Sociales y Humanas, y Grupo de Investigación Salud y Ambiente, Facultad Nacional de Salud Pública, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia

Óscar E. Navarro Carrascal | Profesor de Psicología Social y Ambiental, Universidad de Nîmes, Francia. Presidente de la Asociación Francesa de Psicología Ambiental, ARPEnv

Olga Alicia Nieto Cárdenas | Programa de Medicina. Facultad de Ciencias de la Salud. Universidad del Quindío, Armenia, Colombia

Juan Camilo Olaya González | Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD). I+R Consultores en Ingeniería y Riesgos S.A.S., Bogotá, D.C., Colombia

Carlos Oliveros | Centro de Investigación en Materiales y Obras Civiles, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad de los Andes, Bogotá, D.C., Colombia

Adriana Osorio Mosquera | Facultad de Ingeniería, Tecnológico de Antioquia – Institución Universitaria, Medellín, Colombia

Valentina Ospina Poveda | Universidad de San Buenaventura, Medellín, Colombia

Lina Ospina Ostios | Escuela de Ingeniería Civil y Geomática (EICG), Universidad del Valle, Cali, Colombia

Olga Liliana Pineda López | Universidad de San Buenaventura Medellín, extensión Armenia, Colombia

Juan Andrés Oviedo Amezquita | efe-Prima-ce Control y Diseño de estructuras SAS, Medellín, Colombia

Jhonatan Cristian Paz Quintero | Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Pacífico (CCCCP), Área de Manejo Integrado de Zona Costera, Tumaco, Colombia

Carlos Mario Piscal Arevalo | Universidad de La Salle, Programa de Ingeniería Civil, Bogotá, D.C., Colombia. Red Colombiana de Investigación en Ingeniería Sísmica (CEER)

Lina Porras | Centro de Investigación en Ingeniería Ambiental, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad de los Andes, Bogotá, D.C., Colombia

Luz Stela Quintana Hernández | Universidad de San Buenaventura Medellín, extensión Armenia, Colombia

Paola Andrea Quintero Rodríguez | Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Pacífico (CCCCP), Área de Manejo Integrado de Zona Costera, Tumaco, Colombia

Fabio Hernán Realpe Martínez | Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Pacífico (CCCCP), Área de Manejo Integrado de Zona Costera, Tumaco, Colombia

Juan Carlos Reyes | Centro de Investigación en Materiales y Obras Civiles, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad de los Andes. Bogotá, D.C., Colombia

Constanza Ricaurte-Villota | Programa de Geociencias Marinas y Costeras (GEO). Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras “José Benito Vives de Andrés” INVEMAR, Santa Marta, Colombia

Diana M. Rodríguez-Coca | College of Engineering, Architecture and Technology Oklahoma State University, United States of America

Manuel Rodríguez Susa | Centro de Investigación en Ingeniería Ambiental, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad de los Andes. Bogotá, D.C., Colombia

Mauricio Romero-Torres | Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres, Subdirección para el Conocimiento del Riesgo, Bogotá, D.C., Colombia

Ronald Efrén Sánchez Escobar | Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Pacífico (CCCCP), Área de Manejo Integrado de Zona Costera, Tumaco, Colombia

José Ville Triana García | Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD). Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). Universität Salzburg. Salzburg (Austria)

Daniela Toriniano Jiménez | Facultad de Ingeniería, Tecnológico de Antioquia – Institución Universitaria, Medellín, Colombia

Jairo Andrés Valcárcel Torres | Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD). Universidad de La Salle, Facultad de Ingeniería. Bogotá, D.C., Colombia

Yamile Valencia-González | Doctora en Geotecnia, Profesora Asociada, Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, Colombia

Paula Andrea Villegas González | Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD). Pontificia Universidad Javeriana, Facultad de Ingeniería, Bogotá, D.C., Colombia

Carla María Zapata Rueda | Universidad de San Buenaventura, Medellín, Colombia

LISTA DE PARES REVISORES

Jesús Adolfo Anaya Acevedo | Universidad de Medellín, Colombia

Arlex Angarita Leiton | Corporación Universitaria Minuto de Dios – UNIMINUTO, Colombia

Rafael Aránguiz Muñoz | Universidad Católica de la Santísima Concepción, Chile

César Camilo Cañón Barriga | Pontificia Universidad Javeriana, Colombia

Carlos Andrés Caro Camargo | Universidad Santo Tomás, Colombia

Saieth Baudilio Chaves Pabón | Universidad Militar Nueva Granada, Colombia

Claudia Patricia Coca Galeano | Candidata a PhD en Ciencias Humanas y Sociales, CES - Universidad Nacional de Colombia

Alejandra María Díaz Tamayo | Universidad del Valle, Colombia

Ignacio Escuder Bueno | Universidad Politécnica de Valencia, España

Carolina García Londoño | Sociedad Colombiana de Geología, Presidente Capítulo Antioquia, Colombia

Cesar Ignacio Garay Bohorquez | Fondo para la Acción Ambiental y la Niñez, Colombia

María Mercedes Gonzalez | Universidad del Quindío, Colombia

Helbert García-Delgado | Syracuse University, USA

Yesid Paul Goyes Peñafiel | Universidad Industrial de Santander, Colombia

Sthefania Grajales Noreña | CIMNE, Ingeniar - Risk Intelligence, Colombia

Yolanda Teresa Hernandez Peña | Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia

Carmen Lacambra S. | Grupo LaEra, Director de investigación y línea de soluciones ambientales, Colombia

Paula Andrea Lara Ramírez | Universidad de Antioquia, Facultad Nacional de Salud Pública, Colombia

Víctor Leonardo López J. | Universidad de la Salle, Colombia

Marina Begoña Martínez González | Universidad de la Costa, Colombia

Vladimir Ernesto Merchan Jaimes | Universidad Industrial de Santander, Colombia

Laura L. Pirazán Palomar | TH Köln – University of Applied Sciences, Alemania

Alejandro Ramirez Madrigal | Institución Universitaria Visión de las Américas, Colombia

Antonio Andrés Reyes Merchán | Servicio Geológico Colombiano, Dirección de Geoamenazas, Colombia

Rafael Andrés Muñoz Quintero | Consultoría y Gestión Ambiental S.A.S y Universidad de Los Andes, Colombia

Wilson A. Ramírez H. | Investigador Instituto Humboldt, Asesor Ministro, Colombia

Luz Angela Rojas Bernal | Fundación Universitaria del Área Andina, Colombia

Mauricio Romero Torres | Unidad Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres, Colombia

Willian Sierra Barón | Universidad Surcolombiana, Colombia

Oscar David Sierra Guzmán | Enfermero, Universidad Nacional de Colombia

Jenny M. Trilleras Motha | Profesional independiente, Colombia

Jairo Andrés Valcárcel Torres | Universidad de La Salle, Facultad de Ingeniería, Colombia

Joaquín Andrés Valencia Ortiz | Universidad Industrial de Santander, Colombia

Amanda Varela Ramírez | Pontificia Universidad Javeriana, Colombia

Erick R. Velasco-Reyes | Universidad de Tohoku, Japón

Carolina S. Velásquez Calderón | PhD, Gestión y Ciencia de los Desastres, Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres, Colombia

Paula Andrea Villegas González | Pontificia Universidad Javeriana, DGIRH del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Colombia

CAPÍTULO
1

Evaluación indicativa del riesgo a la calidad del agua frente a amenazas naturales y antrópicas: el caso de Bogotá

Rafael Fernández^{1*}, Manuel Rodríguez Susa², Mildred Lemus², Iván Alejandro Giraldo², Lina Porras², Juliana Martínez², Juan Sebastián Echeverry¹, Carlos Oliveros¹, Juan Carlos Reyes¹, Nubia León³ & Diego Gutiérrez³

¹Centro de Investigación en Materiales y Obras Civiles, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad de los Andes. Bogotá, Colombia

²Centro de Investigación en Ingeniería Ambiental, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad de los Andes. Bogotá, Colombia

³Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá EAAB-ESP, Dirección Ingeniería Especializada. Bogotá, Colombia

*Autor de contacto: Rafael Fernández. Centro de Investigación en Materiales y Obras Civiles, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad de los Andes. Bogotá, Colombia.
Correo-e: ri.fernandez1110@uniandes.edu.co

Resumen

Los sistemas de acueducto cumplen el papel fundamental de asegurar las condiciones de vida digna al suministrar y garantizar la disponibilidad y calidad del agua potable como recurso primario para la vida y la salud. Sin embargo, por la complejidad y extensión de los sistemas de producción de agua, especialmente en grandes ciudades, sus componentes (i.e. captación, reservorios, tratamiento y distribución) se exponen a diversas condiciones amenazantes de origen natural (i.e. sismos, inundaciones o incendios forestales), o antrópico (i.e. terrorismo, actividades tecnológicas industriales-residenciales, gestión interna del sistema), que pueden afectar el proceso de producción y ocasionar cambios sobre los parámetros de calidad del agua de consumo. El objetivo principal de este capítulo es presentar un modelo para evaluar

el riesgo en la calidad de agua potable. El método se aplica como caso de estudio en el sistema de acueducto de agua potable de la ciudad de Bogotá, Colombia, servicio prestado por la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB-ESP). Con el modelo se realiza una comparación cualitativa e indicativa de los efectos e impactos de estos eventos amenazantes externos sobre la calidad del agua en el sistema. A partir de los resultados se identificó la distribución geográfica de los riesgos, afectación sobre diferentes componentes del sistema, y alteración de parámetros de calidad del agua. Esta información sirve como base para entender y dimensionar las acciones y prioridades para mitigar este riesgo.

Palabras clave: sistemas de acueducto, riesgo en la calidad del agua potable, amenazas naturales, amenazas antrópicas.

Indicative water quality risk assessment due to natural and man-made disasters: the case of Bogotá

Abstract

Aqueduct systems play a fundamental role in ensuring decent living conditions and access to water as a primary resource for life, as well as guaranteeing its availability and safe conditions for public health. However, due to their complexity and extension in large cities, the drinking water components (i.e. collection, treatment, distribution) are exposed to various threatening natural hazards (i.e. earthquakes, floods, or wild fires) or anthropic events (i.e. terrorist acts, industrial technology impacts, or management decisions from utility operators), which can affect the process and can generate changes in the drinking water quality parameters. The main objective of this chapter is to present a model that allows risk assessment concerning drinking water quality. The proposed method is applied as a case study in the drinking-water aqueduct system of the city of Bogotá, Colombia, supplied by the Aqueduct and Sewerage Company of Bogotá (EAAB-ESP). The model allows a qualitative and indicative comparison of the effects and impacts of these external threatening events on the water quality in the system. The results allow the user to understand the geographical distribution of risks, impact on different system components, and alteration of water quality parameters. This information serves as a basis for understanding and measuring the actions and priorities to mitigate quality risk in aqueduct systems.

Keywords: Aqueduct systems, water quality risk, natural hazards, anthropic hazards.

1. INTRODUCCIÓN

El acceso al agua potable es un derecho fundamental que se ha catalogado como uno de los Objetivos de Desarrollo Sostenible por las Naciones Unidas [1]. Según esta misma institución, en la actualidad 3 de cada 10 personas no tiene acceso a agua potable, convirtiendo el objetivo del acceso al agua potable como fundamental para el desarrollo de las comunidades y el bienestar de la población por su relevancia en el fomento, la protección y la restauración de la salud. Garantizar la calidad del agua suministrada es otro desafío igual de importante considerando factores como la continua presión de las fuentes de abastecimiento, el cambio global ambiental, la complejidad de los sistemas de producción y distribución [2], y en muchos casos, las precarias condiciones de tratamiento y distribución.

Los sistemas integrales de potabilización deben buscar la remoción de contaminantes y como consecuencia, la reducción del riesgo químico y microbiológico presente en la fuente y en todo el proceso de producción [3,4,5,6,7]. Así mismo, se debe controlar el ingreso de sustancias tóxicas o microorganismos patógenos después de la potabilización. Para alcanzar estos objetivos, además de una gestión integral desde un manejo adecuado de la fuente, sistemas óptimos de potabilización, una correcta distribución y utilización por el usuario, deben estructurarse, desarrollarse y actualizarse planes para la gestión del riesgo de desastres (en adelante riesgo) que tengan en cuenta todas las amenazas y vulnerabilidades sobre el sistema desde la fuente hasta el usuario, que puedan afectar la calidad del agua.

El objetivo principal de este capítulo es presentar un modelo para evaluar el riesgo en la calidad de agua potable que suministra la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB-ESP) para la ciudad de Bogotá D.C. y otros municipios. El modelo se basa en la evaluación cualitativa e indicativa del riesgo del sistema de agua potable de la ciudad de Bogotá a cargo de la EAAB-ESP ante eventos naturales y antrópicos con el fin de identificar los escenarios más probables y de mayor impacto al sistema, en relación con la posible afectación de la calidad del agua potable.

El modelo para evaluación de riesgos para la calidad del agua potable incluye tres componentes principales: el de exposición, el de amenazas, y el de vulnerabilidad. El componente de exposición considera todos los elementos susceptibles a daño a causa de los fenómenos naturales y antrópicos externos, y que pueden generar directa o indirectamente afectaciones en la calidad del agua. El componente de las amenazas considera las principales amenazas naturales y antrópicas que puedan afectar el sistema de generación y distribución de agua potable y tener por lo tanto un impacto en la calidad del agua. Por último, la vulnerabilidad relaciona las características propias de cada componente del sistema con el tipo o nivel de afectación que puede sufrir o generar, ante la eventual ocurrencia de los eventos de amenaza. A partir de diferentes escenarios de análisis, se identifican los eventuales impactos críticos sobre el sistema, las amenazas que los pueden generar y los componentes críticos, con lo cual se establece el potencial de afectación en la calidad del agua en cada uno de estos casos de análisis. Los resultados de este tipo de análisis deben validarse de manera complementaria con la información histórica de eventos que hayan generado afectación en el sistema con repercusiones en la calidad del agua. Una vez identificados los escenarios críticos y el potencial de afectación en la calidad del agua, es posible establecer una serie de medidas de mitigación y los correspondientes planes de reducción y gestión del riesgo en la calidad del agua.

En la literatura existen diferentes metodologías para la evaluación del riesgo a la calidad del agua en sistemas de acueducto. Una de las principales herramientas para este tipo de valoraciones es la *Guía para la calidad del agua de consumo humano* [8], desarrollada por la Organización Mundial de la Salud (OMS) en 2011. El objetivo principal de esta guía es “proteger la salud pública asociada a la calidad de agua potable” [8] y se dirigen a los reguladores de agua y salud, y a los responsables de la formulación de

políticas en torno a la calidad del agua. Esta guía desarrollada por la OMS presenta un marco conceptual para la aplicación de las guías, se definen las metas de protección de la salud, se desarrollan los planes de seguridad del agua, se establecen los abordajes de vigilancia y la aplicación de las guías en circunstancias específicas. Así mismo, se detallan los aspectos microbiológicos, químicos y radiológicos asociados con la afectación en la calidad del agua. Para esta evaluación, la OMS indica que se debe integrar un equipo multidisciplinario de expertos para su desarrollo. Con este equipo se deben identificar los diferentes componentes del sistema, desde la captación hasta el consumo. Estos componentes deben analizarse de forma simultánea e integral para identificar el punto de ingreso de contaminantes y la posible afectación de estos en la salud del usuario final.

Las guías indican que se deben priorizar los factores de peligro según su afectación a la calidad de agua, generalmente a través de matrices semicuantitativas o indicativas (es decir, que utilizan indicadores de riesgo para cuantificar en una escala relativa el impacto o consecuencia sobre el sistema). Estas matrices se desarrollan en conjunto con los expertos del equipo de evaluación y usualmente están basados en sus criterios y experiencia, teniendo en cuenta la dificultad de contar con modelos más precisos o físicamente basados, debido a la complejidad y multidisciplinariedad del problema.

Este tipo de metodologías se aplicó satisfactoriamente en el sistema de distribución de agua potable de la ciudad de Cali, Colombia [9]. En este estudio los autores identificaron los eventos peligrosos para su posterior valoración de riesgo basado en una matriz semicuantitativa adaptada. El resultado principal del estudio fue la priorización de riesgo para la posterior identificación de medidas de mitigación. Similarmente, en Costa Rica se desarrolló el Índice de Riesgo a la Calidad del Agua para Consumo Humano (IRCACH), con el fin de evaluar el cumplimiento o incumplimiento de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos del agua [10]. A diferencia del estudio anterior, este se enfocaba en la identificación del estado actual y no de las posibles amenazas de forma prospectiva. Existen ejemplos adicionales en la literatura internacional sobre la aplicación de este tipo de metodologías en casos puntuales al norte de China [11], Bangladesh [12], y en el desarrollo de metodologías más generales como la desarrollada para islas pequeñas en vía de desarrollo [13]. Todos estos casos anteriores presentan ejemplos claros de la aplicación de metodologías de evaluación de riesgo a la calidad del agua; sin embargo, no se cuenta con una metodología estándar, en donde se evalúen de forma consistente todos los componentes expuestos y las amenazas que generan un riesgo a la calidad del agua.

Para el caso del sistema de acueducto de Bogotá, la EAAB-ESP ha desarrollado permanentemente el Plan de Gestión del Riesgo de Desastre de la EAAB-ESP (PGRD) en la ciudad de Bogotá, los municipios de Soacha y Gachancipá y en los municipios cercanos, con el fin de prevenir daños en el sistema de acueducto y alcantarillado frente a eventos no deseados [14]. En el marco del PGRD, la EAAB-ESP desarrolló el Plan Institucional de Respuesta a Emergencias (PIRE) y los Planes de Emergencia y Contingencia por eventos no deseados específicos (PEC). El PIRE es el documento que define las políticas, los criterios, los lineamientos, la organización y las funciones generales para poder tener una respuesta oportuna, eficaz y eficiente en situaciones de emergencia y/o desastre. El objetivo principal del PGRD fue definir la cadena de valor de gestión organizacional, para garantizar calidad, cantidad, continuidad y oportunidad de procesos, productos y servicios, así como una rápida recuperación ante una emergencia, además de asegurar la correcta aplicación de las responsabilidades de la EAAB-ESP en las funciones de respuesta de la Estrategia Distrital de Respuesta de Emergencias (EDRE) de Bogotá y municipios circunvecinos.

Así mismo, los PEC son los documentos que precisan los criterios, los lineamientos, la organización, los recursos y las actividades específicas para gestionar de forma oportuna y eficaz los eventos que puedan

afectar los sistemas de acueducto y alcantarillado. Estos se desarrollaron con el objetivo principal de definir la cadena de valor de la gestión en la prevención, preparación, detección, resistencia, respuesta y recuperación de los sistemas de alcantarillado y acueducto frente a eventos no deseados. Dentro de los PEC se consideraron los siguientes posibles eventos que podrían afectar la funcionalidad del servicio de acueducto y alcantarillado como el deterioro de la calidad de agua (PEC 1), insuficiente cantidad de agua (PEC 2), exceso de cantidad de agua (PEC 3), fallo o daño de componente (PEC 4), sismo (PEC 5), incendio y explosión (PEC 6), incidente de personal (PEC 7), acumulación, derrame o escape de sustancias (PEC 9) y COVID-19 (PEC 10).

En 2014, la EAAB-ESP desarrolló una consultoría incluyendo los tres componentes principales de la Resolución 549 de 2017: amenazas, vulnerabilidades y caracterización del riesgo, además de los lineamientos para el Plan de Respuesta de Emergencias. Sin embargo, la aproximación de este estudio se enfocó a la afectación de la infraestructura, y muy poco con la alteración de la calidad del agua por algún contaminante o sustancia que afecte la salud humana [15]. En particular, en la consultoría el riesgo se mide como la suma ponderada de las calificaciones de la amenaza y de la vulnerabilidad. En esta metodología se estima el riesgo para cada componente, y el índice total de riesgo es el promedio de cada riesgo calculado para cada componente.

Adicional a los estudios mencionados anteriormente, entre 2013 y 2015 se realizaron estudios de riesgo por parte de la secretaría de Salud y ESE Hospital Pablo VI de Bosa de las estructuras pertenecientes a “SISTEMA DE TIBITOC”, “SISTEMA CHINGAZA - PTAP FRANCISCO WIESNER”, “PTAP EL DORADO” y “PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE – YOMASA” [16]. Los estudios realizados se basaron en identificar la clasificación de la amenaza (baja, media o alta) de diferentes fenómenos naturales y antrópicos. Para esto se generaron mapas de amenaza de las zonas, cruzando dicha información con la ubicación de las estructuras, identificando que tan propensos eran a tener afectaciones debido a un tipo de amenaza, y de esta forma indicar, al menos de manera preliminar, una posible importancia o prioridad relativa de las amenazas más significativas en términos de la afectación al sistema.

Por último, en 2018 la Secretaría de Salud de la ciudad de Bogotá generó unos lineamientos metodológicos para la evaluación de riesgo en sistemas de distribución de agua potable [17]. En esta guía se presenta el marco legal, la metodología para la evaluación de riesgos, detallando en el modelo de elementos expuestos de captación, tratamiento y distribución y especificando las diferentes amenazas naturales y antrópicas a considerar. Esta metodología está basada en las recomendaciones de la OMS en las diferentes guías publicadas [18,8] y se basa en la identificación de las amenazas naturales y antrópicas, la definición de eventos peligrosos y finalmente la identificación de los riesgos en cada uno de los sistemas. La integración se realiza mediante matrices semicuantitativas de identificación de peligro como se ha mencionado anteriormente.

Con relación a los estudios descritos anteriormente, es posible identificar que el enfoque utilizado es consistente con las metodologías indicadas en la literatura y, en particular, con las metodologías desarrolladas por la Organización Mundial de la Salud. Los resultados observados son de gran utilidad para verificar de forma preliminar las amenazas más críticas en cada uno de los componentes del sistema. Sin embargo, debido a su enfoque, en estos estudios no se identifican puntos críticos especialmente con relación a afectación en la calidad del agua por cada una de las amenazas consideradas, diferenciando la vulnerabilidad física y la vulnerabilidad a la calidad del agua. Esto representa una desventaja para la definición de las opciones de mitigación.

Teniendo esto en cuenta, en el presente estudio se abordan estas problemáticas de manera espacial con el objetivo de identificar estos puntos críticos y de evaluar el riesgo con respecto al usuario final, incorporando las capacidades de tratamiento de contaminantes de cada uno de los componentes del sistema. Así mismo, se analizan las posibles afectaciones aguas abajo de las plantas de tratamiento y los riesgos asociados a posibles contaminantes no tratados y su incidencia en la calidad del agua hacia el usuario final. De esta forma, los resultados finales se pueden interpretar con una perspectiva integral multi-amenaza consistente para todos los sistemas de acueducto, que sirva para priorizar riesgos y posteriormente realizar estudios de detalle enfocados en la mitigación. Por último, es importante resaltar que dada la relativa facilidad y sencillez de la metodología, la posibilidad de actualizar y recalcular los indicadores de riesgo periódicamente, o cuando se tenga acceso a nueva información de la red, facilita a las empresas de servicios públicos la renovación y mejoramiento continuo de las estrategias de gestión del riesgo planteadas a partir de este modelo.

2. METODOLOGÍA

Teniendo en cuenta lo anterior, la metodología propuesta se basa en un enfoque de gestión del riesgo, entendiendo el riesgo como la integración de los componentes de exposición, amenaza y vulnerabilidad. Esta metodología se articula con los desarrollos y procedimientos indicados por la OMS y aplicados anteriormente por la EAAB-ESP. A continuación, se presenta cada uno de estos componentes y finalmente la metodología para la cuantificación del riesgo ante eventos naturales y antrópicos.

2.1. Exposición

Para fines de la identificación del riesgo se agrupan los elementos de la infraestructura de los sistemas de acueducto en cuatro grandes componentes: captación, almacenamiento, tratamiento y distribución. El sistema de captación está compuesto por las cuencas, túneles y tuberías que dirigen el agua cruda a los sistemas de almacenamiento. El sistema de almacenamiento se compone por los embalses y por tanques urbanos y rurales. El sistema de tratamiento se compone por las Plantas de Tratamiento para Agua Potable (PTAP) y todos los subsistemas asociados a este. Por último, el sistema de distribución se compone por las estructuras de bombeo, estructuras de control, la red matriz y red menor de acueducto incluyendo las pilas y los tanques de almacenamiento de agua tratada del sistema. Estos sistemas y subsistemas se identifican en la **Figura 1**.

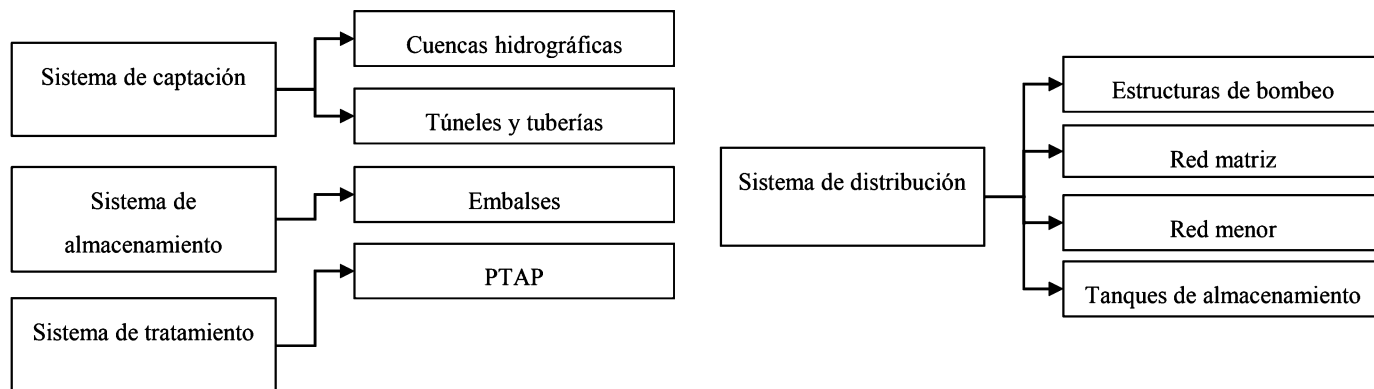


Figura 1. Modelo exposición EAAB-ESP. Fuente: construcción propia.

Los componentes principales del sistema se deben agrupar en un formato de Sistema de Información Geográfica (SIG), en el que se incluyen diferentes aspectos como la identificación de cada componente, la ubicación, el costo asociado, año de construcción y características propias de cada componente como área, volumen, diámetro o longitud, entre otras.

2.2. Amenaza

El modelo debe considerar tanto las amenazas de origen natural como las amenazas generadas por la actividad humana, referenciadas como antrópicas. La identificación de amenazas se basa en el criterio de expertos de diferentes disciplinas, así como de la identificación de amenazas de la nueva metodología de mapas de riesgo desarrollada por la Secretaría de Salud [17]. Para el contexto del presente estudio, las amenazas naturales incluyen los eventos de sismos, precipitaciones, sequías, inundaciones, deslizamientos, descargas torrenciales, incendios forestales, volcanes y vendavales. Asimismo, estas amenazas se pueden dividir en amenazas directas o amenazas indirectas, debido a su interdependencia; por ejemplo, los deslizamientos son una amenaza indirecta de las amenazas directas de sismos y/o precipitaciones. En cuanto a las antrópicas, son aquellas amenazas voluntarias o involuntarias, relacionadas o inducidas por la actividad humana. En este estudio se consideran amenazas de terrorismo, terrorismo virtual, tecnológicas domésticas (actividades asociadas al uso doméstico como vertimientos de aguas residuales o disposición de residuos sólidos convencionales), tecnológicas industriales (actividades asociadas al uso industrial), accidentes viales y derrames, agropecuarias y minerías. Estas amenazas se resumen en la **Figura 2**.

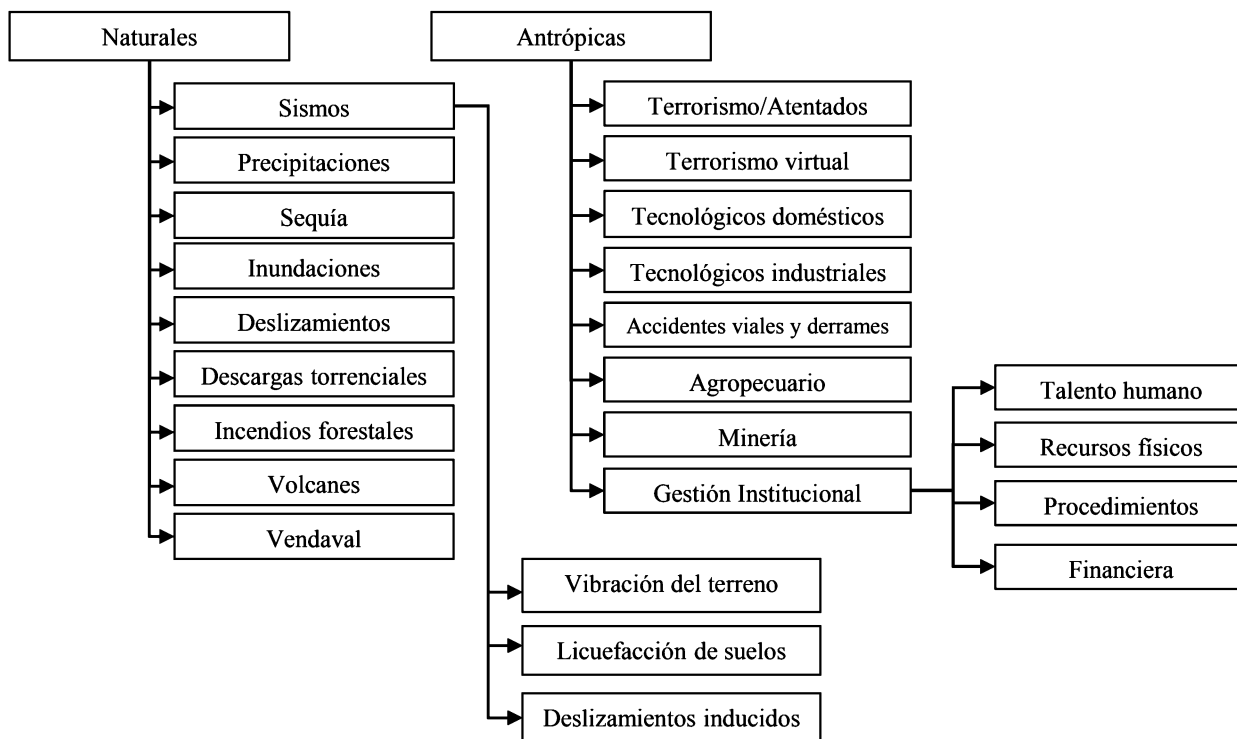


Figura 2. Amenazas totales consideradas. Fuente: construcción propia

Cada una de las posibles amenazas se debe evaluar de manera simplificada, con el fin de calificar la probabilidad de ocurrencia en un escenario seleccionado de tiempo determinado, en términos de:

- Intensidad máxima probable que pueda llegar a generar un impacto significativo al sistema.
- Frecuencia media esperada de ocurrencia de dicho evento.

Las amenazas se representan mediante escenarios seleccionados con alta probabilidad de ocurrencia. Cuando la ocurrencia de un evento natural sobre la zona de influencia de algún componente dependa de uno o más factores detonantes, la frecuencia de ocurrencia de este estaría asociada a la frecuencia de ocurrencia de los detonantes más probables (por ejemplo, la frecuencia de eventos de deslizamientos podría estar asociada a la frecuencia de los eventos detonantes de precipitaciones). En caso de ausencia de información se asignan valores esperados medios razonables a partir de experiencia previa e información de proyectos similares. Algunas amenazas solo tienen un indicador de la intensidad, frecuencia esperada y punto de ubicación donde puede llegar a ocurrir. Por lo tanto, la amenaza debe calificarse para cada componente mediante dos parámetros:

- a) Un indicador de intensidad relativa (1 a 5): es la intensidad con que se podría presentar el evento en cada una de las ubicaciones o componentes expuestos y que pueden llegar a generar posibles impactos a la infraestructura expuesta o directamente en la calidad del agua. Se debe tener en cuenta que el indicador debe permitir comparar el nivel de amenaza para todos los componentes simultáneamente. Por otro lado, debe asegurarse consistencia al comparar un nivel de amenaza entre dos eventos con relación al eventual impacto que pueden llegar a producir (por ejemplo, Nivel 5 para un terremoto o un incendio generarían las peores posibles consecuencias a los componentes que puede afectar según su vulnerabilidad). Cada evento se debe calificar de acuerdo con la siguiente tabla de severidad o intensidades relativas y la calificación debe hacerse para cada uno de los componentes principales expuestos del sistema.

Tabla 1. Intensidad relativa de eventos de amenaza (A).

Nivel	Calificación	Observación
Inexistente	1	No susceptible - La amenaza no afecta al componente
Bajo	2	Susceptibilidad baja - Evento que no generaría impactos importantes
Medio	3	Susceptibilidad media - Evento que generaría impactos medios
Alto	4	Susceptibilidad alta - Evento que generaría impactos importantes
Extremo	5	Susceptibilidad muy alta - Eventos con alta potencialidad de generar daños

- b) Un indicador de frecuencia relativa de ocurrencia: la intensidad indicada anteriormente deberá tener un indicador asociado de frecuencia de ocurrencia según la Tabla 2. Esta tabla debe usarse para caracterizar las amenazas naturales y antrópicas, de acuerdo con la frecuencia histórica observada de ocurrencia de dichos eventos.

Tabla 2. Frecuencia relativa de ocurrencia de eventos de amenaza (T).

Caracterización	Calificación	Frecuencia de Ocurrencia Valor de Referencia	
		Naturales Frecuencia de ocurrencia	Antrópicas Frecuencia histórica de eventos (OMS, 2014)
Muy poco probable	1	~ 1000 años	Indeterminado
Poco probable	2	~ 100 a 500 años	~ 5 años
Probable	3	~10 a 50 años	~ 1 año
Ocasional	4	~1 a 5 años	~ 1 mes
Frecuente	5	~ meses	~ 1 día

2.3 Vulnerabilidad

La vulnerabilidad corresponde a la predisposición de cada componente a sufrir daño y/o a generar impacto en la calidad del agua ante cada uno de los eventos de amenaza y dependerá de los siguientes aspectos:

- Que cada uno de los eventos de amenaza puedan llegar a tener algún tipo de impacto en cada componente y por lo tanto en la calidad del agua.
- Del tipo de componente, sus características físicas, accesibilidad y estado actual.

Para cada componente y para cada amenaza debe asignarse una vulnerabilidad de acuerdo con la posible afectación a la infraestructura y/o a su impacto en la calidad del agua. La asignación debe obtenerse a partir de la siguiente ecuación dependiendo del caso –ecuaciones basadas en OMS [18]:

Caso 1: Sin afectación a la infraestructura*: $V = V_C$

Caso 2: con afectación a la infraestructura*: $V = \frac{16}{80} V_C V_f$

En las anteriores ecuaciones, V_C se refiere al impacto de la amenaza sobre la calidad del agua para el usuario final y debe asignarse de acuerdo con lo indicado en la **Tabla 3** (esta calificación está basada en el Manual para el Desarrollo de Planes de Seguridad del Agua de la Organización Mundial de la Salud OMS de 2009). Vale la pena aclarar que si se está considerando un contaminante en los subsistemas de almacenamiento y/o captación (cuencas, embalses, túneles, etc.), previo al proceso de tratamiento en las PTAP y estos contaminantes se tratan efectivamente en la planta bajo condiciones de operación normal de la misma, la vulnerabilidad asignada debe ser 1. Por otro lado, V_f corresponde a un indicador de vulnerabilidad física de cada componente ante cada tipo de amenaza con respecto a la posible afectación sobre la calidad del agua. El indicador V_f debe asignarse de acuerdo con lo indicado en la **Tabla 4**.

El indicador de vulnerabilidad final V , identifica el impacto en la calidad del agua para amenazas que no generen afectación en la infraestructura como en el caso de derrames accidentales, amenaza agropecuaria, minera o tecnológica industrial o doméstica. También identifica el impacto para el caso en

que la amenaza genere afectación directa en la infraestructura y por lo tanto a la calidad del agua como en el caso de sismos, deslizamientos y descargas torrenciales.

La calificación final del indicador de vulnerabilidad, V , estará entonces en un rango de 1 a 16, siendo 16 la mayor vulnerabilidad. La escala relativa hasta 16 se prefiere con el fin de mantener la compatibilidad con lo propuesto por la OMS [18].

Tabla 3. Calificación de vulnerabilidad a la calidad del agua (V_c).

Nivel	Calificación	Descripción
Insignificante	1	Agua segura
De poca importancia	2	Consecuencias a corto plazo o locales, sin relación con la salud, ni con parámetros de cumplimiento, ni organolépticas
Moderadas	4	Consecuencias organolépticas extendidas o incumplimiento prolongado sin relación con la salud
Graves	8	Posibles efectos sobre la salud a largo plazo
Catastróficas	16	Posible enfermedad

Adaptado de: OMS, 2009

Tabla 4. Calificación de vulnerabilidad a la infraestructura física (V_f).

Nivel	Calificación	Observación
Inexistente	1	El componente no es vulnerable ante la ocurrencia de este evento sin afectación potencial al sistema o la calidad
Bajo	2	La ocurrencia del evento generaría impactos menores en el componente con baja afectación
Medio	3	La ocurrencia del evento generaría impacto medio en el componente con afectación media
Alto	4	La ocurrencia del evento generaría impacto alto con cierre, falla o colapso y alta afectación
Extremo	5	La ocurrencia del evento podría generar la falla o colapso del componente y generar muy alta afectación

Fuente: Construcción propia

2.4 Estimación del riesgo

La evaluación del riesgo identifica los posibles escenarios potenciales de mayor afectación física e impacto en el sistema y en la calidad del agua. Por consiguiente, el indicador de riesgo es una herramienta básica para la toma de decisiones con respecto a las consideraciones principales que deben tenerse en cuenta en los planes de mitigación y reducción del riesgo a la calidad del agua. Teniendo en cuenta eso, la evaluación del riesgo se hará mediante la estimación de un indicador cualitativo relativo (R) para cada uno de los componentes y eventos que puedan afectarlo. Teniendo esto en cuenta, se propone el siguiente indicador de riesgo modificado con la frecuencia –ecuaciones basadas en OMS [18]:

$$R_T = A V T$$

En esta ecuación, A es un indicador de la amenaza (de 1 a 5) y V es un indicador de la vulnerabilidad (de 1 a 16), siguiendo las calificaciones indicadas anteriormente. Cada calificación del riesgo tendría además un indicador de temporalidad de ocurrencia, T , asociado a la frecuencia media de ocurrencia asignada a cada evento de acuerdo con la **Tabla 2** (de 1 a 5). Considerando que eventos con alta frecuencia de ocurrencia deben generar una estrategia diferente de acción con respecto a eventos de ocurrencia remota.

De esta manera una amenaza muy alta (Extrema = 5) con una vulnerabilidad muy alta con o sin afectación a la infraestructura (Catastrófica o Extrema = 16) y una alta frecuencia alta de ocurrencia para eventos naturales o antrópicos (Frecuente = 5), tendrá un indicador de riesgo con un valor de $R = 400$. En un proceso posterior, es posible normalizar el indicador al rango 0 a 100%, en el cual el 100% corresponde al evento con peor posible riesgo; es decir, aquel con máxima intensidad de amenaza natural o antrópica, máxima frecuencia de ocurrencia y máxima vulnerabilidad con eventual impacto en la calidad del agua del sistema.

Este indicador de riesgo puede utilizarse para priorizar los eventos y los componentes que generan el mayor impacto en el sistema teniendo en cuenta simultáneamente su frecuencia esperada de ocurrencia. Esto sirve para definir las prioridades para desarrollar estudios más detallado de evaluación de impacto y a partir de estos implementar opciones de medidas de mitigación y los correspondientes planes de reducción y gestión del riesgo en la calidad del agua. Es importante aclarar que el objetivo de este estudio no es realizar la caracterización detallada de cada posible modo de falla, sino poder entender la matriz de riesgos que afecta el sistema y a partir de esto lograr priorizar los más riesgos más críticos y lograr mitigarlos.

Caja 1. Resumen de los casos que pueden ocurrir:

- Evento natural con impacto en la infraestructura y luego en la calidad
- Evento natural con impacto en la calidad directamente sin afectar la infraestructura
- Evento antrópico con afectación a infraestructura y en la calidad
- Evento antrópico con afectación en la en la calidad directamente sin afectar la infraestructura

3 CASO DE ESTUDIO: BOGOTÁ

3.1 Generalidades

El análisis integral del riesgo de la calidad del agua, según como lo especifica la guía técnica de la Organización Mundial de la Salud [18], y como se indicó anteriormente, requiere la identificación detallada y exhaustiva de los posibles fenómenos y factores que representan una posible afectación en la calidad del agua de un sistema de agua potable. Para esto es importante identificar los diferentes tipos de amenazas que afectan al sistema, los componentes críticos del sistema, la vulnerabilidad de estos y la manera como estos se relacionan. Teniendo en cuenta todas las posibles relaciones, se realizó una mesa de trabajo multidisciplinario entre expertos en calidad del agua, sistemas hidrológicos e hidráulicos y expertos en la

evaluación del riesgo físico en infraestructura. El objetivo de las reuniones entre expertos fue la definición de las posibles amenazas y parámetros a considerar en cada componente del sistema. Teniendo en cuenta lo anterior, en las siguientes secciones se presenta una descripción de cada uno de estos componentes y de su aplicación en el caso de estudio del sistema de acueducto de la ciudad de Bogotá, Colombia.

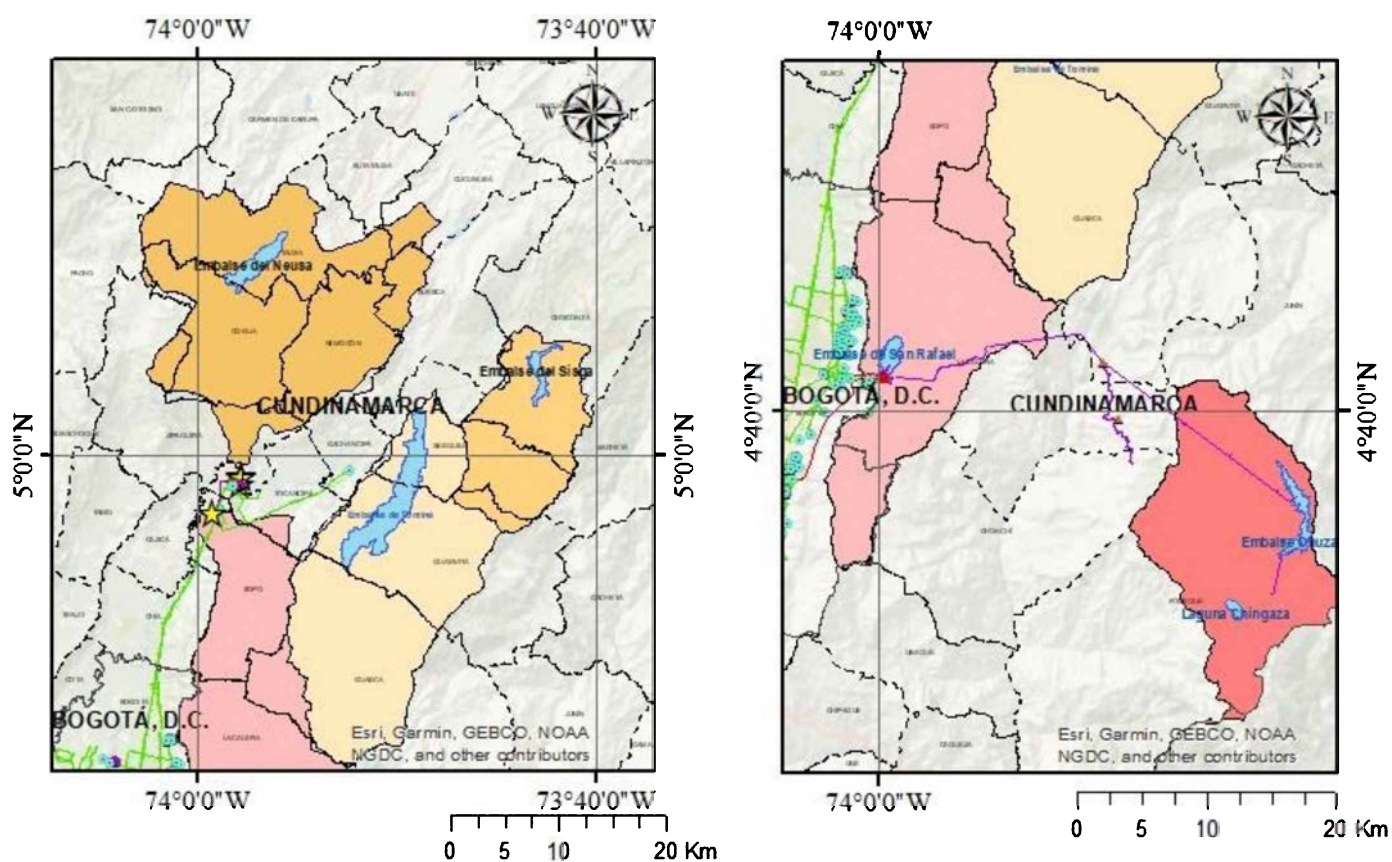
3.2 Exposición

La información utilizada para el modelo de exposición se obtuvo principalmente de la EAAB-ESP, sin embargo esta información fue complementada según cada caso con datos oficiales disponibles en línea de entidades como la Infraestructura de Datos Espaciales Regional (IDER) de la Gobernación de Cundinamarca, el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), el Instituto Nacional de Vías (INVIAS) y el centro de Mapas y Estadísticas de Cundinamarca. En particular, para el caso del sistema de acueducto de Bogotá se cuenta con tres sistemas principales de recolección y suministro de agua:

- Sistema Norte - Chingaza: Cuenca Río Bogotá (Tominé, Sisga y Neusa)
- Sistema Sumapaz: Cuenca Río Sumapaz
- Sistema Agregado Norte - Tibitoc: Cuenca Río Bogotá (Chuza y San Rafael)

Cada sistema puede subdividirse en diferentes componentes. Estos componentes principales del sistema deben caracterizarse y ubicarse geográficamente para el propósito del análisis del riesgo.

En la Figura 3, se presenta el sistema del acueducto de la ciudad de Bogotá. Esta información es la base para la cuantificación del riesgo para cada una de las amenazas y en cada componente del sistema siguiendo la metodología indicada anteriormente.



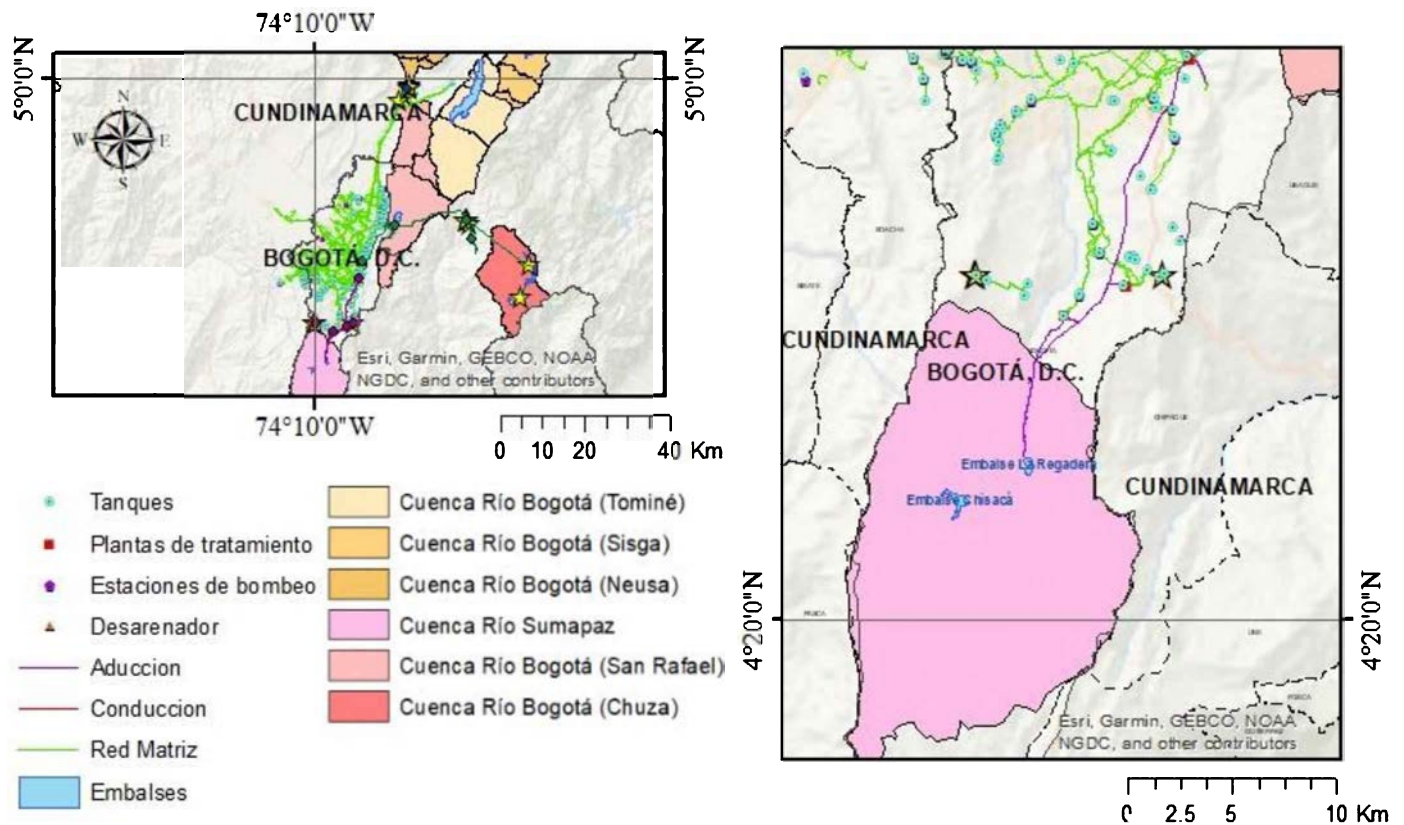


Figura 3. Modelo de exposición completo. Fuente: Construcción propia

3.3 Amenaza

El componente de las amenazas considera las principales amenazas naturales y antrópicas que puedan afectar el sistema de generación y distribución de agua potable y tener por lo tanto un impacto en la calidad del agua. En las siguientes secciones se presenta el análisis de las amenazas incluidas en la evaluación del riesgo, tanto naturales como antrópicas.

Caja 2. Tipos de amenazas incluidas

Amenazas de origen natural:

- sísmica
- precipitaciones
- sequía
- inundaciones
- deslizamiento
- descargas torrenciales
- incendios forestales
- volcanes
- vendaval

Amenazas de origen antrópico:

- terrorismo y atentados
- terrorismo virtual
- tecnológicos domésticos
- tecnológicos industriales
- accidentes viales y derrames
- agropecuario
- minería
- gestión institucional

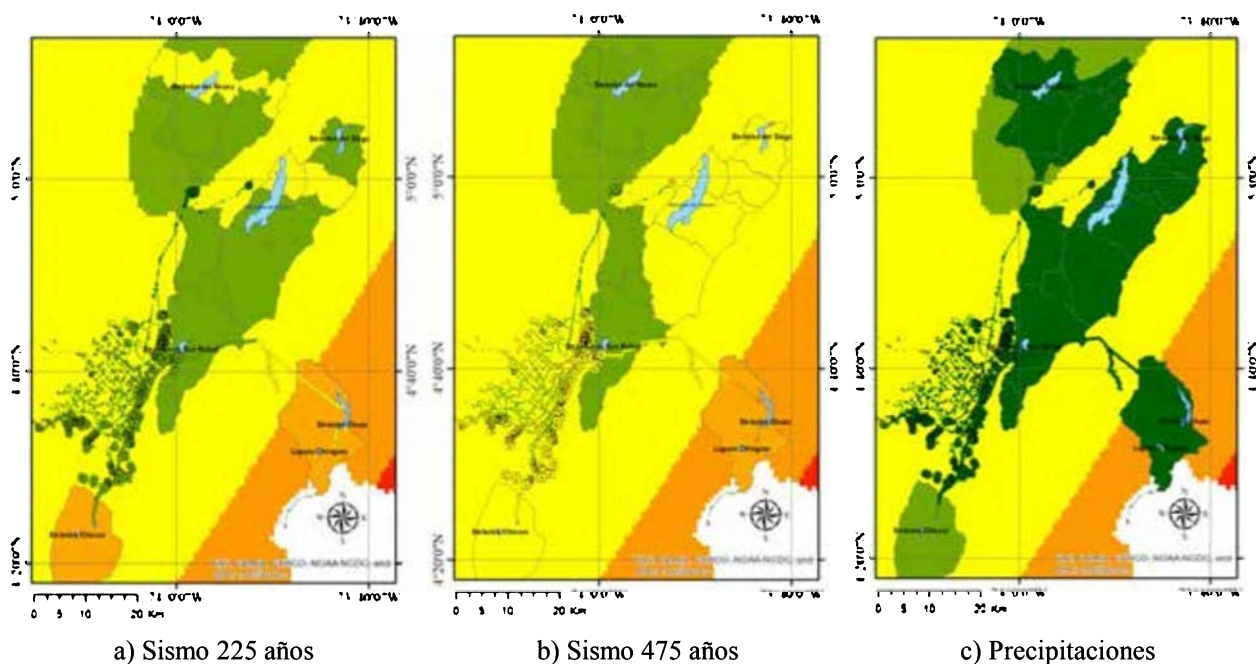
3.3.1 Amenazas naturales

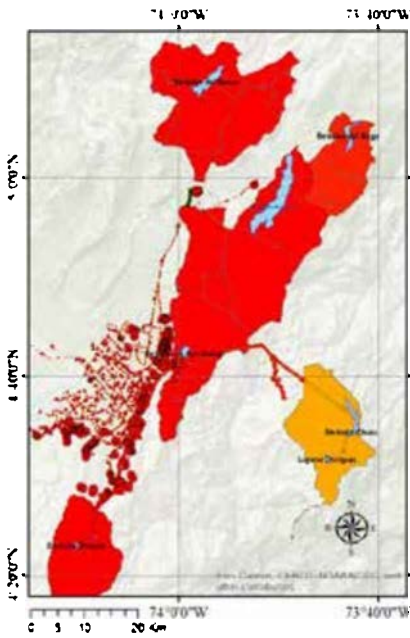
En primer lugar, la amenaza sísmica se obtuvo a partir del modelo probabilista desarrollado por el Centro de Investigación en Materiales y Obras Civiles (CIMOC) de la Universidad de los Andes. La

amenaza por eventos de precipitación se obtuvo a partir de la información de curvas IDF desarrolladas por el IDEAM para 110 estaciones a nivel nacional, con información disponible hasta el 2010. Estas curvas están disponibles en la página web del IDEAM [19,20]. La frecuencia asociada con este mapa corresponde a un valor de 3 correspondiente a un periodo de retorno de 50 años (equivalente al periodo de retorno del mapa base). La amenaza por sequía se derivó a partir de los mapas de susceptibilidad desarrollados por el IDEAM en 2014 (escala 1:9,000,000 a nivel nacional) [21]. La frecuencia asociada con este mapa corresponde a un valor de 4 correspondiente a un periodo de retorno de 1 año (equivalente al periodo de retorno del mapa base). La amenaza por inundaciones se desarrolló a partir de una metodología simplificada de susceptibilidad de inundación, basada en el Blue Spot Model [22].

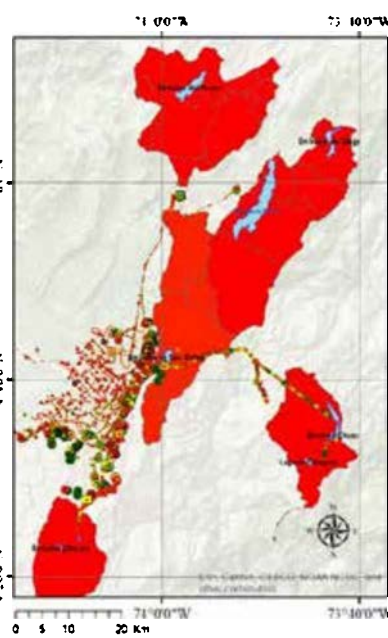
La frecuencia asociada con este mapa corresponde a un valor de 3 correspondiente a un periodo de retorno de 50 años. La amenaza por deslizamiento fue incluida a partir de los mapas de susceptibilidad desarrollados por el SGC [23]. La frecuencia asociada con este mapa corresponde a un valor de 3 correspondiente a un periodo de retorno de 25 años. La amenaza por descargas torrenciales se generó a partir de una metodología simplificada de clasificación de susceptibilidad de cuencas [24]. La frecuencia asociada con este mapa corresponde a un valor de 3 equivalente a un periodo de retorno de 50 años. La amenaza por incendios forestales se consideró a partir de los mapas oficiales realizados por el IDEAM [25] (escala a nivel nacional 1:500,000 o menores).

La frecuencia asociada con este mapa equivale a un valor de 4 correspondiente a un periodo de retorno de 1 año (equivalente al periodo de retorno del mapa base). La amenaza por volcanes se implementó a partir de los mapas oficiales realizados y actualizados por el Servicio Geológico Colombiano (SGC) en 2015 (escala 1:120,000) [26]. La frecuencia asociada con este mapa corresponde a un valor de 1 correspondiente a un periodo de retorno de 500 años (equivalente al periodo de retorno del mapa base). La amenaza por vendavales a partir de los mapas oficiales de velocidades anuales máximas promedios de vientos del IDEAM a partir de los registros entre los años 2000 y 2010 (escala 1:12,000,000). La frecuencia asociada con este mapa corresponde a un valor de 4 equivalente a un periodo de retorno de 1 año. En la **Figura 4** se presentan los mapas de intensidad para cada una de las amenazas naturales mencionada anteriormente.

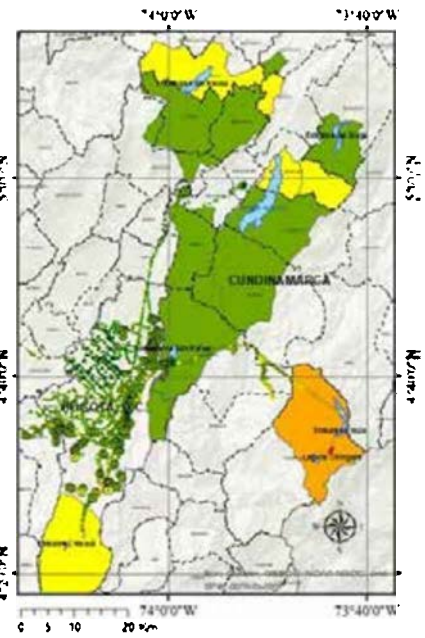




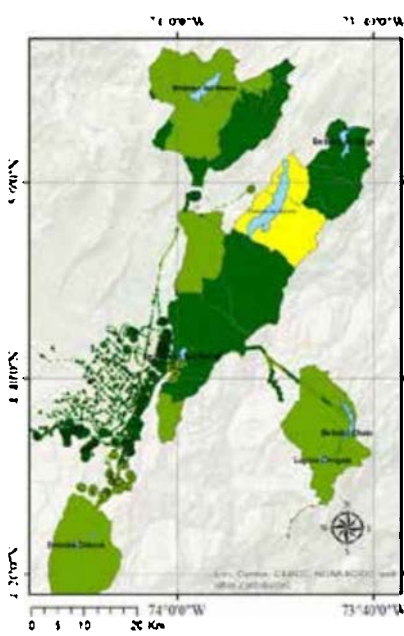
d) Sequía



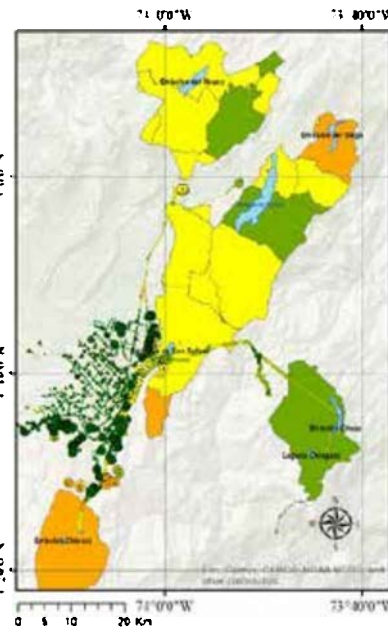
e) Inundaciones



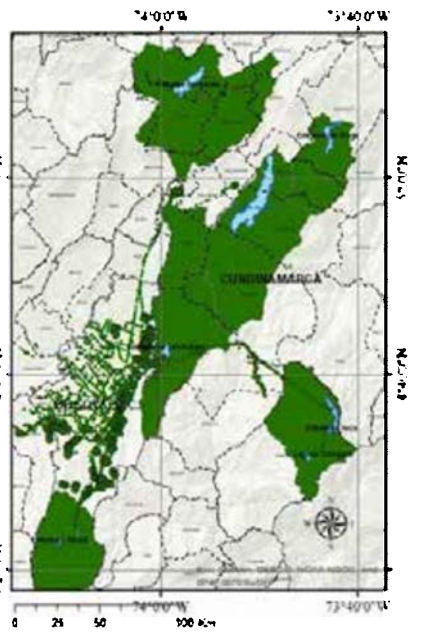
f) Deslizamiento



g) Descargas torrenciales



h) Incendios forestales



i) Volcanes

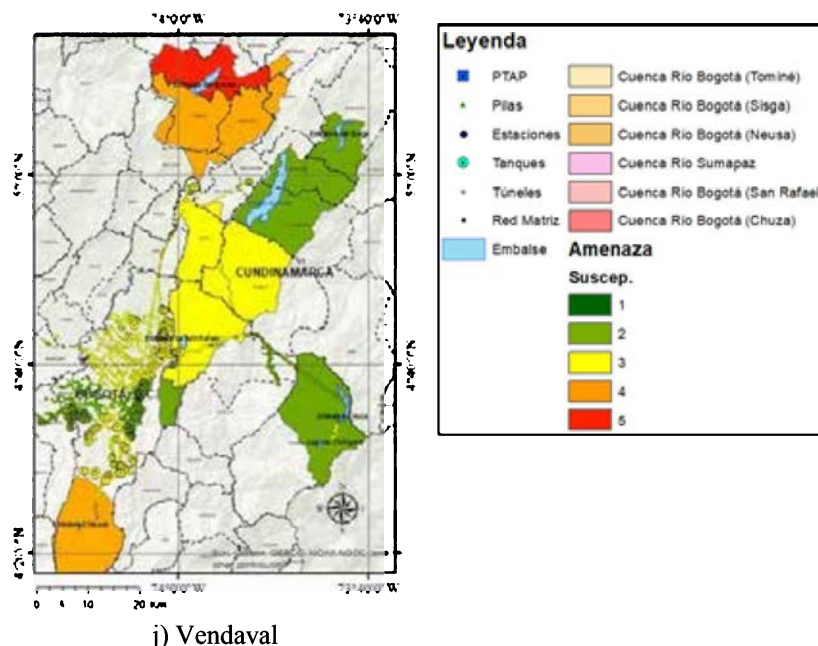


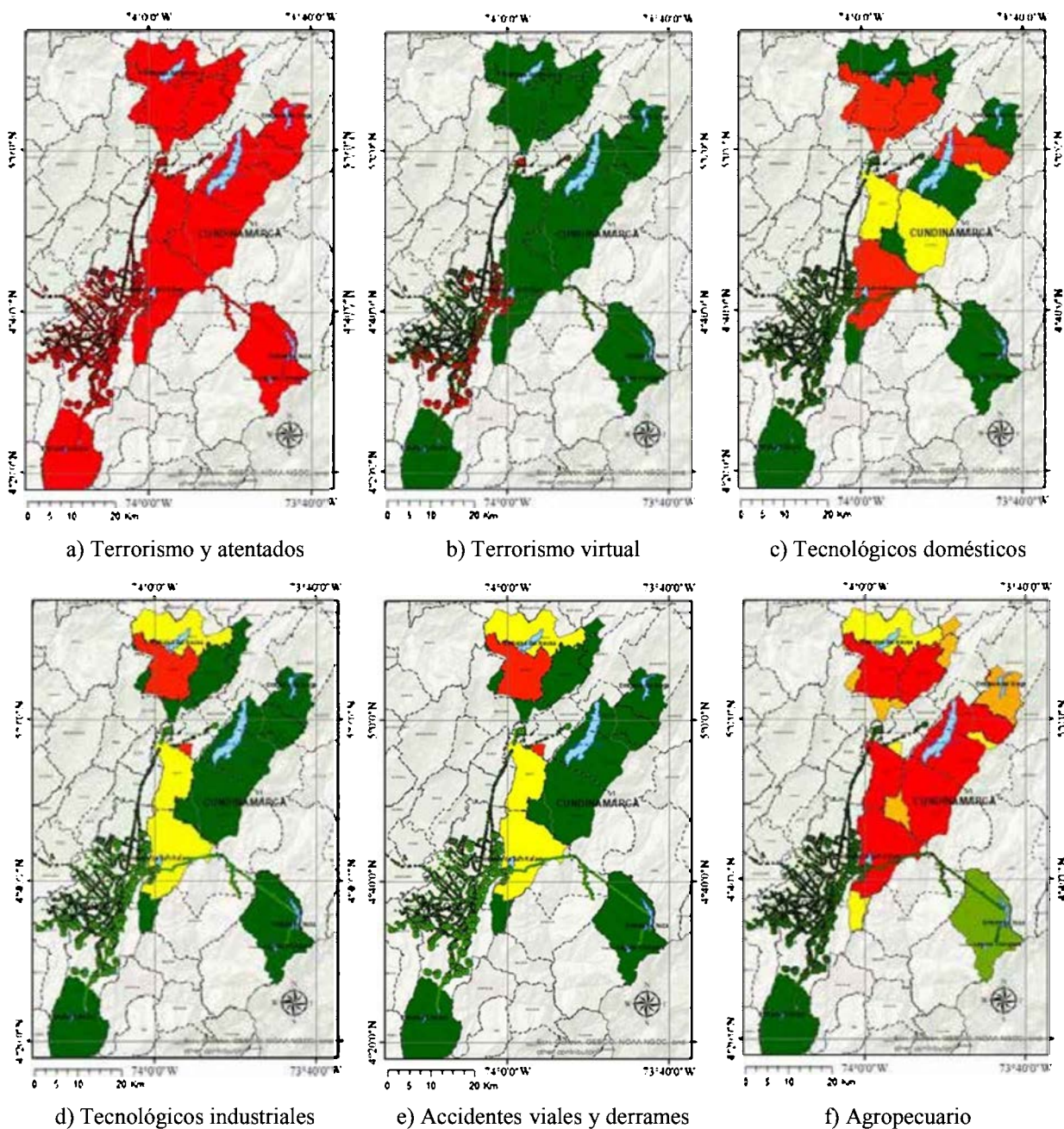
Figura 4. Mapas de amenaza de origen natural.

3.3.2 Amenazas antrópicas

La amenaza por terrorismo y atentados se determinó de acuerdo con consulta interdisciplinaria de especialistas teniendo en cuenta que todos los elementos pueden ser sujetos a algún tipo de sabotaje y atentado. La frecuencia asociada a este fenómeno corresponde a un valor de 1 asociado a periodos de retorno de 10 años. Este periodo de retorno está basado en los atentados y su frecuencia registrados en la base de datos de la Fiscalía [27]. La amenaza por terrorismo virtual, contrario al terrorismo/atentados, se conceptualiza como la potencialidad de intentos de sabotaje electrónico y/o virtual de los componentes. El terrorismo virtual únicamente es relevante para aquellos componentes cuya funcionalidad de control, ejecución y supervisión depende de sistemas electrónicos. La frecuencia asociada a este fenómeno corresponde a un valor de 1 asociado a periodos de retorno de 10 años.

La amenaza por eventos tecnológicos domésticos se obtuvo a partir de las viviendas urbanas y rurales identificadas en los mapas del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), en los cuales se puede identificar las zonas de uso. La frecuencia asociada con este mapa corresponde a un valor de 3 asociado a un periodo de retorno de 1 año. La amenaza por eventos tecnológicos industriales se generó a partir de la identificación de las construcciones con ocupación y uso industrial en los mapas de uso del suelo disponibles en la página Mapas y Estadísticas de la Gobernación de Cundinamarca, así como su posterior validación con los respectivos POT municipales de la región. La frecuencia asociada con este mapa corresponde a un valor de 3 correspondiente a un periodo de retorno de 1 año. La amenaza por accidentes viales y derrames fue identificada a partir de los mapas de vías principales y secundarias del INVIAS y la ANI, junto con los mapas de la ubicación aproximada de los sistemas de oleoductos y gasoductos en el territorio nacional del CENIT y GEB respectivamente. La frecuencia asociada con este mapa corresponde a un valor de 3 correspondiente a un periodo de retorno de 1 año. La amenaza agropecuaria está derivada a partir de la identificación de los terrenos con ocupación agrícola y pecuaria de los mapas de uso del suelo disponibles en la página Mapas y Estadísticas de la Gobernación de Cundinamarca. La frecuencia asociada con este mapa corresponde a un valor de 4 correspondiente a un periodo de retorno de mensual.

La amenaza minera fue desarrollada a partir de la identificación de los terrenos con ocupación minera de los mapas de uso del suelo disponibles en la página Mapas y Estadísticas de la Gobernación de Cundinamarca. La frecuencia asociada con este mapa corresponde a un valor de 4 correspondiente a un periodo de retorno de mensual. La potencialidad de fallencias en la gestión institucional del sistema de acueducto se consideró como un escenario de amenaza antrópica adicional dentro del análisis de gestión del riesgo en la calidad del agua. Las amenazas por cada causalidad se consideraron como escenarios individuales con un nivel de intensidad intermedio y con un valor de frecuencia de 2 asociado a un periodo de retorno de 5 años. Esto quiere decir que se considera un riesgo unificado para todos los sistemas, en cuanto a Talento Humano, Recursos físicos y Procedimientos. Esto se debería explorar en más detalle en futuros proyectos de la EAAB-ESP. En la **Figura 5** se presentan los mapas de intensidades para cada una de estas amenazas.



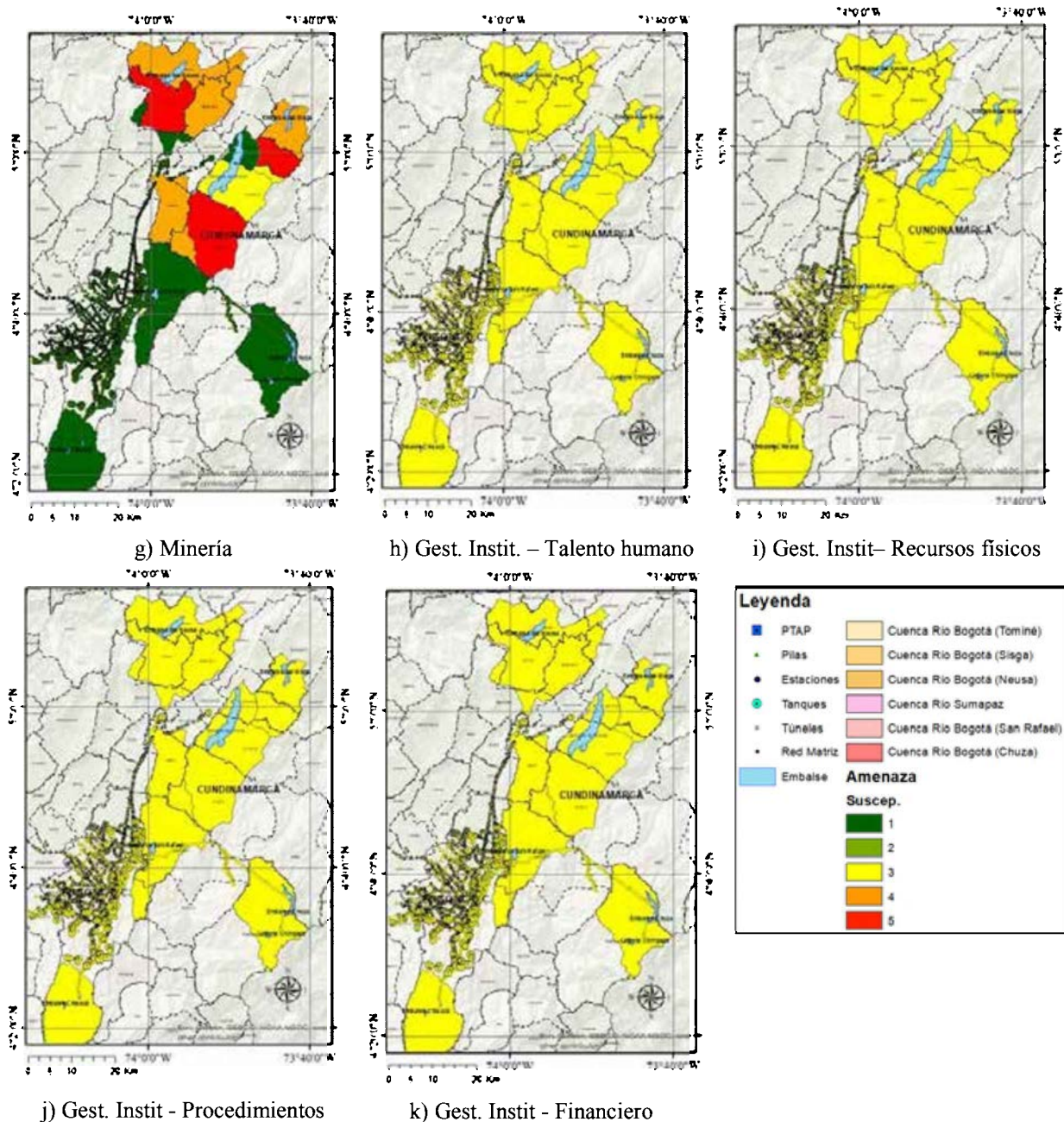


Figura 5. Mapas de amenaza de origen antrópico.

3.4 Vulnerabilidad

La vulnerabilidad corresponde a la predisposición de cada componente a sufrir daño y/o a generar impacto en la calidad del agua ante cada uno de los eventos de amenaza y dependerá de los siguientes aspectos:

- a) Que cada uno de los eventos de amenaza puedan llegar a tener algún tipo de impacto en cada componente y por lo tanto en la calidad del agua.
- b) Del tipo de componente, sus características físicas, accesibilidad y estado actual.

Para cada componente y para cada amenaza se asigna una vulnerabilidad de acuerdo con la posible afectación a la infraestructura y/o a su impacto en la calidad del agua. Estas calificaciones se desarrollaron en conjunto, a partir de reuniones virtuales colaborativas, entre expertos de la Universidad de Los Andes y de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, teniendo en cuenta que cada fila representa una amenaza particular y cada columna un componente de exposición. Por cada combinación de componente con amenaza se indicó en la justificación los diferentes parámetros químicos, microbiológicos o radioactivos que se están considerando en la calificación. A modo de ejemplo, en la **Tabla 5** se presentan las calificaciones de vulnerabilidad a la calidad y sus justificaciones para el sistema de captación Norte Chingaza y las amenaza de incendios forestales.

Tabla 5. Justificación calificaciones vulnerabilidad a partir de reuniones colaborativas.

Amenaza \ Componentes	Captación			
	Cuencas hidrográficas			
	Justificación	Observación UA	Observación EAAB	Cal.
Incendios	<ul style="list-style-type: none"> - Material particulado - Arrastre materia orgánica - Aumento inundaciones - Sustancias químicas (retardantes de llama) - Aumento en temperatura del agua: Cambios en concentraciones de sustancias y liberación genes resistentes anti-bióticos) - Poblaciones microbiológicas de los suelos (aumento anaerobias fijadoras de nitrógeno) incremento de CO₂, Óxidos de Nitrógeno y azufre, alquitrán, se puede producir ozono a nivel del suelo. 	Las plantas no están preparadas para remover contaminantes emergentes (PFOS, PFOA, muy estables). No se miden, Asociado con los incendios se genera aumento de Turbidez, presencia de materia orgánica húmica. Fúlvica, cambios de pH en las fuentes superficiales del área aferente. Afectación de la fauna y la flora, pérdida de biodiversidad, riesgo de inundaciones y erosión por la pérdida de la capa vegetal	16 debido a que los incendios pueden modificar la producción de agua) y se reflejaría en un desabastecimiento	16

En total se tienen cinco matrices de vulnerabilidad para todas las amenazas y todos los componentes. La **Tabla 6** presenta la vulnerabilidad física para todos los componentes de los sistemas de captación, almacenamiento y potabilización, en cada una de las amenazas consideradas.

Tabla 6. Vulnerabilidad física.

Amenaza \ Componentes	Captación		Almacenamiento		Potabilización			
	Cuencas hidrográficas	Túneles y tuberías	Embalses	PTAP	Estructuras de bombeo	Estructuras de control	Tanques	Carro-tanques
	Cal.	Cal.	Cal.	Cal.	Cal.	Cal.	Cal.	Cal.
Naturales	Sismos	3	4	4	4	4	4	2
	Precipitaciones	3	2	2	2	1	1	1
	Sequía	3	1	2	1	1	1	1
	Inundaciones	3	3	4	3	1	1	2
	Deslizamientos	3	3	3	3	3	3	4
	Descargas torrenciales	3	1	2	3	3	3	3
	Incendios forestales	4	2	3	3	1	1	3
	Volcanes	1	1	1	1	1	1	1
	Vendaval	2	1	2	2	2	1	2
Antrópicas	Terrorismo/Atentados	4	5	5	4	4	3	2
	Terrorismo virtual	1	1	1	5	5	5	2
	Tecnológicos domésticos (aguas residuales)	2	1	2	2	2	2	2
	Tecnológicos industriales	3	1	2	2	2	2	2
	Accidentes viales y derrames	3	1	3	1	1	1	2
	Agropecuario	3	1	3	1	1	1	1
	Minería	4	1	3	1	1	1	1
	Gestión institucional - Talento humano	3	3	3	3	2	2	1
	Gestión institucional - Recursos físicos	3	3	3	3	3	3	3

Antrópicas	Gestión institucional - Procedimientos	3	4	4	3	3	3	3	2
	Gestión institucional - Financiera	4	4	3	3	3	2	3	1

En la **Tabla 7** se presentan los resultados para los componentes de captación, componentes de almacenamiento y potabilización, para los componentes del sistema de distribución del sistema Norte Chingaza. Para el sistema Sur-Sumapaz se presenta en la **Tabla 8** los resultados para los componentes de captación, para los componentes de almacenamiento y potabilización, y para los componentes del sistema de distribución. Para el sistema Agregado Norte-Tibitoc se presenta en la **Tabla 9** los resultados para los componentes de captación, para los componentes de almacenamiento y potabilización, y para los componentes del sistema de distribución.

Tabla 7. Vulnerabilidad calidad sistema Norte Chingaza.

Amenaza \ Componentes		Captación		Almacenamiento	Potabilización	Distribución		
		Cuencas hidrográficas	Túneles y tuberías	Embalses	PTAP	Estructuras de bombeo	Estructuras de control	Tanques
		Cal.	Cal.	Cal.	Cal.	Cal.	Cal.	Cal.
Naturales	Sismos	4	16	8	8	8	8	8
	Precipitaciones	8	4	4	8	4	4	4
	Sequías	8	4	8	8	2	2	2
	Inundaciones	4	4	4	8	4	4	4
	Deslizamientos	8	8	8	4	4	4	4
	Descargas torrenciales	8	4	4	4	4	4	4
	Incendios	16	1	16	8	4	4	4
	Volcanes	4	1	2	2	2	2	2
	Vendaval	4	1	2	4	2	2	2
Antrópicas	Terrorismo/ Atentados	16	16	16	16	16	16	16
	Terrorismo virtual	4	8	4	16	16	16	8
	Tecnológicos domésticos (aguas residuales)	16	1	16	8	8	8	8
	Tecnológicos industriales	4	1	4	1	2	2	1

Riesgo a la calidad del agua: caso de Bogotá

Antrópicas	Accidentes viales y derrames	16	8	16	8	8	8	8
	Agropecuario	8	1	8	8	8	8	4
	Minería	4	2	2	4	4	4	4
	Gestión institucional - Talento humano	8	1	8	8	8	8	8
	Gestión institucional - Recursos físicos	8	1	8	8	8	8	8
	Gestión institucional - Procedimientos	8	2	4	8	8	8	8
	Gestión institucional - Financiera	8	4	8	4	4	4	8

Tabla 8. Vulnerabilidad calidad Sur – Sumapaz.

Amenaza \ Componentes	Captación		Almacenamiento	Potabilización	Distribución			
	Cuencas hidrográficas	Túneles y tuberías	Embalses	PTAP	Estructuras de bombeo	Estructuras de control	Tanques	
	Cal.	Cal.	Cal.	Cal.	Cal.	Cal.	Cal.	
Naturales	Sismos	4	8	8	8	8	8	8
	Precipitaciones	8	4	8	4	4	4	4
	Sequías	8	4	8	8	2	2	2
	Inundaciones	8	4	4	8	4	4	4
	Deslizamientos	8	8	8	8	4	8	8
	Descargas torrenciales	8	4	4	4	4	4	4
	Incendios	16	2	8	8	4	4	8
	Volcanes	2	1	2	2	2	2	2
	Vendaval	4	1	2	4	2	2	2
Antrópicas	Terrorismo/ Atentados	16	16	16	16	16	16	16
	Terrorismo virtual	1	2	2	16	16	16	2

Antrópicas	Tecnológicos domésticos (aguas residuales)	16	1	8	8	8	8	8
	Tecnológicos industriales	4	1	4	8	2	2	2
	Accidentes viales y derrames	16	16	16	8	8	8	8
	Agropecuario	16	1	16	8	8	8	8
	Minería	4	2	4	4	2	2	2
	Gestión institucional - Talento humano	4	1	8	8	8	8	8
	Gestión institucional - Recursos físicos	8	1	8	8	8	8	8
	Gestión institucional - Procedimientos	8	2	4	8	8	8	8
	Gestión institucional - Financiera	8	4	8	4	4	4	8

Tabla 9. Vulnerabilidad calidad sistema Tibitoc.

Amenaza \ Componentes	Captación		Almacenamiento	Potabilización	Distribución			
	Cuencas hidrográficas	Túneles y tuberías	Embalses	PTAP	Estructuras de bombeo	Estructuras de control	Tanques	
	Cal.	Cal.	Cal.	Cal.	Cal.	Cal.	Cal.	
Naturales	Sismos	4	16	16	8	8	8	8
	Precipitaciones	16	4	8	4	4	4	4
	Sequías	16	4	16	8	2	2	2
	Inundaciones	8	2	8	8	4	4	4
	Deslizamientos	8	2	8	8	4	8	8
	Descargas torrenciales	8	2	8	8	4	4	4

Riesgo a la calidad del agua: caso de Bogotá

Naturales	Incendios	8	2	8	8	4	4	4
	Volcanes	4	2	2	2	2	2	2
	Vendaval	4	1	2	4	2	2	2
Antropicas	Terrorismo/Atentados	16	16	16	16	16	16	16
	Terrorismo virtual	1	1	2	16	16	16	8
	Tecnológicos domésticos (aguas residuales)	16	4	8	8	8	8	8
	Tecnológicos industriales	16	1	16	8	8	8	8
	Accidentes viales y derrames	16	8	16	8	8	8	8
	Agropecuario	16	2	16	8	8	8	8
	Minería	8	2	8	8	2	2	2
	Gestión institucional - Talento humano	8	1	8	8	8	8	8
	Gestión institucional - Recursos físicos	8	1	8	8	8	8	8
	Gestión institucional - Procedimientos	8	2	8	8	8	8	8
Gestión institucional - Financiera	8	4	16	4	4	4	8	

El sistema de carrotanques se califica de manera general pues no presenta diferencias significativas con respecto a cada sistema de captación. Las calificaciones, así como sus justificaciones y observaciones de presentan en la **Tabla 10**.

Tabla 10. Vulnerabilidad calidad carrotanques.

Amenaza \ Componentes		Distribución
		Carro-tanques
		Calificación
Naturales	Sismos	1
	Precipitaciones	1
	Sequías	1
	Inundaciones	1
	Deslizamientos	1
	Descargas torrenciales	1
	Incendios	1
	Volcanes	1
	Vendaval	1
Antrópicas	Terrorismo/Atentados	16
	Terrorismo virtual	1
	Tecnológicos domésticos (aguas residuales)	1
	Tecnológicos industriales	1
	Accidentes viales y derrames	2
	Agropecuario	1
	Minería	1
	Gestión institucional - Talento humano	8
	Gestión institucional - Recursos físicos	4
	Gestión institucional - Procedimientos	16
Gestión institucional - Financiera	8	

Adicionalmente las redes de distribución se analizaron de forma individual debido a la heterogeneidad propia de estas. Esto implica que las calificaciones se realizan para cada uno de los tramos de forma individual. Para este propósito se tuvo en cuenta una calificación a la vulnerabilidad de acuerdo con las propiedades químicas del agua (i.e. corrosividad, desinfectante, turbiedad) su interacción con la red y los cambios que podrían ocasionar sobre la calidad del agua, así como también una calificación a la vulnerabilidad asociada a las características físicas de cada tramo (i.e. material, diámetro, operación).

Para asignar las calificaciones con respecto al tipo de agua que transitan se asignaron valores de vulnerabilidad baja (0), media (8) y alta (16) para la turbiedad, indicadores de corrosividad como el índice de Langelier, el índice de Ryznar, el índice de Larson, y la relación CSMR y el tipo de desinfectante es decir las variables de estabilidad química y física. Los rangos y límites que se toman para cada variable se presentan en la **Tabla 11**.

Tabla 11. Asignación de vulnerabilidad química en redes.

Variables Químicas de Calidad	Baja	Media	Alta	Fuente
Estabilidad Física (Turbiedad) (NTU)	< 0.8		>0.8	Escala de elaboración propia a partir de límites de estabilidad física óptima propuesta por Zhang et al. [28] : valores menores a 0.8 NTU indicarían que el agua distribuida es estable físicamente y generaría una vulnerabilidad baja en la red, mientras que valores superiores a 0.8 NTU incrementarían sustancialmente la vulnerabilidad a una categoría alta
Estabilidad Química (Langelier)	> -0.5	de -0.5 a -2	< -2	Escala de elaboración propia a partir de límites de corrosividad propuestos por Pietrucha-Urbanik, [29]: para que la corrosividad sea casi imperceptible (>-0.5) teniendo una vulnerabilidad baja; condiciones para una corrosión moderada (-0.5 hasta -2) generando una vulnerabilidad media; y aquellas características en los que se acelera la corrosión (<-2) produciendo una vulnerabilidad alta
Estabilidad Química (Ryznar)	6.2 a 6.8	de 6.8 a 8.5	> 8.5	Escala de elaboración propia a partir de límites de incrustación propuestos por Lenntech [30]: Valores entre 6.2 y 6.8 indican que no hay dificultad respecto a la formación de depósitos ya que el agua no es agresiva ni incrustante por lo que la vulnerabilidad sería baja ; entre 6.8 y 8.5 el agua es agresiva mientras que entre 5.5 y 6.2 puede formar incrustaciones y por tanto en estas condiciones la vulnerabilidad generada por el agua distribuida es media ; y finalmente valores mayores a 8.5 reflejan un agua altamente agresiva, mientras valores menores a 5.5 representan una alta formación de depósitos, catalogando este tipo de agua como un causante de vulnerabilidad alta en los sistemas de distribución

Estabilidad Química (Larson)	<0.4	0.4-1	>1	Escala de elaboración propia a partir de límites de corrosividad propuestos por Zhang et al. [28] explican que un valor superior a 1 para este índice obedece a un agua altamente corrosiva a materiales metálicos y por tanto la vulnerabilidad del sistema por distribuir este tipo de agua sería alta. Valores entre 0.4 y 1 muestran tendencia media a la corrosión y de esta forma se generaría una vulnerabilidad media; y valores menores a 0.4 indican baja o nula corrosión a metales y en consecuencia la vulnerabilidad sería baja
Desinfectante	Solo MIOX	Cloro o Cloramina	Mezcla irregular de MIOX-Cloro	Elaboración propia de acuerdo a experiencia profesional en el tema de desinfección tomando como base las siguientes características para evaluar su efecto en la vulnerabilidad del sistema de distribución como son: i. su acción residual en la red que tiene repercusiones en reducir el recrecimiento de biopelícula en la red sobre todo en puntos alejados y con altos tiempos de retención; ii. su potencial de generar nitrificación que repercute en el crecimiento de biopelícula y formación de subproductos nitrados; iii. la interacción entre el desinfectante y la red ocasionando corrosión, liberación de materiales y adicionalmente fugas; finalmente el efecto químico de su reacción con la materia orgánica natural y aquella producida por los microorganismos y su potencial de formación de subproductos de desinfección (SPD)
Relación (CSMR)	<0.2	0.2 a 0.5	>0.5	Los rangos se establecen con base en la propuesta metodológica de Edwards et al. [31] y Nguyen et al. [32]. De esta forma se establece que la vulnerabilidad baja está dada por un agua tratada con una relación cloruros- sulfatos menor a 2; la vulnerabilidad media cuando este ratio se incrementa hasta 0.5 (0.2-0.5); y una vulnerabilidad alta al ser mayor que 0.5.

Con respecto a la vulnerabilidad de acuerdo con las condiciones físicas de la red, se incluyeron como parámetros que afecten la vulnerabilidad aquellos relacionados con la operación y mantenimiento, el material y el contacto del agua con componentes biológicos formados en la red de distribución como son las biopelículas. Con respecto a la operación se califica si hay mezcla o cambio de fuente y el tiempo de residencia del agua. Con respecto al material se analiza el tipo, la edad y si hay potencial de corrosión galvánica. Por último, con respecto a los biológicos se analiza la vulnerabilidad frente a que las biopelículas formadas afecten la calidad por desprendimiento. Los rangos y límites definidos para cada variable se presentan en la **Tabla 12**.

Tabla 12. Asignación de vulnerabilidad física en redes.

Variables Físicas		Vulnerabilidad		
		Baja	Media	Alta
Operación	Zona Mezcla / Cambio Fuente	Sin Mezcla		Con Mezcla
	Tiempo Residencia (horas)	< 6 horas	6-18 horas	>18 horas
Material	Tipo	Polímeros	Cementos	Hierros
	Edad (años)	0-20	20-50	> 50
	Corrosión galvánica (potencial)	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75
Biológico	Diámetro- Efecto de la Biopelícula	> 90 cm	30 a 90 cm	< 30 cm

Teniendo esto en cuenta, para asignar una sola calificación para la vulnerabilidad química y física se realizó un promedio ponderado asignando pesos iguales a cada parámetro. En la **Figura 6** se presenta la asignación de vulnerabilidad química (de 0 a 16) y física (de 0 a 5) para todos los tramos de la red matriz.

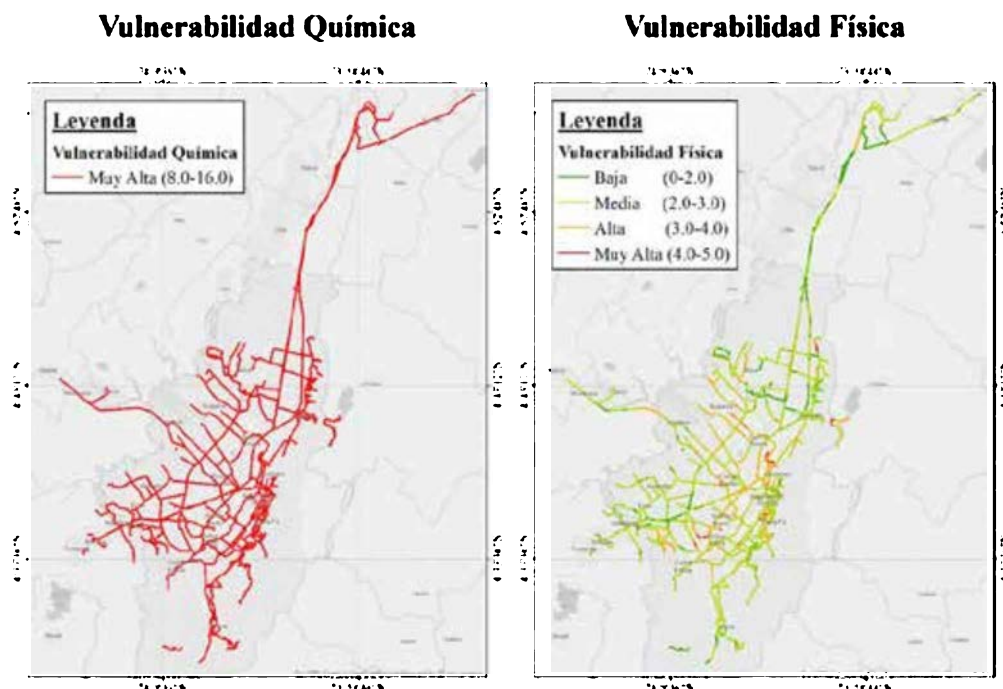


Figura 6. Asignación de vulnerabilidad química y física en Red Matriz. Fuente: Construcción propia

Una vez se tienen las dos calificaciones de vulnerabilidad para cada uno de los tramos de la Red Matriz y Red Menor se calificó una vulnerabilidad total (de 0 a 16) en cada una a partir de la siguiente ecuación:

$$V_{Total} = \frac{16}{80} V_q V_{fs}$$

Los resultados de vulnerabilidad total para la Red Matriz y Red Menor se presentan en la **Figura 7**.

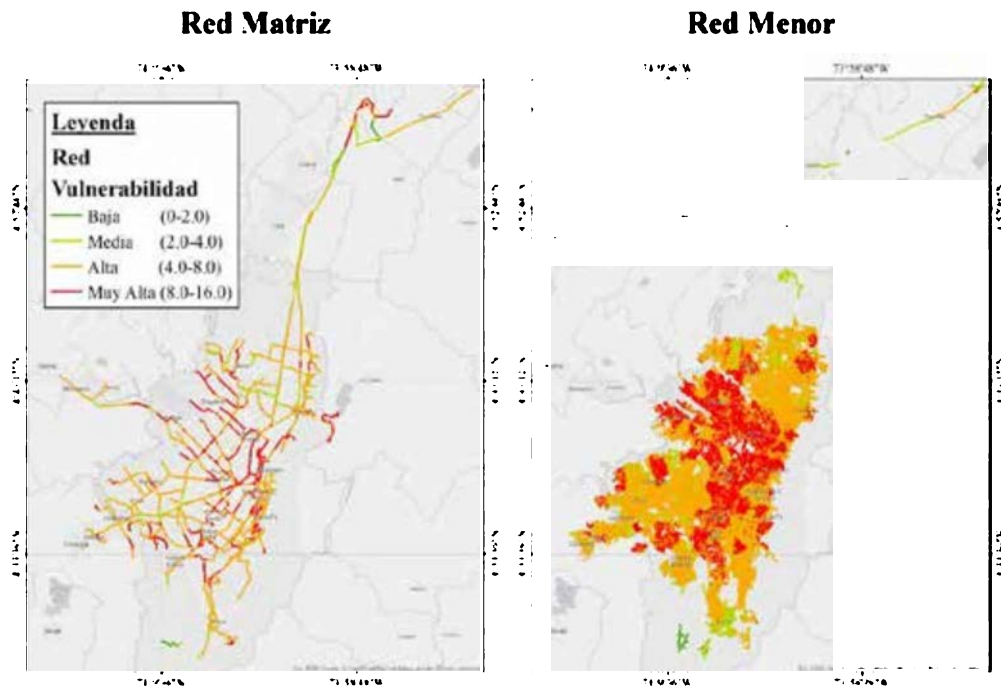


Figura 7. Asignación vulnerabilidad por tramos en Red Matriz y Red Menor.

Fuente: Construcción propia

3.5 Riesgo

La calificación de riesgos se realizó siguiendo la metodología indicada en la Sección 2.4. Los resultados del riesgo distribuidos espacialmente para el caso de amenaza de sequía se presentan de forma ilustrativa en la **Figura 8**. En este mapa las asignaciones de niveles de riesgo en escala de 0 a 100 son las siguientes –basada en las calificaciones indicadas por la OMS [18]:

- Bajo: 0 a 24
- Medio: 25 a 36
- Alto: 36 a 60
- Muy alto: 61 a 100

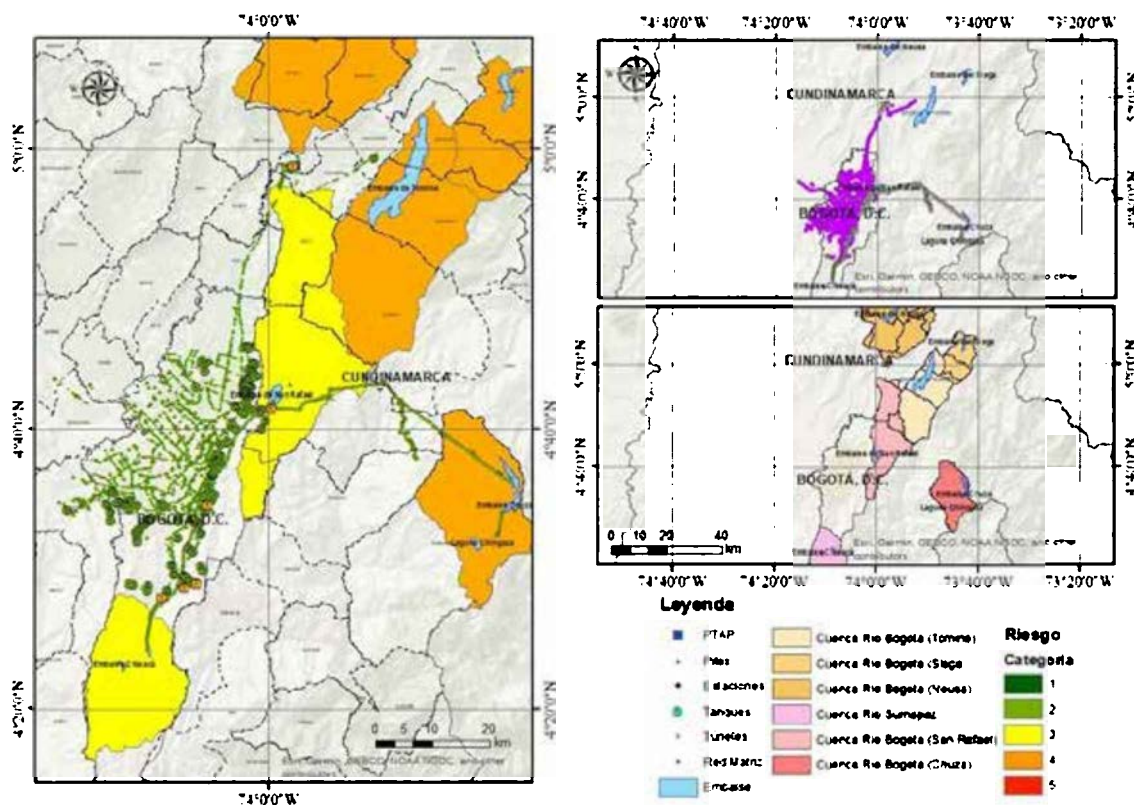


Figura 8. Resultados riesgo sequía distribuidos espacialmente.

Fuente: Elaboración propia

Los resultados finales de riesgo se agrupan por componente y se presentan en la **Tabla 13** para los asociados con amenazas naturales y en la **Tabla 14** para los asociados con amenazas antrópicas. Como se puede evidenciar en estos resultados, la amenaza de sequía es representativa para el sistema de acueducto, y principalmente para la captación del sistema Norte Tibitoc. Así mismo, la amenaza asociada a incendios forestales es crítica, principalmente para captación en el sistema Sumapaz. En términos generales, la amenaza de inundación es la más importante en el sistema de distribución, aunque el riesgo se pueda categorizar en un nivel medio. Con respecto a las amenazas antrópicas, se puede evidenciar que el riesgo se concentra en la amenaza agropecuaria, principalmente en la captación y potabilización del sistema Norte – Tibitoc.

A partir de esta información, es posible priorizar las combinaciones de tipo de amenaza y tipo de elemento expuesto con mayor nivel de riesgo relativo para hacer evaluaciones posteriores detalladas y a partir de esto diseñar planes de gestión del riesgo priorizados. El tipo de medidas de mitigación que se deberían implementar en este paso posterior corresponden a medidas directas de tipo estructural, normativo o capacidad de tratamiento; o indirectas, como programas de capacitación del personal, sistemas de alerta temprana basadas en mediciones de parámetros en tiempo real o elementos de protección financiera. Así mismo, es importante aclarar que estos resultados deben ser actualizados periódicamente dado que tanto la exposición como las amenazas pueden ser dinámicas y cambiantes en el tiempo.

Tabla 13. Matriz resumen resultados riesgo por amenazas naturales (escala relativa).

Elementos Expuestos			Sismo 225	Sismo 475	Precipitación	Sequías	Inundaciones	Deslizamientos	Descargas torrenciales	Incendios forestales	Volcanes	Vendaval
Sistema	Grupo	Componente	MR	MR	MR	MR	MR	MR	MR	MR	MR	MR
Chingaza	Captación	Cuenca Chuza	4.50	3.00	3.75	25.00	11.25	15.00	7.50	26.00	2.00	4.00
		Cuenca San Rafael	2.50	2.25	3.75	25.00	11.25	7.50	5.75	39.00	2.00	5.25
		Túneles y tuberías	16.00	10.25	1.50	19.50	8.50	10.25	4.00	2.00	0.50	2.50
	Almacenamiento	Embalse Chuza	10.50	7.00	1.50	20.00	15.00	15.00	3.00	20.00	1.00	2.00
		Embalse San Rafael	5.75	5.25	1.50	20.00	15.00	7.50	2.25	30.00	1.00	2.75
	Potabilización	PTAP	7.00	5.25	3.00	40.00	15.00	4.50	4.50	15.00	1.00	6.00
Sumapaz	Captación	Cuenca La Regadera	3.00	2.25	7.50	25.00	18.75	11.25	7.50	52.00	1.00	8.00
		Cuenca Chisacá	3.00	2.25	7.50	25.00	18.75	11.25	7.50	52.00	1.00	8.00
		Túneles y tuberías	7.00	5.25	1.75	20.00	9.00	8.75	5.50	2.50	0.50	3.00
	Almacenamiento	Embalse La Regadera	7.00	5.25	6.00	20.00	15.00	11.25	3.00	20.00	1.00	4.00
		Embalse Chisacá	7.00	5.25	6.00	20.00	15.00	11.25	3.00	20.00	1.00	4.00
	Potabilización	PTAP*	7.00	5.25	1.50	40.00	16.00	8.50	4.00	12.50	1.00	5.50
Tíbitoc	Captación	Cuenca Neusa	1.50	1.50	7.50	50.00	18.75	8.25	4.50	18.75	2.00	7.75
		Cuenca Sisga	3.25	2.25	7.50	48.00	18.75	9.00	3.75	19.50	2.00	4.50
		Cuenca Tominé	3.00	2.25	7.50	50.00	18.75	8.25	7.50	16.25	2.00	5.00
		Túneles y tuberías	6.50	6.75	1.50	20.00	6.50	3.00	1.50	3.00	1.00	3.00
	Almacenamiento	Embalse Neusa	6.50	6.50	3.00	35.00	26.25	8.25	4.00	13.00	1.00	4.00
		Embalse Sisga	14.25	9.75	3.00	33.50	26.25	9.00	3.00	14.00	1.00	2.25
		Embalse Tominé	13.00	9.75	3.00	35.00	26.25	8.25	6.00	11.75	1.00	2.50
Potabilización	PTAP	3.50	0.56	0.24	6.40	1.20	1.20	0.60	2.40	0.16	0.96	

General	Distribución	Estructuras de bombeo y control	6.75	5.25	3.00	10.00	10.50	4.50	2.50	5.00	1.00	2.75
		Pilas	1.00	0.75	0.75	5.00	2.50	1.50	0.75	1.25	0.50	2.75
		Tanques	7.00	5.25	3.00	10.00	9.50	4.75	2.75	6.75	1.00	2.75
		Red Matriz: Zona 1	1.00	0.75	0.75	5.00	20.00	1.50	5.75	1.50	0.50	3.00
		Red Matriz: Zona 2	1.00	0.75	0.75	5.00	30.75	1.25	7.00	1.25	0.50	2.75
		Red Matriz: Zona 3	1.00	0.75	0.75	5.00	25.25	1.50	6.00	1.25	0.50	2.25
		Red Matriz: Zona 4	1.00	0.75	0.75	5.00	16.75	1.75	6.50	1.25	0.50	2.50
		Red Matriz: Zona 5	1.00	0.75	0.75	5.00	19.75	1.50	4.75	1.00	0.50	2.00
		Red Menor: Zona 1	1.00	0.75	0.75	5.00	22.00	1.25	4.75	1.00	0.50	3.00
		Red Menor: Zona 2	1.00	0.75	0.75	5.00	34.25	1.00	7.25	1.00	0.50	3.00
		Red Menor: Zona 3	1.00	0.75	0.75	5.00	26.25	1.25	6.25	1.00	0.50	2.50
		Red Menor: Zona 4	1.00	0.75	0.75	5.00	18.00	1.50	5.75	1.25	0.50	2.50
		Red Menor: Zona 5	1.00	0.75	1.00	5.00	22.25	1.50	4.75	1.00	0.50	2.00
		Carrotanques	6.75	5.25	3.25	10.00	12.50	4.00	2.50	5.00	1.00	2.75

Tabla 14. Matriz resumen riesgo por amenazas antrópicas (escala relativa).

Elementos Expuestos			Terrorismo atentados	Terrorismo virtual	Tecnológico industrial	Tecnológico doméstico	Vías y derrames	Agropecuario	Minería	GI Talento humano	GI Recursos físicos	GI Procedimientos	GI Financiera
Sistema	Grupo	Componente	MR	MR	MR	MR	MR	MR	MR	MR	MR	MR	MR
Chingaza	Captación	Cuenca Chuza	16.25	1.00	2.25	5.25	7.50	10.00	3.00	7.50	7.50	7.50	10.50
		Cuenca San Rafael	16.25	1.00	4.50	14.50	22.50	17.00	6.50	7.50	7.50	7.50	10.50
		Túneles y tuberías	20.00	2.00	0.75	0.75	6.00	1.00	1.50	1.50	1.50	3.00	6.00
	Almacenam.	Embalse Chuza	20.00	1.00	1.50	5.25	7.50	10.00	1.50	7.50	7.50	6.00	7.50
		Embalse San Rafael	20.00	1.00	3.00	14.50	22.50	17.00	3.25	7.50	7.50	6.00	7.50
	Potabilización	PTAP	16.25	20.00	0.75	3.00	6.00	8.00	3.00	7.50	7.50	7.50	4.50

Sumapaz	Captación	Cuenca La Regadera	16.25	0.25	2.25	5.25	22.50	10.00	3.00	4.50	7.50	7.50	10.50
		Cuenca Chisacá	16.25	0.25	2.25	5.25	22.50	10.00	3.00	4.50	7.50	7.50	10.50
		Túneles y tuberías	20.00	0.50	0.75	0.75	12.00	1.00	1.50	1.50	1.50	3.00	6.00
	Almacenam.	Embalse La Regadera	20.00	0.50	1.50	3.00	22.50	10.00	2.25	7.50	7.50	6.00	7.50
		Embalse Chisacá	20.00	0.50	1.50	3.00	22.50	10.00	2.25	7.50	7.50	6.00	7.50
Potabilización	PTAP*	16.25	20.00	3.00	3.00	6.00	8.00	3.00	7.50	7.50	7.50	4.50	
Tibitoc	Captación	Cuenca Neusa	16.25	0.25	12.50	17.00	12.00	37.75	14.50	7.50	7.50	7.50	10.50
		Cuenca Sisga	16.25	0.25	7.50	11.50	9.75	40.00	5.25	7.50	7.50	7.50	10.50
		Cuenca Tominé	16.25	0.25	7.50	12.25	18.75	50.00	14.00	7.50	7.50	7.50	10.50
		Túneles y tuberías	20.00	0.25	0.75	3.00	6.00	2.00	1.50	1.50	1.50	3.00	6.00
	Almacenam.	Embalse Neusa	20.00	0.50	4.75	15.75	25.50	37.00	11.00	7.50	7.50	10.50	15.00
		Embalse Sisga	20.00	0.50	3.00	11.50	19.50	40.00	3.75	7.50	7.50	10.50	15.00
		Embalse Tominé	20.00	0.50	3.00	12.25	37.50	50.00	10.00	7.50	7.50	10.50	15.00
Potabilización	PTAP	2.60	3.20	0.48	0.48	0.96	1.28	0.96	1.20	1.20	1.20	0.72	
General	Distribución	Estructuras de bombeo y control	16.25	20.00	0.75	3.00	6.00	8.00	3.00	6.00	7.50	7.50	4.50
		Pilas	8.75	0.25	0.75	0.75	1.50	1.00	0.75	12.00	6.00	10.50	24.00
		Tanques	16.25	20.00	0.75	3.00	6.00	8.00	3.00	6.00	7.50	7.50	4.50
		Red Matriz: Zona 1	8.25	0.25	10.00	10.00	5.00	6.75	5.00	10.00	10.00	10.00	10.00
		Red Matriz: Zona 2	11.50	0.25	13.75	13.75	7.00	9.25	7.00	13.75	13.75	13.75	13.75
		Red Matriz: Zona 3	9.75	0.25	11.75	11.75	6.00	7.75	6.00	11.75	11.75	11.75	11.75
		Red Matriz: Zona 4	8.50	0.25	10.25	10.25	5.25	6.75	5.25	10.25	10.25	10.25	10.25
		Red Matriz: Zona 5	7.75	0.25	9.25	9.25	4.50	6.25	4.50	9.25	9.25	9.25	9.25
		Red Menor: Zona 1	8.00	0.25	9.50	9.50	4.75	6.50	4.75	9.50	9.50	9.50	9.50
		Red Menor: Zona 2	12.00	0.25	14.50	14.50	7.25	9.75	7.25	14.50	14.50	14.50	14.50
		Red Menor: Zona 3	10.25	0.25	12.25	12.25	6.25	8.25	6.25	12.25	12.25	12.25	12.25
		Red Menor: Zona 4	8.25	0.25	10.00	10.00	5.00	6.75	5.00	10.00	10.00	10.00	10.00
		Red Menor: Zona 5	8.00	0.25	9.50	9.50	4.75	6.25	4.75	9.50	9.50	9.50	9.50
		Carrotanques	16.25	4.00	0.75	3.00	6.00	8.00	3.00	6.00	7.50	7.50	4.50

4 CONCLUSIONES

En este capítulo se presenta una metodología para la evaluación del riesgo a la calidad del agua en sistemas de acueducto urbanos. En esta metodología se muestran ventajas frente a metodologías existentes como la incorporación de la frecuencia en el módulo de amenaza, o la incorporación de afectación a la calidad desde la afectación física de los componentes. Así mismo, esta metodología presenta la oportunidad de analizar diferentes tipos de amenazas, tanto naturales como antrópicas. El marco metodológico es suficientemente flexible para incluir amenazas adicionales a las presentada en este capítulo, o por el contrario, reducir y analizar sólo un subconjunto de estas. Los resultados obtenidos a partir de la aplicación de la metodología propuesta sirven para identificar los diferentes riesgos críticos a los cuales está expuesto los sistemas de acueducto de agua potable y a partir de esto realizar una priorización basada en la combinación del tipo de amenaza y de elemento expuesto. Esta metodología se aplica como caso de estudio en el sistema de acueducto de la ciudad de Bogotá, Colombia.

En esta aplicación se consideran diferentes amenazas naturales como lo son la amenaza sísmica, precipitaciones, sequía, inundaciones, deslizamientos, descargas torrenciales, incendios forestales, volcanes y vendavales. Por otro lado, las amenazas antrópicas consideradas son terrorismo y atentados, terrorismo virtual, tecnológicos domésticos, tecnológicos industriales, accidentes viales y derrames, agropecuario, minería y aspectos relacionados con la gestión institucional del talento humano, de los recursos físicos, de procedimientos y financieros.

En este caso de estudio, es posible identificar que los incendios forestales, sequías, amenazas agropecuarias y las inundaciones en las cuencas y embalses son las combinaciones más críticas resultantes de la calificación de riesgos realizada. Por otro lado, es posible obtener un resultado de riesgo promedio para cada elemento expuesto. Para esto se ponderan los resultados de riesgo para cada una de las amenazas y se obtiene una única valoración. De esta manera, los componentes más críticos para la EAAB-ESP son las cuencas y los embalses por lo que la gestión de este riesgo es crítica para el sistema. En particular las cuencas del sistema Tibitoc presentan un alto nivel de riesgo por lo que deben ser gestionadas de forma prioritaria. Por último, es posible priorizar los resultados por amenaza ponderando la valoración de riesgos por cada uno de los componentes.

En este sentido, las amenazas naturales más críticas son las sequías, las inundaciones y los incendios forestales. Por otro lado, las amenazas antrópicas más críticas son las relacionadas con terrorismo por atentados, las ocasionadas por actividades agropecuarias y de gestión institucional. Estos riesgo identificados deben ser priorizados con el objetivo de realizar estudios detallados que conlleven a una mitigación eficiente del riesgo.

PUNTOS CLAVE

1. La evaluación y estimación del riesgo a la calidad del agua es una actividad fundamental para la apropiada gestión del riesgo de los sistemas de acueducto urbanos.
2. Esta evaluación debe actualizarse y complementarse periódicamente.
3. El proceso de evaluación del riesgo en un caso específico debe tener en cuenta las particularidades de cada región, para entender los elementos expuestos, las amenazas antrópicas y naturales y la vulnerabilidad frente a la calidad del agua.
4. La información generada en un proceso de evaluación del riesgo es un insumo fundamental para la gestión del riesgo mediante el diseño e implementación de medidas de reducción del riesgo, diseño de planes de atención de emergencia y transferencia del riesgo entre otras actividades.

PREGUNTAS A RESOLVER

Al aplicar la metodología presentada en este capítulo son las siguientes:

1. ¿Cuál es el nivel de riesgo que tiene un sistema de acueducto?
2. ¿Cuál es la confiabilidad del sistema de acueducto?
3. ¿Cuáles son las amenazas que mayor riesgo representan?
4. ¿Cuáles son los elementos expuestos que mayor riesgo en promedio tienen para diferentes amenazas?
5. ¿Qué tipos de obras de mitigación debería priorizar?

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que los desarrollos y resultados presentados se realizaron en el marco del proyecto *Elaboración y Formulación Del Plan Maestro De La Calidad De Agua Potable - Contrato 2-2-26200-1334-2019* financiado por la Empresa de Acueducto y Alcantarillado (EAAB-ESP). Todos los autores participaron en el proyecto por parte de la Universidad de los Andes o de la EAAB-ESP.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA CRediT

Conceptualización: RF, MRS, ML, JSE, JCR. Curación de datos: RF, JSE, CS, IAG, LP, JM. Análisis formal: RF, JSE, CO, IAG, LP, JM. Adquisición de fondos: MRS. Investigación: RF, ML, JSE, CS. Metodología: RF, MRS, ML, JSE, JCR. Administración del proyecto: RF, MRS, ML, JSE, NL, DG. Recursos: MRS, NL, DG. Software: CO. Supervisión: MRS, JCR. Validación: MRS, JCR. Visualización: RF, CO. Redacción – borrador original: RF, JSE. Redacción – revisión y edición: MRS, JCR, ML, IAG

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen en primer lugar a la Empresa de Acueducto y Alcantarillado (EAAB-ESP) por impulsar iniciativas de reducción del riesgo en el sector. Adicionalmente, los agradecimientos se extienden a los integrantes del Centro de Investigación en Ingeniería Ambiental (CIIA) y al Centro de Investigación en Materiales y Obras Civiles (CIMOC) de la Universidad de los Andes y a sus integrantes que participaron en el desarrollo del proyecto presentado en este capítulo. Así mismo, se hace una mención especial al Profesor Luis E. Yamin, director del CIMOC en la Universidad de los Andes por más de 30 años, quien participó activamente en la estructuración y definición metodológica del presente proyecto.

IDENTIFICACIÓN DE AUTORES

Rafael Fernández	https://orcid.org/0000-0002-2585-1958
Manuel Rodríguez	https://orcid.org/0000-0002-8743-0200
Mildred Lemus	https://orcid.org/0000-0002-2874-519X
Alejandro Giraldo	https://orcid.org/0000-0002-6637-7906
Lina Porras	https://orcid.org/0000-0003-3354-8622
Juliana Martínez	https://orcid.org/0000-0001-5962-4158
Juan Echeverry	https://orcid.org/0000-0001-6537-6381
Carlos Oliveros	https://orcid.org/0000-0002-1817-7010
Juan Carlos Reyes	https://orcid.org/0000-0003-0690-2956
Nubia León	https://orcid.org/0000-0002-1448-5825
Diego Gutiérrez	https://orcid.org/0000-0002-2716-2427

BIBLIOGRAFÍA

1. United Nations. (2021, 3 de junio). *We can end poverty. Millenium development goals and beyond 2015*. <https://www.un.org/millenniumgoals/environ.shtml>
2. Lemus, M., Cárdenas, J.A., Martínez, A.J., & Rodríguez-Susa, M. (2019). Changes on Eubacteria 338I, Gamma-, Betaproteobacteria in biofilms from drinking water systems according to operational conditions. *Environmental Processes*, 6, 85–106. <https://doi.org/10.1007/s40710-019-00355-0>
3. Moreno, J. (2012). *Evaluación de depósitos inorgánicos en sistemas de distribución de agua potable*. Bogotá: Tesis de maestría. Universidad de los Andes.
4. Rueda, J. C., Martínez, A. J., & Rodríguez-Susa, M. (2013). Quantification of *Bacillus cereus* in biofilm-water of household drinking water network and its probably incidence on health. *17th International Symposium on Health-Related Water Microbiology*. Florianopolis, Santa Catarina, Brazil.
5. Hurtado-McCormick, S., Sánchez, L., Martínez, J., Calderón, J., Calvo, D., Narváez, D., Rodríguez-Susa, M. (2016). Fungi in biofilms of a drinking water network: occurrence, diversity and mycotoxins approach. *Water Science and Technology: Water Supply*, 16(4), 905-914. <https://doi.org/10.2166/ws.2016.024>
6. Quintero, A. (2016). *Citotoxicidad y genotoxicidad de SPD derivados de la materia orgánica algal de tres diferentes grupos de microalgas: alga verde-azul, alga verde y diatomea*. [Tesis de maestría. Universidad de los Andes, Bogotá]
7. Giraldo, M. (2014). *Sustancias inorgánicas en tuberías de agua potable: evaluación de desprendimiento e impactos en la salud*. [Tesis Pregrado. Universidad de los Andes, Bogotá]
8. OMS (Organización Mundial de la Salud). (2011). *Guías para la calidad del agua de consumo humano*. Ginebra: Organización Mundial de la Salud.
9. Amézquita, C. P., Pérez, A., & Torres, P. (Junio de 2014). Evaluación del riesgo en sistemas de distribución de agua potable en el marco de un plan de seguridad del agua. *Revista EIA*, 11(21), 157-169.
10. Mora-Alvarado, D., Orozco-Gutiérrez, J., Solís-Castro, Y., Rivera-Navarro, P. C., Cambronero-Bolaños, D., Zuñiga-Zuñiga, L. A., & García-Aguilar, J. (Septiembre de 2018). Índice de Riesgo de la Calidad del Agua para Consumo Humano en Costa Rica. *Tecnología en marcha*, 31(3), 3-14. <https://doi.org/10.18845/tm.v31i3.3897>
11. Shi, W., Xia, J., Gippel, C., Chen, J., & Hong, S. (2017). Influence of disaster risk, exposure and water quality on vulnerability of surface water resources under a changing climate in the Haihe River basin. *Water International*, 42(4), 462-485. <https://doi.org/10.1080/02508060.2017.1301143>
12. Shamsuzzoha, M., Kormoker, T., & Ghosh, R. (2018). Implementation of Water Safety Plan Considering Climatic Disaster Risk Reduction in Bangladesh: A Study on Patuakhali Pourashava Water Supply System. *Procedia Engineering*, 212(2017), 583-590. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2018.01.075>
13. Gheuens, J., Nagabhatla, N., & Perera, E. (2019). Disaster-risk, water security challenges and strategies in Small Island Developing States (SIDS). *Water (Switzerland)*, 11(4), 1-28. <https://doi.org/10.3390/w11040637>
14. EAAB-ESP (Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá). (2020). *Plan de Gestión del Riesgo de Desastres*. Bogotá: Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá.
15. EAAB-ESP (Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá). (2014). *Consultoría para realizar el mapa de riesgos de los sistemas de abastecimiento de agua de la ciudad de Bogotá*. Bogotá: Consultor: Jose David Moreno. Bogotá.

16. Secretaría de Salud y ESE Hospital Pablo VI de Bosa. (2014). *Mapa de riesgo para la calidad del agua para consumo humano*. Bogotá.
17. Secretaría de Salud de Bogotá. (2018). *Nueva metodología para Mapa de Riesgos*. Bogotá.
18. OMS (Organización Mundial de la Salud). (2009). *Manual para el desarrollo de planes de seguridad del agua*. Ginebra: Organización Mundial de la Salud e International Water Association.
19. IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales). (2014). *Mapa de precipitaciones anuales medias multi-anales*. Bogotá: Instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales.
20. IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales). (2020). *Curvas Intensidad Duración Frecuencia IDF*. <http://www.ideam.gov.co/curvas-idf>
21. IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales). (2014). *Periodos de retorno de sequías entre los años 1981-2010*. Bogotá: Instituto de hidrología, meteorología y estudios.
22. Danish Road Institute. (2010). *Methods to predict and handle flooding on highways: The Blue Spot Concept*.
23. SGC (Servicio Geológico Colombiano). (2016). *Mapa de susceptibilidad nacional a movimientos en masa*. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano.
24. IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales). (2017). *Mapa nacional de susceptibilidad a avenidas torrenciales*. Bogotá: Instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales.
25. IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales). (2014). *Mapa nacional de susceptibilidad a incendios forestales*. Bogotá: Instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales.
26. SGC (Servicio Geológico Colombiano). (2015). *Mapas de amenaza volcánica*. Bogotá.
27. Fiscalía General de la Nación. (2020). Recuperado el 2020, de Datos abiertos de la fiscalía general de la Nación: <https://www.fiscalia.gov.co/colombia/gestion/estadisticas/>
28. Zhang, X., Mi, Z., Wang, Y., Liu, S., Niu, Z., Lu, P., . . . Chen, C. (2014). A red water occurrence in drinking water distribution systems caused by changes in water source in Beijing, China: mechanism analysis and control measures. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 8(3), 417-426. <https://doi.org/10.1007/s11783-013-0558-4>
29. Pietrucha-Urbanik, K., Tchórzewska-Cielak, B., Dorota Papciak, D., & Skrzypczak, I. (2017). Analysis of chemical stability of tap water in terms of required level of technological safety. *Archives of Environmental Protection*, 43(4), 3-12. <https://doi.org/10.1515/aep-2017-0043>
30. Lenntech. (2020). *Ryznar Stability Index*. <https://www.lenntech.com/calculators/ryznar/index/ryznar.htm>
31. Edwards, M., & Triantafyllidou, S. (2007). Chloride-to-sulfate mass ratio and lead leaching to water. *American Water Works Association*, 99(7), 96-106. <https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.2007.tb07984.x>
32. Nguyen, C., Stone, K., & Edwards, M. (2011). Chloride-to-sulfate mass ratio: Practical studies in galvanic corrosion of lead solder. *American Water Works Association*, 103(1). <https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.2011.tb11384.x>

CAPÍTULO
2

Evaluación de la amenaza por tsunami en el litoral Pacífico colombiano: Caso de estudio Guapi, Departamento del Cauca

Ronald Efrén Sánchez Escobar^{1*}, Paola Andrea Quintero Rodríguez¹, Fabio Hernán Realpe Martínez¹, Daniel Ruiz Figueroa¹ & Jhonatan Cristian Paz Quintero¹

¹Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Pacífico (CCCP), Área de Manejo Integrado de Zona Costera, Vía "El Morro", Capitanía de Puerto, Tumaco. Nariño. Colombia

*Autor de contacto: Ronald Efrén Sánchez Escobar, Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Pacífico (CCCP), Área de Manejo Integrado de Zona Costera, Vía "El Morro", Capitanía de Puerto, Tumaco. Nariño. Colombia. Correo-e: rsanchez@dimar.mil.co

Resumen

Los tsunamis son eventos naturales que históricamente han afectado áreas costeras y fluviales en el mundo. Estas áreas están expuestas a sismos de gran magnitud producto de la subducción de placas que conforman el llamado Cinturón del Fuego. Dos tsunamis de origen sísmico ocurrieron cerca del litoral Pacífico colombiano, el 31 de enero del 1906 y el 12 de diciembre de 1979 respectivamente. Investigaciones recientes han definido asperezas en la zona de subducción colombo-ecuatoriana, indicador de posibles megasismos, los cuales generan tsunamis altamente destructivos. Debido a esto, es importante investigar la amenaza por tsunami que representan para el municipio de Guapi, siendo una de las comunidades urbanas costeras con mayor población en el departamento del Cauca. En este estudio evaluamos el peligro de tsunami a través del cálculo de la profundidad de inundación y la altura máxima de tsunami del peor escenario creíble. Se aplica un método determinista, utilizando modelos de déficit de deslizamiento como fuentes de tsunami. Los resultados sugieren que, en el peor escenario, la deformación máxima del fondo marino es de 6.0m entre la Bahía Caráquez y Esmeraldas (Ecuador); la máxima altura del tsunami, la máxima distancia de inundación y área de inundación en Guapi es de, 3.3 m, 0.103 km y 0.4

km², respectivamente. Se calculó la profundidad de inundación para el peor escenario en 0.3 m. Con base en estos resultados, se elaboró el mapa de amenaza de tsunami que servirá para elaborar planes de mitigación de tsunamis en estas áreas.

Palabras clave: Amenaza por tsunami, Inundación, Simulación de tsunami, Guapi, Colombia.

Tsunami hazard assessment for the Colombian Pacific coast: Guapi case study, Department of Cauca

Abstract

Tsunamis are natural events that have historically affected coastal and river areas in the world. These areas are exposed to large-magnitude earthquakes due to the subduction of plates that make up the so-called Ring of Fire. Two tsunamis of seismic origin occurred near the Colombian Pacific coast, on January 31, 1906, and December 12, 1979, respectively. Recent research has defined roughness in the Colombian-Ecuadorian subduction zone, as an indicator of possible mega-earthquakes, which generate highly destructive tsunamis. Due to this, it is important to research the tsunami threat they represent for the municipality of Guapi, one of the coastal urban communities with the largest population in the department of Cauca. In this study, we assess the worst scenario's inundation depth and maximum tsunami height. A deterministic method is applied, using slip deficit models as tsunami sources. The results suggest that, in the worst scenario, the maximum deformation of the seabed is 6.0m between Bahía Caráquez and Esmeraldas (Ecuador); the maximum tsunami height, the maximum inundation distance, and inundation area in Guapi is 3.3 m, 0.103 km and 0.4 km², respectively. The flow depth for the worst scenario was calculated to be 0.3 m. Based on these results, a tsunami hazard map was prepared that will be useful for preparing tsunami mitigation plans in these areas.

Keywords: Tsunami hazard assessment, tsunami inundation, tsunami simulation, Guapi, Colombia.

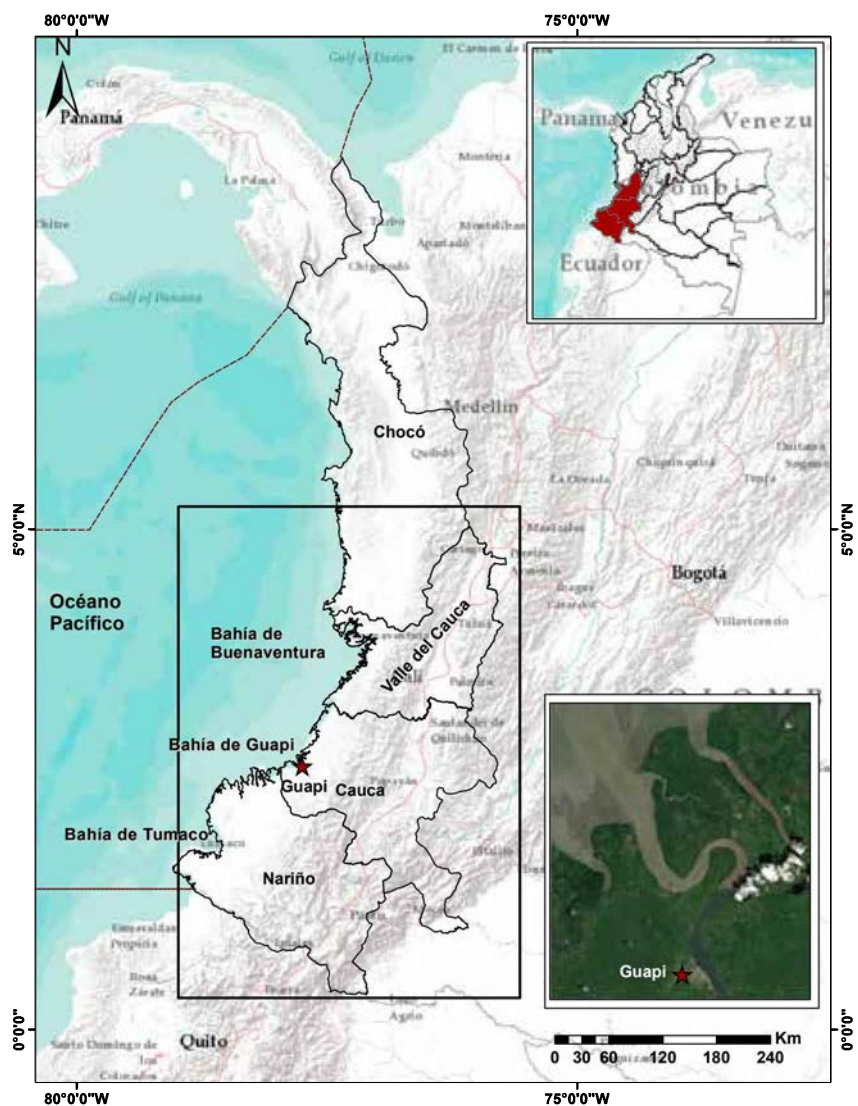
1. INTRODUCCIÓN

La gestión del riesgo de desastres parte del conocimiento de la amenaza y la comprensión del entorno físico y socio-cultural. Para los eventos de tsunami especialmente, es necesario entender los fenómenos que los pueden desencadenar y la configuración morfológica en el área de estudio. La zona de estudio de la presente investigación es el casco urbano de Guapi, situado paralelamente al río con su mismo nombre al interior de la Bahía de Guapi ubicada sobre el Litoral Pacífico Colombiano (LPC) (**Fig. 1**). Esta zona corresponde a una planicie costera deltaica compuesta por ríos principales con dirección N40°W y ríos tributarios, formando valles relativamente amplios y sinuosos y terrazas aluviales de hasta 2 km de amplitud. Esta red densa de drenaje es producto de las altas precipitaciones y la baja permeabilidad del suelo, además, es importante resaltar la influencia del régimen mareal, el cual se prolonga hasta unos 15 km adentro del continente [1].

Históricamente, el LPC ha sido afectado por eventos sísmicos precursores de tsunami, en el año 1906, 1942, 1958 y 1979 con magnitudes de 8.8 Mw, 7.9 Ms, 7.8 Ms y 8.1 Mw, respectivamente [2], se reportan alturas de tsunami basado en relatos históricos de 5m y 1m, y de 3m y 2m para Tumaco y Guapi en los eventos de 1906 y 1979 respectivamente [3,4].

Teniendo en cuenta la ubicación geográfica, las condiciones físicas del entorno y la posibilidad de ocurrencia de eventos de tsunami en el Pacífico Colombo-ecuatoriano, este trabajo se enfoca en evaluar la amenaza por tsunami en la Bahía de Guapi, especialmente en su casco urbano, utilizando como fuentes modelos de deslizamiento interplaca con deslizamiento no homogéneo, además de información batimétrica multihaz y altimétrica de detalle actualizada, aplicando un esquema determinista. Esto permitirá conocer la amplitud y altura del tsunami, el área de inundación y la profundidad de inundación, con el fin de construir el mapa de inundación por tsunami y brindar información necesaria para la futura construcción de planes en la gestión del riesgo de desastres del municipio.

Figura 1. Ubicación geográfica de la Bahía de Guapi, la cual hace parte del litoral Pacífico Colombiano y del departamento del Cauca. Además, se nombra referencias espaciales a la Bahía de Tumaco en el departamento de Nariño y la Bahía de Buenaventura en el departamento del Valle del Cauca.



Caja 1. Términos comunes en la evaluación de la amenaza por tsunami [5].

Fuente de tsunami: Punto o área de origen del tsunami. Normalmente, es el lugar en el que un terremoto, erupción volcánica o movimientos en masa han causado un rápido desplazamiento de agua a gran escala dando origen a las ondas del tsunami.

Modelo de tsunami: Descripciones matemáticas que intentan detallar el tsunami observado y sus efectos.

Propagación de los tsunamis: Los tsunamis viajan desde su área de generación en todas direcciones. La dirección principal de la propagación de la energía es generalmente perpendicular a la dirección de la zona de fractura del terremoto. Su velocidad depende de la profundidad del agua. Las ondas sufren aceleraciones y desaceleraciones cuando pasan sobre el fondo del océano que tiene una profundidad variable.

Simulación de tsunami: Modelo numérico de generación, propagación e inundación de un tsunami.

Altura máxima de tsunami: Máxima elevación alcanzada por el agua del mar medida en relación con un datum dado como el nivel medio del agua o el nivel del agua en el momento de la llegada del tsunami en la costa.

Altura máxima de inundación: Máxima elevación alcanzada por el agua del mar medida en relación con un datum dado como el nivel medio del agua o el nivel del agua en el momento de la llegada del tsunami en una distancia de inundación específica. Es la suma de la profundidad o altura máxima de la columna del agua y la altitud topográfica local en ese sitio en específico.

Profundidad de inundación: Es la profundidad o altura de la columna de agua medida desde la altitud de la topografía local en un sitio.

Área de inundación: Zona inundada por el tsunami.

Distancia de inundación: La distancia horizontal en tierra a la que penetra la ola de un tsunami, normalmente medida de forma perpendicular a la costa.

2. MÉTODO PARA LA EVALUACIÓN DE LA AMENAZA POR TSUNAMI EN EL LPC

2.1 Escenarios sísmicos fuentes de tsunami

Actualmente, diferentes entidades colombianas y japonesas han realizado un esfuerzo conjunto a través del proyecto de cooperación SATREPS – Colombia. Producto de esto, se han utilizado las últimas tecnologías y metodologías para la evaluación de la amenaza por tsunami en Colombia, lo que permite obtener mejores resultados con más precisión. Entre las instituciones colaboradoras se encuentra el Servicio Geológico Colombiano (SGC), la Dirección General Marítima (DIMAR) a través del Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Pacífico (CCCP), la Universidad Nacional de Colombia (UNAL), la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD), el Instituto de Investigación Internacional de Ciencia de los Desastres (IRIDeS, por sus siglas en inglés), perteneciente a la Universidad de Tohoku, y el Instituto de Investigación Nacional para la Ciencia de la Tierra y Prevención de Desastres (NIED, por sus siglas en inglés).

Caja 2. SATREPS

SATREPS (Science and Technology Research Partnership for Sustainable Development), en español, Asociación para la Investigación Científica y Tecnológica para un Desarrollo Sostenible, es una iniciativa diplomática de ciencia y tecnología que promueve la investigación conjunta entre Japón y países en desarrollo haciendo uso de la ciencia y tecnología de avanzada japonesa. El Programa SATREPS es una iniciativa en colaboración entre JICA, la Agencia Japonesa de Ciencia y Tecnología (JST, por sus siglas en inglés) y la Agencia de Investigación y Desarrollo en Medicina de Japón (AMED, por sus siglas en inglés).

SATREPS se propone adquirir nuevos conocimientos que puedan ayudar a abordar problemas de interés global, como medio ambiente y energía, biorecursos, prevención y mitigación de desastres y control de enfermedades infecciosas. En este programa se destaca el hecho de que dicho conocimiento puede aprovecharse en beneficio de la sociedad, en el desarrollo de capacidad de investigadores e institutos de investigación en países en desarrollo según sean las necesidades locales.

El programa de SATREPS incluye la colaboración entre JICA y JST, enfocada en tres áreas de investigación –medio ambiente/energía, biorecursos y prevención y mitigación de desastres– y la colaboración entre JICA y AMED, enfocada en el control de enfermedades infecciosas.

El proyecto que ha aportado conocimientos relacionados a la Gestión del Riesgo y Desastres en Colombia, se titula “Aplicación de últimas tecnologías para fortalecer la investigación y la respuesta a eventos sísmicos, volcánicos y de tsunami, y mejorar la gestión de riesgos”, el cual se dio inició en el 2014 y finalizó en 2022.

El SGC se enfocó en la definición de escenarios sísmicos fuente de tsunami para el Pacífico Colombiano. Entre los resultados, se construyó el modelo de acoplamiento de placa intersísmico a lo largo de la zona de subducción, mediante los datos de GPS en la red GeoRED de operación continua [6]. Además, se calcularon los valores de velocidad de GPS con respecto a la placa Suramericana a lo largo de la costa Pacífica [2]. Así mismo, estos resultados fueron insumos para construir la propuesta de los escenarios fuente de tsunami, [7] propusieron 72 escenarios, los 6 más extremos fueron presentados en el trabajo de Sanchez et al. [8], identificando las mayores alturas de tsunami en escenarios tales como, Escenario A, B y C denominados “peor escenario creíble”, 1906 y 1979 respectivamente, basados en el modelo de déficit de deslizamiento [7].

Poveda y Pulido [7] proponen el escenario C de 1979, el cual corresponde al terremoto ocurrido el 12 de diciembre de 1979 en el segmento del norte de Esmeraldas y Manglares (sur de Tumaco). Como segundo escenario B el evento ocurrido el 31 de enero de 1906, con ruptura en el segmento de Manglares y Tumaco. Por último, el escenario A “peor escenario creíble”, combinando la ruptura de los dos escenarios anteriores y con magnitud aproximada de 8.9 Mw (**Fig. 2**).

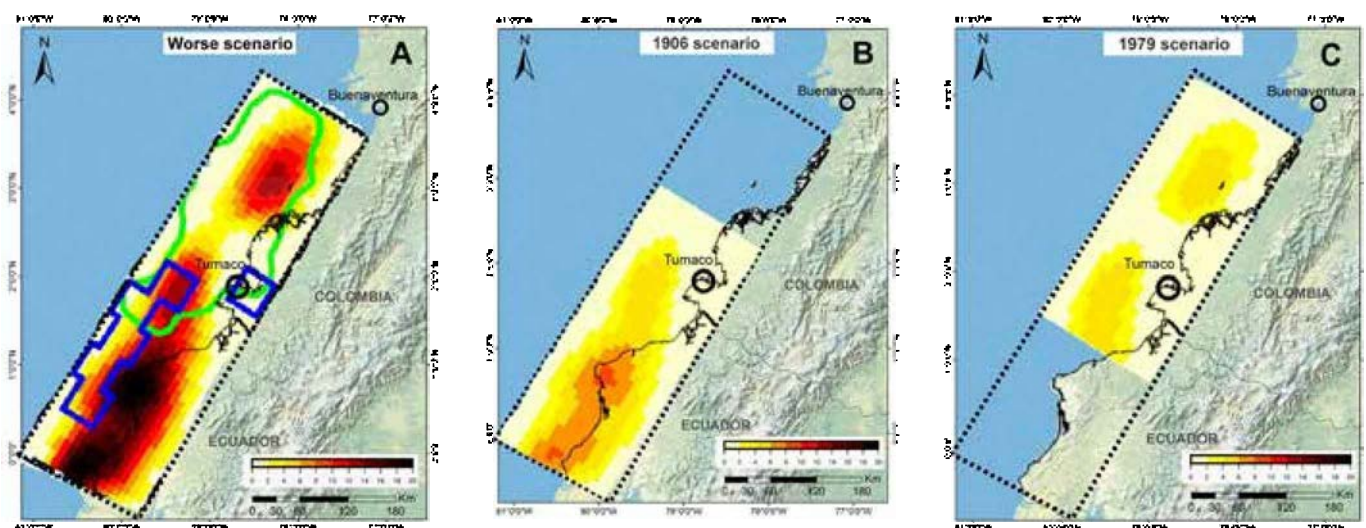


Figura 2. Escenarios basados en el Modelo de deslizamiento interplaca (Fuente: Poveda y Pulido [7]).

Cada escenario se construye por subfallas de 10 km². El escenario de 1906 consta de 680 subfallas, el escenario de 1979 consta de 612 subfallas y el escenario del “peor escenario” consiste en 969 subfallas. Debido a la gran cantidad de subfallas por modelo, se muestra en la **Tabla 1** únicamente las subfallas con el valor de deslizamiento máximo.

Tabla 1. Parámetros de los tres escenarios de déficit de deslizamiento para el modelamiento de tsunami (Tomado de Poveda y Pulido [7]).

Escenario	MW	Long. (°) Epicentro	Lat. (°) epicentro	Prof. (km)	Largo de la subfalla (km)	Ancho de la subfalla (km)	Rumbo (°)	Buzamiento (°)	Rake (°)	Desliz. (m)
“Peor escenario creíble”	~8.9	-79.9541	0.6237	23.2	10	10	30	15	118	20.9
1906	~8.5	-79.9541	0.6237	23.2	10	10	30	15	118	8.4
1979	~8.3	-79.4344	1.79	18	10	10	30	15	118	5.4

2.2 Método de simulación numérica y evaluación de la amenaza

Para la evaluación de la amenaza por tsunami se utilizó el modelo TUNAMI N2, el cual simula la generación, propagación e inundación de tsunami con fuentes de campo cercano a la costa [9]. En el presente estudio se evaluaron tres escenarios con base en un modelo de deslizamiento interplaca como fuentes de generación, presentados en la **Figura 2**. Además, la zona de estudio está condicionada a los cambios en el régimen mareal, para esto se incluyó el nivel del mar de aproximadamente de 2.75 m, propuesto por CCCP [10] (**Fig. 3**).

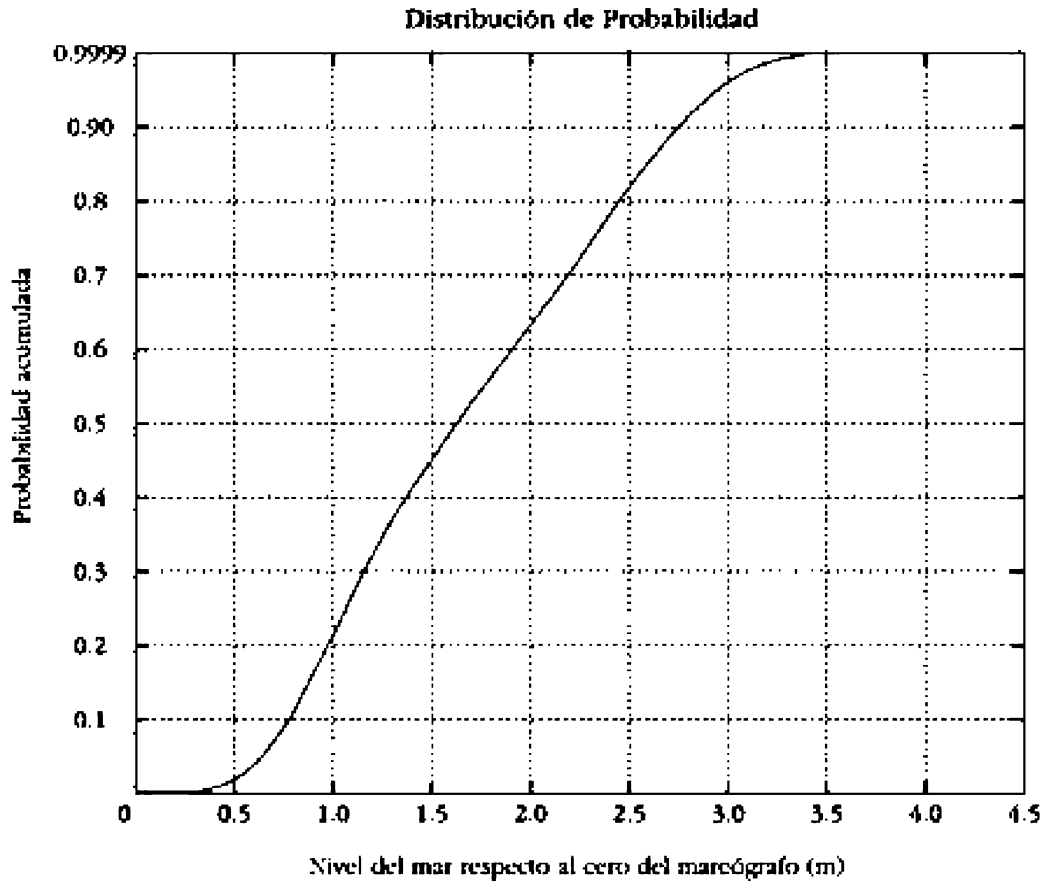


Figura 3. Curva de frecuencia acumulada del nivel de marea en la población de Guapi (Fuente: CCCP [10]).

Otro insumo necesario para llevar a cabo las simulaciones es la configuración topo-batimétrica con una cobertura tanto del área de ruptura de fuente de generación como de la zona de estudio. Para esto, se utilizaron cuatro dominios computacionales (**Fig. 4**), integrando la información topográfica, batimétrica y el nivel de marea alto.

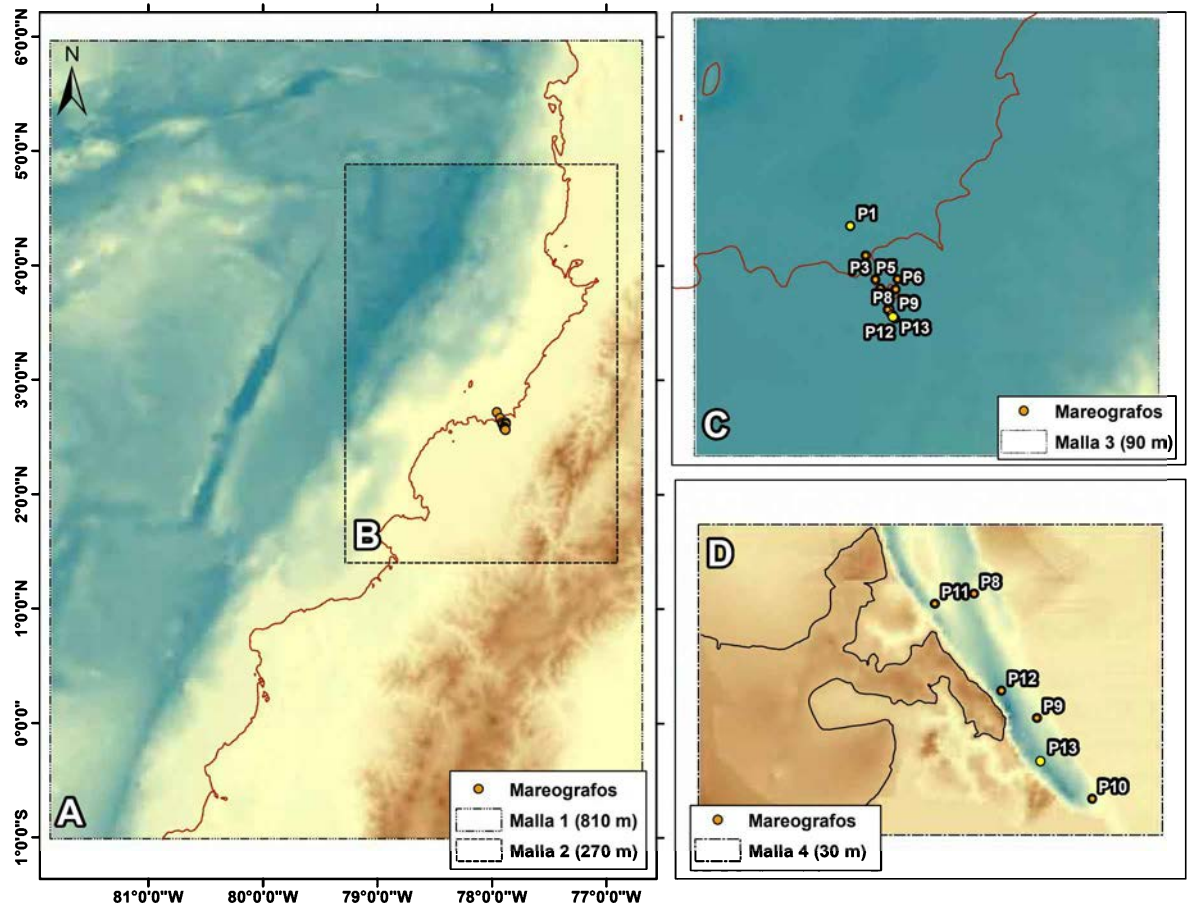


Figura 4. Dominios computacionales: dominio A resolución 810 m; dominio B resolución 270 m; dominio C resolución 90 m y dominio D resolución 30 m. Se presentan los puntos de observación P1 a P13 mareógrafos virtuales.

Para la construcción de los dominios computacionales A, B y C se utilizó la información topobatemétrica de la Carta Batimétrica General de los Océanos (GeBCO, por su acrónimo en inglés), con una resolución original de 30 segundos de arco. Para el dominio computacional D se utilizó la batimetría suministrada por el Servicio Hidrográfico Nacional (SHN) y la información topográfica de levantamiento de detalle realizado por el CCCP, proporcionada por la DIMAR. Toda la información espacial de topografía y batimetría se asoció con el dato de referencia hidrográfica vertical que tienen las bahías de Tumaco y Buenaventura, en este escenario, el valor promedio de la marea baja de sicigia (MLWS) [11].

En cada dominio computacional se efectúa inicialmente la deformación del fondo marino calculado mediante el modelo de deformación elástica propuesta por Okada [12,13] y posteriormente se simuló la propagación e inundación de tsunami, en un tiempo de cálculo total de 5 horas con un paso de tiempo de 0.14 s para el dominio computacional D donde está la zona de evaluación.

Por último, se establecieron 13 puntos de observación con el fin de registrar la evolución de la onda de tsunami desde su propagación en aguas abiertas en la Bahía de Guapi hasta aguas interiores en el canal del río Guapi, propuestos por Castrillón et al. [14] (**Fig. 4**).

3. RESULTADOS DE EVALUACIÓN DE LA AMENAZA

3.1 Deformación vertical del lecho marino

La deformación vertical del lecho marino se relaciona con los parámetros del evento sísmico. Es por esta razón que los valores de mayor magnitud y deslizamiento registrados en la **Tabla 1**, se asocian a mayores niveles de deformación vertical representadas en el escenario del “peor escenario”. En los tres escenarios se observa un levantamiento en aguas profundas cercana a la zona de subducción y una subsidencia desde aguas someras hasta la zona continental (**Fig. 5**), coherente con la distribución espacial del deslizamiento interplaca dados los modelos de la **Figura 2**.

El escenario del “peor escenario” registró niveles máximos de levantamiento durante la deformación vertical del lecho marino aproximadamente de 6 m entre la Bahía Caráquez y Esmeraldas (Ecuador) y de 3.5 m entre la Bahía de Esmeraldas y Buenaventura. Además, niveles máximos de subsidencia hasta de 2.5 m desde la Bahía Caráquez hasta la Bahía Esmeraldas, 2 m hasta la Bahía de Tumaco y de 1.5 m hasta la Bahía de Buenaventura (**Figura 5**).

El escenario de 1906 se despliega desde la Bahía Caráquez en Ecuador hasta la Bahía de Tumaco al sur de Colombia, con niveles máximos de levantamiento durante la deformación del lecho marino aproximadamente de 2.5 m y niveles máximos de subsidencia de 1 m. Mientras el escenario de 1979 se localiza más al norte de Ecuador desde la Bahía Esmeraldas hasta la Bahía de Buenaventura y presenta niveles máximos de 1.5 m y 1 m de levantamiento y subsidencia, respectivamente (**Fig. 5**).

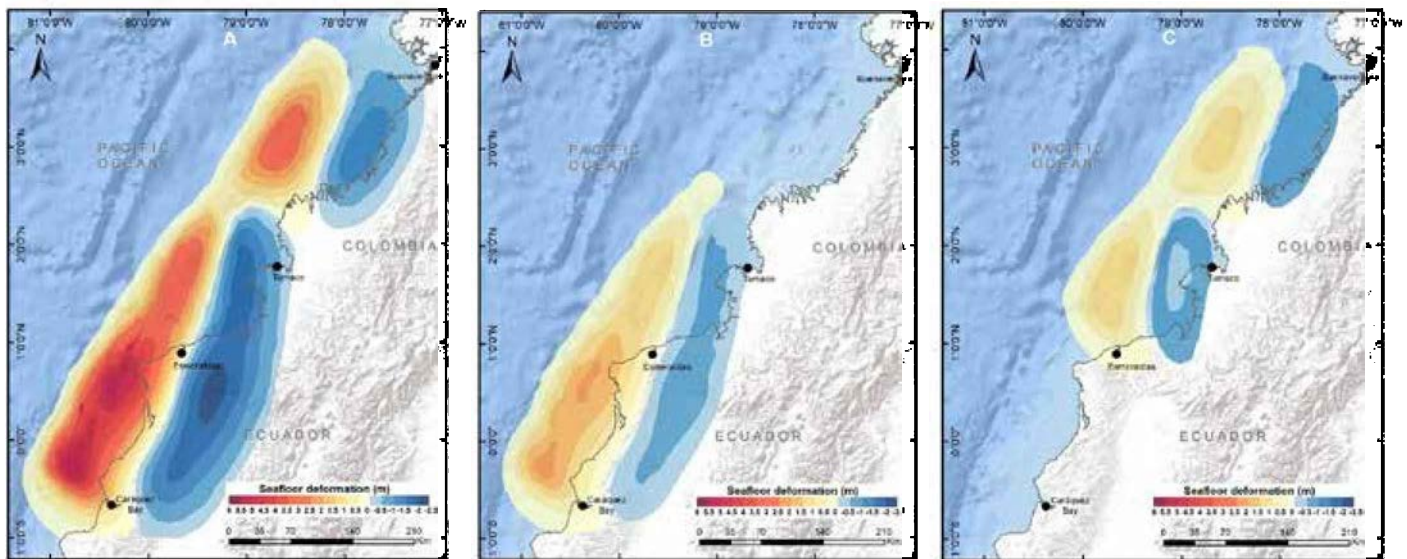


Figura 5. Deformación vertical del fondo marino para cada uno de los tres modelos de deslizamiento interplaca en la zona de subducción colombo-ecuadoriana. La figura de la izquierda corresponde a la deformación del fondo oceánico del “peor escenario”, la figura central muestra la deformación del modelo de 1906, y la figura de la derecha corresponde a la deformación del modelo de 1979 [12].

3.2 Estimación de la máxima amplitud de tsunami

La **Figura 6** muestra la propagación del tsunami desde la zona de generación hasta su llegada a la Bahía de Guapi. La altura se mide en la entrada de la bocana del río de Guapi (P1) y se evidencia una mayor

altura de tsunami en el escenario “peor escenario” de aproximadamente 1.9 m; comparado con los valores máximos de 0.3 m y 0.9 m asociados a los escenarios 1906 y 1979, respectivamente. Estos valores se respaldan por los resultados de la **Figura 5**, teniendo en cuenta que el modelo del “peor escenario” genera la mayor deformación vertical del fondo marino.

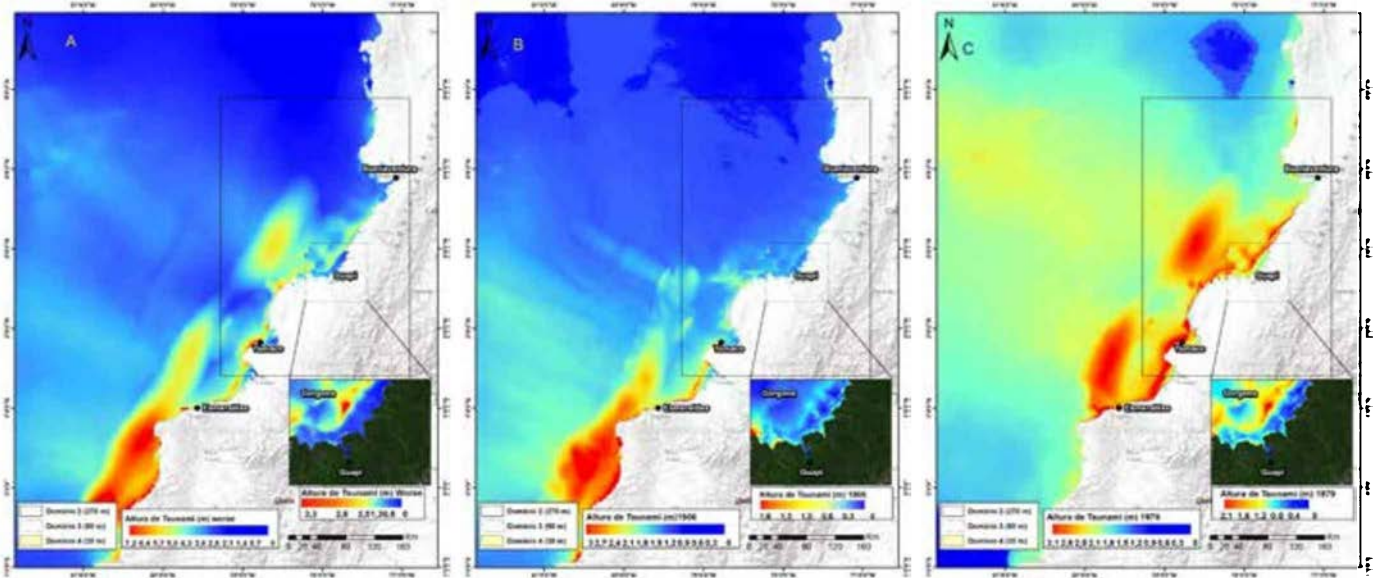


Figura 6. Resultados de la propagación del tsunami para los tres modelos de deslizamiento interplaca en la zona de subducción colombo-ecuatoriana. La figura de la izquierda corresponde al modelo del “peor escenario”, la figura central corresponde al modelo de 1906 y la figura de la derecha corresponde al modelo de 1979.

La **Tabla 3** contiene información de las máximas alturas de tsunami registradas durante la propagación. En los tres escenarios el comportamiento de la altura de tsunami es descendente, asociado a una pérdida de energía durante el paso por el canal del río Guapi. Sin embargo, se presentan diferencias asociadas a las condiciones iniciales de cada escenario, por ejemplo, en el “peor escenario” los valores continúan relativamente constantes, entre 0.1 y 0.2 m, desde el punto P6 hasta el casco urbano de Guapi. En cambio, los escenarios 1906 y 1979, este comportamiento se ve reflejado desde los puntos P3 y P5, respectivamente (ver **Fig. 4**).

Tabla 2. Alturas de Tsunami (m) registradas en los puntos de observación.

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13
Peor Escenario creíble	1.9	1.0	0.7	0.6	0.3	0.2	0.1	0.1	0.2	0.2	0.1	0.2	0.2
1906	0.3	0.3	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.2	0.2	0.1	0.2	0.2
1979	0.9	0.6	0.5	0.4	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1

Respecto a los tiempos de propagación del tsunami desde la fuente de cada escenario, se registra en el punto P1 (**Fig. 7**), la máxima altura de tsunami de 1.9m en el minuto 39, 0.3 m en el minuto 84 y 0.9 m en el minuto 40, para los escenarios “peor escenario creíble”, 1906 y 1979, respectivamente. El punto P12 ubicado cercano al muelle turístico del casco urbano de Guapi, registra la máxima altura de tsunami de 0.2 m en el minuto 156 para el “peor escenario creíble”, de 0.15 m en el minuto 160 para el escenario de 1906 y de 0.1 m en el minuto 230 para el escenario de 1979 (**Fig. 7**). La diferencia significativa en estas alturas podría deberse a la disipación de energía que el tsunami sufre por la fricción con el fondo marino y con la interacción de la geomorfología propia del canal del río Guapi.

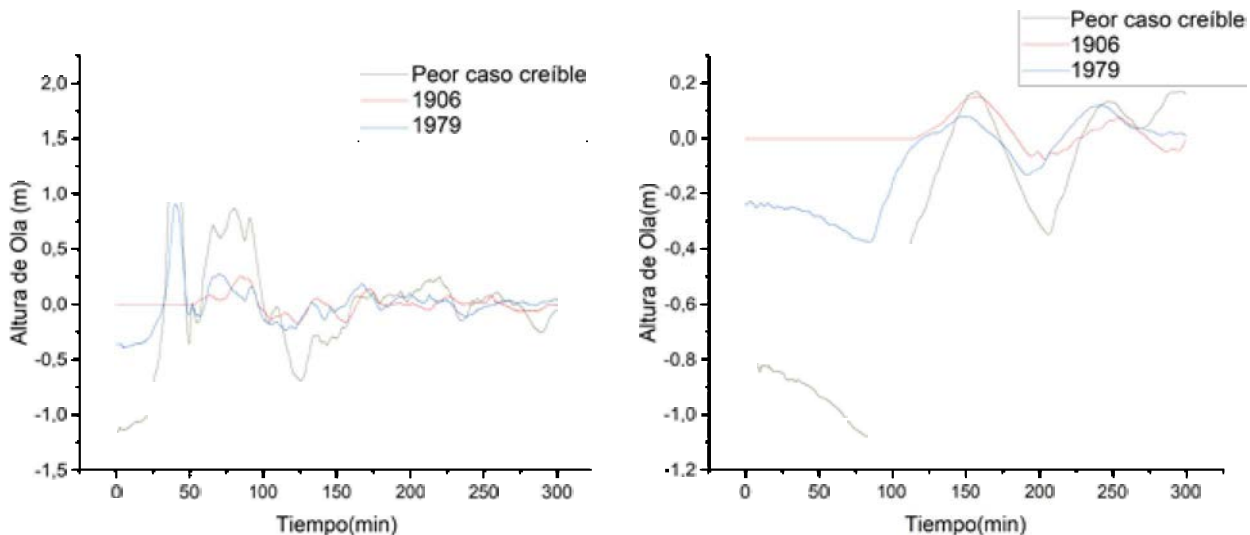


Figura 7. Registro de la evolución de la onda tsunami al propagarse en la Bahía de Guapi. El gráfico de la izquierda corresponde al punto P1 y el gráfico de la derecha al punto P12.

El código de simulación permite la visualización de los resultados en la malla computacional de detalle, obteniendo una mayor cobertura espacial de los datos. En la **Tabla 4** se muestran los diferentes resultados, como los valores de máxima altura, máxima de distancia de inundación y el área de inundación. Las diferencias en la máxima altura del tsunami están directamente relacionadas con los valores máximos de la deformación vertical del fondo marino, los cuales se presentan en el escenario del “peor escenario”, en comparación con los eventos de 1906 y 1979, por consecuencia, en este escenario se generan las mayores alturas en la propagación del tsunami.

Tabla 3. Máxima altura de tsunami, máxima distancia de inundación y área de inundación producto de la simulación en el casco urbano de Guapi.

	Peor escenario	Escenario histórico 1906	Escenario histórico 1979
Max. altura de tsunami (m)	1.9	0.3	0.9
Max. distancia de inundación (km)	0.35	0.103	0.104
Área de inundación (km²)	0.4	0.1	0.1

3.3 Profundidad de inundación

La **Figura 8** muestra la distribución espacial y el rango de la profundidad de inundación para el escenario “peor escenario”, la cual se determinó evaluando los resultados de los tres escenarios del modelo de deslizamiento interplaca. En dicha comparación se identificó que los mayores valores de profundidad de inundación en toda el área del casco urbano de Guapi se dan en el “peor escenario”, con un rango de 0.01 m a 0.3 m de profundidad de inundación.

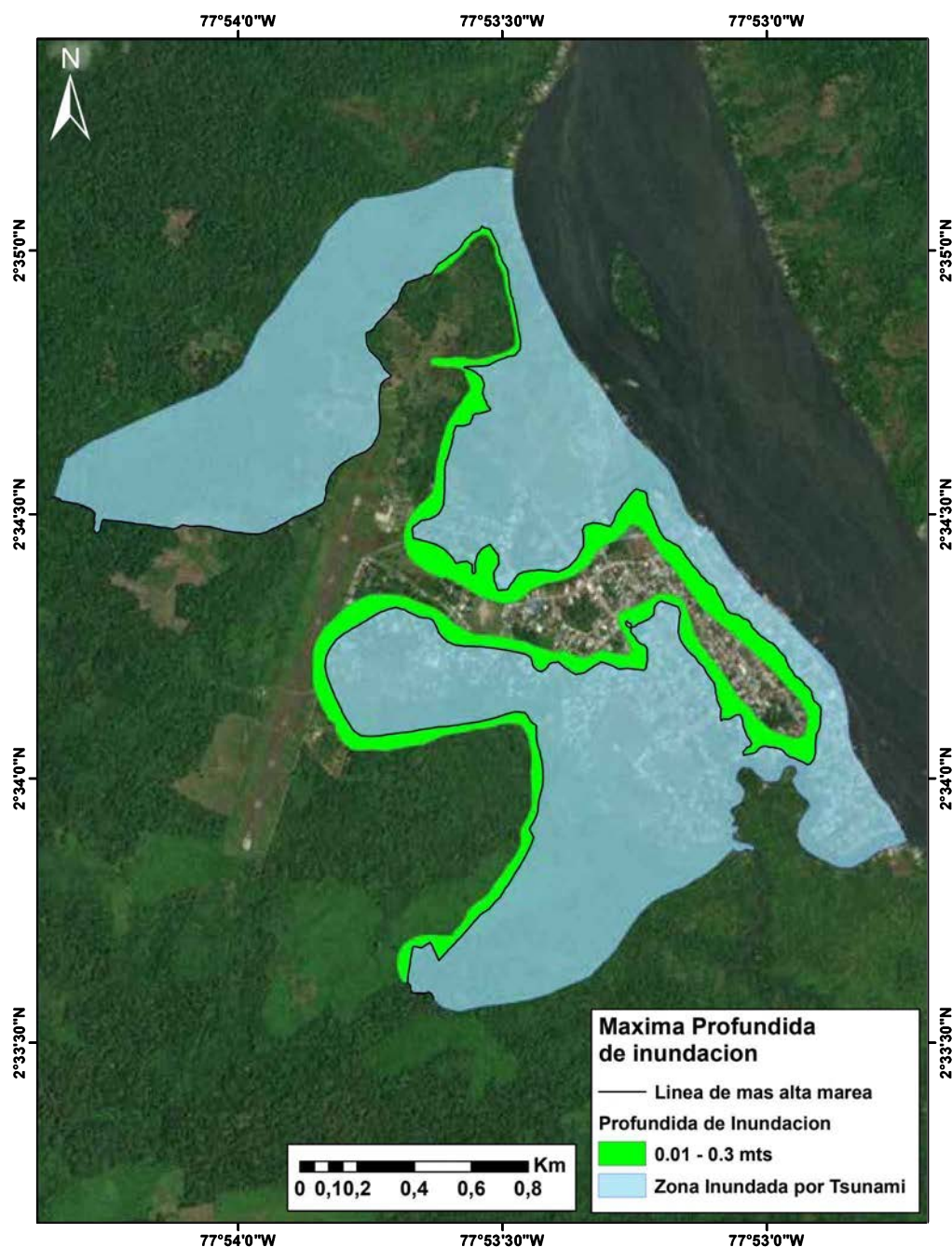


Figura 8. Mapa de máxima profundidad de inundación a partir del escenario del “peor escenario creíble”. El área celeste es inundada con una amplitud de tsunami superior al 0.5 m sobre el nivel del mar de 2.75 m, el área en verde es la profundidad de inundación donde el tsunami pasa la línea de costa.

Castrillón et al. [14] evaluaron la amenaza por tsunami en el casco urbano de Guapi a través de la de la investigación Para el desarrollo de sus resultados utilizaron como condiciones iniciales ocho epicentros potenciales con fallas rectangulares de deslizamiento uniforme asociadas a dos tipos de magnitudes (7.9 Mw y 8.6 Mw) y los estados de marea media y alta. Como producto concluyen que el escenario de magnitud 7.9 Mw en el epicentro Z3 y en ambos estados de marea, es el escenario más desfavorable, alcanzando una altura de ola de tsunami máxima de 3 m en la zona de estudio, sobre todo en el sector zona rural y los barrios aledaños a las quebradas del Barro y del Diablo. Sin embargo, el presente estudio ha modificado la condición inicial del tipo de fuente de generación de tsunami, utilizando fuentes con distribución de deslizamiento no homogéneo, las cuales representan con mayor precisión la condición inicial de las ondas de tsunami en campos cercanos [15].

Además, la información de batimetría y topografía de detalle y la aplicación del modelo TUNAMI N2, permitió calcular la profundidad de inundación, logrando así determinar en el presente estudio que el escenario más desfavorable llamado “peor escenario creíble” puede generar una altura de tsunami de 3.3 m y una profundidad de inundación de 0.3 m. No obstante, se tiene como limitante la falta de registros mareográficos de eventos de tsunami anteriores para corroborar las amplitudes de tsunami ya que se podría validar los resultados de amplitud del tsunami en la zona de estudio, pero existe concordancia con la extensión de las áreas de la inundación, presentados por Castrillón et al [14]. La aplicación del método determinista actualiza la amenaza por tsunami en Guapi, obteniendo información del mayor impacto que se tendría en la zona de estudio por eventos extremos en el LPC, logrando generar un nuevo mapa de inundación por tsunami insumo para la estrategia de respuesta y plan de mitigación. Sin embargo, en futuros trabajos sería conveniente complementar la evaluación, aplicando el método de análisis probabilístico de la amenaza por tsunami (PTHA por sus siglas en inglés) con el fin generar mayor información en cuanto a la relación de diferentes escenarios de tsunami con la probabilidad de excedencia para un periodo de retorno establecido, lo cual ayudaría a mejorar la estrategia de respuesta y plan de mitigación definiendo su implementación en corto, mediano y largo plazo.

Otro avance, sería utilizar modelos numéricos en los que se tuviera en cuenta la dispersión de frecuencia para tsunamis de campo cercano, cambios morfológicos por erosión y la capacidad de modelar el transporte de sedimento durante el evento de tsunami, lo cual precisaría los resultados de impacto de tsunami.

Las casas de palafitos (casas sobre el agua sostenidas por pilotes de madera) en Guapi están construidas para soportar la marea, cambio “suave” de nivel del mar; sin embargo se hipotetiza que con una inundación por tsunami, debido a la fuerza y arrastre de material que trae consigo el evento estas casas no soportarían y serían dañadas por el tipo de construcción, esto hace que la amenaza por tsunami sea más peligrosa que la marea, esto sumado a que el Municipio no tiene definidas zonas ni rutas de evacuación para tsunami.

4. CONCLUSIONES

En el análisis para determinar la amenaza por tsunami se identificó que el escenario más desfavorable para el casco urbano de Guapi es el escenario denominado “peor escenario” del modelo de deslizamiento interplaca, en comparación de los escenarios 1906 y 1979. Además, es coherente con lo reportado en otras ciudades como el casco urbano de San Andrés de Tumaco e Isla Cascajal en Buenaventura [8].

Con base en este escenario, se determinó la profundidad de inundación máxima para la población de Guapi, estableciendo la zona intermareal inundada donde se presenta altura del tsunami, y desde este punto se define las áreas de profundidad de inundación por tsunami con su respectivo rango de profundidad de inundación. Este mapa es un insumo base para definir zonas de menor exposición, estimar los daños potenciales causados por un tsunami y crear planes de mitigación ante tsunamis en el casco urbano de Guapi.

Los resultados de la altura máxima de inundación de tsunami generados por el modelo TUNAMI N2 mostraron valores significativamente iguales a los reportados por otros autores, sin embargo, este modelo aporta más información a la evaluación de la amenaza, ya que permite calcular la profundidad de inundación. Como resultado se obtuvo un rango de profundidad de inundación no superior a los 0.3 m, relativamente bajo en comparación con otros estudios en otras ciudades del Pacífico colombiano. Esta diferencia podría deberse principalmente a la interacción del tsunami con la morfología del fondo marino y la configuración costera, en particular la morfología del canal del río Guapi, lo que puede generar una disipación de la energía del tsunami.

Es recomendable continuar con el estudio de evaluación de amenaza por tsunami en otras zonas del Pacífico colombiano, aplicando el método determinista, pero complementando con otros métodos como el análisis probabilístico de amenaza por tsunami, además del uso del modelamiento numérico incluyendo cambios de topografía por erosión y transporte de sedimentos.

PUNTOS CLAVE

1. El presente estudio se enfoca en la evaluación de la amenaza por tsunami exactamente sobre el casco urbano de Guapi.
2. Durante la etapa de simulación se construyeron modelos digitales del terreno con información de detalle.
3. La inundación por tsunami se determinó teniendo en cuenta la máxima ola de tsunami, sin embargo, el comportamiento habitual de propagación de un tsunami se da mediante un tren de varias olas, los cuales se pueden visualizar en los registros de la evolución de la onda.
4. Para determinar el riesgo por tsunami es necesario incluir la vulnerabilidad y exposición que presenta actualmente la comunidad.

NECESIDADES FUTURAS

1. Con el fin de verificar una posible subestimación de la amenaza en Guapi, se debe considerar realizar estudios enfocados en el comportamiento de la ola de tsunami con morfología costera deltaica.
2. El modelo de TUNAMI N2 ha sido aplicado en varios escenarios históricos a nivel mundial, sin embargo, es necesario realizar la calibración de los resultados con registros mareográficos.

3. Para la evaluación de la amenaza por tsunami existen varios códigos de simulación, pero se recomienda utilizar la misma fuente sísmica generadora, con el fin de ser comparables los resultados.
4. Se hace necesario la participación de las entidades gubernamentales para el desarrollo de planes de mitigación ante tsunami, con a base a los productos científicos desarrollados en este estudio.
5. Estudios probabilísticos para toda la costa y en detalle para cada localidad
6. Modelos numéricos que involucren cambios topográficos por erosión y transporte de sedimentos.
7. Estudios de recurrencia de tsunami a partir de estudios de paleotsunami.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores no declaran conflicto de intereses

CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA CRediT

Conceptualización: Ronald Sánchez, Paola Quintero. Metodología: Fabio Realpe, Daniel Ruiz. Software: Fabio Realpe. Redacción de primera versión: Paola Quintero, Jhonatan Cristian Paz. Escritura. Revisión y edición de segunda versión: Ronald Sánchez, Paola Quintero, Daniel Ruiz, Jhonatan Cristian Paz. Figuras y tablas: Daniel Ruiz. Administración de proyecto: Ronald Sánchez.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen en primer lugar al Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Pacífico (CCCP) y a la Dirección General Marítima (DIMAR) por impulsar, apoyar y financiar iniciativas para gestión del riesgo por tsunamis en las costas colombianas, con el fin de aportar a la seguridad integral marítima. También al Servicio Geológico Colombiano (SGC) y a JICA por su contribución científica en el marco del proyecto SATREPS.

IDENTIFICACIÓN DE AUTORES

Ronald Efrén Sánchez Escobar	https://orcid.org/0000-0003-1452-4553
Paola Andrea Quintero Rodríguez	https://orcid.org/0000-0002-4559-2375
Fabio Hernán Realpe Martínez	https://orcid.org/0000-0002-9632-1196
Daniel Ruiz Figueroa	https://orcid.org/0000-0003-1304-1875
Jhonatan Cristian Paz Quintero	https://orcid.org/0000-0002-4916-5063

BIBLIOGRAFÍA

1. Mejía, Isabel. & Parra, E. (2002). *Mapa preliminar de unidades geomorfológicas Plancha 340 Guapi. Memoria Explicativa*. <https://recordcenter.sgc.gov.co/default.aspx>
2. Sagiya, T., & Mora-Páez, H. (2020). Interplate Coupling along the Nazca Subduction Zone on the Pacific Coast of Colombia Deduced from GeoRED GPS Observation Data. *The Geology of Colombia*, 4 (December). <https://doi.org/10.32685/pub.esp.38.2019.15>
3. Raigoza Arango, J. & Bolaños Cifuentes, R. E. (2013). Aspectos sismo-tectónicos. En: Dimar-CCCP. *Estudio de la Amenaza por Tsunami y Gestión del Riesgo en el Litoral Pacífico Colombiano* (pp. 31–50). Dirección General Marítima-Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Pacífico. Serie de Publicaciones Especiales Vol. 8. San Andrés de Tumaco, Colombia.
4. Ustáriz Manjarrés, G.M. & Reyna Moreno, J.A. (2013). Tsunami: Gestión del Riesgo en el Territorio Colombiano. En: Dimar-CCCP. *Estudio de la Amenaza por Tsunami y Gestión del Riesgo en el Litoral Pacífico Colombiano* (pp. 93–108). Dirección General Marítima- Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Pacífico. Serie Publicaciones Especiales Vol. 8. San Andrés de Tumaco, Colombia.
5. COI (Comisión Oceanográfica Intergubernamental). (2019). *Glosario De Tsunamis*. Unesco/Ioc, 85, 50. <http://ioc.unesco.org>
6. Mora-Páez, H., Kellogg, J. N., Freymueller, J. T., Mencin, D., Fernandes, R. M. S., Diederix, H., LaFemina, P., Cardona-Piedrahita, L., Lizarazo, S., Peláez-Gaviria, J. R., Díaz-Mila, F., Bohórquez-Orozco, O., Giraldo-Londoño, L. & Corchuelo-Cuervo, Y. (2019). Crustal deformation in the northern Andes – A new GPS velocity field. *Journal of South American Earth Sciences*, 89(October 2018), 76–91. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2018.11.002>
7. Poveda, E. & Pulido, N. (2019). *Earthquake rupture and slip scenarios for Ecuador-Colombia subduction zone*. <http://sismo.sgc.gov.co:90/>
8. Sanchez, R., Otero, L., Guerrero, A.M., Puentes, M., Mas, E., Koshimura, S., Adriano, B., Urrea, L. & Quintero, P. (2020). Tsunami hazard assessment for the central and southern pacific coast of Colombia. *Coastal Engineering Journal*, 62(4), 540–552. <https://doi.org/10.1080/21664250.2020.1818362>
9. Imamura, F., Yalçiner, A. C., & Ozyurt, G. (2006). *Tsunami modelling manual (TUNAMI model)*
10. CCCP (Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Pacífico). (2010). Determinación del régimen medio y extremal del nivel del mar en la bahía de Guapi.
11. Álvarez Machuca, M.C., Pulido Nossa, D.A., Solano Trullo, L.J. & Oviedo Barrero F. (2018). Construcción de la superficie hidrográfica de referencia vertical para las bahías de Buenaventura y Málaga, Pacífico colombiano. *Boletín Científico CIOH*, (36):53–69. <https://doi.org/10.26640/22159045.438>
12. Okada, Y. (1985). Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 75(4), 1135–1154. <https://doi.org/10.1785/BSSA0750041135>
13. Okada, Y. (1992). Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 82(2), 1018–1040. <https://doi.org/10.1785/BSSA0820021018>
14. Castrillón, C., Martínez, M., Puentes, M., Sánchez, R. & Tocancipá Falla, J. (2015). *Conocimiento local y riesgo por tsunami en Guapi, Cauca*. Editorial Universidad del Cauca <https://doi.org/10.26640/9789587322002.2015>
15. Ulutas, E. (2013). Comparison of the seafloor displacement from uniform and non-uniform slip models on tsunami simulation of the 2011 Tohoku-Oki earthquake. *Journal of Asian Earth Sciences*, 62, 568–585. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2012.11.007>

CAPÍTULO
3

Metodología para captura de datos y caracterización en estudios de valoración cualitativa multiamenaza en corredores viales apoyada en TIC

Alejandro Franco Rojas*, Álvaro Rodríguez Páez, Sandra Yanet Velazco Flórez, Juan Pablo Londoño Linares & Orlando Rincón Arango

Programa de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad de La Salle. Carrera 2 No. 10 – 70, Bogotá, Colombia

*Autor de contacto: Alejandro Franco Rojas, Facultad de Ingeniería, Universidad de La Salle. Carrera 2 No. 10 – 70, Bogotá, Colombia. Correo-e: afacor@unisalle.edu.co

Resumen

Los estudios de amenaza y riesgo son escasos en los entornos rurales y en la infraestructura lineal como las vías. En estos estudios prevalece un enfoque correctivo, en lugar que uno preventivo, tradicionalmente estos estudios han estado enfocados hacia los movimientos en masa, sin incluir otra componente fundamental como son las inundaciones que también afectan significativamente a los corredores viales. Así pues, este capítulo presenta el proceso de desarrollo e implementación de un aplicativo móvil para el registro de incidencias por parte de los actores viales, con el objetivo de dinamizar el proceso de caracterización de corredores viales y fortalecer los procesos de valoración de amenaza. Se desarrolló una metodología a partir de variables significativas multiescala (regional, zonal y local) definiendo indicadores para su valoración cualitativa. Lo anterior se desarrolló como parte de un proyecto para Valoración Cualitativa Multiamenaza (remoción e inundación) en la red no concesionada colombiana. Los resultados probaron la utilidad del instrumento de captura para registrar las condiciones de amenaza y vulnerabilidad de cada corredor vial a partir de la inspección visual de obras de drenaje, obras de estabilización y puntos críticos. Se realizó la validación en 635 km de vía, logrando identificar positivamente sitios críticos con actividad reciente e histórica comprobada. Adicionalmente, se reconoció que los

elementos expuestos en el corredor vial incluyen no solo la superficie de rodadura, sino también sus obras de drenaje, estabilización y protección, valorando la exposición, fragilidad y resiliencia. La utilidad a futuro de esta aplicación dependerá de una sostenida captura de la información por parte de los administradores viales, facilitando la identificación ágil y oportuna de zonas prioritarias mediante un modelo que se auto-refina y se hace más robusto, permitiendo la asignación efectiva de recursos por parte de los tomadores de decisiones.

Palabras clave: amenaza, remoción, inundación, vulnerabilidad, elemento expuesto, fragilidad

Methodology for data capture and characterization in multi-hazard qualitative assessment studies in road corridors supported by ICT

Abstract

Hazard and risk studies are scarce in rural zones and infrastructure such as roads. These studies are prone to a corrective approach despite a preventive approach. Traditionally, these studies have focused on mass wasting without including other fundamental components, such as floods that significantly affect the road. Thus, this chapter presents the experiences gathered in the process of development and implementation of a mobile application for the registration of incidents by road actors, intending to boost the process of characterization of road corridors and strengthen hazard assessment processes. A methodology was developed based on significant multiscale variables (regional, zonal and local) defining indicators for their qualitative assessment. This was developed as part of a project for Multi-Hazard Qualitative Assessment (mass wasting and flooding) in the Colombian secondary road network. The results demonstrated the instrument's usefulness in identifying each road's hazard and vulnerable conditions from the visual inspection of drainage structure, stabilization elements, and critical points. Validation was carried out on 635km of roads, positively identifying critical sites with recent and historical proven activity. Additionally, it was possible to recognize that the elements exposed in the road corridor include not only the pavement surface, but also its drainage, stabilization structure, assessing the exposure, fragility, and resilience. The usefulness of this application will depend on maintaining the capture of information by road managers, facilitating the agile and timely identification of priority areas. In this way is consolidated a model that is self-renewed and becomes more robust, allowing the allocation of resources by decision-makers.

Keywords: Hazard, Removal, flood, vulnerability, exposed element, fragility.

1. INTRODUCCIÓN

Algunos fenómenos naturales, y eventos antrópicos no intencionales y sociales causan daños materiales en la infraestructura vial. Priorizar las intervenciones tendientes a minimizar el impacto de estos daños requiere identificar adecuadamente la amenaza y vulnerabilidad para estimar el riesgo, a través del desarrollo de metodologías de recolección de datos, evaluación, análisis y reporte. La mayoría de los estudios de riesgo abordan los factores amenazantes de forma individual, originando pocos estudios de riesgo con valoración de multiamenaza.

Caja 1. Cooperación interinstitucional en ciencia y tecnología

Los actores del sistema de CTel deben proveer información para la toma de decisiones y lograr que el conocimiento se aproveche socialmente de manera permanente tanto por actores especializados como por la sociedad en el sentido más amplio posible [1]. Así, la cooperación en ciencia y tecnología interinstitucional público-privada es requisito para construir un territorio más resiliente y para gestionar eficientemente la infraestructura del país.

Desde 2020, la Universidad de la Salle, la Universidad del Quindío y el Instituto Nacional de Vías (INVIAS) se aliaron para desarrollar metodologías que valoran cualitativamente el nivel de riesgo con enfoque multiamenaza, incluyendo factores amenazantes como movimientos en masa, e inundaciones sobre los corredores viales como elementos expuestos [2].

La alianza hace confluir el conocimiento experto de administradores viales y la academia. Los administradores viales conocen de primera mano la historia y realidad de la infraestructura. Las Universidades aportan el soporte teórico de la base biofísica del territorio, así como la captura y análisis de información técnica especializada.

Fruto de la alianza, el proyecto tuvo el objetivo de desarrollar una aplicación para la captura de datos a nivel local que pueda apropiarse a futuro por la entidad y la comunidad científica, que facilite la captura y sistematización de información local que ha sido una de las debilidades de la metodología de cuantificación de amenaza.

Generalmente estos estudios de amenaza y riesgo se concentran en la valoración de áreas urbanas, resultando escaso su aplicación a entornos rurales e infraestructura de carácter lineal como las vías. En el caso de la infraestructura vial, prevalece un enfoque que se centra en las intervenciones correctivas y puntuales, en lugar de una aproximación preventiva sobre el conjunto del corredor lineal. Para cambiar este enfoque, el INVIAS con diversas entidades ha desarrollado una metodología para valorar la amenaza y vulnerabilidad física de la infraestructura vial a su cargo a través del desarrollo de un aplicativo móvil para la captura eficiente de la información a escala local y de la zona del derecho de vía (**Fig. 1**).

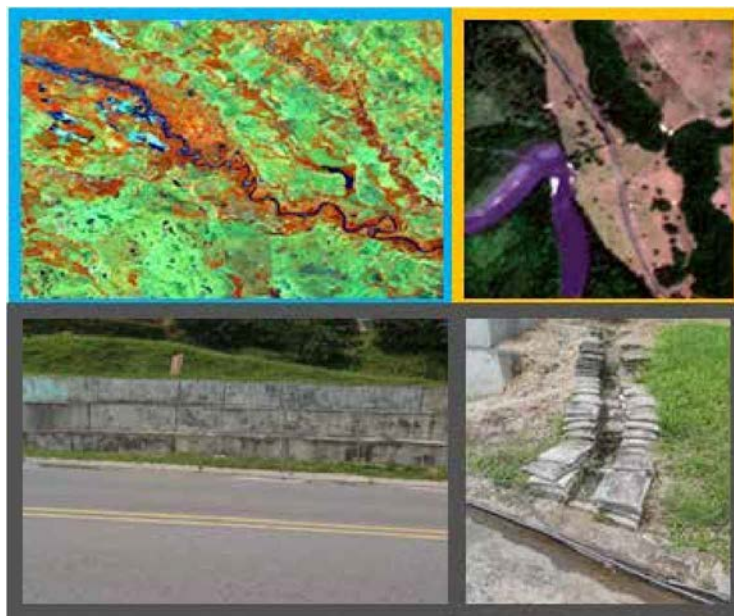


Figura 1. Ejemplos de información según ámbitos: a) Regional imagen índice NVIR, b) zonal: proximidad de obras viales y derecho de vía a la ronda del río, c) y d) local: obras de arte.

Dentro del proceso de desarrollo de la aplicación se identificaron las variables que aportan a caracterizar cada factor amenazante (ver **Figuras 6, 10 y Caja 5**) y que valoran el nivel de vulnerabilidad para determinar cuáles aportan significativamente a generar indicadores que cuantifiquen y valoren el nivel de riesgo dentro de un esquema multiamenaza objeto de estudio, y que pudieran capturarse mediante una aplicación móvil dentro del corredor socioeconómico.

El considerar una aproximación combinada entre remoción e inundación no obedeció a un capricho ni a un simple interés académico. El posicionamiento de las principales ciudades de Colombia en las estribaciones de la cordillera de Los Andes implica el reto de construir vías en zonas de ladera, resultando frecuentemente expuestas a deslizamientos y procesos de movimientos en masa. Cifras de la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD) y la Corporación OSSO indican que entre 1914 y 2019 se han presentado 67,789 eventos en Colombia de los cuales 20,085 han sido inundaciones (30% del total) y son el fenómeno con el mayor número de eventos registrados [2]. De acuerdo con Gil-Guirado et al. [3], el 80% de las inundaciones afectan vías, ya sea producto de eventos torrenciales en zonas de ladera o eventos de tipo estático en zonas de planicie. La interacción de la infraestructura con el sistema físico da lugar a la exposición tanto a procesos de remoción como a inundación, que en conjunto deterioran el sistema vial, afectan la calidad de vida, condicionan el desarrollo económico del país y demandan importantes inversiones en mantenimiento y conservación.

El objetivo del presente capítulo es presentar el avance y resultados obtenidos en el desarrollo de una metodología para la estimación cualitativa de multiamenaza (movimientos en masa, e inundación) soportada en herramientas TICs para corredores viales a cargo del Instituto Nacional de Vías.

2. CONCEPTOS GENERALES

La Política Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (Ley 1523 de 2012) establece los lineamientos y procesos a seguir para avanzar en el conocimiento y reducción del riesgo y en el manejo de los desastres

[4], constituyendo el marco de referencia para las instituciones públicas, privadas y las personas en general (ver **Caja 2**).

En el marco de esta normativa, para realizar una adecuada recolección y caracterización de los datos, es fundamental precisar cuáles son las mejores fuentes de información primarias o secundarias. Esto garantiza generar evaluaciones y análisis con mejores recomendaciones para la reducción del riesgo y manejo de desastres a implementar por los tomadores de decisiones.

Caja 2. Definiciones clave.

La UNGRD establece los principios y conceptos que orientan la gestión del riesgo de desastres en Colombia [5], algunos de los más relevantes para este estudio son:

Vulnerabilidad: susceptibilidad o fragilidad física, social, ambiental, económica o institucional que tiene una comunidad de ser afectada o sufrir efectos adversos en caso de que un evento físico peligroso se presente. Corresponde a la predisposición de sufrir pérdidas o daños de los seres humanos y sus medios de subsistencia, así como de sus sistemas físicos, sociales, económicos y de apoyo que puedan afectarse [5]. De esta manera la sociedad y los elementos expuestos dejan de concebirse como un factor pasivo en la formación del riesgo, logrando incluso anticiparse, resistir y recuperarse a los impactos de un evento amenazante[6].

Elemento expuesto: se refiere a personas, medios de subsistencia, servicios ambientales, recursos económicos, sociales, bienes culturales, infraestructura que por su localización pueden ser afectados por la manifestación de una amenaza [4]. La correcta definición del elemento expuesto ya sea la infraestructura, la comunidad o el servicio, es clave para establecer las características que aportan a su vulnerabilidad.

Fragilidad y/o susceptibilidad: el concepto de fragilidad y/o susceptibilidad, es el grado de afectación de un elemento frente a un fenómeno amenazante de origen natural, antrópico no intencional, se puede definir también como la mayor o menor predisposición de un elemento a sufrir daños ocasionados por un evento que suceda u ocurra sobre un determinado espacio geográfico. En el caso de la infraestructura, permite diferenciar entre una afectación temporal que no compromete su funcionalidad y una afectación que obliga a la reposición de la obra.

Resiliencia: la capacidad de un sistema, comunidad o sociedad expuestos a una amenaza para resistir, absorber, adaptarse y recuperarse de sus efectos de manera oportuna y eficaz, lo que incluye la preservación y la restauración de sus estructuras y funciones básicas [5]. Introduce un conjunto de cualidades que fomentan un proceso de adaptación exitosa y de transformación, a pesar de los riesgos y la propia adversidad, otorgando un carácter dinámico a la gestión del riesgo de desastres[6].

Por su parte el Decreto 1807 de 2014, define las condiciones, escalas, especificaciones e insumos para incorporar de manera gradual la gestión del riesgo en los planes de ordenamiento territorial municipal y distrital, con énfasis en movimientos en masa, inundaciones y avenidas torrenciales. Como resultado el país ha avanzado en su aplicación, especialmente en entornos urbanos caracterizados espacialmente por su homogeneidad, densidad y ocupación zonal; sin embargo, muchos de los criterios y métodos aplicables a escala municipal no resultan apropiados para una infraestructura vial, caracterizada

por ser un elemento lineal, poco denso, disperso y heterogéneo, razón por la cual se debe partir del reconocimiento de esta infraestructura como el elemento expuesto, considerando sus variables y condiciones particulares.

2.1 Corredor vial como elemento expuesto

Para recolectar datos y valorar la amenaza y vulnerabilidad física se requieren determinar no solo los elementos que conforman el corredor vial que no se limitan a la calzada y superficie de rodadura. Por el contrario, deben incluirse los taludes adyacentes, las obras de estabilización, las obras de drenaje, puentes, bermas y las distintas capas localizadas sobre la subrasante (**Fig. 2**).

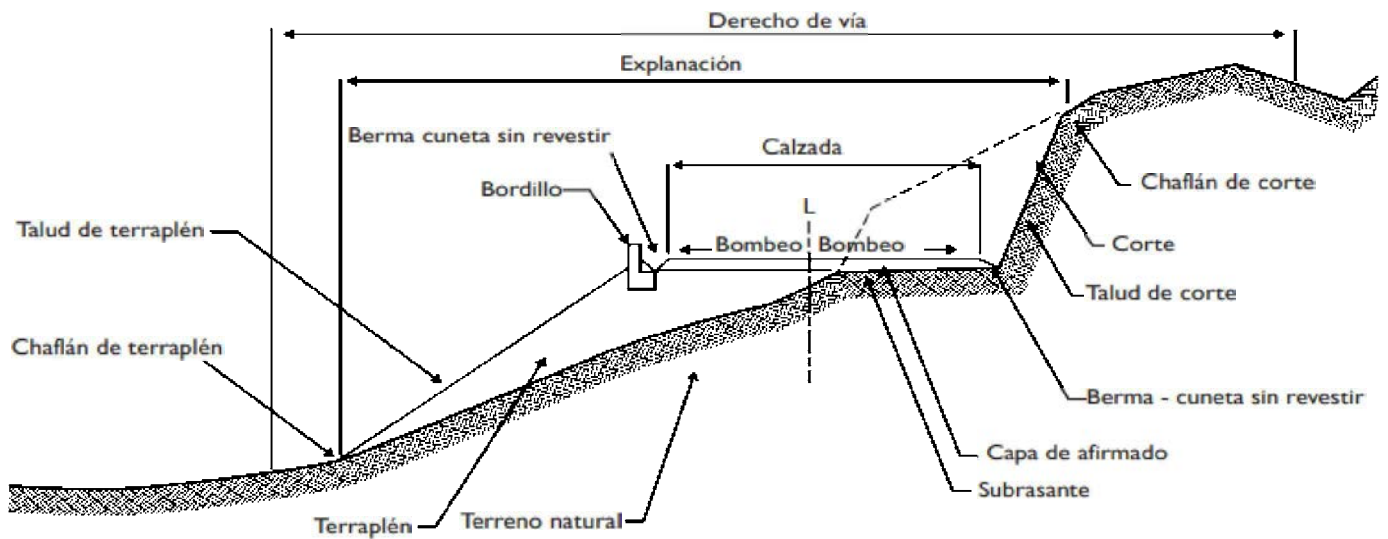


Figura 2. Sección transversal típica de la vía [20].

Todos los elementos que se mencionaron anteriormente hacen parte del corredor vial y por esta razón se llamarán elementos expuestos con el fin de realizar la construcción de los instrumentos para aplicarse por el inspector vial en la recolección de datos para su caracterización en el momento que se efectúe el recorrido de uno de los tramos que conforman el corredor vial a estudiar.

La clasificación de los elementos que conforman el corredor vial se obtuvo a partir de los manuales para la inspección visual de obras de estabilización, de drenaje, puentes y pontones, pavimentos flexibles y rígidos de los estudios de investigación del estado actual de las obras de la red nacional de carreteras [7 -11].

Con respecto a la estructura de la vía, se estableció el tipo de pavimento como flexible, rígido o articulado, la calzada que la conforma con uno o varios carriles, separador, berma, bordillo, terraplén subrasante, subbase, base y capa de rodadura, teniendo en cuenta los criterios de diseño y construcción establecidos por el administrador y operador de la vía.

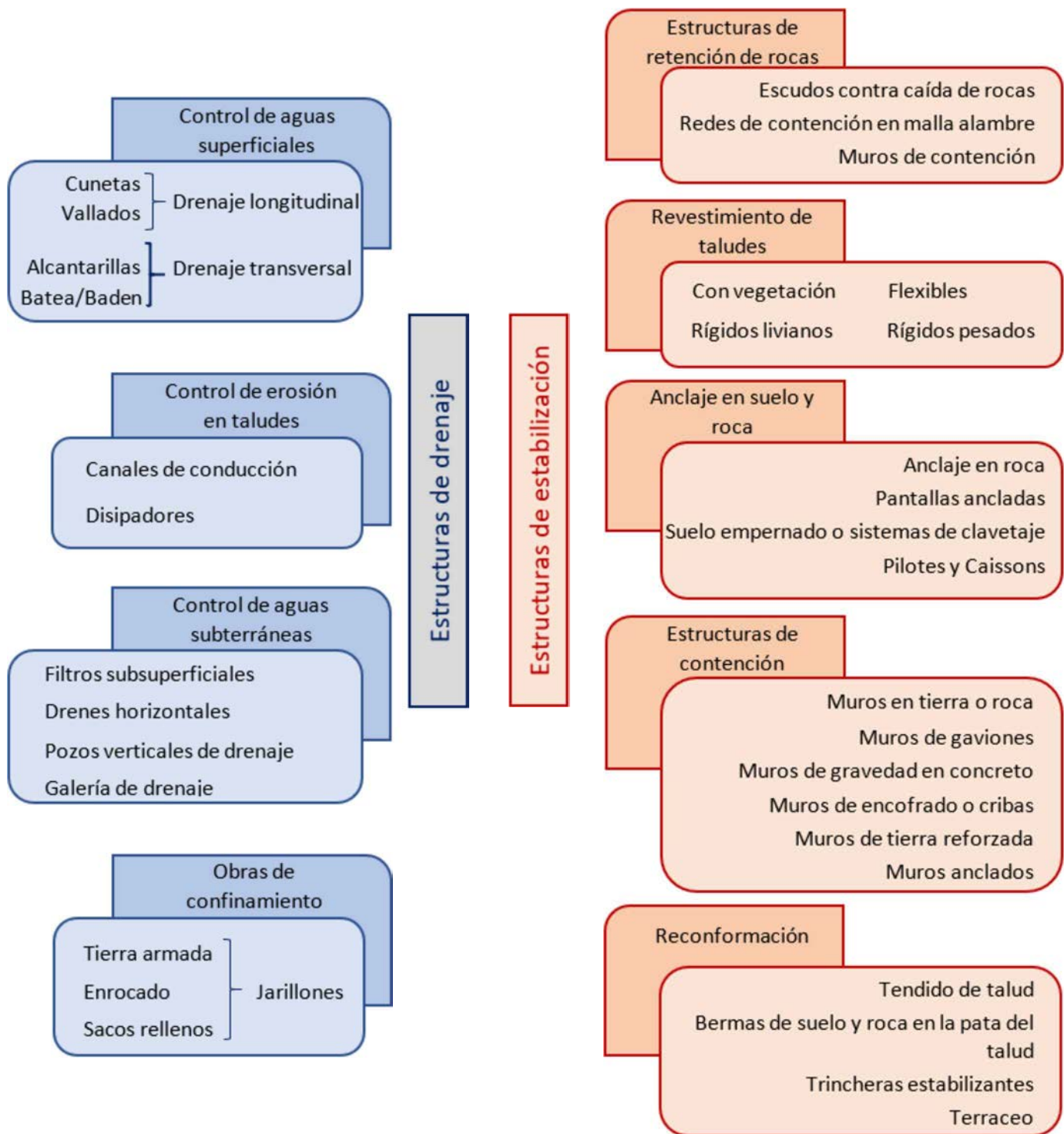


Figura 3. Estructuras de drenaje y de estabilización de taludes utilizadas para el manejo de eventos amenazantes en la infraestructura vial, organizadas taxonómicamente en categorías y subcategorías. Izquierda (color azul) las estructuras de drenaje y a derecha (color rosado) las estructuras de estabilización. Cada subcategoría corresponde a una tipología de obra, a la cual se asocian los tipos más comunes en proyectos viales.

Los elementos asociados al manejo de eventos amenazantes sobre la vía se agruparon en estructuras de drenaje y estructuras de estabilización teniendo en cuenta la orientación respecto a la vía, geometría, materiales y función principal (**Fig. 3**).

Una vez establecida la exposición del elemento, se seleccionan los fenómenos amenazantes a estudiar, en este caso los eventos por movimiento de masas, las inundaciones, y estado físico de la vía, que en conjunto permiten valorar si existe la probabilidad de afectación sobre la estructura inspeccionada, así como determinar el grado de exposición por la manifestación de una amenaza [3].

3. PROPUESTA METODOLÓGICA PARA EL DESARROLLO DE LA APLICACIÓN

El instrumento de recolección de datos de la infraestructura vial debe aportar a unificar los criterios y parámetros a registrar, a su correcta georreferenciación y análisis espacial. Para lograrlo se desarrolló una propuesta metodológica de ocho etapas.

Primera etapa: se identificaron diferentes variables con su respectiva escala de valor y/o métrica de medición. Para la integración de la información se tomó como referente la unidad base de análisis para corredores viales definida por el Servicio Geológico Colombiano (SCG) [4], denominada *corredor geotécnico*, la cual fue adaptada y mejorada dentro del convenio de cooperación 736 de 2020 [5]. En este proyecto se definieron tres dominios (**Fig. 4**), que permiten diferenciar las zonas con las que la infraestructura vial se interrelaciona. La combinación de estos tres dominios define variables regionales como el clima y la geología, aspectos de alcance zonal como es la interacción con las actividades socioeconómicas y detalles de escala local como el estado de conservación de la infraestructura y las dimensiones de las obras de drenaje.

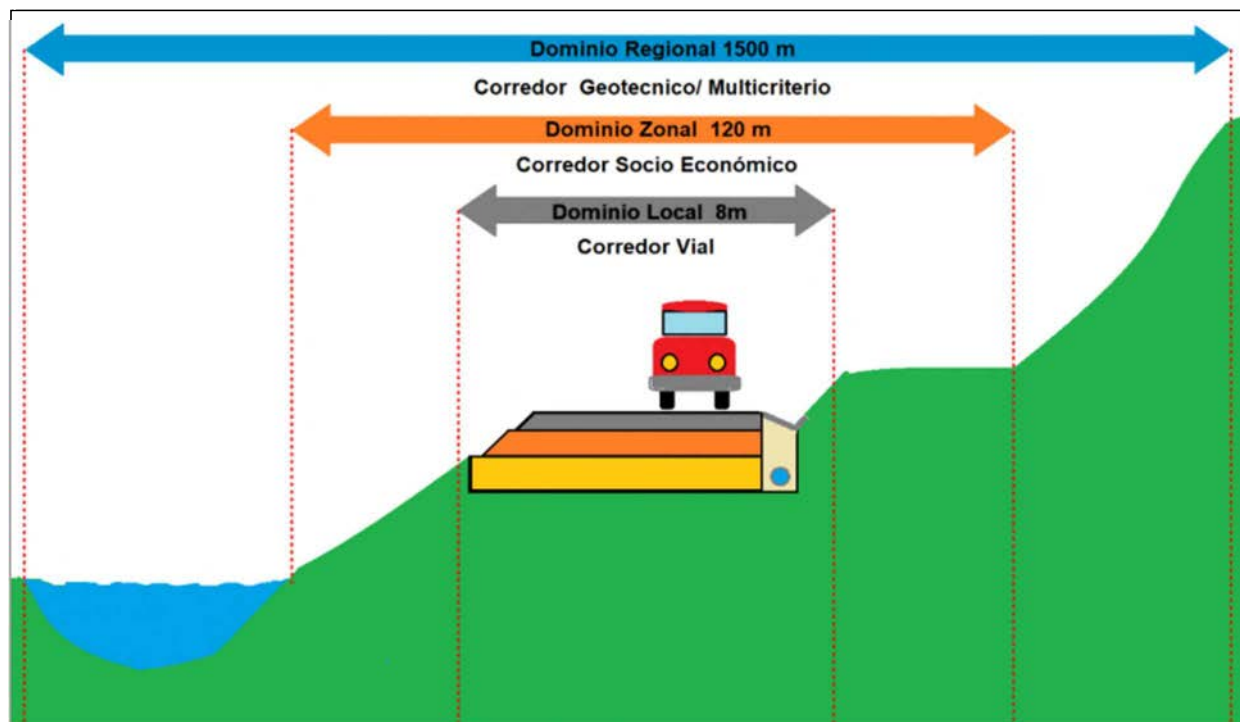


Figura 4. Detalle de dominios para el manejo de la información.

Segunda etapa: se desarrolló un proceso de identificación de las características relevantes del elemento expuesto a evaluar y las variables claves que permitirían su caracterización, apoyados en el criterio experto del grupo de especialistas, así como de actores de la vía (administradores viales).

Tercera etapa: a partir de dicha información se procedió a desarrollar los formatos de base para la captura de la información en campo, así como las rúbricas de calificación del estado de la infraestructura y de valoración, todos estos aspectos relevantes para el desarrollo del aplicativo móvil para la captura de información en campo. Dicho aplicativo debe permitir la espacialización de la información recolectada y su posterior migración a diferentes bases de datos con el propósito de valorar cualitativamente tanto amenaza como vulnerabilidad física (**Fig. 5**). En la medida que el conjunto de herramientas propuestas logra identificar correctamente las condiciones de amenaza y vulnerabilidad de puntos críticos o de control, la metodología puede validarse o en su defecto someterse a un nuevo proceso de revisión y actualización, dando lugar a un proceso o sistema adaptativo.

Una característica transversal en todo el proceso de construcción de una metodología para la captura de datos y valoración cualitativa multiamenaza en corredores viales apoyada en TIC, es el conocimiento experto. Este conocimiento al representarse de manera especial por los aportes, acompañamiento y validación por los administradores viales, quienes son profesionales contratados por el INVIAS para realizar labores de seguimiento, gestión, inventario físico, la atención de emergencias [12] y mantenimiento periódico de la infraestructura, razón por la cual, tienen un conocimiento detallado de la historia de cada corredor vial, incluyendo puntos críticos, eventos amenazantes y condiciones físicas.



Figura 5. Secuencia metodológica para captura de información y valoración de amenaza y vulnerabilidad apoyado en TIC.

Cuarta etapa: iniciado el proceso para determinar el nivel de riesgo multiamenaza, se establece que el elemento expuesto es el corredor vial, conformado por su estructura física, obras de drenaje, estabilización y protección, como se menciona en el numeral anterior. Al definir con claridad el elemento expuesto, se logró precisar los parámetros de infraestructura susceptibles ante movimiento en masa e inundaciones, así como la vulnerabilidad en la estructura física, con sus respectivas dimensiones, materiales y especificaciones.

Quinta etapa: para la calificación cualitativa del riesgo a escala local, se estableció una métrica de medición para cada variable, que se integró en una matriz de solicitaciones tendiente a determinar su aporte a la valoración de amenaza y vulnerabilidad en tres rangos: Alta, Media y Baja.

Sexta etapa: se elaboró un prototipo de herramienta técnica que permite sistematizar los resultados de la inspección física del elemento expuesto, teniendo como criterio básico los fenómenos amenazantes de movimiento de masas, inundaciones y la estructura física del corredor vial. Este prototipo se aplica de manera remota en la inspección virtual de la infraestructura vial, apoyado en herramientas como Google Maps e imágenes satelitales. Lo anterior con el propósito de identificar variables no consideradas, la validez de las métricas propuestas y la valoración de puntos críticos en la infraestructura. Como resultado, se logra la actualización del instrumento de captura de información previo a la aplicación in situ. En este caso, la inspección visual de obras de drenaje y obras de estabilización se limita a puntos críticos, en los cuales de manera simultánea un grupo de profesionales realiza la captura de datos con el prototipo técnico corregido, permitiendo identificar no solo la pertinencia de las variables y las métricas, sino también, la interfaz de captura de información y la disparidad de criterios y/o conceptos.

Séptima etapa: se sometió el instrumento de captura de información al personal especializado en la inspección e inventario de vías, es decir, los administradores viales, quienes previa capacitación, realizaron una retroalimentación integral del instrumento, su interfaz y variables incorporadas, dando lugar a un instrumento refinado.

Octava etapa: una vez se contó con el instrumento refinado fue posible realizar la captura sistemática de información en campo en 635 km de corredores viales de la territorial Boyacá (Zipaquirá-Barbosa, Páez-Puerto Boyacá y Sogamoso-Pajarito) de los cuales se presentarán algunos resultados a lo largo del documento a manera de ejemplo, para su posterior evaluación y análisis de datos para la presentación de resultados a través de mapas georreferenciados y estadísticas que dan cuenta de las condiciones de cada corredor vial en términos de amenaza y vulnerabilidad.

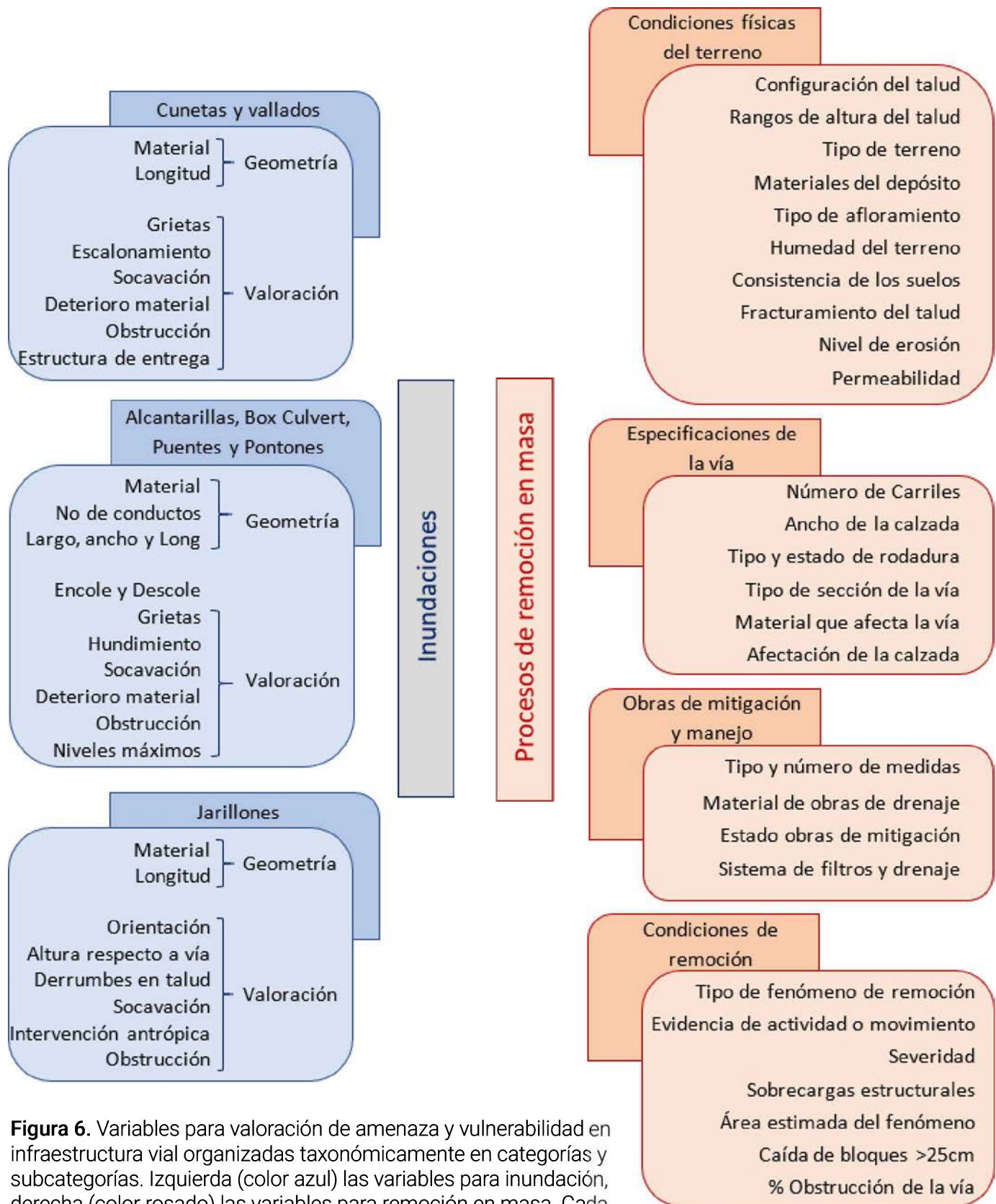


Figura 6. Variables para valoración de amenaza y vulnerabilidad en infraestructura vial organizadas taxonómicamente en categorías y subcategorías. Izquierda (color azul) las variables para inundación, derecha (color rosado) las variables para remoción en masa. Cada subcategoría corresponde a una tipología de obra a inspeccionar a la cual se asocian las especificaciones o criterios a valorar.

4. AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA

El fundamento conceptual de la aproximación metodológica para la determinación de la amenaza por movimientos en masa se basa en desarrollos previos generados a nivel internacional y que han sido apropiados y traídos a la realidad del contexto nacional por las guías metodológicas propuestas por el SCG [13–15]. Los métodos definidos para la evaluación de la amenaza a diferentes escalas y para diferentes elementos de infraestructura se seleccionaron con la colaboración de la comunidad académica y actores relevantes en el contexto nacional en el área de la gestión del riesgo. Así pues, en el sentido de no redundar en lo ya tratado ampliamente en estos estupendos documentos en lo referente a la determinación de amenaza por movimientos en masa, omitiremos las definiciones básicas. Sin embargo, se invita al lector a revisarlas con detalle si es de su interés en las referencias antes mencionadas, lo anterior nos permite presentar de una forma más eficaz los planteamientos y mejoras realizados dentro de esta investigación. Así pues, en lo referente a movimientos en masa solo se retoman de forma algunos conceptos claves para permitir entender la propuesta metodológica desarrollada.

Siguiendo el marco referencial definido por SGC (2017) [4] para determinar la amenaza por movimiento en masa a escala 1:2,500, se estructuró a partir de tres ejes principales o etapas: la caracterización geo ambiental, un análisis de susceptibilidad y la caracterización de la amenaza. Para cada una de estas etapas se definieron factores y temáticas para poder realizar la zonificación del territorio. La metodología para determinar la amenaza por movimientos en masa se fundamenta en las guías metodológicas del Servicio Geológico Colombiano (SCG) [8–10]. Los métodos para evaluar la amenaza en diferentes escalas y para diferentes elementos de infraestructura se seleccionaron colaborativamente con la academia y actores nacionales de la gestión del riesgo de desastres.

En general, para estudios de amenaza la información se ha obtenido predominantemente desde el nivel regional, complementándola con algunos datos de orden local. El proceso se orienta principalmente hacia el establecimiento de un inventario de procesos que se considera como el insumo principal para la zonificación de la amenaza [4]. La información regional resulta clave para determinar la amenaza de un área con una extensión significativa, como por ejemplo un municipio. Pero cuando se trata de una obra lineal como es una vía, este aspecto deja de ser un *sine qua non*, pues muchas variables que se producen a nivel regional no logran incorporarse mientras que variables a nivel local permiten valorar de forma más precisa la amenaza, en específico mejorando la determinación de la susceptibilidad y generando datos más asertivos y confiables a la escala de análisis de la vía. Por otra parte, existe otra debilidad en el proceso cuando se aplica a una vía y corresponde al momento de asignación de la actividad histórica debido a la baja frecuencia de eventos que se obtienen debido a que los inventarios históricos de movimientos en masa, tales como el sistema de información de movimientos en masa SIMMA del Servicio Geológico Colombiano, para muchos de los tramos de las vías nacionales presenta un subregistro. Muestra de ello, en la Figura 7 se evidencia para la vía Tunja - Páez (Departamento de Boyacá), que a pesar de ser una vía con alta frecuencia de eventos por kilómetro, especialmente en el tramo entre Ramiriquí-Miraflores-Páez; al revisar no se observa ningún evento registrado en el inventario de movimientos en masa.

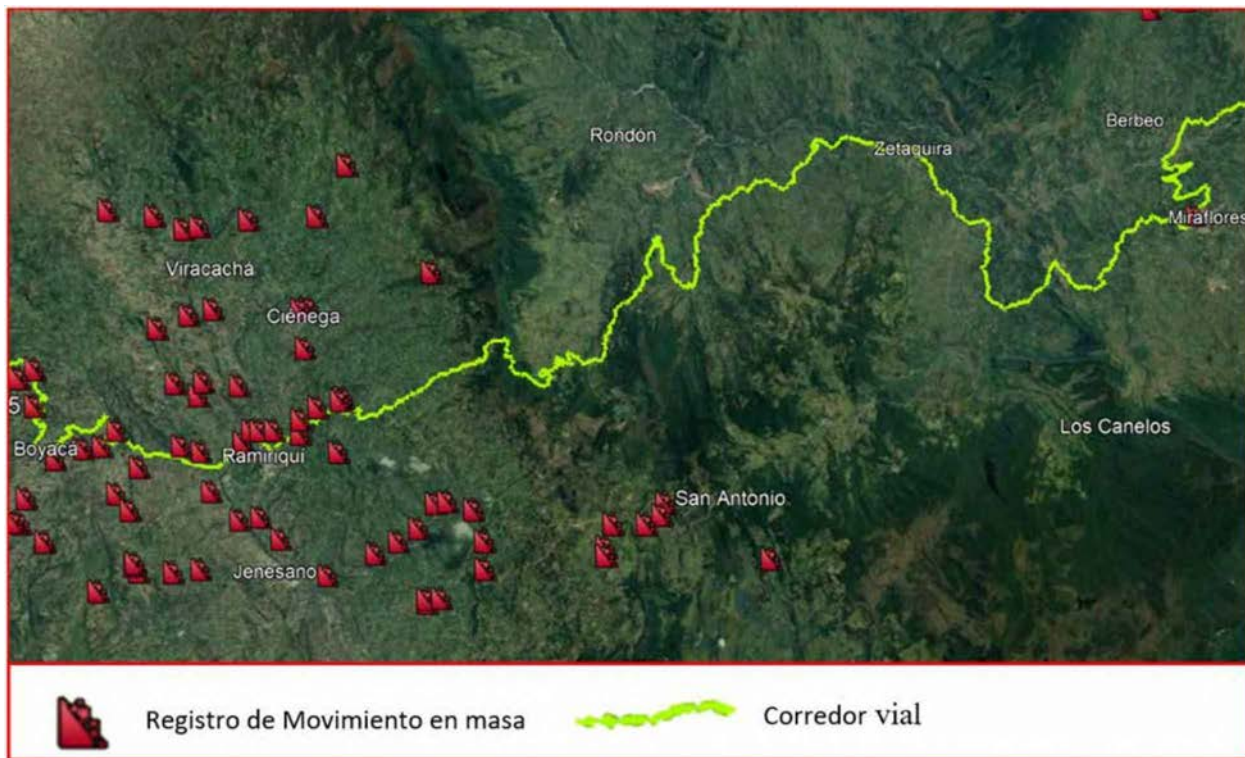


Figura 7. Muestra de subregistro o falta de completitud en inventarios de movimientos en masa para tramos críticos de las vías nacionales (vía Tunja Páez Departamento de Boyacá).

Lo anterior pone de manifiesto la necesidad que para una evaluación certera de amenaza en corredores viales es muy importante la captura de información a nivel local por parte de los actores que usan o que administran la vía. Si bien, aproximaciones metodológicas previas aportan una serie de formatos para la captura de la información a nivel local, muchas de las variables que se requiere registrar exigen un alto nivel de conocimiento experto de la persona que lo va aplicar, de tal manera que le permita identificar y valorar cada aspecto de una forma certera. Lo anterior hace que estas metodologías no sean de fácil aplicación para corredores viales extensos en periodos de tiempos cortos, pues se requeriría de gran cantidad de recursos físicos, económicos y personal. Esta problemática de la adquisición de la información fue discutida por Van Westen [16], quien estudió los diferentes problemas que se presentan al tratar de realizar cuantificaciones de riesgo a escalas de detalle.

Finalmente, otro reto con la aplicabilidad radica en la formulación de un esquema para la integración de la información capturada en campo, y así armonizarla con la información regional y zonal. Por lo anterior, dentro del proceso del presente proyecto fue necesario en una primera instancia identificar los diferentes flujos de la información que se producen a las diferentes escalas (Fig. 8). También identificar las condiciones de esta para poder definir un esquema de captura e integración de la información, el cual se estructuró a partir de un proceso de utilización de TIC, con el objetivo de facilitar la captura de la información por parte de los actores de la vía (administradores viales y/o usuarios) sin tener que depender de la disponibilidad de expertos en geología y geotecnia para realizar el levantamiento de las variables en campo tanto a nivel zonal como a nivel local.

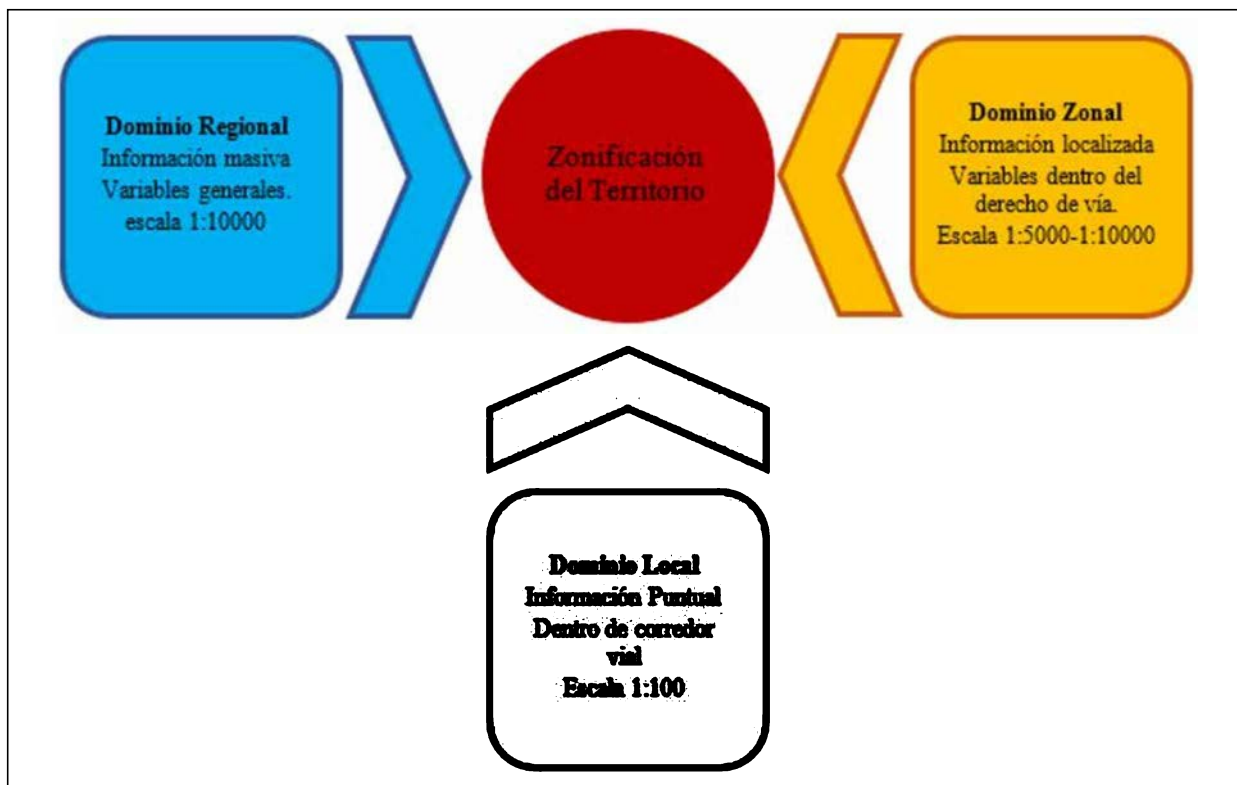


Figura 8. Flujo de información para un proceso de zonificación para un corredor vial.

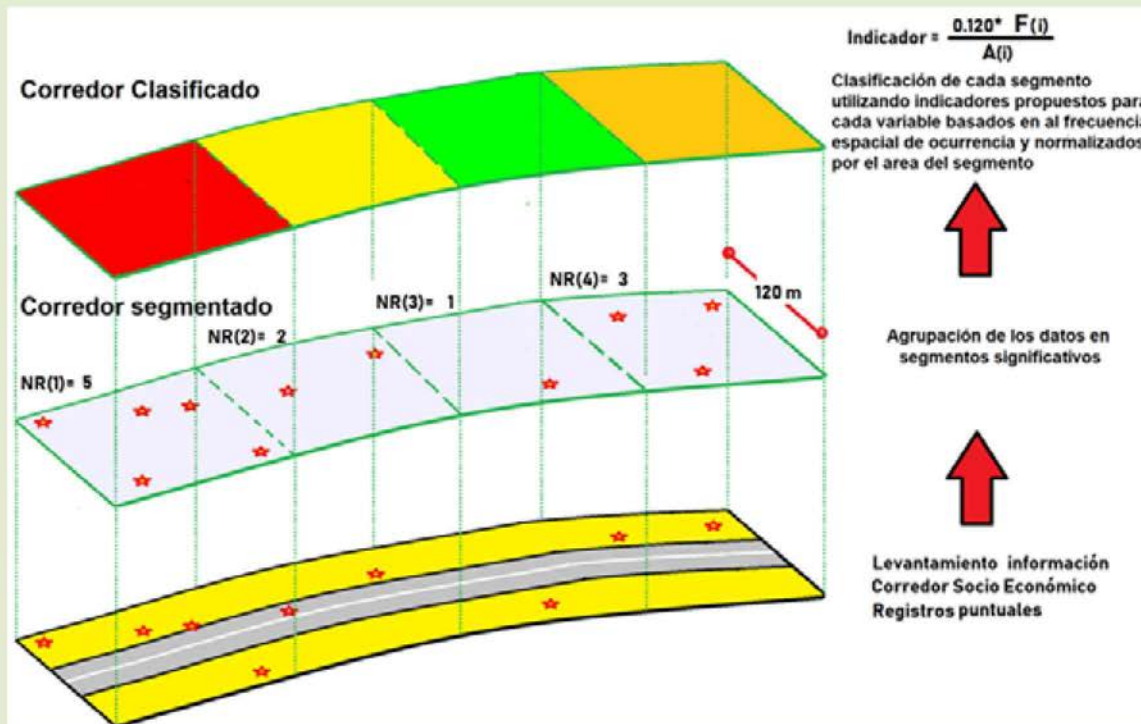
Dentro de este contexto, fue necesario realizar una valoración inicial de las condiciones y variables de la metodología propuesta en el 2018 por el Servicio Geológico Colombiano en conjunto con INVIAS [13], proponiendo mejoras para facilitar la aplicabilidad en corredores viales, y garantizando una respuesta que permitiera una sinergia entre las variables de los tres dominios. Así pues, se incorporaron nuevas variables para refinar la determinación de la susceptibilidad (LSI). En total se identificaron 16 variables para incorporarse en el refinamiento de la susceptibilidad y de la amenaza.

El formato original para levantamiento de información se desarrolló en Excel (Fig. 9), incluyendo la localización del evento, descripción, registro fotográfico, esquema, condiciones topográficas y geométricas de la sección, agentes externos que son posibles detonantes del evento, intervención con medidas de mitigación, la valoración del proceso de remoción (tipo, actividad reciente, caída de bloques, área afectada, entre otros) y características del terreno (composición suelo-roca, permeabilidad, humedad, fracturamiento, entre otros).

Caja 3. Esquema de mejoramiento de susceptibilidad y armonización de datos



Cada una de las nuevas variables se captura de acuerdo con el dominio donde se ubica: regional (repositorios de información abierta), zonal y local (captura de datos en campo mediante aplicación móvil).



La segmentación del corredor vial en tramos relativamente homogéneos permite la agrupación de variables y eventos de distintas escalas, para su armonización y valoración estadística.


1 Localización			3 Condiciones Topográficas y geometría de la sección																																																																																																								
Territorial	Nombre de la vía		Tipo de Terreno	Sección de la Vía																																																																																																							
Sector	Latitud (°)	Longitud (°)	Rango altura	Tipo de rodadura de la vía																																																																																																							
PR inicial	PR final	Sentido	Numero Carriles	Ancho de la calzada (m)																																																																																																							
Fecha	Levantado por		4 Agentes externos posibles detonantes en el área de influencia (UMVCS)																																																																																																								
2 Descripción del evento o incidente.			Alcantarillas 1) Si	Reservorios de agua 2) No	Fuentes de agua (artificial) 3) Si																																																																																																						
Código Reg	Motivación del registro		Cantidad	Cantidad	Cantidad																																																																																																						
			Excavaciones	Botaderos	Sobrecargas estructuras																																																																																																						
Descripción de la zona del registro y esquema.			Cantidad	Cantidad	Cantidad																																																																																																						
<table border="1"><tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr><tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr><tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr><tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr><tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr><tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr><tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr><tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr><tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr><tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr><tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr><tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr><tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr><tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr><tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr><tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr><tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr></table>																																																																																																									5 Intervenciones mitigación en el área de influencia (UMVCS)		
Existencia medidas de mitigación 1) Si			sistemas de Filtros y/o Drenes de penetración																																																																																																								
Cantidad			Cantidad																																																																																																								
6 Valoración de condiciones de remoción en masa en área de influencia (UMVCS)			7 Características del terreno, geomateriales y geoformas.																																																																																																								
Actualmente se presenta o evidencia un fenómeno de remoción en masa dentro del Área de influencia			Tipo afioramiento para la evaluación																																																																																																								
Existen evidencias de que en el pasado hubo un evento de remoción en masa dentro del área de influencia			Composición del depósito 3) Suelo-Roca(50/50)																																																																																																								
Tipo de fenómeno de remoción observado			Humedad del terreno																																																																																																								
Área estimada del fenómeno(m ²)			Permeabilidad y/o drenaje																																																																																																								
Estado del fenómeno			Afectación o fracturamiento del talud																																																																																																								
Se han realizado obras de contención			Presencia de rocas Blandas																																																																																																								
Estado de las obras de contención			Presencia de clastos																																																																																																								
Obra de mitigación Principal			Erosión suelos/Meteorización rocas																																																																																																								
Obra de mitigación secundaria			Consistencia de suelo, o matriz depósito																																																																																																								
Hay caída de material en sobre la vía			Tipo de materiales afectan la vía																																																																																																								
Caída de bloques 25 cm o superior			Porcentaje de obstrucción o afectación de la vía																																																																																																								

Figura 9. Formato para levantamiento de elementos viales que aportan a la valoración de movimientos en masa.

5. AMENAZA POR INUNDACIÓN

La diversidad climática del país en combinación con paisajes contrastantes como son las cordilleras, las planicies aluviales, altiplanos y llanuras, implica que algunas zonas se exponen a inundaciones asociadas a lluvias cortas e intensas que dan lugar a eventos torrenciales. También se exponen a inundaciones prolongadas y de baja velocidad asociadas a lluvias persistentes y generalizadas sobre grandes áreas tributarias. Aunado a ello, la incidencia de fenómenos de variabilidad climática en la escala interanual, según su severidad pueden inhibir o fortalecer las precipitaciones acordes a la intensidad del Fenómeno de Niño o Niña, especialmente en las regiones Andina, Caribe y Pacífica.

La UNGRD [2] considera clave en caso de inundación: “Prepararse, Actuar, y Recuperarse”, para lo cual resulta indispensable conocer el tipo de evento al cual se está expuesto, las áreas potencialmente afectadas con mayor frecuencia e intensidad, y la temporada del año en que es más probable su ocurrencia.

Caja 4. Claves para valoración de la amenaza por inundación acorde con el tipo de evento.

La UNGRD [17], resalta tres tipos de inundaciones en cuya descripción es posible develar claves para su valoración, como son: el régimen hidrológico que involucra la cantidad y tiempo de precipitación, la pendiente del cauce, la intervención antrópica que da lugar a represamientos, la morfología y relieve sobre el cual se implanta la infraestructura, y la insuficiencia del sistema de drenaje construido.

Inundaciones repentinas. Se producen por la presencia de grandes cantidades de agua en muy corto tiempo. Son frecuentes en ríos de zonas montañosas con bastante pendiente, y muchas veces se producen a causa de fuertes aguaceros sobre los terrenos débiles o sin vegetación, y el represamiento de las aguas por rocas, vegetación, y demás materiales que han caído sobre el río. Ejemplo de ello el evento del 6 de mayo de 2021 en Medellín.



Inundaciones lentas o en la llanura. Se producen sobre terrenos planos que desaguan muy lentamente, cercanos a las riberas de los ríos o donde las lluvias son frecuentes o torrenciales. Muchas de ellas son producto del comportamiento normal de los ríos, es decir, de su régimen de aguas, ya que es habitual que en invierno aumente la cantidad de agua inundando los terrenos cercanos como playones o llanuras, como lo ocurrido en la vía Bogotá-Chía en 2011.



Inundaciones en ciudades. Las poblaciones que no cuentan con efectivos sistemas de alcantarillado o canales de desagües y aquellas cuya superficie es plana o algo cóncava (como un valle) pueden sufrir inundaciones como efecto directo de las lluvias, independientemente de las inundaciones producidas por desbordamiento de ríos y quebradas. Condición cada vez más común como consecuencia del cambio climático y del crecimiento de las áreas urbanas, como ocurre en la ciudad de Bogotá.



Para establecer con precisión el tipo de evento (inundación dinámica o estática), la frecuencia, la intensidad y el territorio afectado, es necesario realizar aproximaciones cuantitativas que requieren como insumos un levantamiento topo-batimétrico del cauce y áreas inundables, la modelación hidráulica y el procesamiento de series históricas de caudal o precipitación. La valoración de la intensidad es función de la combinación entre la profundidad y la velocidad del flujo (**Tabla 1**), variables caracterizadas por importantes fluctuaciones tanto en el cauce como en las áreas inundables, en virtud de lo cual, la valoración cuantitativa de la amenaza por inundación requiere la mayor precisión posible en la información topográfica, el intervalo computacional y la variación temporal y volumétrica del hidrograma, condiciones que redundan en recursos económicos y computacionales.

Tabla 1. Nivel de intensidad para inundaciones estáticas y dinámicas. Fuente: Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales y Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación [18].

Niveles de intensidad	Inundaciones estáticas Profundidad del flujo (H) en metros	Inundaciones dinámicas Profundidad (H) x Velocidad del flujo (V) en (m²/s)
Alto	$H \geq 1.0$	$H*V \geq 1.5$
Medio	$0.5 \leq H < 1.0$	$0.5 \leq H*V < 1.5$
Bajo	$0.25 \leq H < 0.50$	$H*V < 0.5$ y $H \geq 0.25$

Existen distintos criterios para determinar la zonificación de amenaza por inundación (ASCE, FEMA, Instituto Geológico y Minero de España, Universidad Nacional – IDEAM), todos involucran tanto velocidad como profundidad, aunque con variaciones en la cantidad de rangos (Low, Medium, High, Very High, Extreme), el método de entrada (gráfico o matriz) y los valores de profundidad y velocidad, pero pocos discretizan según el tipo de evento.

En contraste, las metodologías cualitativas se apoyan principalmente en la valoración de las condiciones del medio físico, particularmente la geomorfología y su susceptibilidad a inundaciones, en los antecedentes de eventos históricos ya sea a partir de información espacial obtenida mediante imágenes de sensores remotos o según el inventario de eventos, en los registros hidrológicos multitemporales cuya principal fuente recae en el IDEAM, y finalmente, en la presencia y estado de conservación de las obras de drenaje (**Fig. 10**).

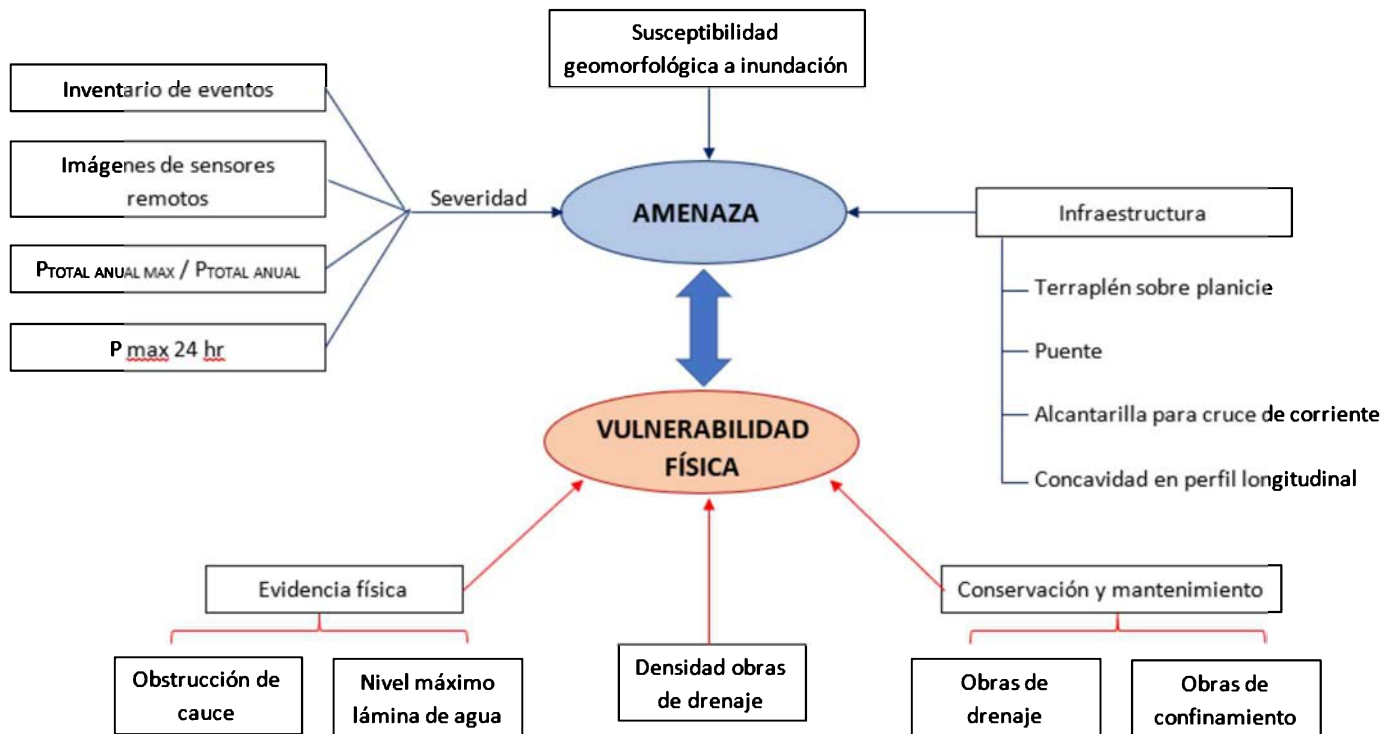


Figura 10. Variables para evaluación de amenaza por inundación en corredores viales [19], incluyendo aspectos del medio físico que dan cuenta de la severidad del evento y la susceptibilidad a nivel regional a sufrir inundaciones, así como aspectos propios de las obras de infraestructura que en virtud de su correcta construcción y estado de conservación incrementan o disminuyen la capacidad de respuesta de la infraestructura vial ante la ocurrencia de un evento.

Para garantizar una adecuada aplicación de la metodología es necesario considerar los siguientes aspectos. Primero, enfatizar en el reconocimiento de aquellas geoformas de origen aluvial que se exponen con mayor frecuencia a eventos de inundación a escala regional. Segundo, es necesario reclasificar las unidades a escala 1:100,000 siguiendo los criterios y categorías propuestos por el Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt y el Fondo Adaptación [21]. Tercero, revisar el inventario de áreas inundables del IDEAM, el cual está debidamente espacializado a escala 1:100,000 para los años 1988, 2000, 2011 y 2012 que involucran los eventos más representativos en un lapso superior a 20 años. Cuarto, reconocer la precipitación como detonante, para lo cual se involucran registros históricos de estaciones hidrológicas que dan cuenta tanto de eventos hidrológicos torrenciales por medio de la precipitación máxima en 24 horas, como de eventos prolongados por medio de la precipitación total anual, previo análisis estadístico y construcción de isoyetas. Quinto, valorar a escala local los factores intrínsecos que hacen referencia al estado de conservación y la exposición de las obras que conforman la infraestructura vial, ante la acción de los eventos hidrológicos. Esta valoración se hace mediante la inspección física, evaluando su estado mediante rúbricas (**Fig. 11**), que pueden aplicarse a las obras de drenaje transversales (alcantarillas, puentes y box culver) obras de drenaje con flujo sobre la calzada (bateas y badenes), obras de drenaje longitudinal (cunetas y vallados) y obras de confinamiento (jarillones).

	Baja	Media	Alta
Encole	Existe estructura de encole en buen estado, correctamente integrada a la alcantarilla, sin fracturamiento, ni colmatación u obstrucción	La estructura de encole se encuentra fracturada, con desportillamiento, pero sin afectar su integridad y funcionamiento. El nivel de obstrucción es moderado	No existe estructura de encole. Existe estructura, pero se desprendió de la alcantarilla o se encuentra colmatada perdiendo su funcionalidad
Descole	Existe estructura de descole en buen estado, correctamente integrada a la alcantarilla, sin fracturamiento, ni colmatación u obstrucción	La estructura de descole se encuentra fracturada, con desportillamiento, pero sin afectar su integridad y funcionamiento. El nivel de obstrucción es moderado	No existe estructura de descole. Existe estructura, pero se desprendió de la alcantarilla o se encuentra colmatada represando el flujo y perdiendo su funcionalidad
Grietas (m)	No se observan grietas que afecten el comportamiento de la estructura o puedan generar fallas a largo plazo.	Se observan grietas mínimas inferiores a 1 mm de espesor, el área afectada es mínima y se relaciona con fenómenos de expansión y contracción	Se observan grietas en una amplia superficie de la estructura, estas grietas inducen a la falla del elemento, la pérdida parcial o total de la tubería, y representan una amenaza a la integridad de la estructura
Hundimientos e integridad de la estructura	No se observa hundimiento o aplastamiento en la tubería o estructura de drenaje.	Se observa hundimiento leve de la estructura sin generar afectaciones en su integridad.	Se observa hundimiento o aplastamiento diferencial que genera daños en la estructura o fallas en los elementos de la misma
Socavación	Se presenta una estructura de descarga en óptimas condiciones, no se evidencia pérdida de material en la entrada o salida de la estructura	Se presenta pérdida de material en la entrada o salida de la estructura de forma moderada sin generar hundimientos, colapso o pérdida en la estabilidad de la estructura. En los taludes adyacentes más allá del descole se observa socavación progresiva o regresiva	Se presenta pérdida de material de manera excesiva en la entrada o salida de la estructura generando hundimientos, destornillamientos o una socavación de la estructura debido a la ausencia, colapso o fracturamiento de disipadores y obras para control de erosión. La socavación en los taludes adyacentes compromete la integridad de la estructura
Deterioro del material	Material en buen estado, una superficie limpia y sin imperfecciones considerables	El material presenta desgaste, su rugosidad aumenta y se evidencia fragilidad de este, pero sin pérdida de partículas ni exposición del acero de refuerzo	Material con imperfecciones, presenta raíces y cuerpos extraños, su rugosidad es alta, hay pérdida de partículas y queda expuesto el acero de refuerzo
Obstrucción	Menos del 10% de la sección se encuentra con material tanto transportado como del que proviene de taludes adyacentes	La estructura se encuentra obstruida hasta en un 30% de la sección	En el caso de conductos cerrados la estructura presenta obstrucción en más del 30% de su sección
Evidencia de niveles máximos	Se evidencian láminas de agua por debajo del 30% de la altura total	Se evidencian láminas de agua por ente 30% y 80% de la altura total	Se evidencian láminas de agua superiores al 80% de la altura total (borde libre inferior al 20%)

Figura 11. Rúbrica para valoración de susceptibilidad a inundación de obras de drenaje puntual (alcantarillas, box culver, puentes y pontones) según su estado de conservación.

Nota: La valoración de las obras de drenaje a escala local puede aumentar o mitigar la amenaza ante inundaciones. Para su correcta aplicación es necesario el diseño de formatos para registro de información, y protocolos de inspección visual de las obras.

6. VULNERABILIDAD FÍSICA

Para implementar la aplicación de captura de datos, el registro de los puntos críticos, y establecer el nivel de vulnerabilidad del sector o corredor vial objeto de estudio, se desarrolló una metodología que permitiera identificar adecuadamente los elementos expuestos, y su registro en la Geodatabase para analizarse (**Fig. 12**).

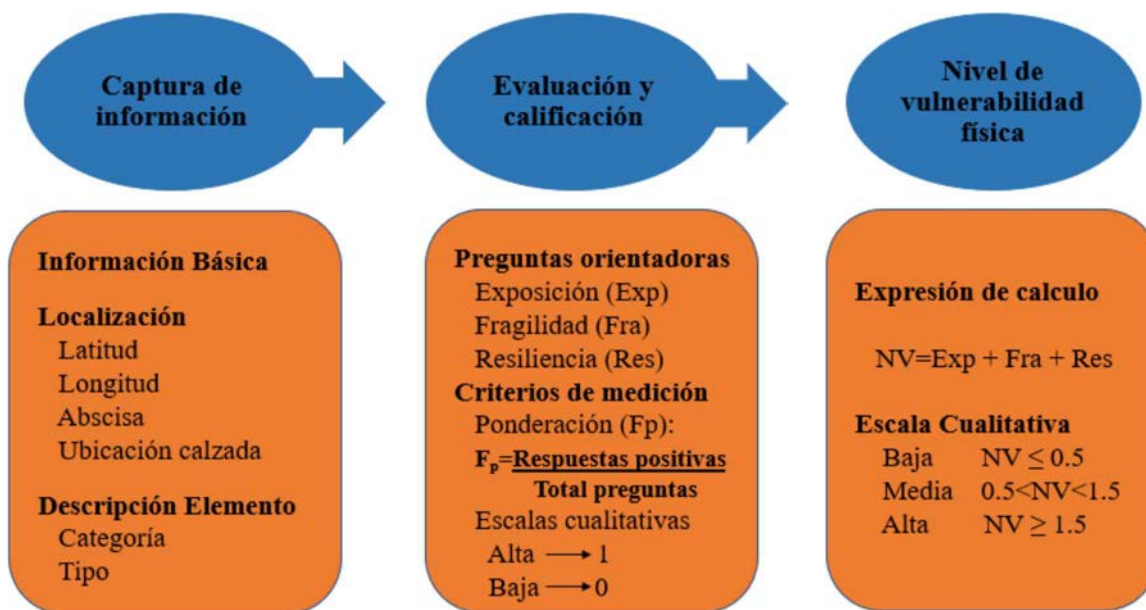


Figura 12. Esquema metodológico para definir vulnerabilidad física.

Para evaluar los resultados de la inspección física, se construyeron preguntas básicas orientadoras, para calificar y determinar el nivel de exposición de la estructura (ver **Caja 5**). Las preguntas permiten evidenciar en el trabajo de campo y trabajo de oficina, las diferentes evidencias de huellas ocasionadas por los fenómenos amenazantes como son remoción en masas e inundaciones. Para la construcción de las preguntas, se toma la experiencia de la fuente primaria administradores viales, quienes inspeccionan las diferentes estructuras que componen la vía.

A manera de ejemplo, se muestra la aplicación de la metodología en una alcantarilla localizada en el corredor vial Chiquinquirá–Otanche, en una sección a media ladera, con cabezal de encole y descole y sección circular en tubería de concreto. La superficie de rodadura se encuentra sin pavimento flexible o rígido, y las cunetas están perfiladas mediante maquinaria (**Fig. 13**).

Caja 5 Preguntas orientadoras, para la calificación y evaluación de la vulnerabilidad física.

Exposición.

1. ¿Se evidencian huellas de daños o eventos anteriores que afectaron la estructura inspeccionada?
2. ¿Se evidencian daños ocasionados por deslizamientos, inundaciones o daños ocasionados por el uso del corredor vial?
3. ¿Se evidencian huellas de mantenimiento preventivo, que permita tener en funcionamiento la estructura inspeccionada?
4. ¿Se evidencian en la inspección visual y consulta con fuentes internas y externas que efectúan mantenimiento rutinario?
5. ¿Se evidencian que después de la inspección física y visual, realizan actividades de recuperación de las estructuras afectadas por eventos amenazantes?
6. Cada pregunta se valora entre 0 (Baja) y 1 (Alta) y tendrá una ponderación de 0.2 para obtener una sumatoria con valor máximo de 1.0.

Fragilidad.

1. ¿Se evidencia daño por escalonamiento?
2. ¿Se evidencian grietas en las estructuras inspeccionadas?
3. ¿Se evidencia desgaste de la estructura y su material?
4. ¿Se evidencian desportillamientos en las estructuras inspeccionadas?
5. ¿Se evidencian fracturas en las estructuras inspeccionadas?
6. ¿Se evidencia separación entre los elementos que conforman la estructura?
7. ¿Se evidencia obstrucción en el funcionamiento de la estructura inspeccionada?
8. Cada aspecto se debe medir en metros lineales, se valora entre 0 (Baja) y 1 (Alta) y tendrá una ponderación de 0.14 para obtener una sumatoria con valor máximo de 1.0.

Resiliencia.

1. ¿Se evidencia que existen procesos y procedimientos para el manejo de daños producidos por eventos naturales?
2. ¿Se evidencia que la Institución efectúa capacitaciones técnicas con el fin de tener preparado el talento humano para manejar y recuperar las estructuras afectadas?
3. ¿La Institución cuenta con el personal operativo disponible para atender y recuperar las estructuras afectadas?
4. ¿Se evidencia que se cuenta con el recurso disponible para el manejo y recuperación de las estructuras afectadas productos de eventos naturales, antrópicos no intencionales?
5. ¿Se evidencia que se cuenta con los recursos de material disponibles para enfrentar y manejar los eventos que se presentan y poder recuperar las estructuras afectadas?
6. ¿Se evidencia que el tiempo de respuesta para el manejo de la recuperación de las estructuras en menor a tres meses?

Cada pregunta se valora entre 0 (Baja) y 1 (Alta) y tendrá una ponderación de 0.17 para obtener una sumatoria con valor máximo de 1.0.

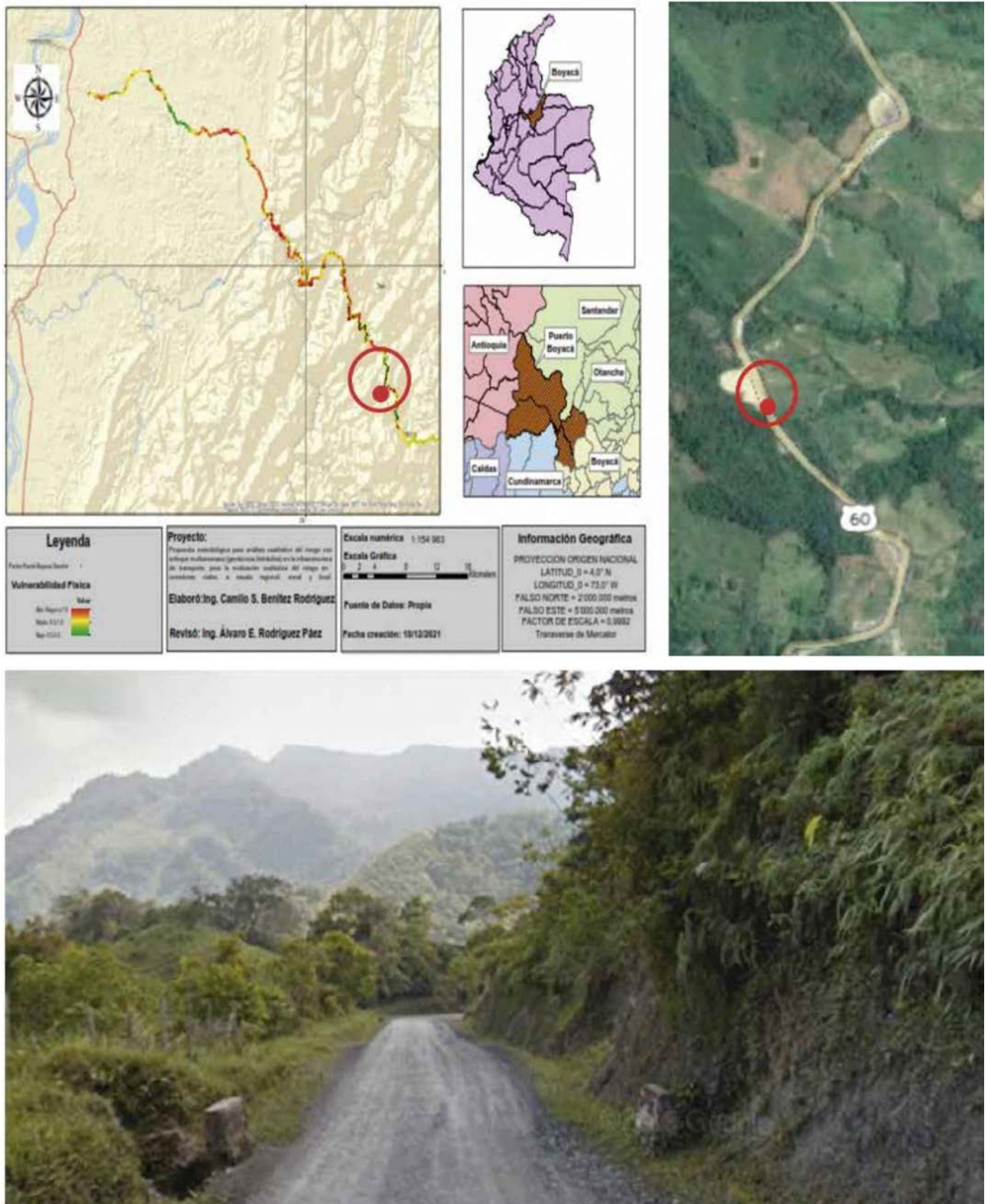


Figura 13. Alcantarilla localizada en el corredor vial Chiquinquirá–Otanche.

Como resultado de la aplicación de las preguntas referentes a exposición, fragilidad y resiliencia, se obtiene una valoración de 0.51, cuyo resultado se reclasifica a las escalas de Vulnerabilidad Baja (< 0.5), Media (0.5 a 1.5) y Alta (> 1.5).

Tabla 2. Valoración de vulnerabilidad física de una estructura de drenaje.

Tipo de Estructura		Cuneta/Canal de conducción								
Factores	Localización		Preguntas orientadoras							Calificación
	Latitud (N)	Longitud (W)	1	2	3	4	5	6	7	
Exposición	5.65461	-74.07429			x					0.2
Fragilidad	5.65461	-74.07429			x					0.14
Resiliencia	5.65461	-74.07429	X							0.17
La vulnerabilidad física de este punto se determina como media										0.51

7. IMPLEMENTACIÓN TECNOLÓGICA: INSTRUMENTO MÓVIL DE CAPTURA DE DATOS EN CAMPO

La captura de datos o hechos del mundo real se muestra como uno de los procesos o requerimientos más exigentes que tienen las organizaciones para recopilar información valiosa y relacionada con sus proyectos en campo. Los datos son la naturaleza para cualquier proyecto de investigación. Estos datos deben recolectarse, crearse y observarse para posteriormente analizarse y de esta manera producir unos resultados fiables y originales, producto de la investigación.

Un dato es la representación física de la información de una manera adecuada para su comunicación, interpretación o procesamiento por parte de seres humanos o por medios automáticos [23]. Los datos en sí reflejan un hecho o un grupo de hechos del mundo real, siendo capturados de diferentes formas y almacenados en varios formatos dependiendo de su utilidad y eficiencia [24].

Este es el caso de los datos espaciales, describen características y recursos de la tierra. Se capturan para la resolución de problemas y apoyar la toma de decisiones asociadas con la localización, distribución y relación espacial dentro de un entorno geográfico [24]. Esta clase de datos es la base de todo SIG, un sistema espacial que crea, administra, analiza y mapea todo tipo de datos (pendientes, vegetación, tipo de suelo, movimientos en masa, inundación, población y cualquier otro fenómeno localizado sobre la superficie de la Tierra) [25].

7.1 Representación de los datos

Un SIG es una herramienta informática que se utiliza para ayudar a las personas a transformar los datos geográficos en información geográfica. Este modelo de datos digitales incorpora características geográficas del mundo real, que son almacenados en una base de datos y luego pueden mostrarse en un mapa [26].

7.2 Captura de datos

Para asegurar una eficaz representación de la realidad de los corredores viales objeto de estudio, se realizó la inspección visual y el registro de datos en campo. Estos datos inicialmente fueron capturados y almacenados en fichas de Microsoft Excel (ver **Fig. 9**), las cuales fueron verificadas, unificadas y validadas por los expertos, de acuerdo con los requerimientos y variables relevantes para las componentes de vulnerabilidad, movimientos en masa e inundación. Una vez llevado a cabo este proceso de validación y ajuste de las rúbricas planteadas inicialmente, se adopta una versión más integrada del instrumento de captura de datos.

Sin embargo, teniendo en cuenta el volumen de datos y previendo una mejora en el flujo de información, se ideó una solución práctica para captura de datos en campo mediante un instrumento móvil que soportara los requerimientos del modelo. Los avances de las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (TIC) han permitido el desarrollo de aplicaciones que procesan grandes volúmenes de datos geográficos, creando una disciplina denominada Geomática (o geo-Informática) que abarca la captura, análisis y aplicación de los datos descriptores (el qué) y de localización de objetos georreferenciados (el dónde) [27], operando en campos tan variados como la cartografía, la teledetección, la topografía o los SIG entre muchos otros.

Por tanto y con los nuevos avances de las TIC, es posible que cualquier persona realice la captura o levantamiento de dichos datos, todo desde un dispositivo móvil, en cualquier lugar y en cualquier momento. La generalización de la tecnología GPS en dispositivos móviles (especialmente celular) ha permitido que esta capacidad esté al alcance de cualquier ciudadano y como consecuencia, el desarrollo de aplicaciones en distintos campos [28].



Figura 14. Inspección visual de una alcantarilla localizada en la vía Chiquinquirá-Otanche y registro de datos en campo por dispositivo móvil, incluyendo dimensiones de la sección transversal, estado de conservación, integridad de la estructura, procesos de erosión e inestabilidad del talud

Progresivamente, los dispositivos móviles se equipan con una gama mucho más amplia de funciones para responder a las demandas de movilidad, llegando a convertirse en un instrumento similar al computador personal, con una marcada tendencia sobre otras tecnologías, con posibilidades de convertirse en herramientas indispensables para los usuarios [29].

7.3 Instrumento móvil de captura de datos en campo

Con el fin de optimizar el proceso toma de datos y en relación con la propuesta metodológica, se ideó una solución que soportara de forma práctica la captura de información en campo. Para este proceso, se implementó un recurso de la compañía la compañía ESRI (Environmental Systems Research Institute, [25]), Survey123 connect (aplicación web lanzada el 29 de noviembre de 2019), que mediante la implementación de formularios inteligentes proporciona una serie de funciones que van más allá de la simple entrada de datos (Fig. 15).

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
type	name	label	hint	guidance_hint	appearance	required_validation_default	calculation	constraint	constraint_message	validation			
note	nl												
begin_group	general	Localización			compact								
text	id_reporte	ID Reporte			compact	yes	yes	yes	concat(\${id_via}, 'PR', \${pr_loc}, ' \${propiedad}, ' \${v}, \${format-date(now)}, ' \${m}/\${a}/\${y}				
date_time	fecha	Fecha			hidden	yes	yes	yes	now()				
select_one_territorial	territorial	Selección territorial			autocomplete	yes							
select_one_cod_via	id_via	Código del tramo			autocomplete	yes							
select_one_sec_via	sector	Sector (A-B)			compact	yes							
select_one_servicio	servicio	Ciudad			horizontal compact	yes							
text	pr_loc	PR				yes							
geopoint	ubicacion	Ubicación				yes	if needed yes						
text	usuario	Identificado por:				yes			if needed yes				
end_group													
begin_group													
select_one_evento_grupo	descripcion	Descripción del evento			compact								
text	motivo	Cause de riesgo			compact	yes							
select_one_fenomeno	fenomeno	Motivación			compact	yes							
select_one_fenomeno	tipo	Tipo de fenómeno observado			compact	yes							
text	descripcion	Descripción del evento amasante			compact	yes							
text	tipo_otro	Cuál			compact	yes							
integer	severidad	Severidad del evento			dropdown	yes							
checkbox	severidad	Severidad											
image	foto	Fotografía				yes							
text	descripcion	Descripción del evento amasante			compact	yes							
image	imagen	Fotografía				yes							
end_group													
begin_group													
select_one terreno	terreno	Topografía			compact	yes							
select_one talud	talud	Perfil longitudinal			compact	yes							
select_one talud	talud	Perfil Transversal			compact	yes							
select_one altura	altura_talud	Rango de altura del talud afectado			compact	yes							
select_one estructura	estructura	Estructura de pavimento			compact	yes							
integer	cantidad	Número de curvas			compact	yes							
decimal	anchura	Ancho de la calzada (m)			compact	yes							
end_group													

Figura 15. Survey123 Connect, permite diseñar y publicar “formularios inteligentes” en ArcGIS Online o ArcGIS Enterprise, permitiendo recopilar multitud de datos e información para después visualizarla geográficamente. Estos formularios funcionan en combinación con un editor de hojas de cálculo, que facilita obtener una vista previa de los diseños de XLSForm y validarlos.

Con *Survey123 Connect*, se pueden integrar y definir las diferentes variables y consultas, al igual que definir la apariencia y el comportamiento de los formularios mediante la implementación de un documento *XLSForm*, un estándar abierto que simplifica la creación de formularios en un formato legible y utilizando una hoja de cálculo. Este tipo de aplicaciones en *Survey Connect* permiten de forma previa, hacer pruebas de los formularios creados antes de publicarse, así como, trabajar con mapas offline, administrar varios idiomas, organizar diferentes flujos de trabajo.

La aplicación funciona en dispositivos móviles (celulares), computadoras portátiles o de escritorio como una aplicación nativa, al igual que en el navegador. Una de las facilidades que ofrece este tipo de aplicación es que los datos en campo pueden recopilarse a través del dispositivo, incluso, sin conexión a Internet, es decir, en entornos desconectados (Fig. 16).

Figura 16. Variables disponibles para captura de información en aplicativo móvil.

Módulos del proceso en la aplicación Survey123 connect

La estructura del formulario está basada en secciones desplegadas que al momento de iniciar un nuevo reporte se encuentra retraída para evitar la saturación visual en la aplicación. Al interior de cada sección, el formulario cambia/oculta/muestra opciones adicionales en función de los datos preliminares ingresados. La estructura de las secciones se muestra en la (Fig. 17).

Figura 17. Interfaz del aplicativo móvil.

Los módulos del proceso, implementando la aplicación Survey123 connect, se relacionan a continuación:

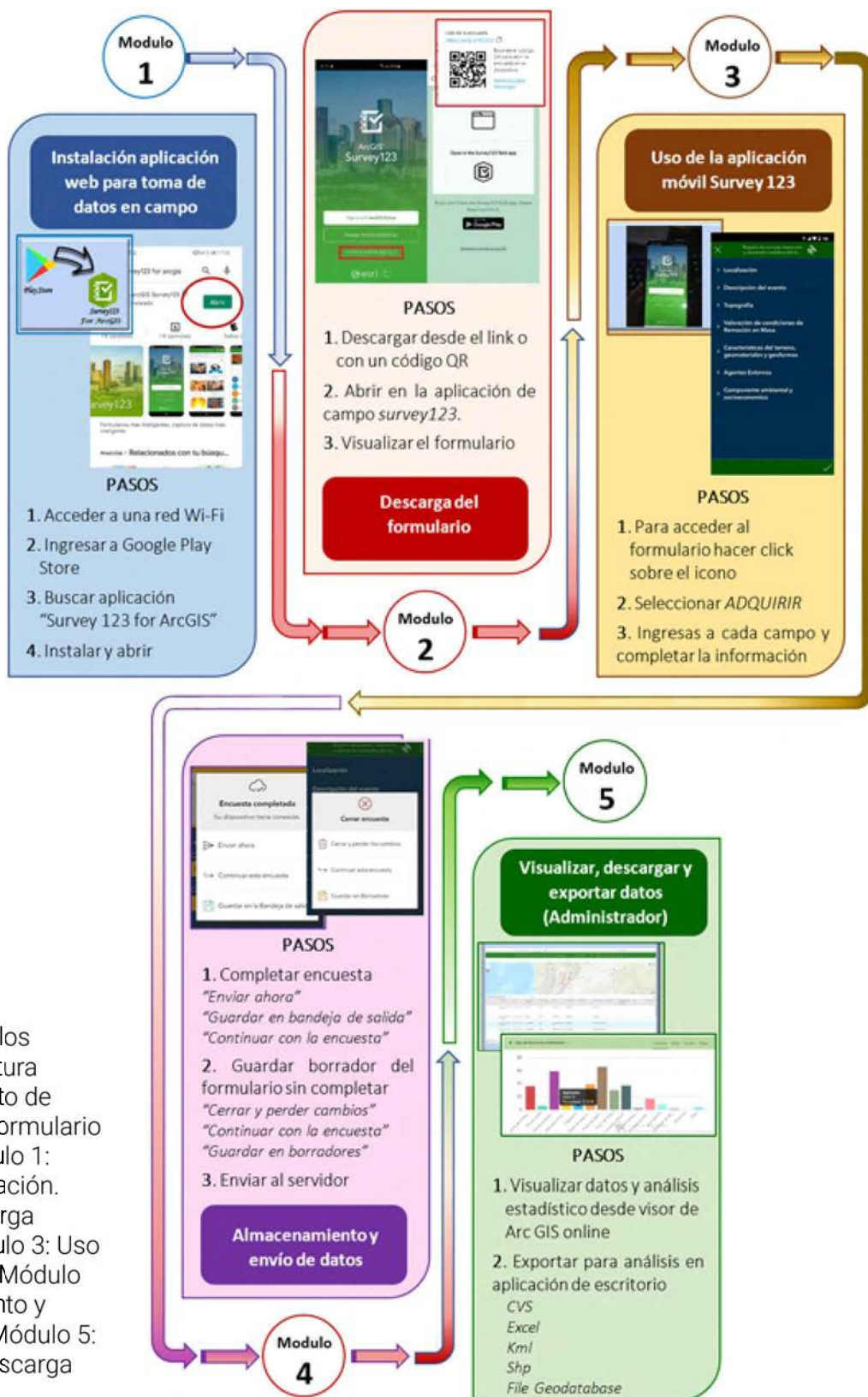


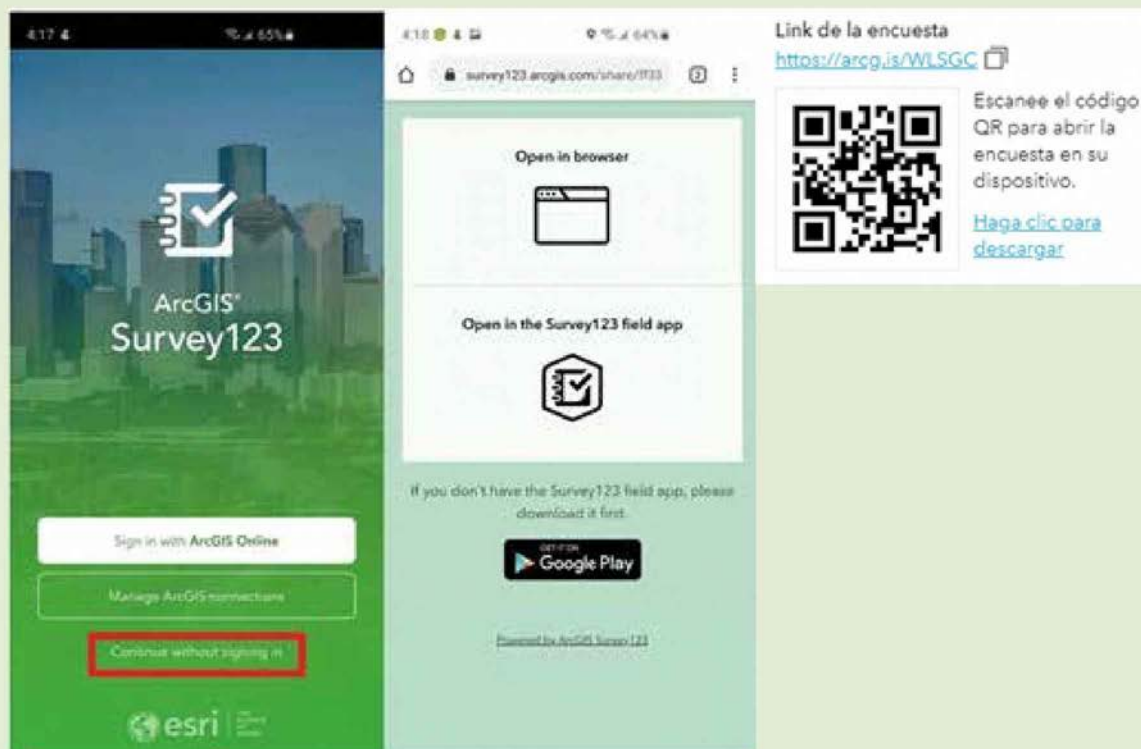
Figura 18. Módulos del proceso, captura y almacenamiento de información en formulario inteligente. Módulo 1: Instalación aplicación. Módulo 2: Descarga formulario. Módulo 3: Uso de la aplicación. Módulo 4: Almacenamiento y envío de datos. Módulo 5: Visualización, descarga de datos.

Caja 6. Módulos del proceso

Instalación de la aplicación. ESRI dispone de dos componentes de Survey123. Uno es Survey123 Connect componente de escritorio para crear las encuestas, disponible en Microsoft Store y puede instalarse directamente en el dispositivo de mesa. El otro componente es la aplicación de campo Survey123 para capturar datos de encuesta en dispositivos móviles, disponible en Google Play, App Store y Microsoft Store y puede instalarse directamente en su dispositivo móvil desde estas tiendas.

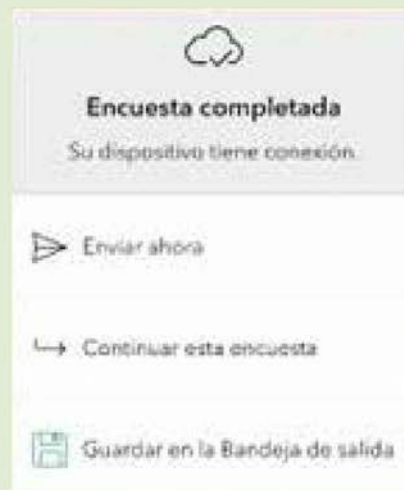


Descarga del formulario o encuesta. Luego realizar la instalación, podrá dirigirse al aplicativo Survey 123. Es necesario descargar la encuesta antes de ir a campo a zonas sin acceso a internet. La aplicación puede funcionar offline y cuando exista acceso a internet podrá enviar la encuesta diligenciada. El formulario para descargarse se facilitará mediante un enlace o un código QR.

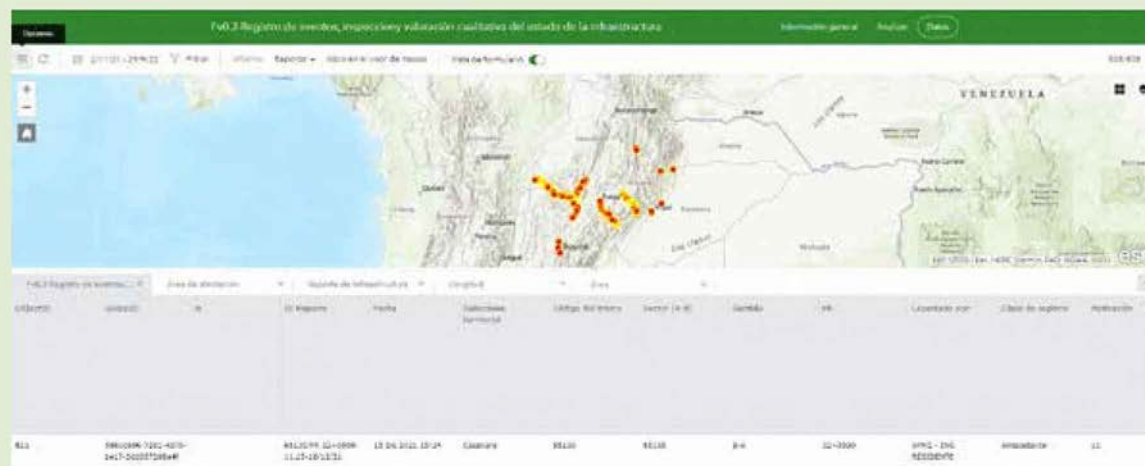


Almacenamiento y envío de datos. Luego de diligenciar todos los campos del formulario, se puede enviar.

Si no pudo completar una encuesta de inmediato (o la completó sin conexión), debe guardarla en su bandeja de salida dentro de la aplicación Survey123. Esto facilitará que una encuesta parcialmente completada pueda completarse después para enviarse; o si se completó sin conexión se pueda enviar cuando se cuente con una conexión estable.



Visualización, descarga de datos. Una vez diligenciado y enviado el formulario, es posible generar informes basados en los datos capturados. Ya que, la aplicación de forma directa no puede generar estos informes, estos se generan a través de la componente de escritorio Survey123 Connect, o desde el visor ArcGIS online. Ahora, si se requiere hacer análisis más profundos con los datos, estos podrán exportarse en diferentes formatos y extensiones para utilizarse en una aplicación desktop como ArcMap de ArcGIS. Los datos pueden descargarse en formatos SCV, KML o SHP.



Proceso de análisis y resultados

Se hizo el recorrido por los corredores viales pertenecientes al territorial Boyacá. La plataforma Survey123 Connect permite acceder al conjunto de datos para su análisis y visualización, destacando en este caso el número de puntos inspeccionados en cada corredor vial con su respectivo porcentaje, la motivación o razón por la cual se decidió diligenciar este formulario, el tipo de fenómeno y registro de infraestructura, junto con un registro fotográfico que da cuenta del inventario realizado y del estado actual de la infraestructura (Fig. 19).



Figura 19. Visualización de información general de datos captados en campo con la componente de campo de la aplicación *survey 123*. La imagen muestra estadísticas del recuento de puntos de interés tomados en la encuesta.

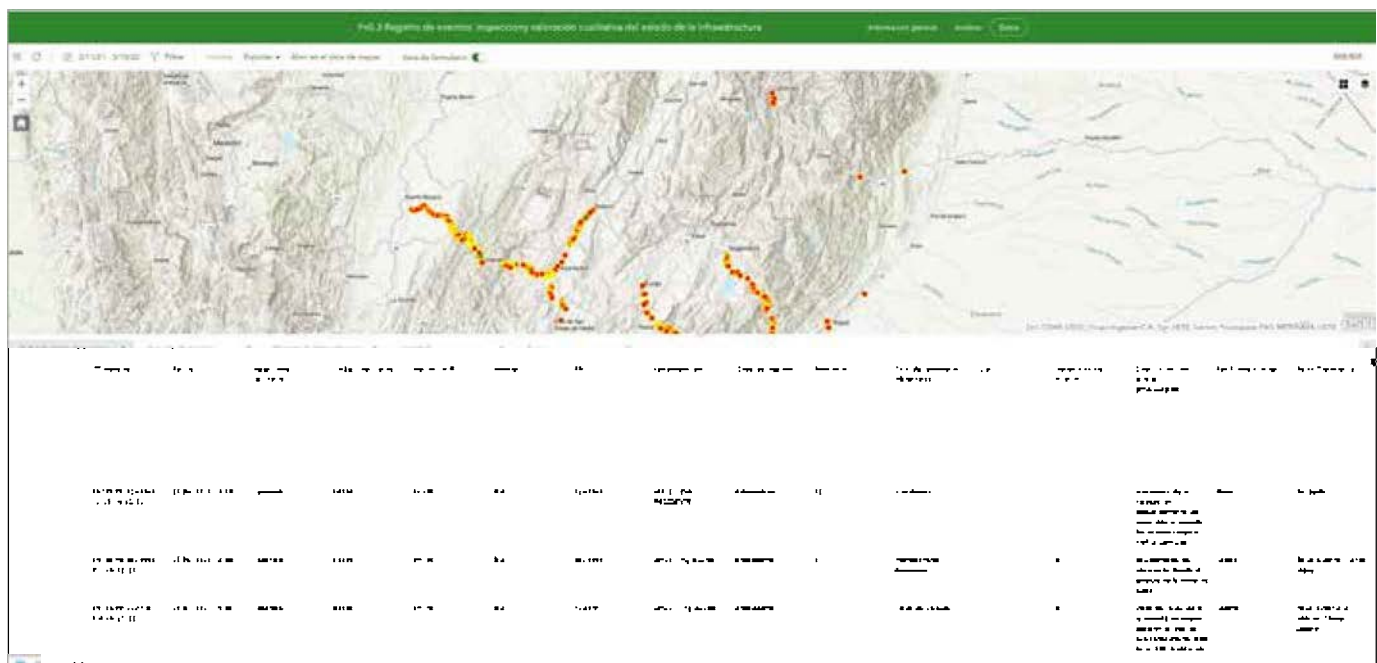


Figura 20. Visualización de información general de datos captados en campo con la componente de campo de la aplicación *survey 123*. La imagen muestra algunos puntos de interés desplegados en el visor de mapas.

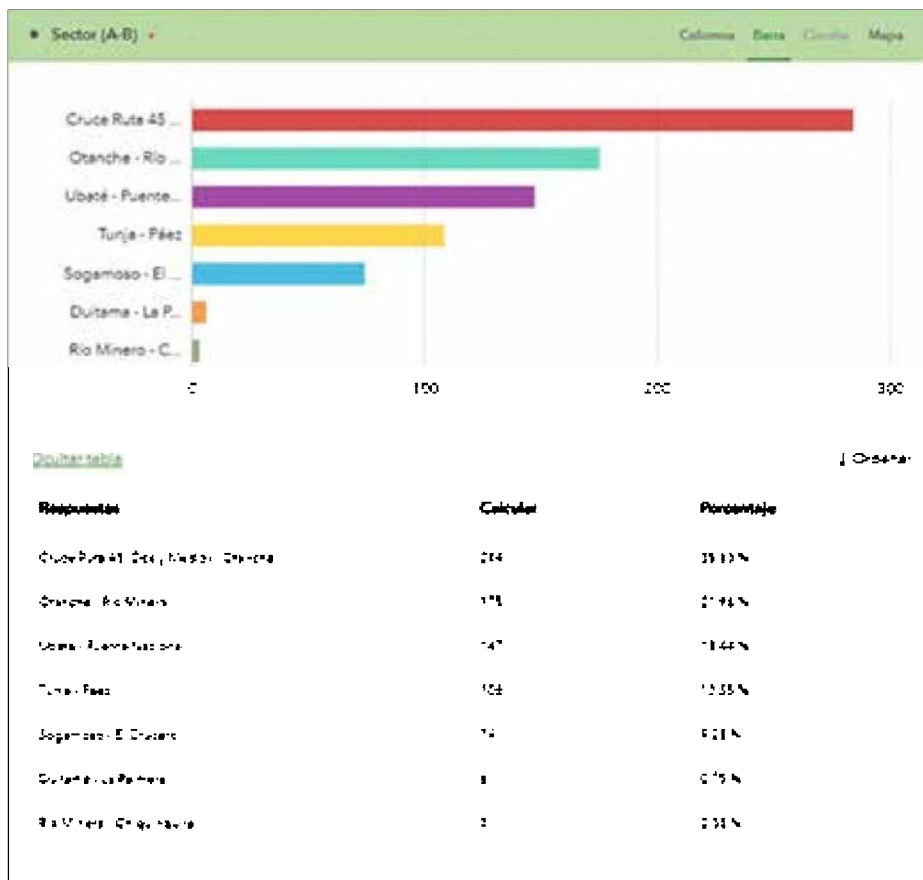


Figura 21. Ejemplo de la visualización de resultados y análisis estadístico izquierda: selección por barras en sectores analizados puntos con registro de incidencias, derecha: relación de afectaciones a infraestructura en un sector. Inferior derecha: detalle de estado de obras inspeccionadas en un sector

En particular, para las vías de la territorial Boyacá a cargo del INVIAS, puede observarse que la mayoría de los puntos inspeccionados corresponden a la transversal Monterrey - Puerto Boyacá, particularmente Otanche – Cruce 45, sector donde prevalecen procesos de inestabilidad de taludes asociados a la presencia de rocas blandas, con fenómenos de deslizamiento rotacional y flujo de detritos, fenómenos que a su vez ocasionan la colmatación de las obras de drenaje por escorrentía y arrastre de estos materiales.

Así las cosas, el aplicativo permite generar análisis estadísticos, visualización de mapa georreferenciado, localización de puntos de interés, toma de imágenes de evento y de infraestructura, entre otras acciones, haciendo de esta metodología una herramienta para la gestión de la infraestructura vial y la toma de decisiones sobre los riesgos y medidas de mitigación acorde con los lineamientos de la Ley 1523 de 2012 y superando la aplicación de los estudios de amenaza y vulnerabilidad tradicionalmente restringida al ámbito municipal.

8. CONCLUSIONES

De acuerdo con las experiencias y resultados obtenidos en el proceso de formulación desarrollo e implementación de esta metodología para la captura de datos en estudios de Valoración Cualitativa Multiamenaza en Corredores Viales apoyado en TICs se concluye lo siguiente.

Para alcanzar un adecuado desarrollo de este tipo de instrumentos para captura de datos se requiere de una sinergia de los especialistas con los potenciales usuarios finales del instrumento. Para este estudio, se contó con el acompañamiento, aporte y validación por parte de los administradores viales, quienes son profesionales contratados por el INVIAS para realizar labores de seguimiento, gestión, inventario físico, la atención de emergencias, mantenimiento de la infraestructura. lo que permitió un ajuste de los instrumentos a partir de sus experiencias y el conocimiento detallado de la historia de cada corredor vial, incluyendo puntos críticos, eventos amenazantes y condiciones físicas.

En el proceso para determinar el nivel de riesgo multiamenaza por movimiento de masas e inundaciones, se estableció que el elemento expuesto es el corredor vial, conformado por su estructura física, obras de drenaje, estabilización y protección. Como resultado, del proceso planteado se logró la actualización del instrumento de captura a una versión móvil mejorada, posibilitando que los profesionales hicieran toma de datos de forma simultánea. Adicionalmente, se logró desarrollar un instrumento mejorado para la inspección visual de obras de drenaje, obras de estabilización y puntos críticos.

Finalmente, es posible realizar una captura de datos en campo de forma sistemática para su posterior valoración y análisis de información y su correspondiente presentación de resultados a través de mapas georreferenciados y análisis estadísticos que dan cuenta de las condiciones de cada corredor vial en términos de amenaza y vulnerabilidad. Estas herramientas constituyen un aporte significativo a la gestión del riesgo en infraestructura vial, y dadas sus condiciones de elemento lineal, disperso y heterogéneo puede considerarse novedoso en este tipo de procesos.

PUNTOS CLAVE

1. Con el fin de establecer el nivel de amenaza y vulnerabilidad de los corredores viales es necesario determinar cuál es el elemento expuesto a estudiar, para permitir la selección de las variables e indicadores de medición y construir los instrumentos requeridos para la toma de datos a analizar.
2. Para identificar el nivel de riesgo es necesario precisar el nivel de las amenazas y vulnerabilidad de los elementos expuestos y poder presentar los resultados a través de herramientas tecnológicas que permitirán un mejor análisis de las áreas comprometidas.
3. La implementación de herramientas tecnológicas facilita la toma de datos en situ haciendo que el proceso sea más rápido y eficiente con la captura de datos, además la herramienta que se aplica permite tomar datos offline, para después visualizarlos.
4. El inventario de eventos históricos no puede limitarse al reporte de nuevos procesos, sino que debe incluir el registro de obras de mitigación construidas con anterioridad, así como procesos inactivos, por cuanto estos dan cuenta de zonas potencialmente amenazantes y de la efectividad de las medidas implementadas.
5. La aproximación multiescala para valorar la amenaza permite combinar variables de tipo regional, zonal y local, que en conjunto dan cuenta de las condiciones intrínsecas y extrínsecas que detonan las condiciones amenazantes. Sin embargo, su procesamiento exige el uso simultáneo de información continua (tipo raster) y discreta (tipo vector).
6. La visualización de los datos y resultados a través de mapas permite al tomador de decisiones tener una percepción rápida y clara de la situación preexistente de la zona de trabajo, favoreciendo una oportuna gestión de puntos críticos.

RECOMENDACIONES PARA TOMAR DECISIONES

Para futuros tomadores de decisiones sugerimos se fomente la investigación y transferencia de tecnología en los siguientes campos:

1. Estrategias para la apropiación de esta herramienta TIC por parte los usuarios, logrando el uso cotidiano en la gestión de la infraestructura vial. Es importante que los administradores viales participen desde etapas tempranas en la construcción y validación del formulario.
2. Un proceso automatizado para cuantificar la amenaza y vulnerabilidad, que no requiera la supervisión de un experto, que permita actualizar las condiciones de entrada y cálculos de un sector previamente inspeccionado, que incluya los cambios asociados a mantenimiento y/o reposición vial, y cuyos resultados se encuentren disponibles para cualquier usuario.
3. Ampliar el uso de la herramienta en otras regiones, para lograr identificar posibles ajustes (por ejemplo, en el vocabulario) acorde nuevos contextos físicos, ambientales y culturales.

4. En el desarrollo de herramientas Tic tendientes a valorar amenaza y vulnerabilidad conviene:
5. Que antes de seleccionar una herramienta tecnológica, se tenga claridad sobre las variables (cualitativas y cuantitativas), sus escalas, tipo (categóricas u ordinales), métricas y necesidad de georreferenciación, acorde con el elemento expuesto.
6. Validar las herramientas Tic con datos reales en puntos o sectores de control, en los cuales se tenga una idea clara del resultado esperado o de la condición física del elemento expuesto y sus condiciones de amenaza y vulnerabilidad.
7. Fortalecer la cooperación en Ciencia y Tecnología, entre instituciones de educación superior y entidades públicas, logrando reconocer por un lado el conocimiento experto que dan los años en una labor específica aun cuando esta provenga de personal sin un título profesional, así como, dar aplicación al conocimiento propio de las aulas que refleja la actualidad del estado del arte en temas complejos y emergentes.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores no declaran conflicto de intereses.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA CREDIT

Conceptualización: AFR, ORA, JPLL. Metodología: AFR, ORA, SYVF, ARP. Redacción de primera versión: AFR, ORA, SYVF, ARP. Escritura. Revisión y edición de segunda versión: AFR, ORA. Figuras y tablas: AFR, ORA, SYVF, ARP. Administración de proyecto: JPLL. Búsqueda de evidencia: AFR, ORA, SYVF, ARP.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al INVIAS y particularmente a los administradores viales por su continuo aporte en las etapas de identificación de variables y validación del formulario inteligente, como muestra de la necesidad de crear sinergias entre el conocimiento experto acuñado por las instituciones de educación superior y las entidades públicas.

IDENTIFICACIÓN DE AUTORES

Alejandro Franco [CvLAC](#)
Orlando Rincón [CvLAC](#)
Álvaro Rodríguez [CvLAC](#)
Sandra Velazco <https://orcid.org/0000-0003-3764-0557>
Juan Pablo Londoño [CvLAC](#)

BIBLIOGRAFÍA

1. Silva, D. (2020) *Indicadores de ciencia y tecnología 2019*. Observatorio Colombiano de Ciencia y Tecnología, Bogotá. <https://doi.org/10.5377/innovare.v8i2.9082>
2. UNGRD (Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres). (2020, 17 de enero). *¿Cuál es el riesgo por inundaciones en Colombia?* <http://portal.gestiondelriesgo.gov.co/Paginas/Noticias/2020/Cual-es-el-riesgo-por-inundaciones-en-Colombia.aspx>
3. Gil-Guirado, S.; Pérez-Morales, A; Pino, D., Peña, J. C. & Martínez, F. L. (2022). Flood impact on the Spanish Mediterranean coast since 1960 based on the prevailing synoptic patterns, *Science of The Total Environment*, 807(part 1), 150777. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150777>
4. Ley 1523 de 2012. Por la cual se adopta la política nacional de gestión del riesgo de desastres y se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y se dictan otras disposiciones. Abril 24 de 2012. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=47141>
5. UNGRD (Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres). (2017). *Terminología Sobre Gestión del Riesgo de Desastres y Fenómenos Amenazantes*. UNGRD <http://hdl.handle.net/20.500.11762/20761>
6. Rosales-Veitia, J. Evolución histórica de la concepción de la gestión de riesgos de desastres: algunas consideraciones. *Revista Kawsaypacha: Sociedad y medio ambiente*, 7, 67-81, 2021. <https://doi.org/10.18800/kawsaypacha.202101.004>
7. INVIAS (Instituto Nacional de Vías). (2006). *Manual para la inspección visual de obra de estabilización*. Universidad Nacional de Colombia & Instituto Nacional de Vías - Ministerio de Transporte. <https://bit.ly/3RfLHF9>
8. INVIAS (Instituto Nacional de Vías). (2003). *Manual para la inspección visual de obras de drenaje*. Universidad Nacional de Colombia & Instituto Nacional de Vías - Ministerio de Transporte. <https://bit.ly/3Sme06m>
9. INVIAS (Instituto Nacional de Vías). (2006). *Manual para la inspección visual puentes y pontones*. Universidad Nacional de Colombia & Instituto Nacional de Vías - Ministerio de Transporte. <https://bit.ly/3UKh3a0>
10. INVIAS (Instituto Nacional de Vías). (2006). *Manual para la inspección visual de pavimentos flexibles*. Universidad Nacional de Colombia & Instituto Nacional de Vías - Ministerio de Transporte. <https://bit.ly/3SylhQ4>
11. INVIAS (Instituto Nacional de Vías). (2006). *Manual para la inspección visual de pavimentos rígidos*. Universidad Nacional de Colombia & Instituto Nacional de Vías - Ministerio de Transporte. <https://bit.ly/3BQudtb>
12. INVIAS (Instituto Nacional de Vías). (2013, 25 de enero). *Administradores Viales*. <https://www.invias.gov.co/index.php/informacion-institucional/123-seguimiento-a-la-inversion/proyectos-invias/80-administradores-viales>
13. Servicio Geológico Colombiano (SGC). (2018). *Guía metodológica para la evaluación del riesgo físico por movimientos en masa en la infraestructura vial*. Bogotá
14. Servicio Geológico Colombiano (SGC). (2016). *Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa a escala detallada o local*. Servicio Geológico Colombiano ed. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano.

15. Rodríguez Castiblanco, E. A., Sandoval Ramírez, J. H., Chaparro Cordón, J. L., Trejos González, G. A., Medina Bello, E., Ramírez Hernández, K. C., Castro Marín, E., Castro Guerra, J. A., & Ruiz Peña, G. L. (Eds.). (2017). *Guía metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1: 25.000*. Libros del Servicio Geológico Colombiano. <https://doi.org/10.32685/9789585978225>
16. van Westen, C. J., van Asch, T. W. J. & Soeters, R. (2006). Landslide hazard and risk zonation—why is it still so difficult?,” *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 65, 167–184. <https://doi.org/10.1007/s10064-005-0023-0>
17. UNGRD (Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres). (2014, 15 de enero). *Sistema Nacional de Información para la Gestión del Riesgo de Desastres*. <http://gestiondelriesgo.gov.co/snigrd/pagina.aspx?id=144>
18. Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación, Managua (Nicaragua). (2005). *Inundaciones fluviales. Mapas de amenaza, recomendaciones técnicas para su elaboración*. Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales y Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación, Managua.
19. Universidad de La Salle. (2020). *Tomo III: Lineamientos para la evaluación del riesgo con enfoque multiamenaza en corredores viales escala regional, zonal y local*. Instituto Nacional de Vías INVIAS, Bogotá, Informe. Convenio especial de cooperación 736-2020. INVIAS/UNISALLE/UNIQUEINDIO.
20. United States Agency for International Development. (USAID). (2018). *Guía para el mantenimiento rutinario de vías rurales*. Bogotá.
21. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt & Fondo de Adaptación. (2015). *Propuesta de límites funcionales de humedales a partir de criterios de geomorfología en Ventanas Ciénaga de la Virgen, ciénaga de Zapatos y Paz de Ariporo - Hato Corozal a escala 1:25.000*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, Bogotá.
22. United Nations Statistical Commission and Economic Commission for Europe. (2000). *Terminology on statistical metadata*. United Nations. Geneva.
23. Towards Data Science. (2020, 29 de noviembre). *What is Data*. <https://towardsdatascience.com/what-is-data-ade94b37204a>
24. Muñoz, A. (2009). *Geodesia y cartografía: Fundamentos de los sistemas de información geográfica*. Recursos educativos abiertos. <http://hdl.handle.net/10609/53642>
25. ESRI. (2021, 15 de enero). *What is GIS?* <https://www.esri.com/en-us/what-is-gis/overview>
26. Joshua, S., Smith, J. & Bianchetti, R. (2012). Encoding Our World: Geographic Data Representation. En Joshua, S., Smith, J. & Bianchetti, R. (Eds), *Mapping Our Changing World*. Department of Geography, Pennsylvania State University.
27. Alarcón-Ruiz, E. & Ordoñez-Pacheco, L. D. (2019) Tendencias de los Sistemas de Información Geográfica. Alcances y limitaciones. *Revista de Tecnologías Computacionales*, 3(12). <https://doi.org/10.35429/IOCT.2019.12.3.8.13>
28. Rodríguez, E. (2010, 4 y 5 de octubre). *La Geolocalización, Coordenadas hacia el Éxito. El potencial de la aplicación de una herramienta social de geolocalización en la comunicación institucional y corporativa*. II Congreso Internacional Comunicación 3.0. Salamanca.
29. Velazco, S & Joyanes, L. (2010). *Servicios de Geolocalización, el enfoque de las Redes Sociales*. V Simposio Internacional de Sistemas de Información e Ingeniería de Software en la Sociedad del Conocimiento (SISOFT -2010). Bogotá.

CAPÍTULO
4

Evaluación de la amenaza por avenidas torrenciales en el departamento de Antioquia a escala de cuenca

Edier Aristizábal¹, Federico Gómez Cardona^{1*}, María Isabel Arango Carmona¹

¹Departamento de Geociencias y Medio Ambiente. Universidad Nacional de Colombia. Medellín, Antioquia.

*Autor de contacto: Federico Gómez. Departamento de Geociencias y Medio Ambiente. Universidad Nacional de Colombia. Medellín, Antioquia. Correo-e: fevgomezca@unal.edu.co

Resumen

Las avenidas torrenciales son eventos altamente destructivos y frecuentes en ambientes tropicales y terrenos montañosos como Colombia, donde es común la presencia de asentamientos humanos ubicados sobre abanicos torrenciales. Esta combinación de factores crea un escenario crítico, donde las avenidas torrenciales son amenazas naturales que deben entenderse adecuadamente e incorporarse en los planes de ordenamiento territorial. El presente estudio propone una metodología para la priorización de cuencas con susceptibilidad y amenaza ante avenidas torrenciales, con un enfoque regional que permite comprender y caracterizar dichos eventos. La susceptibilidad de más de 3,000 cuencas del departamento de Antioquia es caracterizada a través de factores como morfometría, análisis de estabilidad de laderas y probabilidades de ocurrencia de la precipitación como factor detonante. Los resultados muestran que cerca de la mitad de las cuencas son de carácter torrencial, y que el 11% de ellas se encuentra en la categoría más alta de amenaza. Estas cuencas críticas deben priorizarse para realizar estudios a mayor detalle, que permitan definir con precisión las potenciales áreas de afectación y el nivel de riesgo asociado para los elementos expuestos.

Palabras clave: amenazas naturales, avenidas torrenciales, susceptibilidad, amenaza, ordenamiento territorial.

Hazard Assessment from debris flow in the department of Antioquia at the basin scale

Abstract

Debris-flow processes are deadly and highly destructive events, frequent in tropical environments and mountainous terrains like Colombia, where is common the location of human settlements along torrential fan areas. These conditions set up a critical scenario where debris flow represents hazards that must be understood and considered for land use planning. The present study proposes a methodology for prioritizing watersheds with a critical debris flow susceptibility and hazard, with a regional approach that allows for better understanding and characterizing such events. The susceptibility level of more than 3,000 watersheds in the Antioquia region is characterized using factors like morphometry, slope stability analysis, and precipitation probability as triggering factors. The results show that about half of the watersheds are torrential in nature, of which 11% are in the highest hazard category. These critical watersheds must be prioritized to carry out studies in greater detail to define potential areas of affectation and the level of risk associated with the exposed elements.

Keywords: Natural hazards, debris flows, susceptibility, hazard, land use.

1. INTRODUCCIÓN

Las avenidas torrenciales son fenómenos altamente destructivos y súbitos que representan una amenaza para la vida y la infraestructura localizada en zonas de abanicos aluviales, donde torrentes de montaña depositan su material transportado [1]. La ocurrencia de avenidas torrenciales se asocia con lluvias intensas de corta duración, en cuencas de áreas pequeñas y relieve montañoso [2], que dan como resultado un reducido tiempo de evacuación que impide la toma de acciones para reducir las pérdidas de vidas humanas e infraestructura [3].

En general, los flujos torrenciales se consideran como fenómenos de transporte de sedimentos compuestos por una mezcla de agua, materiales finos y gruesos, donde las fuerzas e interacciones sólidas y líquidas influyen en el movimiento [4,5]. Sin embargo, dependiendo de criterios como la concentración de sedimentos, la densidad y comportamiento del flujo y las características ambientales de la cuenca, estos eventos pueden variar de procesos gravitacionales a hidrológicos, con numerosas formas intermedias, incluso dentro del mismo evento. Si bien las avenidas torrenciales son un fenómeno global, no existe en la literatura un término en inglés directamente equivalente a este evento. Por el contrario, se han definido diferentes fenómenos en el continuo entre eventos hidrológicos y de ladera, incluyendo los términos *flash flood*, *debris flood*, *debris torrent* y *debris flow*. Para efectos de practicidad, se puede traducir las avenidas torrenciales como *debris flow processes*, para aclarar que se deben entender como un rango de procesos a nivel de cuenca, más que como un tipo de eventos específico.

Para el caso de Colombia, Aristizábal, Carmona y López [6] llevaron a cabo una recopilación y revisión de los fenómenos relacionados con las avenidas torrenciales. Allí, los autores exponen que el

término avenidas torrenciales, más que referirse a un fenómeno concreto, engloba un rango de procesos de tipo gravitacional e hidrológico a escala de cuenca, y proponen clasificarlas en tres tipos.

El primer tipo son las crecientes súbitas, generadas por eventos de lluvia cortos e intensos en cuencas montañosas. Estos eventos se reconocen por períodos de retorno cortos, caudales máximos altos, más no extremos, y baja concentración de sedimentos, normalmente por debajo de 30% [7]. Estas características dan como resultado un flujo torrencial de dos fases; es decir, que aún se comporta como un líquido, pero que carga una baja concentración de sedimentos, principalmente finos y arenas [8–11]. El segundo tipo de avenidas torrenciales se denomina inundación de escombros, y se refiere a un flujo generado por eventos de lluvia intenso que, dadas la pendiente y disponibilidad de sedimentos de la cuenca, aumenta su caudal y poder erosivo. Esto genera que la corriente remueva sedimentos del lecho del canal, además de pequeños colapsos de sus orillas. Este flujo torrencial también tiene dos fases, pero tiene un poder destructivo importante ya que remueve gran cantidad de sedimentos gruesos, incluso bloques [12,13].

Finalmente, el tercer tipo de avenidas torrenciales son los flujos de escombros canalizados. Estos fenómenos se generan con eventos de precipitación particularmente intensos, que además de generar crecientes súbitas, detonan enjambres de deslizamientos en las laderas, un fenómeno descrito por Crozier [14] como *Multiple-Occurrence Regional Landslide Events* (MORLE). Estos movimientos en masa transportan material desde las vertientes al cauce, aumentando la concentración de sedimentos del flujo y su poder erosivo. Cuando la concentración de sedimentos es muy alta, el flujo deja de comportarse como un líquido que carga sedimentos por arrastre, y pasa a tener una sola fase, donde el agua lleva los sedimentos en suspensión a su misma velocidad [15]. Dadas sus altas concentraciones de sedimentos, estos fenómenos se comportan como flujos no newtonianos de una sola fase, es decir aquellos donde la viscosidad es variable dependiendo de las interacciones y esfuerzos entre partículas de sedimentos y el fluido intersticial.

Algunos criterios para diferenciar los flujos de escombros canalizados de otros tipos de avenidas torrenciales incluyen su caudal máximo y el orden del canal donde se generan. Según Hungr, Leroueil y Picarelli [16], las inundaciones de escombros exhiben un caudal pico de 2 a 3 veces mayor al caudal máximo de una inundación, mientras que los flujos de escombros producen caudales máximos hasta 50 veces mayores, generando así un potencial destructivo enorme. A su vez, los flujos de escombros suelen limitarse a cuencas de orden pequeño, mientras que las inundaciones de escombros pueden ocurrir en cuencas de mayor orden [17].

La región andina de Colombia es un ambiente tropical y montañoso donde son frecuentes los episodios de lluvias de alta intensidad que desencadenan avenidas torrenciales. La ubicación de centros urbanos y población en zonas de abanicos torrenciales permiten que la ocurrencia de estos eventos resulte en pérdidas de vidas y daños económicos. Según Aristizábal et. al [18], en Colombia han ocurrido 1,358 eventos de avenida torrencial entre 1921 y 2018, causando 3,318 muertes, y dejando 1,264,705 persona afectadas, 3,318 viviendas destruidas y 23,694 afectadas. Este escenario muestra la importancia del conocimiento de este fenómeno, así como la implementación de medidas de reducción de riesgo y de ordenamiento territorial.

Este estudio se compone de la evaluación de la susceptibilidad y amenaza por avenidas torrenciales a escala de cuenca en el departamento de Antioquia, el cual, dada su topografía y clima tropical, se ha visto especialmente afectado ante eventos de avenida torrencial. Según la base de datos del grupo de investigación *Geohazards* (www.geohazards.com.co), se han generado allí más de 9,272 avenidas torrenciales entre 1921 y 2021, causando más de 440 muertes. Cerca del 50% de las muertes por avenidas torrenciales han tenido lugar en el Valle de Aburrá, la región más poblada, donde ocurren cerca del 30% de los eventos.

La metodología propuesta hace uso de Sistemas de Información Geográfica y bases de datos de libre acceso para su práctica replicación. Para la susceptibilidad se utilizó la metodología de análisis discriminante a partir de una base de datos de cuencas torrenciales y no torrenciales junto con sus parámetros morfométricos. Se implementó en el departamento de Antioquia, donde se subdividió el territorio en 3,039 cuencas de áreas que varían entre 8 y 40 km² y se caracterizaron a través de las funciones discriminantes en torrenciales o no torrenciales. Posteriormente, usando la granulometría de los suelos presentes en las cuencas, se diferenciaron los diferentes tipos de avenidas torrenciales a los cuales una cuenca puede ser susceptible. Finalmente, realizando un análisis estadístico de datos de precipitación, se calculó la probabilidad de ocurrencia de eventos extremos de precipitación que pueden desencadenar avenidas torrenciales, entendiendo esta probabilidad como una aproximación a la amenaza.

Este análisis corresponde al resultado del primer estudio a nivel departamental de susceptibilidad y amenaza ante avenidas torrenciales en Colombia a nivel de cuenca con una mirada multi-amenaza. Siguiendo este mismo enfoque, el Servicio Geológico Colombiano lanzó en el año 2022 la Guía metodológica para la zonificación de amenaza por avenidas torrenciales [19]. Esta guía proporciona unos lineamientos generales para la elaboración de estudios de amenaza para su incorporación en los Planes de Ordenamiento Territorial a escala básica (1:25,000), y detallada (1:2,000). La guía representa el primer documento metodológico oficial que propone analizar las avenidas torrenciales como eventos concatenados, es decir, que combinan análisis de estabilidad de laderas, aporte de sedimentos e inundaciones.

Caja 1. Glosario*

Avenida torrencial: flujos formados por una mezcla de sedimentos y agua en diferentes proporciones, que se desplazan a grandes velocidades a lo largo de cauces en cuencas de montaña, y que tienen como causas detonantes la presencia de uno o varios de los siguientes eventos: lluvias concentradas intensas o lluvias antecedentes, enjambre de movimientos en masa, rotura de presas naturales o artificiales o aporte de grandes volúmenes de agua por deshielo.

Creciente súbita: flujo torrencial de dos fases generadas por eventos de lluvia cortos e intensos en cuencas montañosas. Estos eventos se reconocen por períodos de retorno cortos, caudales máximos altos, más no extremos, y baja concentración de sedimentos, principalmente finos y arenas.

Inundación de escombros: flujo torrencial de dos fases generado por un evento de lluvia intenso que aumenta el caudal de la cuenca súbitamente y poder de erosión. Esto genera que el flujo remueva los sedimentos del lecho del canal, además de crear pequeños colapsos de sus orillas capaz de movilizar bloques de roca.

Flujo de escombros canalizado: flujo torrencial con altas concentraciones de sedimentos que se comporta como un fluido no newtoniano de una sola fase. Se generan con eventos de precipitación particularmente intensos que detonan enjambres de deslizamientos en las laderas, los cuales aumentan considerablemente la concentración de sedimentos y el poder erosivo y destructivo del flujo.

*Definiciones de acuerdo con Aristizábal, Carmona y López [6].

2. ÁREA DE ESTUDIO

Colombia se encuentra en el norte de la cordillera de los Andes en una región tectónicamente activa con un clima tropical, creando un escenario multi-amenaza donde fenómenos como deslizamientos, inundaciones y avenidas torrenciales son recurrentes. El 75% de su población se asienta sobre las cordilleras andinas, mientras que el 77% se concentra en centros urbanos [20].

El ciclo de precipitación anual sobre la región andina presenta un carácter bimodal, con estaciones húmedas de marzo a mayo y de septiembre a noviembre; y estaciones secas de diciembre a febrero y de junio a agosto [21–24]. La variabilidad anual de las precipitaciones está dada principalmente por el desplazamiento de la Zona de Convergencia Intertropical (ITCZ) [24], mientras que su variabilidad interanual está controlada por los efectos de las fases de El Niño-Oscilación del Sur (ENOS): El Niño, la fase cálida y La Niña, la fase fría [25–28]. A escala local, los Andes influyen en la dinámica climática y de precipitaciones en la región. Las fuertes características topográficas inducen la circulación atmosférica local, la cual aumenta la convección profunda, creando tormentas intensas y localizadas, que desencadenan movimientos en masa y avenidas torrenciales [29,30].

El estudio se implementó en el departamento de Antioquia, ubicado al noroccidente de la zona andina colombiana, entre las cordilleras Central y Occidental. La región cuenta con una extensión de 63.612 km² y relieve variado, desde llanuras aluviales hasta zonas montañosas (**Fig. 1**). Su población supera los 6,6 millones de habitantes para 2020, de los cuales 4 millones se encuentran en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, que incluye a Medellín y nueve municipios aledaños, constituyendo el segundo mayor asentamiento de Colombia [31].

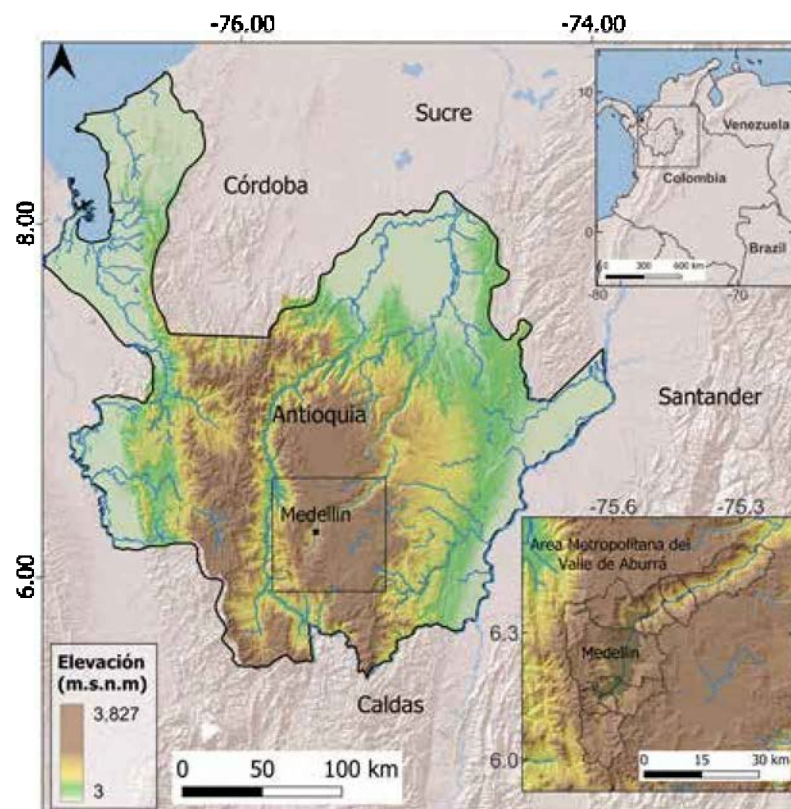


Figura 1. Mapa topográfico y ubicación del departamento de Antioquia, y del Área Metropolitana del Valle de Aburrá.

3. DATOS Y METODOLOGÍA

El análisis se realiza en tres pasos principales: el primero es el análisis de susceptibilidad, donde se utiliza un método estadístico multivariado para clasificar las cuencas del departamento entre torrenciales y no torrenciales. Posteriormente, a partir de la geología presente en la zona de estudio, se analiza cuál es el evento torrencial más destructivo que puede ocurrir en cada cuenca. El tercer paso es el análisis de la amenaza, donde entran en consideración los factores detonantes. En este análisis se tuvo en cuenta la precipitación como factor detonante, tanto de las avenidas torrenciales como de los deslizamientos que pueden alimentar los flujos. Así, la amenaza se divide en el análisis de la probabilidad temporal de ocurrencia de la lluvia y de los eventos de interés: movimientos en masa y avenidas torrenciales; y de la magnitud, establecida a partir del volumen potencial de sedimentos que puede aportar la cuenca en la ocurrencia de la avenida torrencial. La **Figura 2** muestra un esquema de la metodología implementada.

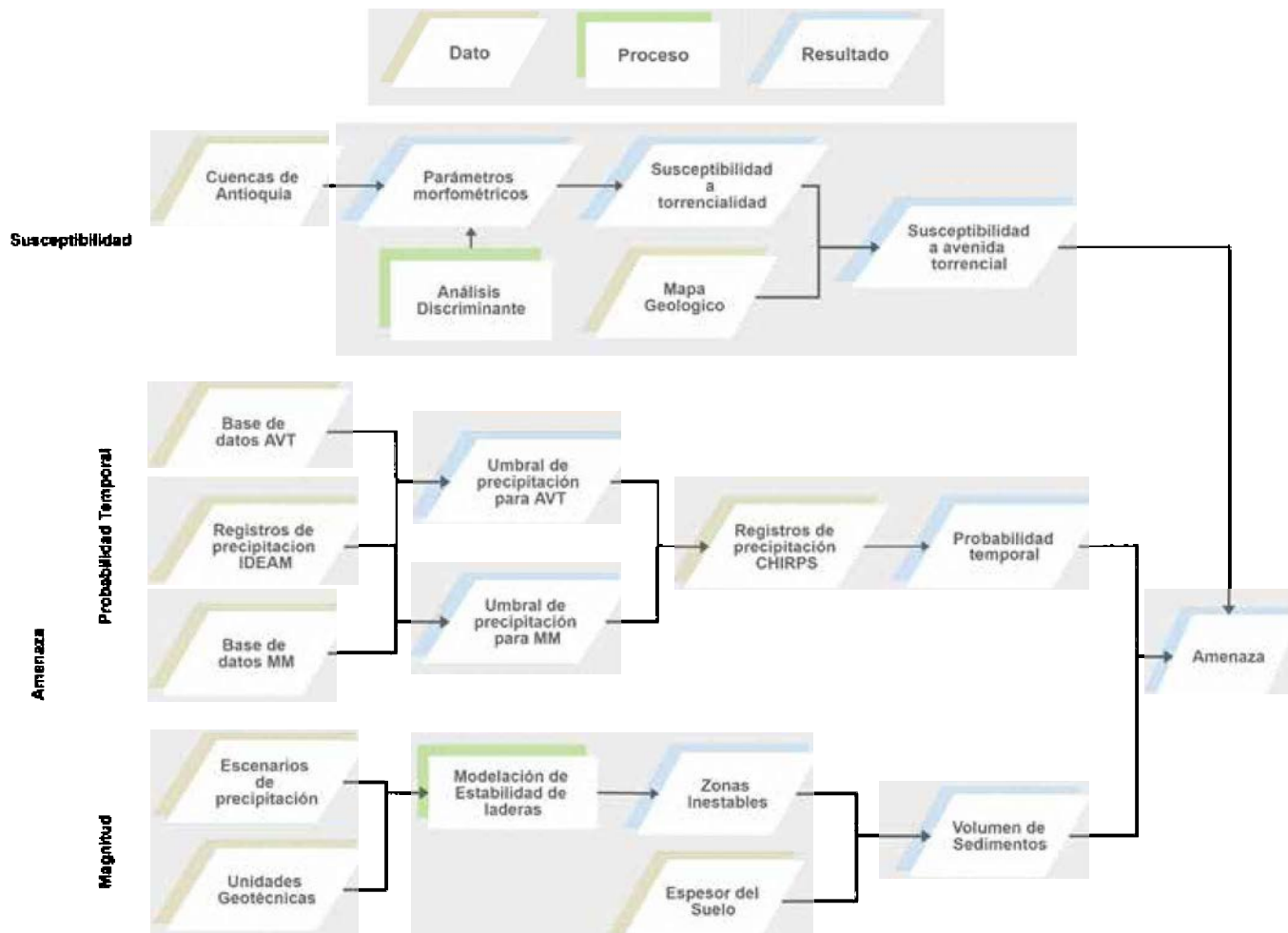


Figura 2. Diagrama de la metodología empleada en el estudio.

3.1 Susceptibilidad

Caja 2. Susceptibilidad a avenida torrencial

La susceptibilidad a avenida torrencial pretende contestar dos preguntas:

¿En cuáles cuencas se puede esperar la ocurrencia de eventos torrenciales?

Las avenidas torrenciales se presentan en cuencas pequeñas con relieves montañosos y fuertes pendientes, bajo la presencia de intensos eventos de lluvia, y el aporte de sedimentos provenientes de las laderas o su propio cauce.

En aquellas cuencas que son torrenciales, ¿cuál es el tipo de evento más crítico que se podría suceder?

De acuerdo con el análisis de los registros históricos de avenidas torrenciales en el país, los flujos de escombros canalizados, que son los más críticos y destructivos, se relacionan con la presencia de rocas graníticas en la zona alta de la cuenca y con enjambres de movimientos en masa. La geología de las cuencas torrenciales se analiza para detectar la presencia de cuerpos graníticos. Todas las cuencas torrenciales son propensas a generar crecientes súbitas. Sin embargo, en cuencas torrenciales con cuerpos graníticos, se considera que el evento más crítico posible son los flujos de escombros canalizados. En cuencas torrenciales sin cuerpos graníticos, se consideran que son las inundaciones de escombros.

El primer paso consiste en delinear las cuencas que constituyen la unidad de análisis de la metodología. Para el caso de Antioquia, dada la escala de estudio y la capacidad computacional, se delinearono cuencas cuya área se encuentre en el rango entre 8 y 40 km², eliminando aquellas que fueran más pequeñas que 8 km², y subdividiendo aquellas mayores a 40 km². Hay algunas observaciones a nivel mundial sobre los tamaños de cuencas torrenciales, como el propuesto por Marchi et. al [32], quienes evaluaron 25 cuencas asociadas a avenidas torrenciales en Europa y reportaron que por lo general, tienen áreas menores a 1,000 km². A nivel local, las 31 cuencas asociadas a avenida torrencial en Colombia reportadas por Arango, et. al [33] varían en área desde 1.3 y 849 km². Sin embargo, este criterio es flexible y puede adaptarse a otras zonas de estudio dependiendo de la escala de análisis y el conocimiento sobre la naturaleza de estos eventos en la zona.

Estudios previos han utilizado parámetros morfométricos de las cuencas para estimar la susceptibilidad a diversos fenómenos de flujo a nivel mundial [34–37], y más recientemente, en Colombia. En el trabajo llevado a cabo por Arango, et. al [33], se realizó un análisis estadístico multivariado para conocer los parámetros en términos de morfometría, que definen el carácter torrencial de una cuenca. Para dicho análisis, los autores seleccionaron en total 73 cuencas en los Andes colombianos: 31 relacionadas con registros de avenidas torrenciales, y 42 con topografía y ubicación similares, pero sin registro asociado a eventos de este tipo. Del conjunto de cuencas extrajeron múltiples índices morfométricos utilizando el Modelo Digital de Elevación (DEM), y se analizaron las principales diferencias entre los valores de los parámetros dentro de cada grupo. Entre los métodos estadísticos analizados por los autores se encuentra el Análisis Discriminante de Fisher [38]. Este método permite explicar las diferencias entre dos grupos de objetos en categorías previamente definidas [39], a través de un grupo de variables medidas sobre ellos. Utilizando este análisis, es posible entender cuáles parámetros morfométricos influyen en que una

cuenca sea torrencial, además de generar ecuaciones, llamadas funciones discriminantes, que permiten clasificar de manera sistemática nuevas cuencas en uno de los grupos: susceptibles o no susceptibles a eventos torrenciales.

Una vez se conocen las cuencas que son susceptibles a generar episodios torrenciales dada su morfología, el análisis de susceptibilidad por tipo de avenida torrencial es llevado a cabo. El propósito de este análisis es conocer el tipo de avenida torrencial más peligroso que se puede presentar en una cuenca. Para este análisis, se tomó en cuenta el inventario de avenidas torrenciales del grupo de investigación Geohazards, donde se clasificaron, cuando fue posible, las avenidas torrenciales según su tipo: inundación súbita, inundación de escombros, y flujos de escombros canalizados. Esta clasificación se realizó con base en posibles menciones en el registro sobre enjambres de deslizamientos, la presencia de grandes bloques de roca en el depósito, y registros gráficos del evento cuando estuvieron disponibles. Se observó que más del 70% de las avenidas torrenciales de tipo flujo de escombros canalizados en la base de datos tuvieron lugar en cuencas con suelos de roca granítica residual, donde se registraron enjambres de movimientos en masa (MORLE). De hecho, los eventos más destructivos de avenidas torrenciales recientes en el país tienen como característica general la presencia de zonas montañosas de composición granítica como zona fuente de sedimentos en los flujos. Una posible explicación a este fenómeno es que las rocas graníticas, ricas en minerales como cuarzo y feldespato, se meteorizan y generan material de tamaño predominantemente arenoso con permeabilidad alta. Estos suelos se ven principalmente afectadas por precipitaciones de alta intensidad y poca duración, generando gran densidad de deslizamientos superficiales, a diferencia de los suelos fino-granulares, que tienden a afectarse más por lluvias antecedentes, es decir, de bajas intensidades, pero larga duración, debido a su baja permeabilidad [40–43]. El potencial particularmente destructivo de los eventos cuya área fuente son rocas graníticas se da por que los suelos arenosos tienen el potencial de alterar la reología del flujo al aumentar su densidad y transformarlo en un flujo espeso de una sola fase, capaz de transportar por flotación bloques de roca hasta de tamaños métricos [44]. La predominancia de suelos graníticos en eventos MORLE ha sido poco reportada a nivel mundial, con algunos ejemplos similares [43,45] pero probablemente sea un fenómeno localizado en zonas propensas a precipitaciones intensas, suelos meteorizados de espesores considerables, y rocas graníticas en zonas de alta pendiente, las cuales abundan en Colombia.

Para empezar, se considera que toda cuenca torrencial puede crear potencialmente crecientes súbitas. Sin embargo, este tipo de evento no representa en ningún caso el evento más destructivo posible, por lo que la distinción se hace entre cuencas susceptibles a presentar inundaciones de escombros, y flujos de escombros canalizados como eventos más críticos. Considerando que la diferencia entre estos tipos de avenidas torrenciales varía en función principalmente del aporte de sedimentos de ladera, ya sea por la ocurrencia de movimientos en masa o remoción de sedimentos del cauce, la clasificación de la susceptibilidad entre estos dos eventos se llevó a cabo analizando el suministro potencial de diferentes tipos de sedimentos.

Las cuencas susceptibles a generar flujos de escombros canalizados son aquellas que fueron clasificadas como torrenciales y que tienen material potencialmente deslizable de granulometría gruesa, como arenas y gravas. Las cuencas que son susceptibles a inundaciones de escombros son aquellas torrenciales donde, por el contrario, los suelos que se encuentran en la cuenca son granulometría fina, como arcillas, y limos. Este tipo de materiales no suelen aportar grandes volúmenes a los flujos torrenciales ya que no son desencadenados por intensas precipitaciones. Por tanto, el aporte de sedimentos de las inundaciones de escombros suele provenir principalmente de la remoción material del lecho y las márgenes del cauce.

Para definir la granulometría del material de aporte, se utilizó el mapa geológico elaborado por el Servicio Geológico Colombiano (SGC) con escalas entre 1:100,000 y 1:400,000. Dado que en dicha clasificación geológica una sola unidad puede corresponder a un espectro amplio de rocas con composiciones y texturas diferentes, la clasificación se realiza tomando la mineralogía descrita de la litología predominante de cada unidad, separándolas entre rocas con regolitos fino granulares y grueso granulares, teniendo en cuenta que este análisis es una generalización, donde no se tienen en cuenta los diferentes grados de meteorización de la roca parental ni las variaciones mineralógicas o de tamaño de grano que se puedan presentar internamente. Los regolitos fino-granulares son considerados producto de la meteorización de rocas con alto contenido de feldspatos, anfíbol, piroxenos, olivino, plagioclasas, entre otros, que al meteorizarse suelen alterarse a minerales del grupo de las arcillas, como rocas ígneas básicas, metamórficas de protolito pelítico y básico, y rocas sedimentarias finas. Por su parte, los grueso-granulares están asociados a la meteorización de rocas ácidas ricas en cuarzo, como rocas plutónicas de composición granítica.

Finalmente, cruzando los resultados de la clasificación de respuesta hidrológica de las cuencas con los resultados de potencial aporte de sedimentos dado por su litología, se realiza la clasificación de susceptibilidad a evento torrencial más crítico posible por cuenca.

Cuencas con regímenes torrenciales y presencia de regolitos grueso granulares son susceptibles a presentar todos los eventos torrenciales, siendo el más crítico el tipo flujo de escombros canalizados. Así mismo, las cuencas con regímenes torrenciales y presencia predominante de regolitos fino-granulares son susceptibles a presentar tanto crecientes súbitas como inundaciones de escombros, siendo éstos últimos los más críticos. Por otra parte, las cuencas clasificadas como no torrenciales en el análisis morfométrico son consideradas no susceptibles a ningún tipo de avenida torrencial.

3.2 Amenaza: magnitud y probabilidad temporal

Caja 3. Amenaza por avenida torrencial

La amenaza por avenida torrencial en una cuenca está dada por la magnitud de un posible evento, y por la probabilidad temporal de un evento de lluvia que lo desencadene.

Magnitud: La descarga pico, que se relaciona directamente con la magnitud de una avenida torrencial, es variable dependiendo de su tipo. Los flujos de escombros canalizados tienen descargas pico hasta 50 veces mayores a las de otras avenidas torrenciales, convirtiéndolas en eventos de magnitudes muy altas. Estas descargas extremas sólo son posibles si hay enjambres de deslizamientos que aporten gran volumen de sedimentos al flujo, por lo que, para efectos de este estudio, se asume que todo flujo de escombros canalizados está relacionado eventos de movimientos en masa. De esta forma, la magnitud del evento en cuencas susceptibles a flujos de escombros canalizados es determinada a partir de un modelo físico simple de estabilidad de laderas, que cuantifica el volumen de sedimentos que podrían potencialmente alcanzar el drenaje y aumentar su caudal. Dado que la magnitud de las inundaciones de escombros es considerablemente menor, y que pueden no estar acompañadas de eventos de deslizamientos, siempre se considera su magnitud como media. Sin embargo, este criterio puede ser ajustado de acuerdo con las condiciones propias de otras zonas de estudio.

Probabilidad temporal: En base a una recopilación de eventos de avenidas torrenciales y a un registro histórico de precipitación, es posible determinar la probabilidad de que un valor dado de intensidad de lluvia detone una avenida torrencial. Dado que los flujos de escombros canalizados se relacionan con eventos de movimientos en masa, se utiliza un registro histórico de movimientos en masa para evaluar la probabilidad conjunta de un evento de avenida torrencial, y un evento de movimiento en masa.

Varnes [46] define la amenaza como la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno potencialmente destructivo dada un área y un tiempo determinados. Estudios recientes consideran que una evaluación completa de la amenaza debe incluir tanto un análisis espaciotemporal como un análisis de magnitud [47,48]. Por consiguiente, el diagnóstico de la amenaza tiene tres componentes principales: el primero es el mapeo de la susceptibilidad —descrita anteriormente—, el segundo es la determinación de la probabilidad temporal de ocurrencia de un evento detonante específico —en este caso la lluvia— y el tercero la evaluación de la magnitud del evento.

Probabilidad temporal. La probabilidad temporal (PT) se define como la probabilidad de ocurrencia de un evento detonante específico, en este caso un evento de lluvia de alta intensidad que desencadene la ocurrencia de una avenida torrencial en un periodo de tiempo específico. Inicialmente, es necesario conocer las probabilidades de excedencia de un evento de precipitación. Para esto, se utiliza la base de datos de libre acceso Climate Hazard Group Infrared Precipitation with Stations (CHIRPS), la cual tiene formato ráster con resolución espacial de aproximadamente 5 km, y contiene información diaria desde 1981. A partir de esta base de datos, se obtiene para cada una de las celdas ráster de 5 km la probabilidad de excedencia del evento de precipitación definido, calculado así:

$$P_p = \frac{\text{Días excedidos}}{\text{Total de días}} \quad (1)$$

Para el caso de las inundaciones de escombros, la probabilidad temporal (PT_{IE}) se obtiene a partir de la probabilidad de excedencia de un evento de lluvia (P_p) y de la probabilidad condicional de tener una avenida torrencial (P_{at}), dado que se exceda el evento de lluvia, así:

$$PT_{IE} = P_p(P_{at}|P_p) \quad (2)$$

Así mismo, la probabilidad temporal de los flujos de escombros canalizados (PT_{FEC}), se calcula considerando adicionalmente la probabilidad condicionada de que esta precipitación genere movimientos en masa ($P_{mm}|P_p$), así:

$$PT_{FEC} = P_p(P_{at}|P_p)(P_{mm}|P_p) \quad (3)$$

Teniendo los valores de P_{at} , P_{mm} y P_p , se calcula la distribución espacial de las probabilidades temporales de ocurrencia de los eventos de inundación de escombros (PT_{IE}) y flujos de escombros canalizados (PT_{FEC}). A cada cuenca se le asigna la máxima probabilidad de los píxeles que se encuentran dentro de ella.

Dado que los valores de probabilidades de avenida torrencial y movimientos en masa están relacionados con un evento de precipitación, se requiere primero conocer aquellos valores de precipitación que se considere generadores de estos eventos. Para esto, se construyó un inventario de 504 avenidas torrenciales y 8046 movimientos en masa en Antioquia, a partir de la recopilación y filtrado de las bases de datos de libre acceso DESINVENTAR (<https://www.desinventar.org>) y SIMMA (<https://simma.sgc.gov.co>). Para cada uno de los eventos recopilados, se conoce su ubicación y fecha, necesarias para su correlación con un evento de lluvia. Esta correlación utilizó los datos de precipitación de 249 estaciones del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), también de acceso libre. A estas estaciones pluviométricas se les asigna un área de influencia a partir de los polígonos de Thiessen y un rango de máximo 5 km y se correlacionan los eventos que se encuentren dentro de estas dos áreas. Los eventos que se encuentren a una distancia mayor a 5 km de una estación pluviométrica son descartados con el fin de reducir el error por la variabilidad espacial de la lluvia. También son descartados aquellos eventos en los cuales la estación más cercana no haya registrado ningún evento de lluvia, ya que se considera como necesaria la ocurrencia de un evento de precipitación para la generar una avenida torrencial. Para el caso de los movimientos en masa, se asume que aquellos ocurridos un día de no-lluvia son detonados por precipitaciones acumuladas los días antecedentes al evento. Finalmente, considerando estos filtros, quedan para el análisis 269 avenidas torrenciales y 4930 movimientos en masa. La **Figura 3** muestra la ubicación de los deslizamientos, avenidas torrenciales y estaciones pluviométricas utilizadas.

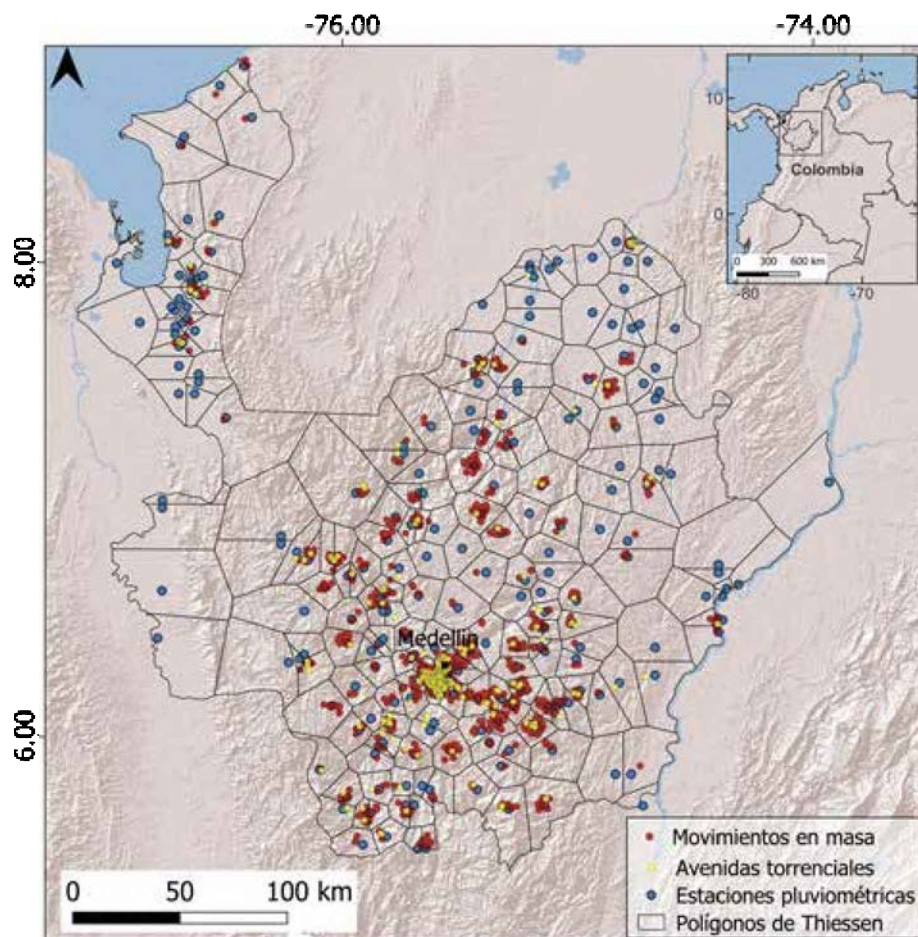


Figura 3. Inventario de avenidas torrenciales, movimientos en masa y estaciones pluviométricas utilizadas para el análisis de probabilidad temporal.

Utilizando esta base de datos de eventos y precipitaciones asociadas, se realiza un análisis de correlación lluvia-evento usando el método estadístico multivariado de regresión logística. Este método estima la relación entre una variable dependiente —en este caso la ocurrencia de avenidas torrenciales o movimientos en masa—, con variables independientes, en este caso la precipitación. El método tiene la ventaja de que las variables independientes no deben seguir una distribución normal, como es el caso de la lluvia. A partir de los resultados de la regresión logística, se construye una ecuación de probabilidad de ocurrencia de un movimiento en masa o una avenida torrencial, en función de un valor dado de precipitación.

Magnitud. La magnitud de las avenidas torrenciales es función de la cantidad de sedimentos de las laderas que pueden ser incorporados a la avenida torrencial. Para los flujos de escombros canalizados, la magnitud depende del volumen de sedimentos que han sido transportados desde las laderas de la cuenca hasta el canal, mientras que los eventos de inundación de escombros tienen magnitudes menores, considerando que los sedimentos que llevan provienen de la remoción de material del lecho y las márgenes en el cauce del drenaje.

Para determinar el volumen de sedimentos incorporables al flujo en cada cuenca, es necesario estimar las zonas que son inestables ante episodios de precipitación, y conocer el volumen de suelo que se llegaría a movilizar. La zonificación de la estabilidad de laderas se obtuvo a partir del modelo con base física SHALSTAB (SHALLOW Landslide STABILITY), un modelo acoplado hidrológico-geotécnico propuesto por Montgomery y Dietrich [49] que utiliza la precipitación en estado estacionario para generar patrones espaciales de humedad y estimar el potencial de falla a través de un análisis de talud infinito según la ley de Mohr-Coulomb, como se observa en la siguiente ecuación:

$$\frac{a}{b} = \frac{T}{q} \sin \varphi \left[\frac{P_s}{P_w} \left(1 - \frac{\tan \Theta}{\tan \varphi} \right) + \frac{c}{\rho_w b \cos^2 \Theta \tan \varphi} \right] \quad (4)$$

Donde, a es el área contributiva (m^2), b es el tamaño de la celda (m), T es la transmisividad del suelo en condiciones saturadas ($\frac{m^2}{día}$), q es la precipitación ($\frac{mm}{día}$), φ es la pendiente local ($^\circ$), ρ_w es el peso unitario del suelo ($\frac{kN}{m^3}$), ρ_w es el peso unitario del agua ($\frac{kN}{m^3}$), Θ es el ángulo de fricción ($^\circ$), c es el espesor de la capa de suelo deslizable (m) y la cohesión (kPa).

Los parámetros geotécnicos para el modelo de estabilidad de laderas se obtienen a partir de la base de datos libre GeoTech Data (<http://geotechdata.info>) que compila estudios geotécnicos y brinda rangos típicos y valores promedio de los suelos a parte de la clasificación USCS de los suelos. Las propiedades geotécnicas fueron asignadas con base al mapa geológico del departamento, analizando la composición mineralógica y granulométrica típica de la meteorización de cada una de las unidades geológicas superficiales.

El espesor de suelo deslizable se evalúa a través del modelo propuesto por Catani et. al [50], el cual estima espesores de suelos utilizando la topografía y valores empíricos de espesores máximos y mínimos de suelo, lo que permite adaptar el modelo a diferentes ambientes, a partir de la siguiente ecuación:

$$b_i = b_{max} \left[1 - \frac{\tan \Theta_i - \tan \Theta_{min}}{\tan \Theta_{man} - \tan \Theta_{min}} \left(1 - \frac{b_{min}}{b_{max}} \right) \right] \quad (5)$$

Donde, θ_i es la pendiente local ($^\circ$), θ_{max} y θ_{min} la pendiente máxima y mínima en la cuenca, respectivamente y b_{max} y b_{min} los valores que restringen, el espesor de suelo deslizable (m).

De esta forma, para cada cuenca analizada, el modelo SHALSTAB estima las celdas que fallarían ante diferentes valores de lluvia detonante. Esta información, junto con la distribución espacial del espesor del suelo, permite calcular el volumen de sedimentos que serán desplazados. Se asume que todo el material que falla ante este evento es conducido hasta el cauce y alimenta la avenida torrencial. En la realidad esto no es así, ya que muchos movimientos en masa no se alcanzan a propagar hasta los drenajes; sin embargo, al considerar el volumen total se simplifica el análisis y se evalúa el escenario más crítico. Para hacer posible la comparación entre cuencas, el valor estimado de volumen de sedimentos inestables se normaliza con el área de la cuenca.

3.3 Cálculo de la amenaza

Para la estimación de la amenaza se utiliza un análisis de matrices categóricas. Para esto, los valores de probabilidad temporal y magnitud son divididos en categorías y su cruce da como resultado un nivel de amenaza. El nombre de las categorías (p. ej. muy baja, baja, media, alta, muy alta, etc.), y los valores límites entre ellas es un criterio que se debe adaptar a las necesidades del análisis, su audiencia, y los niveles de aceptación de la amenaza y el riesgo propios de cada zona. Dado que el objetivo para la zona de Antioquia era conocer zonas de amenaza relativa alta, la separación entre las categorías se realizó en base a los quiebres naturales del histograma de distribución de cada variable. De esta forma, el análisis muestra el nivel de probabilidad temporal, magnitud y amenaza de cada cuenca, en relación con las demás del departamento. También, para la zona de estudio, se evitó utilizar la categoría baja, para no brindar una falsa sensación de seguridad ante un fenómeno de capacidad destructiva tan alta como las avenidas torrenciales.

Finalmente, la probabilidad temporal y la magnitud son cruzadas categóricamente a partir de la matriz de decisión presentada en la **Tabla 1**. Este análisis solo se realiza para las cuencas definidas como susceptibles a avenidas torrenciales. Se podría decir, por tanto, que la categoría de amenaza baja por avenidas torrenciales la tendrían las cuencas clasificadas como no torrenciales.

Tabla 1. Matriz de cálculo de amenaza.

		Magnitud		
		Muy alta	Alta	Media
Probabilidad temporal	Muy alta	Muy alta	Muy alta	Alta
	Alta	Muy alta	Muy alta	Alta
	Media	Muy alta	Alta	Media

4. RESULTADOS

El departamento fue primero subdividido en cuencas siguiendo el criterio de áreas entre 8 y 40 km², resultando en 3039 cuencas objeto de estudio.

Susceptibilidad. Según los resultados del análisis llevado a cabo por Arango, Aristizábal y Gómez [33], las variables más importantes para describir la torrencialidad de las cuencas de la zona andina colombiana son: el número de drenajes, la tasa de meandricidad, la constante de mantenimiento del canal, el relieve y el índice de Melton. La **Tabla 2** muestra las fórmulas y autores de dichos parámetros.

Tabla 2. Parámetros morfométricos relevantes para definir la torrencialidad de cuencas en los Andes Colombianos.

Parámetro	Ecuación	Fuente
Número de drenajes N_u	$N_u = N_1 + N_2 + \dots + N_n$	[51]
Tasa de meandricidad R_w	$R_w = \frac{C_l}{L_b}$	C_l Longitud del drenaje principal (km) L_b Longitud de la cuenca (km) [52]
Constante de mantenimiento del canal C	$C = \frac{A}{L_u}$	A = Área de la cuenca (km ²) L_u Longitud de drenajes [53]
Relieve H	$H = Z - z$	Z : Cota mayor [54]
Índice de Melton M	$M = \frac{H}{\sqrt{A}}$	z : Cota menor [37]

De la combinación lineal de estas variables, los autores hallaron las funciones discriminantes presentadas en las ecuaciones $A = 0.078N_u + 447.607R_w + 58.488C + 26.305H + 215.262M - 208.620$ (6) y $T = 0.140N_u + 510.863R_w + 71.341C + 30.161H + 291.057M - 287.070$ (7), aplicables a Colombia.

$$A = 0.078N_u + 447.607R_w + 58.488C + 26.305H + 215.262M - 208.620 \quad (6)$$

$$T = 0.140N_u + 510.863R_w + 71.341C + 30.161H + 291.057M - 287.070 \quad (7)$$

Si se desea conocer el carácter de una nueva cuenca, basta con extraer los valores de los cinco parámetros morfométricos y calcular el valor de ambas funciones discriminantes. La cuenca es susceptible a torrencialidad si $T > A$, y no susceptible en el caso contrario.

Los valores de los cinco índices morfométricos seleccionados fueron extraídos para cada una de las cuencas de Antioquia, y su susceptibilidad por avenida torrencial calculada aplicando las funciones discriminantes. La **Figura 4** muestra los resultados de la clasificación de las cuencas en comportamiento torrencial o no torrencial. Las cuencas clasificadas como torrenciales se ubican principalmente en zonas

montañosas con altas pendientes del centro de Antioquia. Las llanuras aluviales de los ríos Cauca, al occidente, y Magdalena, al oriente del departamento, tienen una topografía suave y bajas pendientes, donde predominan las cuencas no torrenciales.

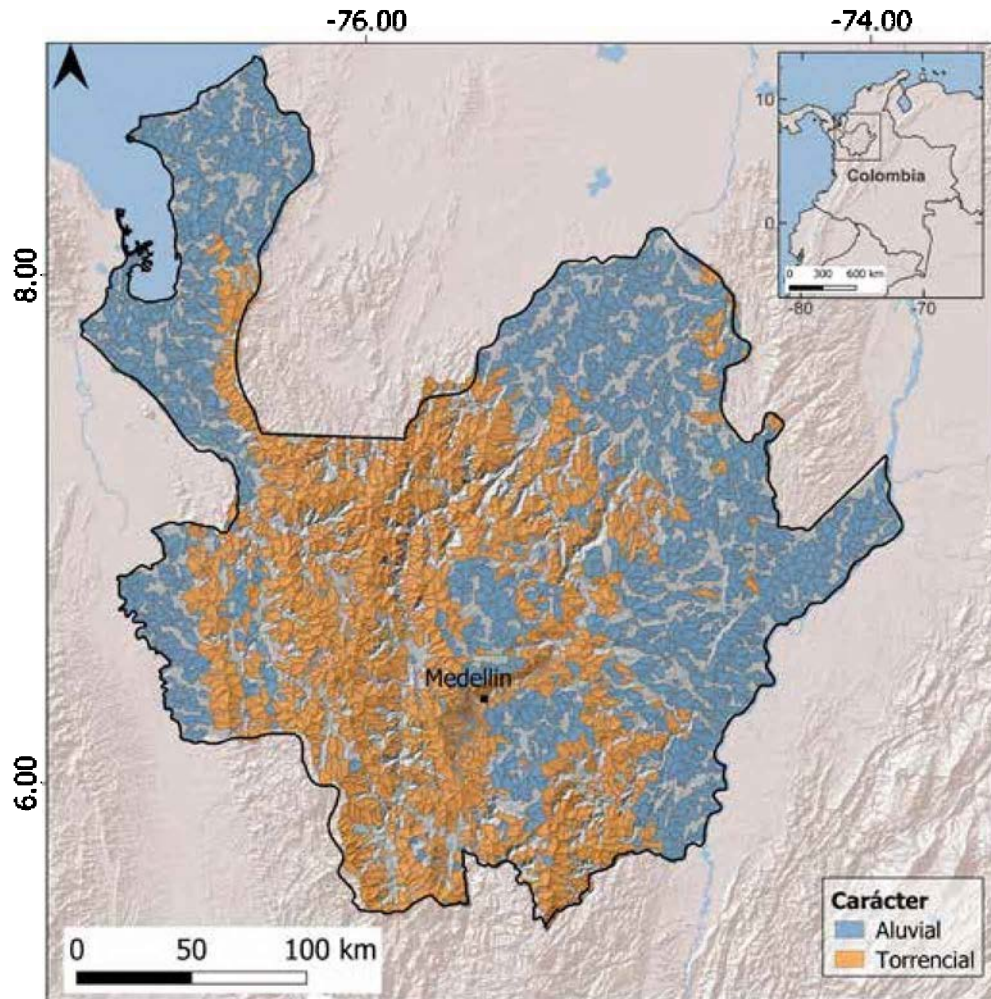


Figura 4. Resultados de clasificación de las cuencas en carácter torrencial y no torrencial.

La **Figura 4** muestra los resultados de la clasificación de las unidades geológicas del departamento en base a su composición mineralógica y granulometría de suelos residuales. Dentro de las unidades de regolitos grueso granulares, se destacan los cuerpos plutónicos de la Cordillera Central en el Oriente Antioqueño, mientras que en la zona central y occidental del departamento predominan las rocas sedimentarias y vulcano-sedimentarias de la Cordillera Occidental.

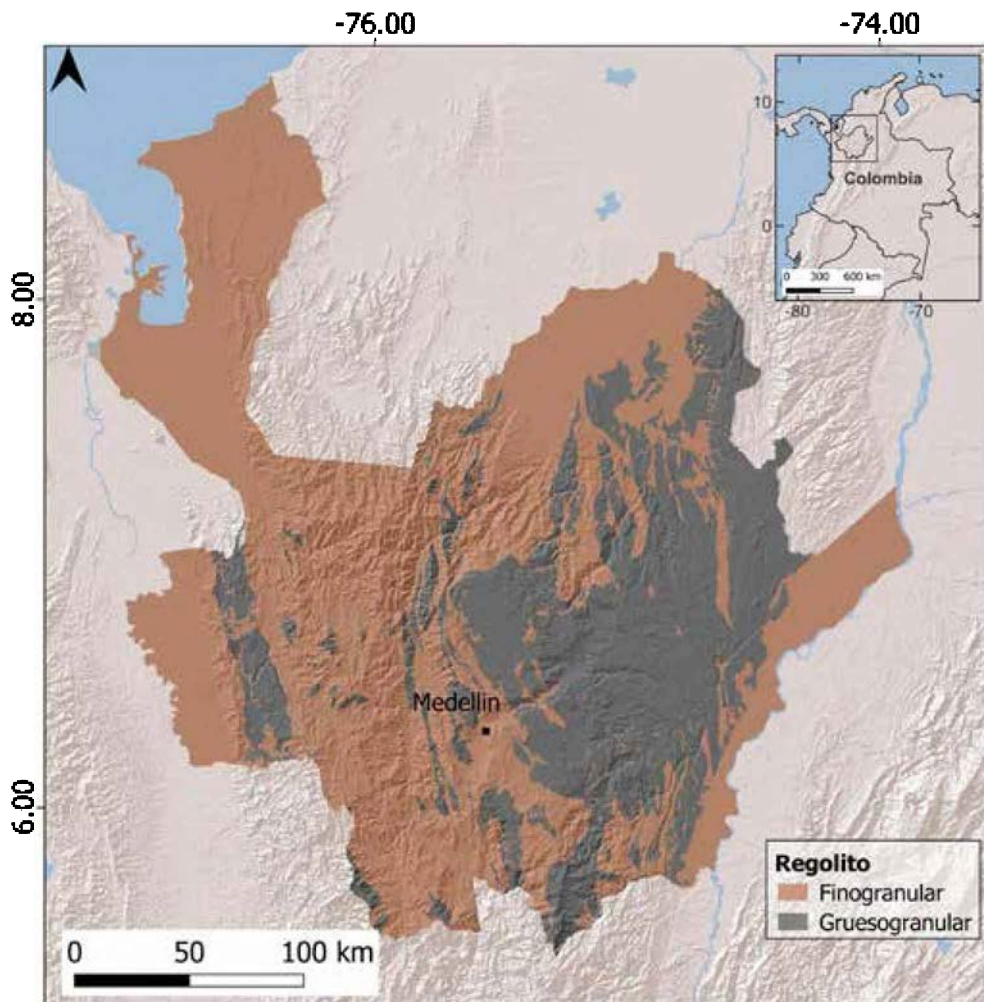


Figura 5. Tipo de regolito de las unidades geológicas.

Para obtener el tipo de evento torrencial al que es susceptible cada cuenca, se realiza el cruce categórico entre el carácter o respuesta hidrológica de las cuencas producto de su morfometría con el tipo de suelo presente en la cuenca. Los resultados se presentan en la **Figura 6**, donde las cuencas con regímenes torrenciales y presencia de regolitos grueso granulares son clasificadas como tipo flujo de escombros canalizado, mientras aquellas con regolito fino-granular son clasificadas como susceptibles a inundación de escombros. Cuencas clasificadas como no torrenciales en el análisis morfométrico no continúan en el análisis.

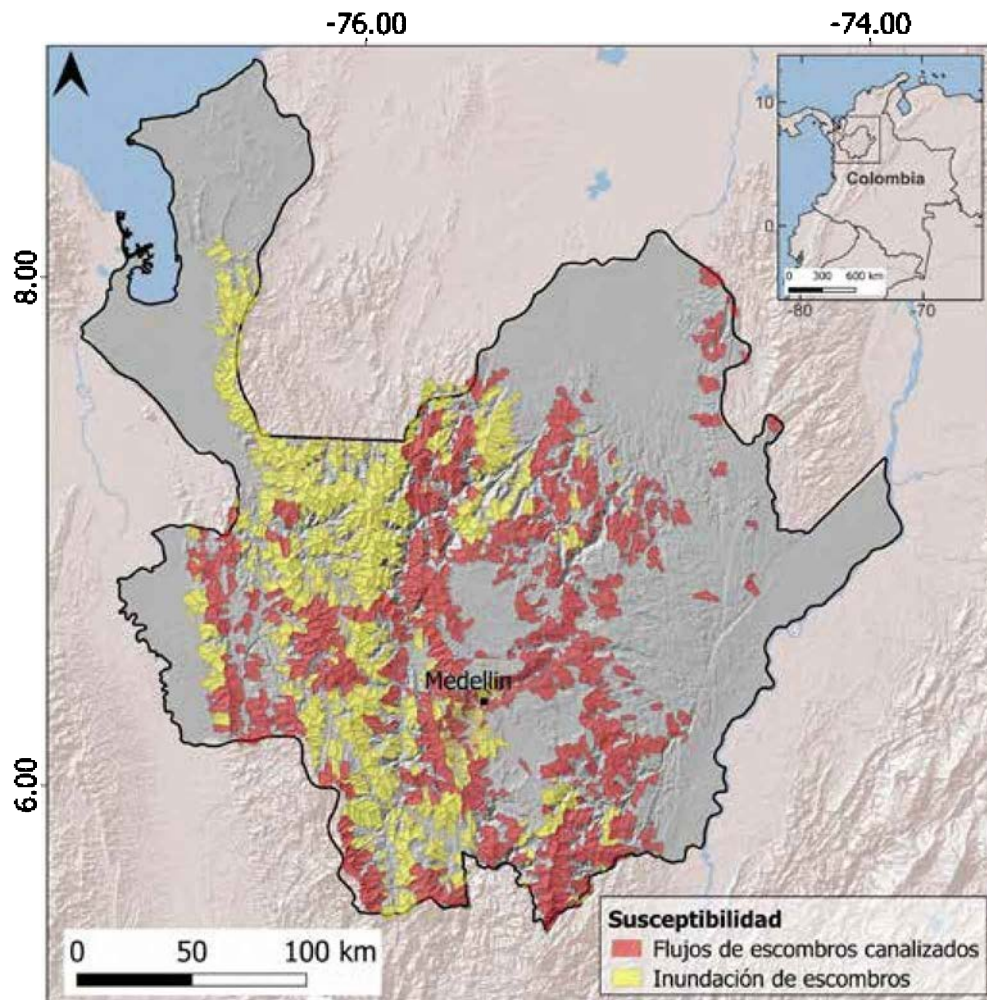


Figura 6. Susceptibilidad ante flujos de escombros canalizados e inundación de escombros para las cuencas torrenciales.

Probabilidad Temporal. Al procesar la base de datos de avenidas torrenciales y su correlación con la intensidad diaria asociada, se encuentra que estos fenómenos en el departamento de Antioquia se dan al superar intensidades de 50 mm/día. Este valor no corresponde a un evento demasiado intenso, pero se considera apropiado por ser conservador.

A partir del escenario de lluvia escogido se calcula la probabilidad de excedencia de dicha intensidad a través de la frecuencia relativa de los días que se supera este valor y el total de días en que se cuenta registro. La distribución espacial de la probabilidad muestra sus valores más bajos, cercanos a 0.03% en el norte y centro del departamento, y las máximas probabilidades, cercanas a 3.97% en zonas húmedas y lluviosas como el valle del río Atrato al occidente del departamento, y su extremo suroriental en el valle del Río Magdalena, como se observa en la **Figura 7**.

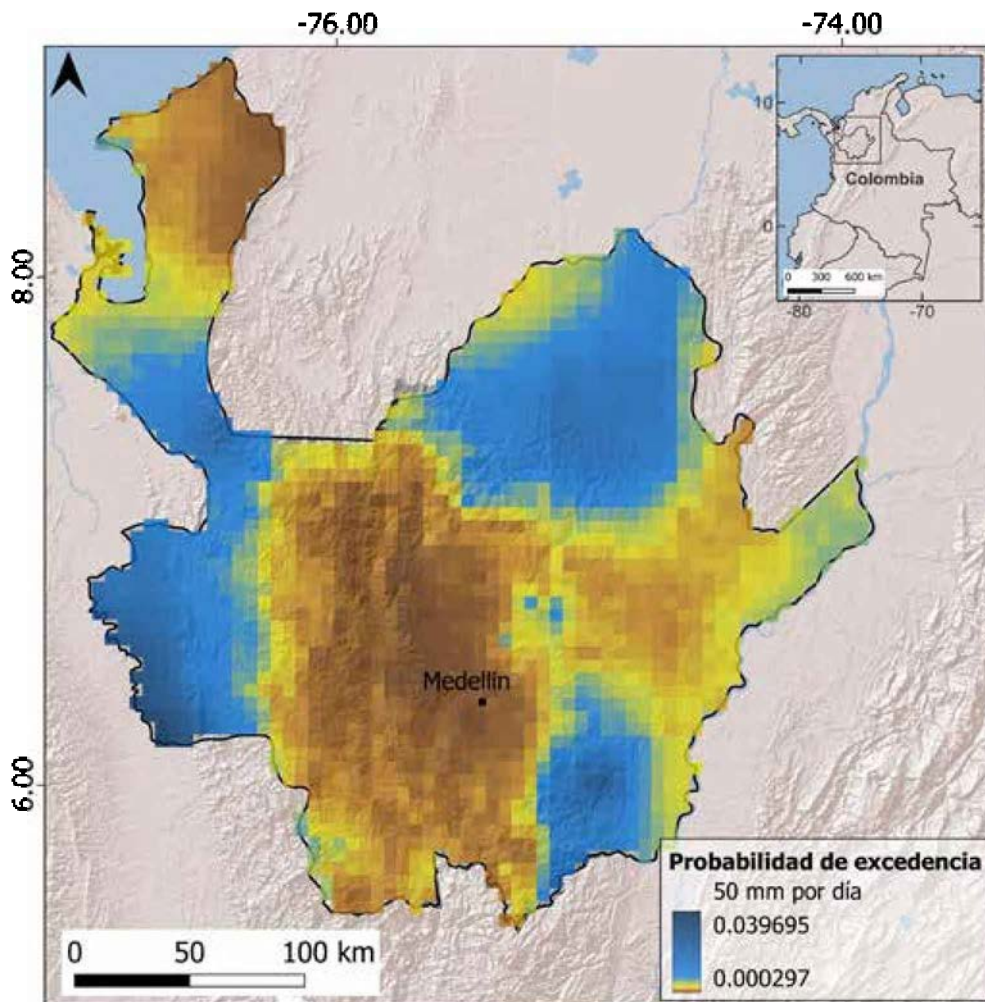


Figura 7. Probabilidad de excedencia de una lluvia diaria de 50 mm/día.

A continuación, se realiza el análisis de correlación entre los eventos de movimientos en masa y avenidas torrenciales con la precipitación, a través de la regresión logística. El resultado de la regresión es una fórmula que estima la probabilidad de ocurrencia de un evento, ya sea movimiento en masa o avenida torrencial, en base a un valor de precipitación, como se muestra en las ecuaciones 8 y 9:

$$P_{at} = \frac{1}{1 + e^{-(-9.11875 + 0.005586x)}} \quad (8)$$

$$P_{mm} = \frac{1}{1 + e^{-(-10.12345 + 0.017439x)}} \quad (9)$$

Donde P_{at} y P_{mm} son las probabilidades de ocurrencia de avenidas torrenciales y movimientos en masa, respectivamente, dada una lluvia diaria x en mm .

Para el evento de precipitación escogido de 50 mm diarios, P_{at} es igual a $9.59e^{-5}$ y P_{mm} es igual a $1.45e^{-4}$. La probabilidad de los movimientos en masa es, naturalmente, mayor a la de ocurrencia de avenidas torrenciales ya que estos son más frecuentes en la base de datos.

Finalmente, se puede calcular la probabilidad temporal de ocurrencia para cada fenómeno, teniendo en cuenta las probabilidades conjuntas. El cálculo de las probabilidades conjuntas se hace para cada uno

de los píxeles de 5 km del mapa de probabilidad de precipitación de la **Figura 7**, y a cada cuenca se le asigna el valor del píxel con valor máximo dentro de ella, dependiendo de su susceptibilidad. Los valores resultantes de probabilidad temporal son categorizados en tres niveles según los quiebres naturales del histograma de los valores regionales, como se presenta en la **Figura 8**. Los resultados muestran a la mayor parte de las cuencas en categoría media, con focos de alta probabilidad en las regiones más lluviosas, o con mayor frecuencia de deslizamientos y avenidas torrenciales, en la zona occidental del departamento.

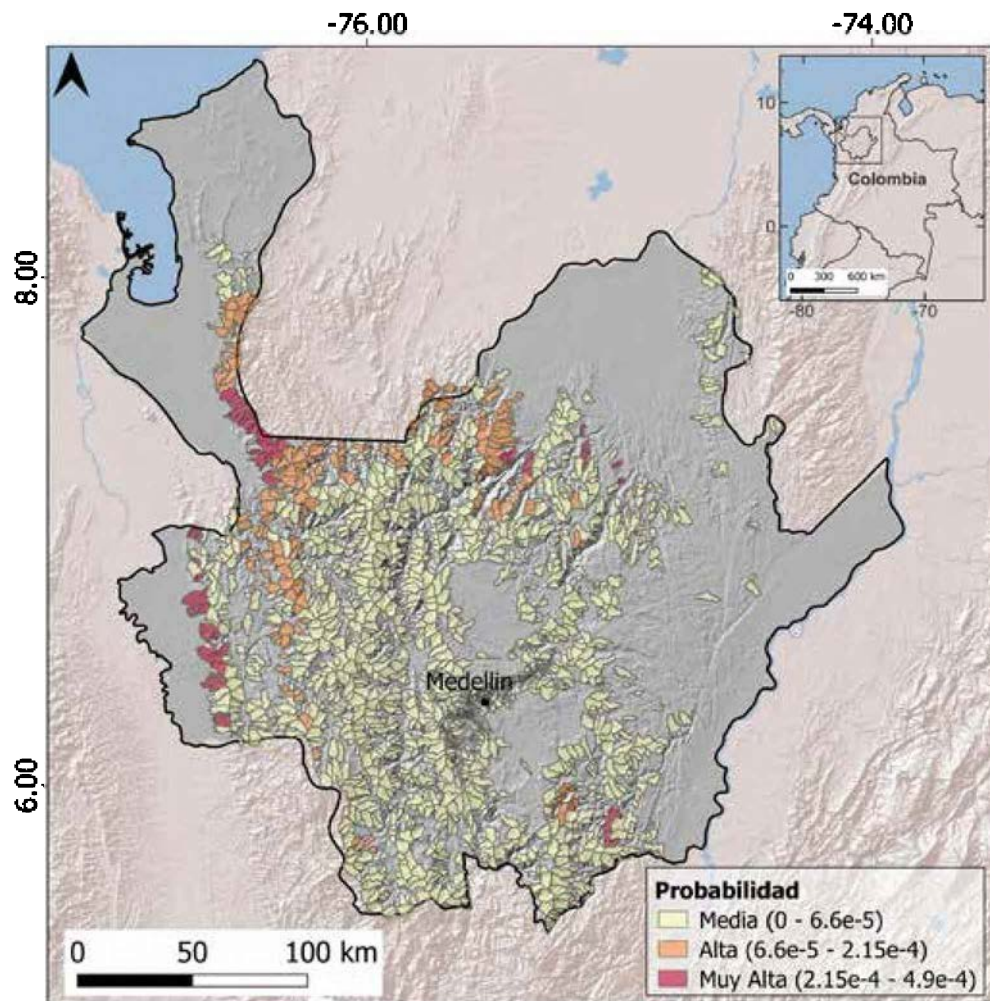


Figura 8. Probabilidad temporal de ocurrencia de avenidas torrenciales.

Magnitud. Utilizando el modelo SHALSTAB se calculan las celdas que fallan con la lluvia detonante de 50 mm/día, y aquellas que fallan incondicionalmente, es decir, aquellas que, por sus características geotécnicas y geomorfológicas, pueden fallar aún sin lluvia detonante. Cruzando estos resultados con el mapa de espesores de suelos calculado a partir de la ecuación

$$h_i = h_{\max} \left[1 - \frac{\tan\Theta_i - \tan\Theta_{\min}}{\tan\Theta_{\max} - \tan\Theta_{\min}} \left(1 - \frac{h_{\min}}{h_{\max}} \right) \right] \quad (5),$$

se calcula la distribución espacial del volumen de

suelo susceptible a fallar ante el evento de precipitación para las cuencas susceptibles a flujos de escombros canalizados. Los valores de volumen son clasificados en categoría media, alta y muy alta usando como límites entre categorías los quiebres naturales del histograma. Los resultados se presentan en la

Figura 9. Los valores de magnitud, o volumen potencial por , varían entre 0 y $2,15 \frac{m^3}{m^2}$, encontrándose los mayores valores en suelos grueso-granulares del centro y sur del departamento, mientras que el norte y occidente se encuentran dominados por la categoría media. A las cuencas susceptibles a inundaciones de escombros, se les asigna la categoría de magnitud Media.

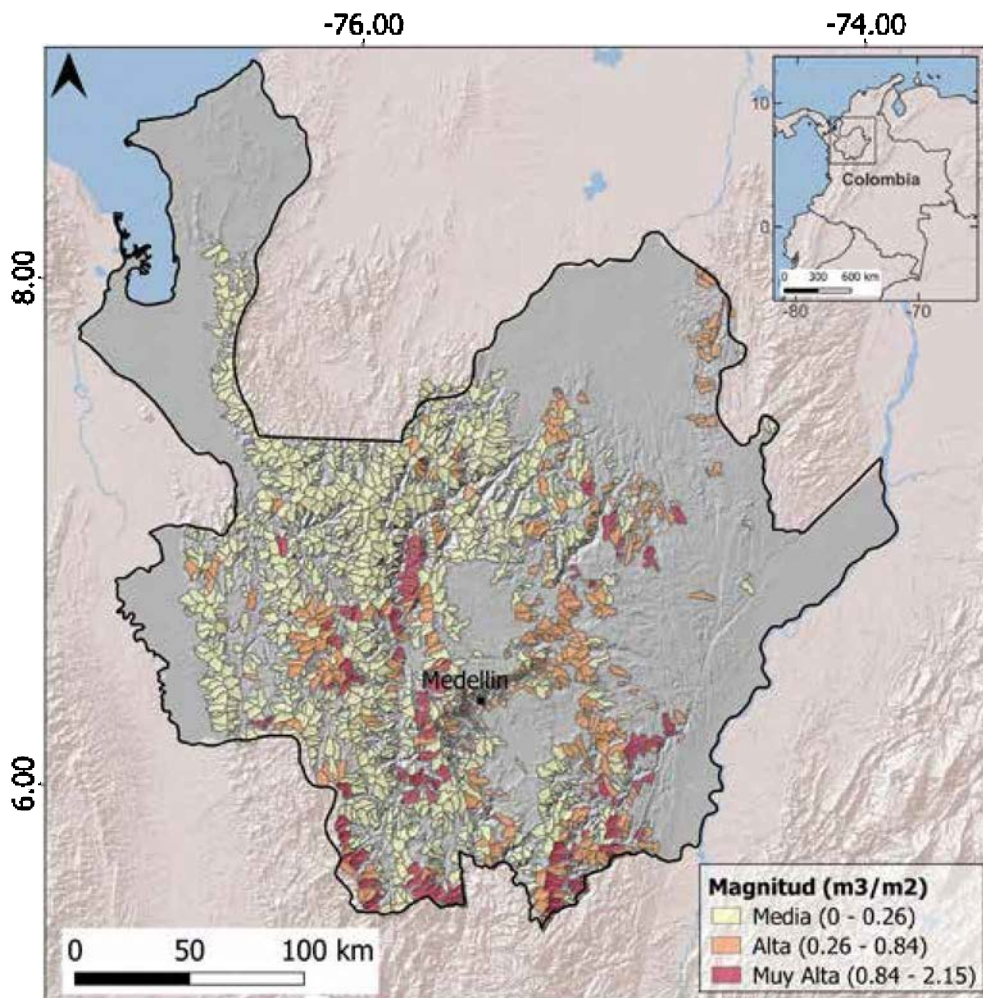


Figura 9. Volumen potencial normalizado de sedimentos disponibles.

Cálculo de amenaza. Finalmente, a partir del cruce categórico de los resultados obtenidos de probabilidad temporal y magnitud de las cuencas usando la **Tabla 1**, se obtiene la amenaza por avenidas torrenciales en categorías media, alta y muy alta, como se presenta en la **Figura 10**. Resaltan en amenaza muy alta algunas cuencas del valle del río Cauca, especialmente al norte de Medellín, donde su cauce se hace más estrecho. Otras zonas de amenaza muy alta son el suroeste y sureste antioqueño.

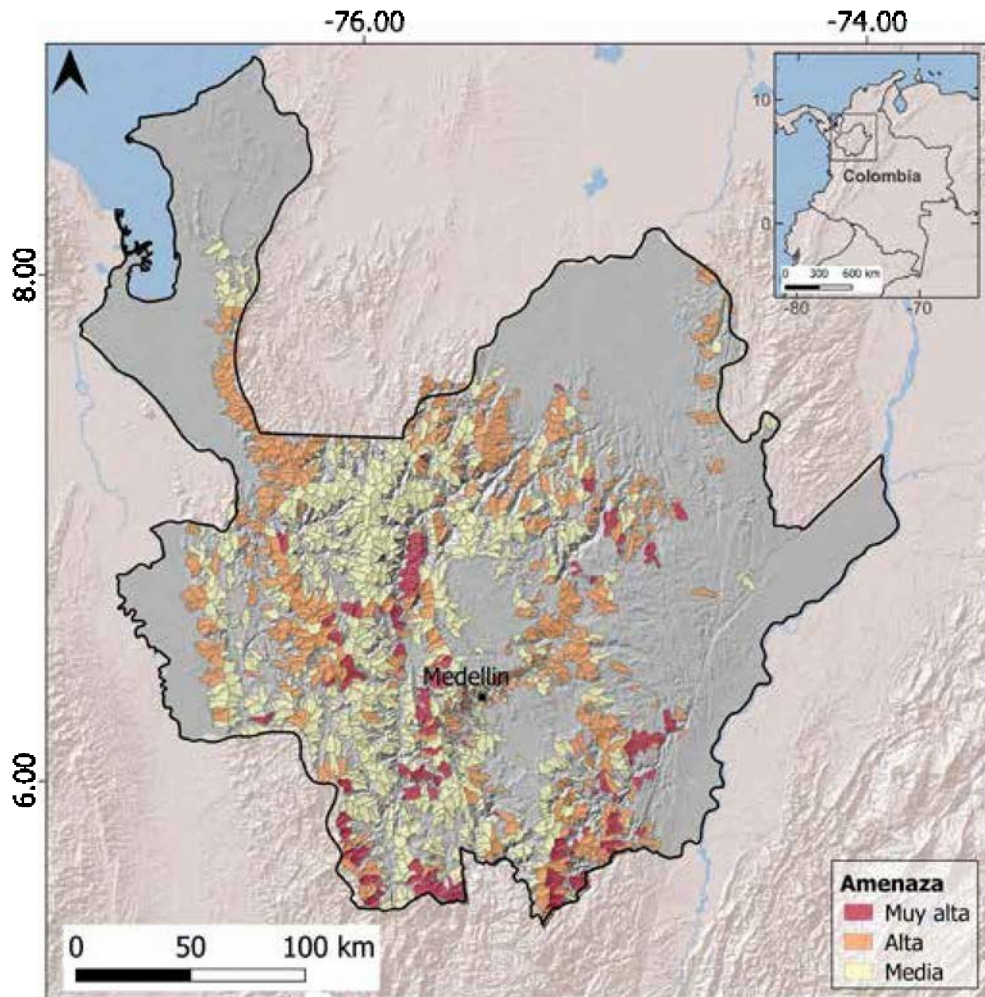


Figura 10. Amenaza por avenidas torrenciales en el departamento de Antioquia.

5. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Las avenidas torrenciales representan una de las amenazas de origen natural con mayor capacidad de destrucción, especialmente en ambientes tropicales y zonas de montaña como es el caso de Colombia. Dadas las grandes pérdidas económicas y humanas causadas por estos eventos en el país en años recientes, es imperativo la necesidad de compilar y analizar las avenidas torrenciales, y de incorporar su conocimiento en estrategias y planes que en el futuro reduzcan su ocurrencia como desastres.

El reconocimiento de las avenidas torrenciales como eventos multi-amenaza marca una gran diferencia ya que elimina la discusión si corresponden a fenómenos de inundación o movimientos en masa. Ahora se entienden estos fenómenos como eventos concatenados de procesos de ladera e hidrológicos, que se relacionan espacial y temporalmente a escala de cuenca.

El presente texto es el resultado del primer estudio regional de susceptibilidad y amenaza ante avenidas torrenciales en Colombia a nivel de cuenca con un enfoque multi-amenaza. La metodología cuenta con una serie de análisis estadísticos, físicos y empíricos para modelar la relación entre diferentes procesos al interior de una cuenca ante un evento de lluvia detonante. El insumo base para llegar a esta metodología fue la recopilación extensiva de eventos de avenida torrencial en Antioquia, y la observación de patrones y

relaciones que pudieran permitir llegar a una caracterización de zonas donde la amenaza es desconocida. La metodología aquí propuesta cuenta con las ventajas de requerir únicamente información de acceso libre y disponible regionalmente, sin trabajo de campo, y que es altamente adaptable a diferentes condiciones ambientales y de necesidades. Más que un marco metodológico estricto, el estudio propone un conjunto de técnicas y modelos que otros profesionales pueden acoplar a distintos entornos, y que puede simplificarse o complejizarse en función de la calidad y cantidad de información disponible y requerimientos.

Un paso importante a nivel nacional hacia el entendimiento y caracterización de avenidas torrenciales en Colombia fue la reciente publicación de la Guía metodológica para la zonificación de amenaza por avenidas torrenciales por el servicio Geológico Colombiano, la cual describe las pautas para la generación de mapas de amenaza para su incorporación en los Planes de Ordenamiento Territorial. La guía metodológica también entiende y analiza las avenidas torrenciales como eventos multi-amenaza, pero se centra en un análisis más detallado, utilizando modelos físicos para propagación de flujos, que son más costosos computacionalmente, y demandan una mayor cantidad de información de estrada. El enfoque de la guía metodológica y el propuesto en este análisis no son contradictorios, sino complementarios, ya que trabajan a escalas y con objetivos diferentes.

La metodología aquí propuesta es un primer acercamiento a nivel regional, que puede utilizarse en zonas remotas o con información escasa, que puede aplicarse en análisis a escala municipal, departamental, regional o incluso nacional para entender cuáles zonas deben priorizarse para estudios más detallados, como aquellos propuestos por el Servicio Geológico, cuyo resultado final es la extensión de la inundación relacionada con un valor de amenaza en base a su intensidad y magnitud.

En términos de limitaciones de la metodología, la más importante se relaciona con su escala gruesa y con la incertidumbre asociada a su información de entrada. Es posible que cuencas con áreas menores a las consideradas en el estudio puedan presentar condiciones de amenaza, o que la información relacionada con la probabilidad de ocurrencia no permita identificar aquellas zonas más propensas. Adicionalmente, la calidad limitada de los inventarios históricos de movimientos en masa y de avenidas torrenciales inciden directamente en la calidad de las estimaciones de las probabilidades temporales de dichos eventos. Precisamente por esto, se debe tener muy en cuenta las incertidumbres de los valores numéricos de magnitud, probabilidad temporal y amenaza producto de este análisis, y se sugiere trabajar con información categórica, que permita entender las zonas más críticas dentro de la zona de estudio de forma relativa. Para llegar a valores más exactos de estos parámetros, es recomendable llevar a cabo estudios de detalle a partir de cartografía y modelos digitales de la cuenca, que permitan representar la respuesta hidrológica de la cuenca ante eventos intensos de lluvia, con modelos hidrológicos, hidráulicos y de tránsito de flujos, complementados con estudios geomorfológicos, e información primaria de las condiciones de vulnerabilidad de la población expuesta.

PUNTOS CLAVE

1. La susceptibilidad por avenidas torrenciales es definida a partir de las características morfométricas de la cuenca, siendo las variables más importantes para definir la torrencialidad: el número de drenajes, la tasa de meandricidad, la constante de mantenimiento del canal, el relieve y el índice de Melton.

2. El tipo de avenida torrencial que se pueda presentar en una cuenca depende, adicional a la respuesta hidrológica, de si tiene suelos grueso-granulares que alimenten el flujo cambiando su reología de una inundación de escombros a un flujo de escombros canalizado.
3. La amenaza es producto de la susceptibilidad, la probabilidad temporal y la magnitud del fenómeno a evaluar. Siendo la susceptibilidad la caracterización espacial del fenómeno, la probabilidad temporal el análisis del factor detonante –lluvia– y la magnitud el volumen de los sedimentos disponibles para ser incorporados al flujo torrencial.
4. A pesar de que en este estudio las cuencas se caracterizan como torrenciales, el fenómeno no ha de presentarse en toda la cuenca si no que se restringe a la zona de influencia del drenaje.

NECESIDADES FUTURAS

1. Es importante seguir investigando los eventos de avenida torrencial en Colombia, para entender las condiciones particulares de estos eventos en nuestro entorno y crear metodologías que permitan conocer el nivel de amenaza y riesgo a nivel nacional.
2. La creación y fortalecimiento de inventarios de eventos amenazantes es un paso fundamental para la estimación precisa de umbrales, probabilidades y riesgo.
3. El mejoramiento de la calidad y cantidad de información de entrada para el conocimiento y análisis de las avenidas torrenciales, tales como los registros de precipitación, modelos digitales de elevación, y cartografía base y temática.

6. MATERIALES Y MÉTODOS

Este estudio se realiza en dos grandes partes: primeramente, para el análisis de la susceptibilidad, se toman cuencas con registros claros de avenidas torrenciales y cuencas carentes de todo indicativo de torrencialidad en la zona andina colombiana y 28 índices morfométricos extraídos a partir de los modelos digitales de elevación satelitales de ALOS PALSAR y a través del Análisis Discriminante de Fisher [38] se obtienen ecuaciones que clasifican las cuencas de Antioquia entre torrenciales o no torrenciales. Posteriormente, a partir de la geología presente en la zona de estudio –tomada de la cartografía geológica del Servicio Geológico Colombiano–, se analiza cuál es el evento torrencial más destructivo que puede ocurrir en cada cuenca, subcategorizando las cuencas torrenciales en dos eventos máximos probables: flujos de escombros canalizados o inundación de escombros, dependiendo si se presentan suelos de granulometría gruesa o fina, respectivamente.

La segunda parte es el análisis de la amenaza, donde entra en consideración la precipitación como factor detonante, tanto de las avenidas torrenciales como de los deslizamientos que pueden alimentar los flujos. La amenaza se divide en el análisis de la probabilidad temporal de ocurrencia de la lluvia y de los eventos de interés: movimientos en masa y avenidas torrenciales; y de la magnitud, establecida a

partir del volumen potencial de sedimentos que puede aportar la cuenca en la ocurrencia de la avenida torrencial. Para esto, se construyó un inventario de 504 avenidas torrenciales y 8046 movimientos en masa en Antioquia, a partir de la recopilación y filtrado de las bases de datos DESINVENTAR (<https://www.desinventar.org>) y SIMMA (<https://simma.sgc.gov.co>) y se correlacionan utilizando los datos de precipitación de 249 estaciones del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). La magnitud se analiza a partir de la zonificación de la estabilidad de laderas se obtuvo a partir del modelo con base física SHALSTAB (SHallow Landslide STABility), un modelo acoplado hidrológico-geotécnico propuesto por Montgomery y Dietrich [49] que utiliza la precipitación en estado estacionario para generar patrones espaciales de humedad y estimar el potencial de falla a través de un análisis de talud infinito según la ley de Mohr-Coulomb.

MATERIAL SUPLEMENTARIO

Los datos, detalles de métodos adicionales y código de análisis estadístico están disponibles bajo requerimiento al correo geohazards_med@unal.edu.co.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores no declaran conflicto de intereses.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA CRediT

Conceptualización: EAG, FGC, MIAC. Curación de datos: FGC, MIAC. Análisis formal: FGC, MIAC. Adquisición de fondos: DAGRAN. Investigación: EAG, FGC, MIAC. Metodología: EAG, FGC, MIAC. Administración del proyecto: EAG. Recursos: UNAL. Software: FGC, MIAC. Supervisión: EAG. Validación: EAG. Visualización: FGC, MIAC. Redacción – borrador original: EAG, FGC, MIAC. Redacción – revisión y edición: EAG, FGC, MIAC.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer al Departamento Administrativo de Gestión de Riesgos de Antioquia (DAGRAN), en especial al ingeniero Jafed Naranjo, El presente estudio fue sólo posible gracias a esta entidad quienes aportaron los recursos necesarios para los estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo, que permitieron establecer el escenario de riesgo por avenidas torrenciales en el departamento de Antioquia. Los análisis realizados sobre este estudio fueron esenciales para constituir la metodología propuesta en el presente artículo.

IDENTIFICACIÓN DE AUTORES

Edier Aristizábal Giraldo <https://orcid.org/0000-0002-2648-2197>

Federico Gómez Cardona <https://orcid.org/0000-0002-8525-4354>

María Isabel Arango Carmona <https://orcid.org/0000-0001-8266-9186>

BIBLIOGRAFÍA

1. Banihabib, M.E. & Forghani, A. (2017). An assessment framework for the mitigation effects of check dams on debris flow. *Catena*, 1(152), 277–84. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.01.018>
2. Hürlimann, M., Oorthuis, R., Abancó, C., Carleo, L. & Moya, J. (2019). *Monitoring of rainfall and soil moisture at the Rebaixader catchment (Central Pyrenees)*. Association of Environmental & Engineering Geologists (AEG). Colorado, USA.
3. Gan, B.R., Liu, X., Yang, X., Wang, X. & Zhou, J. (2018). The impact of human activities on the occurrence of mountain flood hazards: lessons from the 17 August 2015 flash flood/debris flow event in Xuyong County, south-western China. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 9(1):816–40. <https://doi.org/10.1080/19475705.2018.1480539>
4. Iverson, R.M. The physics of debris flows. (1997). *Reviews of Geophysics*, 35(3), 245–296. <https://doi.org/10.1029/97RG00426>
5. Nettleton, I.M., Martin, S., Hencher, S. & Moore, R. Debris flow types and mechanisms. (2005). *Scottish Road Network Landslides Study*. <http://www.scotland.gov.uk/Publications/2005/07/08131738/17395>
6. Aristizábal, E., Carmona, M.I.A. & López, I.K.G. (2021). Definición y clasificación de las avenidas torrenciales y su impacto en los Andes colombianos. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 29(1), 242–258. <https://doi.org/10.15446/rcdg.v29n1.72612>
7. Bradley, J.B. (1986). *Hydraulics and bed material transport at high fine suspended concentrations*. Colorado State University, Fort Collins.
8. French, J.G. & Holt, K.W. (1989). *The Public Health Consequences of Disasters*. Atlanta, Georgia: US Department of Health and Human Services. Public Health Service, CDC.
9. Rozalis, S., Morin, E., Yair, Y. & Price, C. (2010). Flash flood prediction using an uncalibrated hydrological model and radar rainfall data in a Mediterranean watershed under changing hydrological conditions. *Journal of Hydrology*, 394(1–2), 245–55. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.03.021>
10. IAHS-UNESCO-WMO. (1974). *Flash floods*. Proceeding of the Paris symposium. 112.
11. Borga, M., Stoffel, M., Marra, F., Marchi, L., Marra, F. & Jakob, M. (2014). Hydrogeomorphic response to extreme rainfall in headwater systems: Flash floods and debris flows. *Journal of Hydrology*, 518(PB), 194–205. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.05.022>
12. Jakob, D. & Hungr, O. (eds). (2005). *Debris-flow hazards and related phenomena*. Springer, Berlin-Heidelberg.
13. Hungr, O., Evans, S.G., Bovis, M.J. & Hutchinson, J.N. (2001). A review of the classification of landslides of the flow type. *Environmental and Engineering Geoscience*, 7(3), 221–38. <https://doi.org/10.2113/gsegeosci.7.3.221>
14. Crozier, M.J. (2005). Multiple-occurrence regional landslide events in New Zealand: Hazard management issues. *Landslides*, 2(4), 247–56. <https://doi.org/10.1007/s10346-005-0019-7>
15. O'Brien, J. & Julien, P. (1985) Physical properties and mechanics of hyperconcentrated sediment flows. *Proceedings of the ASCE HD Delineation of landslides, flash flood and debris flow hazards*.
16. Hungr, O., Leroueil, S. & Picarelli, L. (2014). The Varnes classification of landslide types, an update. *Landslides*, 11(2), 167–94. <https://doi.org/10.1007/s10346-013-0436-y>
17. Jakob, M., Holm, K., Lange, O. & Schwab, J.W. (2006) Hydrometeorological thresholds for landslide initiation and forest operation shutdowns on the north coast of British Columbia. *Landslides*, 3(3), 228–38. <https://doi.org/10.1007/s10346-006-0044-1>

18. Aristizábal, E., Carmona, M.I.A. & López, I.K.G. (2020). Definición y clasificación de las avenidas torrenciales y su impacto en los Andes colombianos. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 29(1). <https://doi.org/10.15446/rcdg.v29n1.72612>
19. Cañón, A.M.R., Merchán, A.A.R., Peña, M.A.M., Peña, G.L.R., Castellanos, S.V.M., Flórez, M.S.R, et al. (2021). *Guía metodológica para zonificación de amenaza por avenidas torrenciales*. Libros del Servicio Geológico Colombiano. <https://doi.org/10.32685/9789585313156>
20. DANE (Departamento Administrativo Nacional de Estadística). (2018). Reloj de población. <http://www.dane.gov.co/reloj/>
21. Poveda, G. La hidroclimatología de Colombia: una síntesis desde la escala inter-decadal hasta la escala diurna. (2004). *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias*, XXVIII(107), 201–22.
22. Poveda, G., Salazar, L.F. (2004). Annual and interannual (ENSO) variability of spatial scaling properties of a vegetation index (NDVI) in Amazonia. *Remote Sensing of Environment*, 93(3), 391–401. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.08.001>
23. Poveda, G. & Mesa, O.J. (1997). Feedbacks between hydrological processes in tropical South America and large-scale ocean-atmospheric phenomena. *Journal of Climate*, 10(10), 2690–702. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1997\)010<2690:FBHPIT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1997)010<2690:FBHPIT>2.0.CO;2)
24. Poveda, G., Waylen, P.R., Pulwarty, R.S. (2006). Annual and inter-annual variability of the present climate in northern South America and southern Mesoamerica. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 234(1), 3–27. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2005.10.031>
25. Eslava, J. (1993). Climatología y Diversidad Climática de Colombia. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias*, 18(71), 507–38.
26. Poveda, G., Vélez, J.I., Mesa, O.J., Cuartas, A., Barco, J., Mantilla, R.I., et al. (2007). Linking long-term water balances and statistical scaling to estimate river flows along the drainage network of Colombia. *Journal of Hydrologic Engineering*, 12(1), 4–13. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(2007\)12:1\(4\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(2007)12:1(4))
27. Pabón-Caicedo, J.D. & Eslava-Ramírez, J.A. (2001). Generalidades de la distribución espacial y temporal de temperatura del aire y de la precipitación en Colombia. *Meteorología Colombiana*, 4, 47–59.
28. Mesa, O., Poveda, G., Vélez, J.I., Mejía, J.F., Hoyos, C.D., Mantilla, R., et al. (2000) *Distribución espacial y ciclos anual y semianual de la precipitación en Colombia*. XIV Seminario de Hidráulica e Hidrología, Villa de Leyva, Boyacá. <http://www.bdigital.unal.edu.co/9727/>
29. Álvarez-Villa, O.D., Vélez, J.I. & Poveda, G. (2011). Improved long-term mean annual rainfall fields for Colombia. *International Journal of Climatology*, 31(14), 2194–212. <https://doi.org/10.1002/joc.2232>
30. Poveda, G., Alvarez, D.M. & Rueda, O.A. (2011). Hydro-climatic variability over the Andes of Colombia associated with ENSO: A review of climatic processes and their impact on one of the Earth's most important biodiversity hotspots. *Climate Dynamics*, 36, 2233–49.
31. Departamento Administrativo de Planeación de Antioquia. (2018). *Anuario Estadístico de Antioquia 2018*. <https://www.antioquiadatos.gov.co/index.php/poblacion-2018>
32. Marchi, L., Borga, M., Preciso, E. & Gaume, E. (2010). Characterisation of selected extreme flash floods in Europe and implications for flood risk management. *Journal of Hydrology*, 394(1–2), 118–33. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.07.017>
33. Arango, M.I., Aristizábal, E. & Gómez, F. (2021). Morphometrical analysis of torrential flows-prone catchments in tropical and mountainous terrain of the Colombian Andes by machine learning techniques. *Natural Hazards*, 105(1), 983–1012. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-04346-5>

34. El Bastawesy, M., White, K. & Nasr, A. (2009). Integration of remote sensing and GIS for modelling flash floods in Wadi Hudain catchment, Egypt. *Hydrological Process*, 23(9), 359–368. <https://doi.org/10.1002/hyp.7259>
35. Biswas, A., das Majumdar, D. & Banerjee, S. (2014) Morphometry Governs the Dynamics of a Drainage Basin: Analysis and Implications. *Geography Journal*, 927176. <https://doi.org/10.1155/2014/927176>
36. Kostaschuk, R.A., MacDonald, G.M, Jackson Jr, L.E.J. (1987) Rocky Mountain Alluvial Fans. *The Canadian Geographer/Le Géographe canadien*, 31(4), 366–368. <https://doi.org/10.1111/j.1541-0064.1987.tb01664.x>
37. Melton, M.A. (1957). *An Analysis of the Relations Among Elements of Climate, Surface Properties, and Geomorphology* Office of Naval Research Technical Report No. 11. Office of Naval Research, technical report. <http://www.dtic.mil/get-tr-doc/pdf?AD=AD0148373>
38. Fisher, R.A. (1940). The Precision of Discriminant Functions. *Annals of Eugenics*, 10(1), 422–429. <https://doi.org/10.1111/j.1469-1809.1940.tb02264.x>
39. Bertrand, M., Liébault, F. & Piégay, H. (2013). Debris-flow susceptibility of upland catchments. *Natural Hazards* 67(2), 497–511. <https://doi.org/10.1007/s11069-013-0575-4>
40. Rahimi, A., Rahardjo, H. & Leong, E.C. (2010). Effect of hydraulic properties of soil on rainfall-induced slope failure. *Engineering Geology*, 114(3–4), 135–43. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2010.04.010>
41. Tsaparas, I., Rahardjo, H., Toll, D.G., & Leong, E.C. (2002). Controlling parameters for rainfall-induced landslides. *Computers and Geotechnics*, 29(1), 1–27. [https://doi.org/10.1016/S0266-352X\(01\)00019-2](https://doi.org/10.1016/S0266-352X(01)00019-2)
42. Aristizábal, E., Garcia, E.F., Marin, R.J., Gómez, F., Guzmán-Martínez, J., Aristizábal, E., et al. (2020). Rainfall-intensity effect on landslide hazard assessment due to climate change in north-western Colombian Andes. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, 16,(103): 51–66. <https://doi.org/10.17533/udea.redin.20201215>
43. Feng, W., Bai, H., Lan, B., Wu, Y., Wu, Z., Yan, L, et al. (2022). Spatial–temporal distribution and failure mechanism of group-occurring landslides in Mibei village, Longchuan County, Guangdong, China. *Landslides*, 19(1957), 1–14. <https://doi.org/10.1007/s10346-022-01904-9>
44. Aristizábal, E., Arango Carmona, M.I., García López, I.K. (2020). Definition and classification of torrential avenues and their impact in the Colombian Andes. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 29(1), 242–58. <https://doi.org/10.15446/rcdg.v29n1.72612>
45. Ruiz-Villanueva, V., Bodoque, J.M., Díez-Herrero, A., Calvo, C. (2011). Triggering threshold precipitation and soil hydrological characteristics of shallow landslides in granitic landscapes. *Geomorphology*, 133(3–4), 178–189. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.05.018>
46. Varnes, D. (1984). *Landslide hazard zonation : A review of principles and practice*. Natural Hazards. United Nations.
47. Guzzetti, F., Carrara, A., Cardinali, M., Reichenbach, P.(1999). Landslide hazard evaluation: A review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. *Geomorphology*, 31(1–4), 181–216. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(99\)00078-1](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(99)00078-1)
48. Jaiswal, P. & van Westen, C.J. (2009). Estimating temporal probability for landslide initiation along transportation routes based on rainfall thresholds. *Geomorphology*, 112(1-2), 96–105. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.05.008>
49. Dietrich, W.E. & Montgomery, D.R. (1998). *SHALSTAB: a digital terrain model for mapping shallow landslide potential*. National Council of the Paper Industry for Air and Stream Improvement Technical Report. Vol. LVIII. <http://calm.geo.berkeley.edu/geomorph/shalstab/index.htm>

50. Catani, F., Segoni, S. & Falorni, G. An empirical geomorphology-based approach to the spatial prediction of soil thickness at catchment scale. *Water Resources Research*, 46(5), 1–15. <https://doi.org/10.1029/2008WR007450>
51. Horton, R.F. (1955). Erosional development of streams and their drainage basins, hydrophysical approach to quantitative morphology. *Nihon Ringakkai Shi/Journal of the Japanese Forestry Society*, 37(2):79–82.
52. Smart, J.S, Surkan, A.J. (1967). The relation between mainstream length and area in drainage basins. *Water Resources Research*, 3(4), 963–74. <https://doi.org/10.1029/WR003i004p00963>
53. Schumm, S.A. (1956). Evolution of drainage systems and slopes in badlands at Perth Amboy, New Jersey. *Geological Society of America Bulletin*, 67(5),597–646. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1956\)67\[597:EODSAS\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1956)67[597:EODSAS]2.0.CO;2)
54. Strahler, A.N. (1956). Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography. *Geological Society of America Bulletin*, 3(11), 1117–1142. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1952\)63\[1117:HAAOET\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1952)63[1117:HAAOET]2.0.CO;2)

CAPÍTULO
5

Comparativo de incendios forestales en Colombia a través de instrumentos de teledetección: caso de estudio en la región de la Orinoquía

Daniela Toriniano Jiménez¹, Adriana Osorio Mosquera^{1*} & Alejandro Marulanda Tobón²

¹Facultad de Ingeniería, Tecnológico de Antioquia – Institución Universitaria TdeA. Calle 78b, No. 72A-220, Medellín, Colombia

²Área de Sistemas Naturales y Sostenibilidad, Escuela de Ciencias Aplicadas e Ingeniería, Universidad EAFIT. Carrera 49 N° 7 Sur-50, Medellín, Colombia

*Autor de contacto: Alejandro Marulanda Tobón. Área de Sistemas Naturales y Sostenibilidad, Escuela de Ciencias Aplicadas e Ingeniería, Universidad EAFIT. Carrera 49 N° 7 Sur-50, Medellín, Colombia.
Correo-e: amarula2@eafit.edu.co

Resumen

La información sobre la cobertura del suelo que se logra a partir del uso de instrumentos acoplados a plataformas satelitales, ha permitido detectar y analizar con agilidad los recursos ambientales disponibles en una región, especialmente cuando han sufrido transformaciones por actividades antrópicas o naturales. En la misma línea, la alteración de la cobertura vegetal es más notoria cuando han ocurrido incendios, que en Colombia tradicionalmente se presentan en la región de la Orinoquía. Acudiendo a la necesidad de desarrollar metodologías y herramientas para detectar y monitorear incendios, en el presente capítulo se propone el uso de productos derivados de teledetección óptica (MODIS y Sentinel-2), para estimar la superficie quemada en la Orinoquía en dos periodos de tiempo: el primero entre diciembre de 2019 y junio de 2020, y el segundo entre diciembre de 2020 y junio de 2021. Los lapsos temporales seleccionados para el análisis, coinciden con las épocas secas de la región y en las cuales se suelen generar los mayores eventos de incendios forestales. Con el desarrollo, se constató que las estimaciones de área quemada variaron entre las diferentes metodologías, obteniendo para el año 2020

valores que oscilan entre 2,054,174 ha y 2,461,980 ha; para el año 2021, el área quemada fluctuó entre 815,485 ha y 847,756 ha, por lo que los datos muestran un valor superior en el área quemada en el año 2020 respecto al 2021. Las zonas con mayor afectación se presentaron en los departamentos de Vichada y Meta, así como las zonas fronterizas entre Venezuela y Colombia. Los análisis expuestos proporcionan entonces un comparativo entre dos plataformas satelitales, lo cual constituye una aproximación metodológica para la detección de incendios, acciones que pueden usarse no solo en la zona de la Orinoquía, sino también en otras regiones del territorio colombiano. El alcance del trabajo permite además recomendar sobre la necesidad de profundizar en las técnicas de análisis de incendios, especialmente en la validación de la precisión de los datos a fin de generar una aproximación a los valores reales.

Palabras clave: Teledetección, sistemas de información geográfica, incendios forestales, áreas quemadas.

Comparison of wildfires in Colombia through remote sensing: a case study in the Orinoquía region

Abstract

Information about land cover obtained with instruments coupled to satellite platforms has allowed quickly detect and analyze the environmental resources available in a region, especially when they have suffered transformations due to anthropic or natural activities. In the same way, the transformation of vegetation cover is more noticeable when fires have occurred, which in Colombia traditionally occur in the Orinoquía region. Addressing the need to develop methodologies and tools to fire events detection and monitoring, this chapter proposes the use of products derived from optical remote sensing (MODIS and Sentinel-2) to estimate burnt area in the Orinoquía in two periods: the first between December 2019 to June 2020, and the second between December 2020 to June 2021. The periods selected for the analysis coincide with the region's dry season and in which the largest wildfire events usually occur. It was found that the estimates of burned area varied between the different methodologies, obtaining for the year 2020 values that ranged between 2,054,174 ha and 2,461,908 ha; for the year 2021, the area burned fluctuated between 815,485 ha and 998,726 ha, so the data shows a higher value of area burned in 2020 compared to 2021. The areas with the greatest impact are Vichada and Meta, as well as the border areas between Venezuela and Colombia. The analysis concludes with a comparison between two satellite platforms techniques, which constitute a methodological approach for fire detection, actions that can be used not only in the Orinoquía area but also in other regions of the Colombian territory. The work also makes it possible to recommend the need to deepen fire analysis techniques, especially in validating the accuracy of the data to generate an approximation to the real values.

Keywords: Remote sensing, geographic information system, wildfires, burnt area.

1. INTRODUCCIÓN

Más del 90% de los incendios forestales que ocurren en el mundo son causados de forma directa o indirecta por intervención humana [1]. Estos eventos generan una alteración de la biodiversidad al ciclo de nutrientes, un impacto directo al suelo, e incluso puede ocasionar procesos erosivos hasta la desertificación [2] dada la reducción del número de ejemplares arbóreos disponibles [3]. Adicionalmente, las emisiones de partículas por quema de biomasa vegetal, se convierten en una fuente importante de aerosoles atmosféricos y gases de efecto invernadero, contribuyendo a las alteraciones climáticas actuales, afectando las tasas fotosintéticas de los ecosistemas y modificando las propiedades de coberturas nubosas [4].

En Colombia, los incendios forestales se asocian estrechamente a factores socioeconómicos como la expansión de la frontera agrícola y pecuaria [5,6], aunque existen otras causas antrópicas indirectas (la cacería de animales, encendido de fogatas y la quema de pólvora) y causas accidentales (la interacción abrupta o creciente de árboles con líneas para la conducción de energía, o atentados terroristas) [7].

Como resultado, se han modificado ecosistemas completos, pues grandes extensiones forestales del país se han transformado en zonas con múltiples usos productivos, acciones que se dan a lugar desde siglos atrás con la introducción de la ganadería y la expansión de las tierras de pastoreo, la urbanización y la colonización de las tierras bajas. Por ejemplo, se registra una pérdida de cobertura vegetal, a causa de incendios de más de un millón de hectáreas entre 1999 y 2019, más de cuatro veces el área registrada en el período comprendido entre 1973 y 1998. Entre las causas recientes y que explican el aumento, se encuentra la creación de carreteras, los nuevos asentamientos humanos, las actividades ilícitas y su impacto, principalmente asociadas con cultivos ilícitos, minería y la extracción de madera de forma no regulada [8,9].

La transformación de los bosques de Colombia a causa de incendios ha afectado gran parte de los bosques húmedos tropicales de la costa Pacífica, la Amazonía y el Magdalena Medio. También se observan eventos en las zonas de mayor productividad agrícola, como lo son los valles de los ríos Cauca y Magdalena, mesetas Cundiboyacense, Nariño, y la zona cafetera [8].

La probabilidad de eventos de fuego aumenta conforme las temporadas secas de las diferentes regiones del país. Para la zona del Caribe dicha época seca se presenta entre los meses de diciembre y abril, mientras para la región andina es usual que suceda entre enero y febrero. En lo que respecta a la región de la Orinoquía, es tradicional que dichos eventos acontezcan en dos periodos al año, el primero entre diciembre y marzo y el segundo entre julio y agosto.

Estos eventos, adicionalmente pueden intensificarse o atenuarse tanto en número como en área total afectada, según sea la incidencia regional de los fenómenos de cambio climático global denominados El Niño y La Niña respectivamente, con intensidades que varían y son proporcionales a la magnitud de los fenómenos climáticos mencionados [10].

Ahora bien, la caracterización de los incendios se realiza comúnmente mediante instrumentos y técnicas que hacen uso del espectro del campo electromagnético visible u óptico, y el térmico o infrarrojo [11]. No obstante, su uso operacional puede ser limitado debido a que los sensores ópticos por ejemplo, son fuertemente dependientes de las condiciones atmosféricas [12].

Dadas las limitaciones expuestas, en los últimos años, se ha propuesto el uso de técnicas remotas que emplean una combinación de datos obtenidos mediante sensores ópticos [13]. El objetivo de este capítulo es explorar las ventajas que ofrece emplear los sensores ópticos para la teledetección de

incendios forestales y realizar un comparativo temporal en la región de la Orinoquía Colombiana. Así mismo, indagar sobre posibles variaciones en la frecuencia de incendios entre el periodo de aislamiento vivido a nivel mundial por la pandemia de coronavirus y un periodo normal, bajo la hipótesis que es la intervención humana la principal causa de generación de los incendios forestales.

Caja 1. Conceptos clave

Teledetección: La Teledetección es la técnica para obtener información a distancia de objetos sin que exista un contacto material [14]. ,

Teledetección óptica: También conocidos como sensores pasivos, son aquellos que la radiación reflejada se deriva principalmente del Sol, dado que no requieren de energía inducida artificialmente, detectan la radiación solar reflejada o emitida por los objetos de la superficie. Dependen por lo tanto de una fuente de radiación externa, para que puedan operar; los mecanismos fotográficos son un buen ejemplo de este tipo de sensores[14]. Los sensores pasivos se limitan a recoger la energía electromagnética procedente de las cubiertas terrestres; ya sea reflejada de los rayos solares o emitida en virtud de su propia temperatura [15].

2. DETECCIÓN DE ÁREAS QUEMADAS EN LA ORINOQUIA COLOMBIANA

La Orinoquía (**Fig. 1**), también conocida como Llanos Orientales, es una de las seis regiones naturales de Colombia. Se destaca por su riqueza en recursos naturales, como en reservas de hidrocarburos, siendo esta una de las principales actividades en la región, seguida por el establecimiento de producciones agropecuarias hacia el piedemonte andino [16]. La Orinoquia presenta una gran variedad de climas tropicales, pues la temperatura en la región oscila entre 18 y 36 °C y se generan precipitaciones medias anuales entre 1,500 y 1,900 mm. Domina así una distribución pluvial monomodal, con una época de lluvias de abril a noviembre y una época seca de diciembre a marzo [17]. Su relieve es dominado por llanuras y sabanas con alturas medias de 50 msnm, y donde su única elevación significativa corresponde a la Sierra de la Macarena, localizada en el piedemonte andino sobre el departamento del Meta con 1600 msnm [16,18].

La Orinoquia Colombiana ha tenido una clara afectación por los incendios [19]. En el periodo entre diciembre del año 2000 y febrero del 2009 las regiones que presentaron una mayor afectación fueron la Orinoquia, seguida por la Amazonía y el Caribe. Así mismo, en la Orinoquía se observó un claro patrón intra-anual de incendios, donde se evidencia un comportamiento bimodal asociado a la época de verano; el primer pico donde se concentran la gran parte de anomalías térmicas se da entre diciembre y marzo y otro más corto entre julio y agosto.

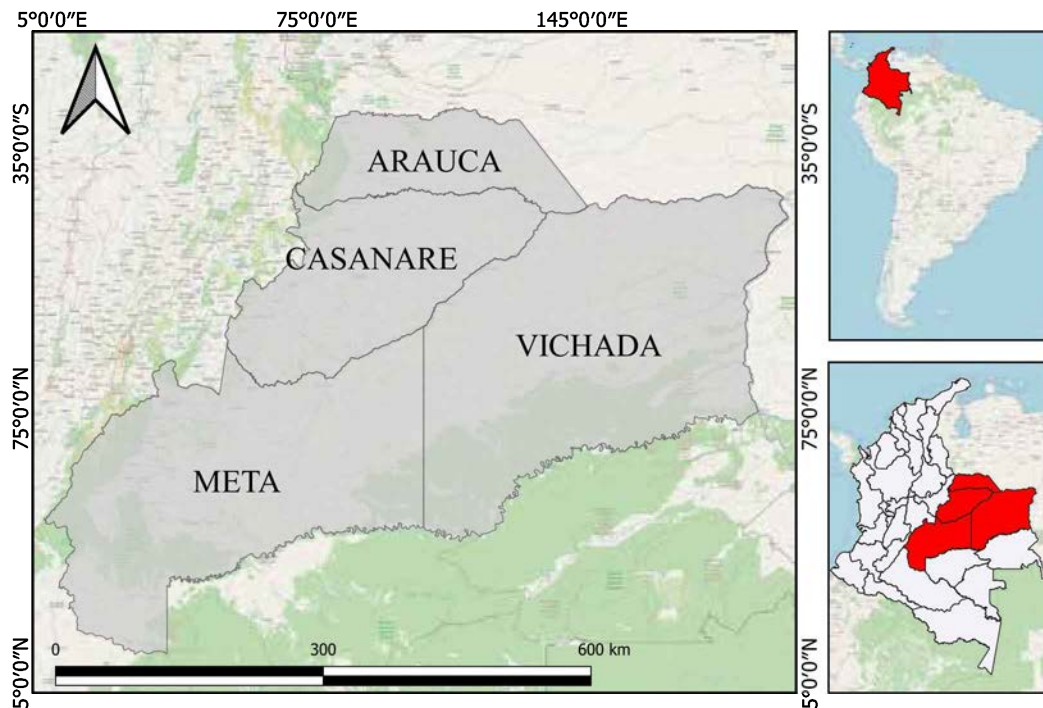


Figura 1. Localización del área de estudio. Se ubica al este de Colombia limitando al norte y este con Venezuela, al sur con Amazonia y al oeste con la región Andina. Se halla entre los ríos Arauca, Guaviare, Orinoco y el Piedemonte llanero. Dicha región la conforma los departamentos de Arauca, Casanare, Meta y Vichada albergando 64 municipios y alcanzando un área aproximada de 254,000 km².

En lo que respecta al impacto en el paisaje y los ecosistemas, se encuentra que es sobre todo la deforestación para la instauración de nuevos sistemas de producción agropecuaria [20] y extracción de hidrocarburos [21] el fenómeno de mayor peso. Seguidamente, se encuentran los incendios forestales, de los cuales se reporta que las sabanas son influenciadas por incendios recurrentes y de amplia extensión, principalmente en el periodo seco de enero a marzo. Estas conflagraciones son esencialmente ocasionadas por actividades de caza, pesca y renovación de pastizales [10], así como en actividades de inicio de siembra [22].

Por lo anterior, se explorarán diferentes métodos de detección de áreas quemadas a partir del uso de datos captados por instrumentos ópticos en la zona de la Orinoquía Colombiana, un área cuya afectación por el fuego ha sido de gran importancia para el país [19]. El análisis de los incendios se realizará en dos periodos: el primero entre diciembre de 2019 a junio de 2020, y el segundo entre diciembre de 2020 hasta junio de 2021. Estos periodos se nombrarán en el documento como primer periodo o año 2020 y segundo periodo o año 2021.

Los análisis y comparativos se realizarán bajo dos procedimientos:

- Análisis de focos de calor y áreas quemadas reportadas por el sensor MODIS.
- Índice Normalizado de área quemada (NBR) a través de imágenes Sentinel-2.

Caja 2. Terminología importante

Focos de calor: Anomalías térmicas localizadas a partir de imágenes satelitales las cuales son asociadas a incendios. En la espacialización de los datos de temperatura de la zona de estudio, se plasman como un valor de temperatura elevado en comparación con los píxeles o valores colindantes, activando los umbrales establecidos en el algoritmo. El evento que ocasiona que se active el segmento, puede ser un incendio, una quema agrícola, fuegos industriales, volcanes activos u otros. [23].

FIRMS: (Sistema de Información sobre Incendios para Gestión de Recursos): Sistema de la NASA que proporciona datos de incendios activos (incluida una ubicación aproximada de un punto de acceso detectado) de los instrumentos MODIS y VIIRS las 24 horas del día, los 7 días de la semana a cualquier persona, en cualquier parte del mundo. Las detecciones de incendios activos globales se pueden ver de forma interactiva haciendo uso de la aplicación FIRMS Fire Map [24].

MODIS (Espectro radiómetro de imágenes de resolución moderada): Es un sensor a bordo de los satélites AQUA y TERRA diseñado para observaciones de la tierra, atmósfera, océano y criósfera. Contiene 36 bandas espectrales y adquiere datos en tres resoluciones espaciales: 250 m, 500 m y 1 km. Este sensor detecta las radiaciones infrarrojas emitidas por los incendios, permitiendo su ubicación, así como la dirección de propagación del incendio a una resolución espacial de 1 km [25].

Sentinel-2: Es una misión de la Agencia Aeroespacial Europea (ESA), y que pertenecen al programa Copérnico, la cual se compone de dos satélites que obtienen imágenes multispectrales (13 bandas espectrales: cuatro bandas a 10 m, seis bandas a 20 m y tres bandas a 60 m de alta resolución) [26].

Google Earth Engine (GEE): Es una plataforma en la nube para realizar análisis científicos y visualización de datos geoespaciales de gran tamaño. Actualmente posibilita el acceso a petabytes de datos de imágenes satelitales en la nube para su análisis a escala planetaria. El panel central facilita a los usuarios escribir su código en JavaScript. GEE procesa los códigos escritos e ilustra los resultados como imágenes en el panel Mapa o como mensajes en la pestaña Consola [27].

2.1 Focos de calor y área quemada detectados a través de MODIS

Al analizar la suma de anomalías térmicas del día y de la noche en cada uno de los períodos de análisis, se observa que en el primer período se presentó el valor más alto de los focos de calor, con un total de 2,262 focos (**Fig. 2**), este valor es alrededor de tres veces más alto que el reporte obtenido en el segundo período, el cual fue de 791.

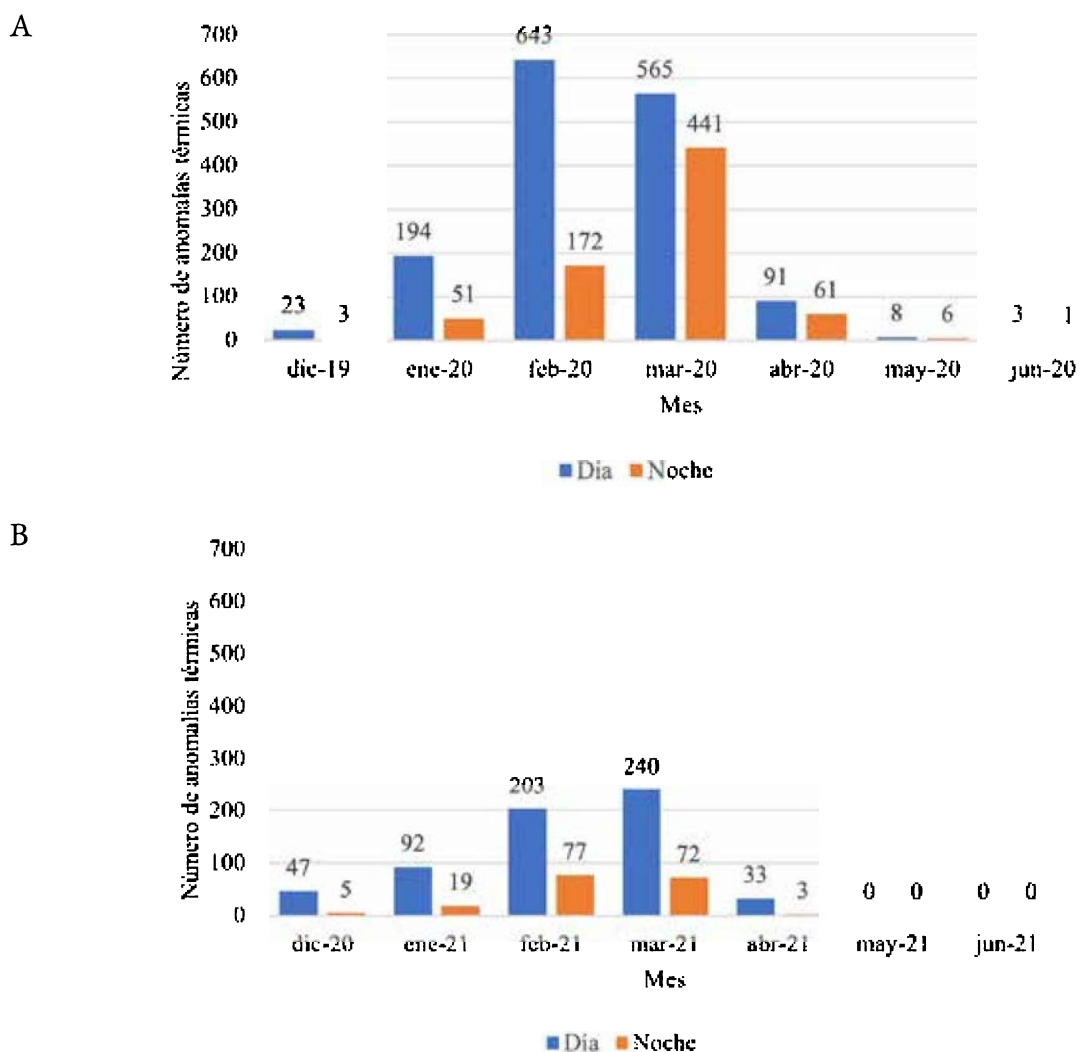


Figura 2. Número de anomalías térmicas (día-noche) obtenidas por el sensor MODIS en la Orinoquía Colombiana para los períodos de análisis de (A) diciembre de 2019 a junio de 2020 y (B) diciembre de 2020 a junio de 2021.

Durante el período de estudio se observa que la mayor detección de anomalías térmicas, se presenta entre los meses de enero a marzo para ambos períodos analizados, situación muy probablemente generada por la baja precipitación, las altas temperaturas y la acción del viento de esta época. El mes donde los registros de anomalías se concentran es marzo, momento en el que se denotan 1,006 focos de calor para el primer periodo de análisis, y 312 para el segundo. A partir de abril, se evidencia una clara reducción en el número de fuegos detectados, donde la causa más probable de dicha reducción se debe al inicio de la temporada de lluvia que se extiende hasta finales de noviembre. Estos resultados concuerdan con trabajos similares realizados en condiciones o escenarios próximos [19,28].

Al realizar un análisis detallado del 2020, se evidenció que el 13 de febrero, y el 5 y 21 de marzo se presentaron las mayores anomalías térmicas alcanzando 108, 93 y 92 puntos de calor respectivamente. Además, se observó que el día en que inicia el incremento de este parámetro es el 28 de enero. Es importante resaltar que para el mes de marzo de 2020 se decreta el inicio de los períodos de aislamiento obligatorio preventivo por la emergencia sanitaria por COVID-19. Específicamente el 12 de marzo de

2020 se declara emergencia sanitaria en todo el territorio nacional, el 17 de marzo se declara estado de Emergencia por parte del presidente de la República y a partir del 25 de marzo se genera el aislamiento preventivo obligatorio, hecho que podría relacionarse con el gran incremento que se presentó respecto al año 2021.

La distribución espacial de los focos de calor en los dos períodos de análisis (**Fig. 3**), muestra que la mayoría de los focos de calor se presentan en los departamentos de Vichada y Meta, no obstante, para el año 2020 existe una alta concentración de anomalías térmicas en la frontera de Colombia y Venezuela que se hace más evidente en el mes de marzo.

Si bien los focos de calor detectados son una aproximación a la ocurrencia real de incendios forestales, constituyen una fuente importante para el análisis de la distribución espacial y temporal de los eventos, el estudio y definición del foco de contaminación del aire, la ubicación de puntos persistentes, y un insumo preliminar para un comparativo con las detecciones alcanzadas de áreas quemadas que se pueden deducir del uso de otros instrumentos, tales como la información de MODIS y Sentinel 2.

Por otro lado, al analizar el área quemada en la Orinoquia se observa que este valor es significativamente mayor en el primer período de análisis (**Tabla 1**), alrededor de 2.5 veces más de área quemada que en el segundo período. El total de área quemada para el año 2020 es de 2,054,174.4 ha, de las cuales el 90.3% se concentran en los meses de enero a marzo. De acuerdo con [29], los datos de áreas quemadas reportadas en 2020 por MODIS, superan inclusive los valores de 2018 y 2019 que registraron 1,964,100.9 ha, y 1,493,421.3 ha respectivamente. Se resalta que de acuerdo con [30], para el 2018 hubo un incremento significativo en los focos de calor. Entre las posibles causas se encuentra las altas temperaturas que se dieron, y generando incendios que arrasaron millones de hectáreas entre la Amazonia y Orinoquia.

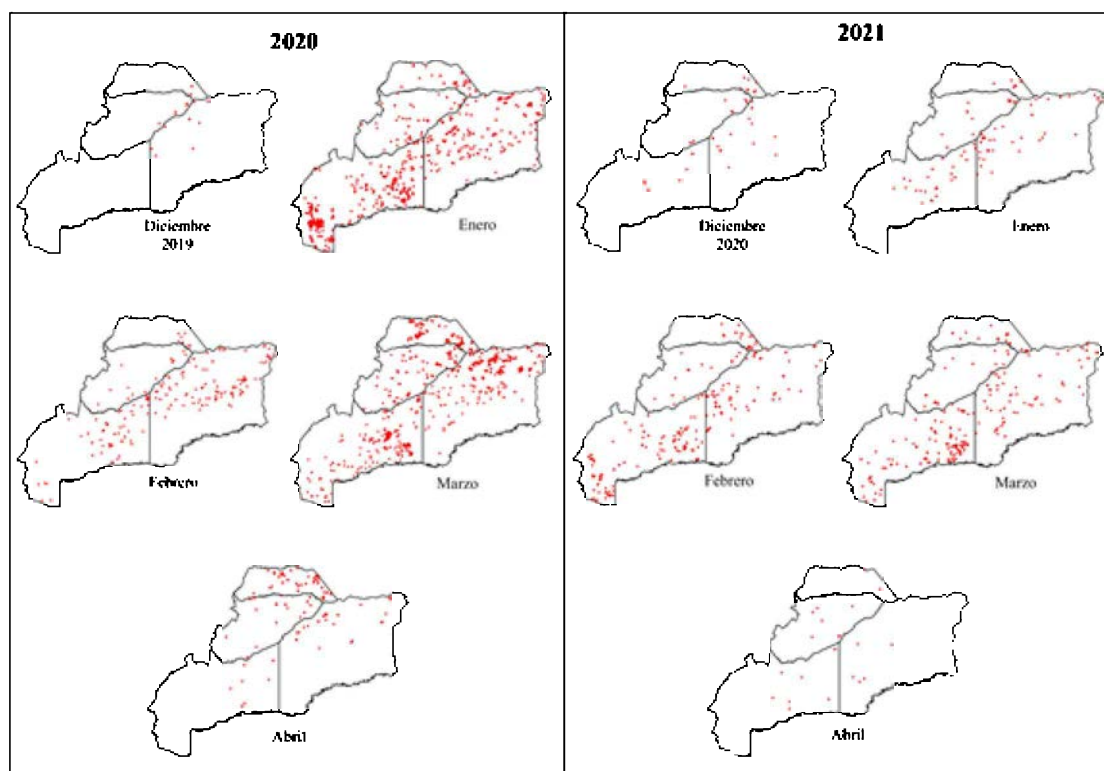


Figura 3. Distribución de las anomalías térmicas en la Orinoquia Colombiana para los períodos de análisis de diciembre de 2019 a junio de 2020 y diciembre de 2020 a junio de 2021.

Tabla 1. Área quemada en hectáreas en la Orinoquia Colombiana reportada por el sensor MODIS MCD64A1 versión 6.

Departamento	Área (ha)	
	2019 a 2020	2020 a 2021
Arauca	259,592.94	81,891.23
Casanare	226,693.84	106,312.86
Meta	448,525.67	273,148.90
Vichada	1,119,361.87	354,132.80
TOTAL	2,054,174.32	815,485.79

La distribución de la superficie afectada por el fuego en la Orinoquia se da en toda la región, no obstante, para el año 2020 se observa una mayor afectación en Meta y Vichada; sin embargo, al este de Arauca y norte de Vichada se concentra la mayor afectación entre los meses de febrero y marzo limitando con Venezuela. Los puntos donde se localizan los focos de calor coinciden con las áreas quemadas que presenta el sensor MODIS para la Orinoquia (**Fig. 4**).

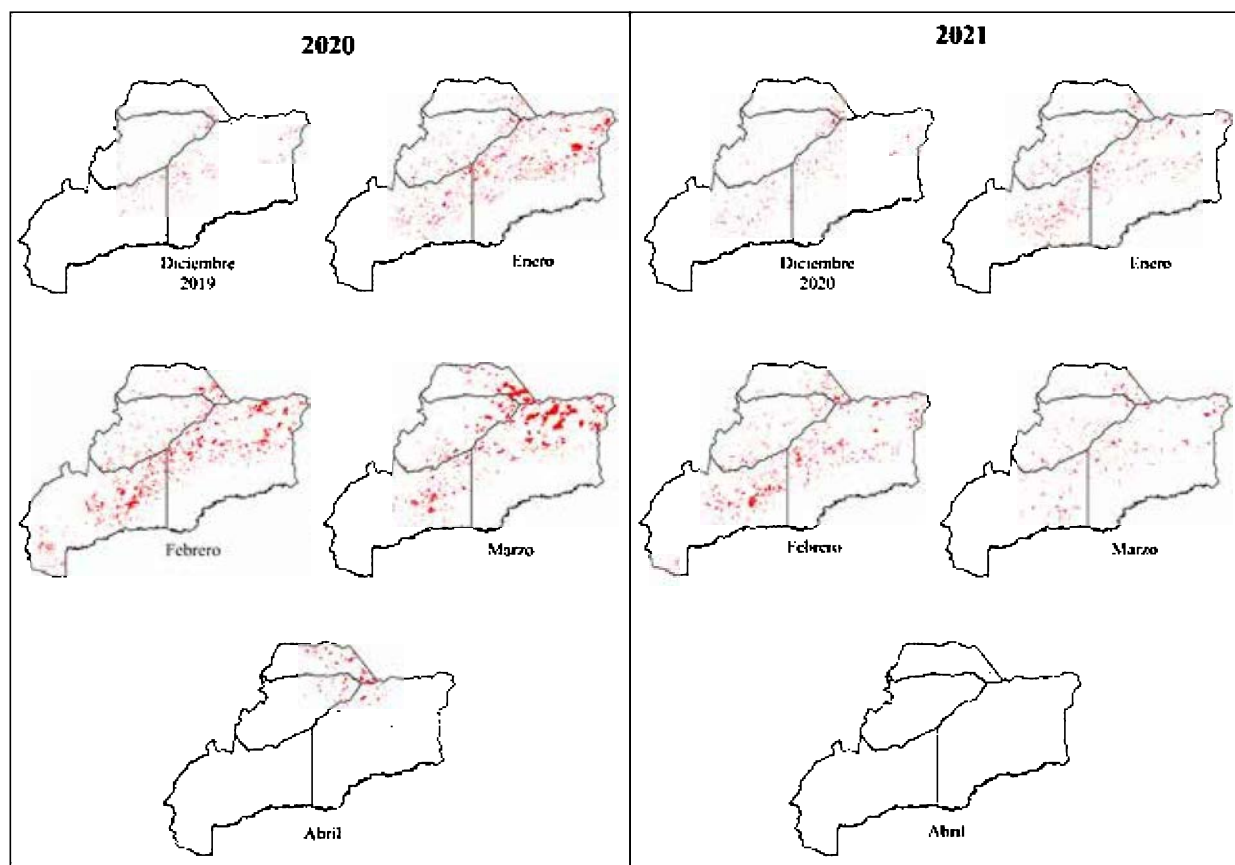


Figura 4. Distribución de las áreas quemadas en la Orinoquia Colombiana para los períodos de diciembre de 2019 a junio de 2020 y diciembre de 2020 a junio de 2021.

2.2 Índice Normalizado de área quemada (NBR) a través de imágenes Sentinel-2

La severidad del incendio se puede describir como el grado en que un área ha sido alterada o interrumpida por el fuego [31]. Dicha afectación se calculó a través del índice normalizado de área quemada (NBR) y su clasificación se realizó de acuerdo con los rangos de severidad de incendios propuestos por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) (ver Sección 4. Materiales y métodos). En el área de estudio (**Tabla 2 y 3, y Fig. 5**), se observa que para el primer período de análisis los departamentos donde se registró “alta severidad” fueron Arauca y Meta, mientras que para el segundo período fueron Casanare y Meta. Este comportamiento cambia cuando se analizan la clase de “moderada/alta” severidad en la cual en el año 2020 el mayor peso lo tiene el departamento de Vichada que se encuentra colindante con Venezuela, mientras que en el 2021 esta categoría está dominada por el Meta.

Al calcular la superficie quemada como la sumatoria de las clases 1 (alta severidad), 2 (moderada/alta severidad), 3 (moderada/baja severidad) y 4 (baja severidad) (**Tabla 2 y 3**) en el área de estudio, fue para el primer período de 2,461,908.6 ha, mientras que para el segundo período fue de 847,756.5 ha. Por otro lado, se observa que un área equivalente a 2,333,588.4 ha se registra como sucesión vegetal (clases 6 y 7) en el año 2021 (mayor a 2,294,845.9 ha que se reportan en el año 2020), probablemente debido a los incendios registrados un año atrás.

Es importante mencionar que, durante el procesamiento de los datos, muchas de las imágenes se encontraban con una alta nubosidad, razón por la cual, se aplica una máscara para eliminar las nubes y las sombras de nubes, ya que las primeras no permiten observar la superficie mientras que las sombras tienen bajos niveles de reflectividad, por tanto, pueden ser confundidas con zonas de áreas quemadas. Por lo anterior, en los resultados se observa espacios en blanco (correspondiente a la categoría NA), donde no se pudo determinar el índice Normalizado de Área Quemada (**Fig. 5**).

El cálculo de severidad mediante imágenes de Sentinel-2 es un proceso de detección de cambios, en el que los datos anteriores y posteriores a un evento se deducen entre sí, por lo que se pueden detectar como incendios los cambios generados por deforestación y otros cambios en la cobertura del suelo. De igual forma, en ocasiones los algoritmos de máscara de nubes y sombra de nubes aplicados no eliminan totalmente las sombras de las nubes, lo que puede ocasionar que existan detecciones falsas o errores de omisión [32]. Igualmente, pueden ser fuente de error los cambios leves en la vegetación, como lo es la regeneración natural detectada en el mes de abril, en zonas donde ocurrieron incendios, ya que generan una baja diferencia en el rango de dNBR el cual no es clasificado como área quemada sino posiblemente como rebrote (vegetación en crecimiento). De lo anterior, puede afirmarse que el desarrollo de técnicas de validación para la detección de cambios en la cobertura vegetal, es fundamental para evaluar las incertidumbres asociadas con los productos basados en datos satelitales, para identificar las mejoras necesarias en los productos y para permitir que los productos se utilicen adecuadamente [33].

En el área de estudio, se observa que el departamento de Arauca y Meta, fueron los departamentos que presenta mayores cambios de la vegetación para el 2020, de igual forma, se observa que entre Arauca y Casanare se sigue una trayectoria de área afectada que va desde los límites con Venezuela (**Fig. 5**).

Tabla 2. Área reportada para las clases del índice Normalizado de Área Quemada en el período 2019 a 2020.

Clase	Nombre	Departamento			
		Arauca	Casanare	Meta	Vichada
0	NA	371,448,82	1,827,742.46	2,418,501.00	3,767,782.00
1	Alta Severidad	19,369.46	8,726.94	1,368.13	2,849.45
2	Moderada/alta Severidad	181,177.45	143,535.79	26,393.55	69,296.47
3	Moderada/baja Severidad	356,261.66	362,436.54	84,702.28	247,858.58
4	Baja Severidad	35,444.01	51,659.64	33,027.17	837,873.43
5	No quemado	1,380,147.71	1,443,606.68	4,613,209.93	4,712,880.40
6	Nuevo rebrote, Bajo	32,524.66	390,458.75	755,385.60	223,560.52
7	Nuevo rebrote, Alto	1,383.98	202,217.40	614,039.20	75,275.80
Total		2,377,757.74	4,430,384.21	8,546,626.86	9,937,376.66

Por otro lado, las variaciones en los datos pueden deberse al umbral implementado, algunos estudios como el realizado por [27], muestran los diferentes resultados de detección de áreas quemadas al modificar el valor del umbral como respuesta a los múltiples factores que afectan el cálculo de la diferencia temporal de NBR y la importancia de definir valores por ecosistemas que permitan la estimación de área quemada utilizando modelos regionales.

Tabla 3. Área reportada para las clases del índice Normalizado de Área Quemada en el período 2020 a 2021.

Clase	Nombre	Departamento			
		Arauca	Casanare	Meta	Vichada
0	NA	234,226,41	644,552.31	2,146,921.00	2,468,963.45
1	Alta Severidad	3,236.97	2,746.00	1,287.99	429.13
2	Moderada/alta Severidad	54,486.42	45,991.42	44,682.49	21,994.46
3	Moderada/baja Severidad	143,693.45	153,842.09	151,500.52	131,583.00
4	Baja Severidad	3,769.54	45,180.19	34,000.03	9,332.77
5	No quemado	1,877,660.68	3,475,569.68	4,799,770.00	6,463,138.60
6	Nuevo rebrote, Bajo	54,453.11	57,113.15	709,367.55	649,993.00
7	Nuevo rebrote, Alto	6,231.04	5,389.88	659,097.60	191,943.04
Total		2,377,757.62	4,430,384.72	8,546,627.18	9,937,377.46

Los resultados de ambas metodologías, muestran que en medio de la pandemia, muchas regiones de Colombia se vieron afectados por los incendios y otras ciudades por la mala calidad del aire que se respiraba en ese momento, en una publicación hecha por la revista Mongabay Latam, [34] afirma que durante la primera semana de cuarentena, se registraron niveles de contaminación elevados, los cuales

estuvieron relacionados fuertemente con los incendios que, entre diciembre y los primeros días de abril, se suelen presentar en la parte norte de Sudamérica.

Además, sostienen que estos eventos de quema de biomasa, se deben principalmente a que personas inescrupulosas, aprovecharon la emergencia sanitaria para realizar daños ambientales sobre áreas de especial importancia ecológica y áreas naturales protegidas, debido a la falta de vigilancia y control por parte de las autoridades competentes [34].

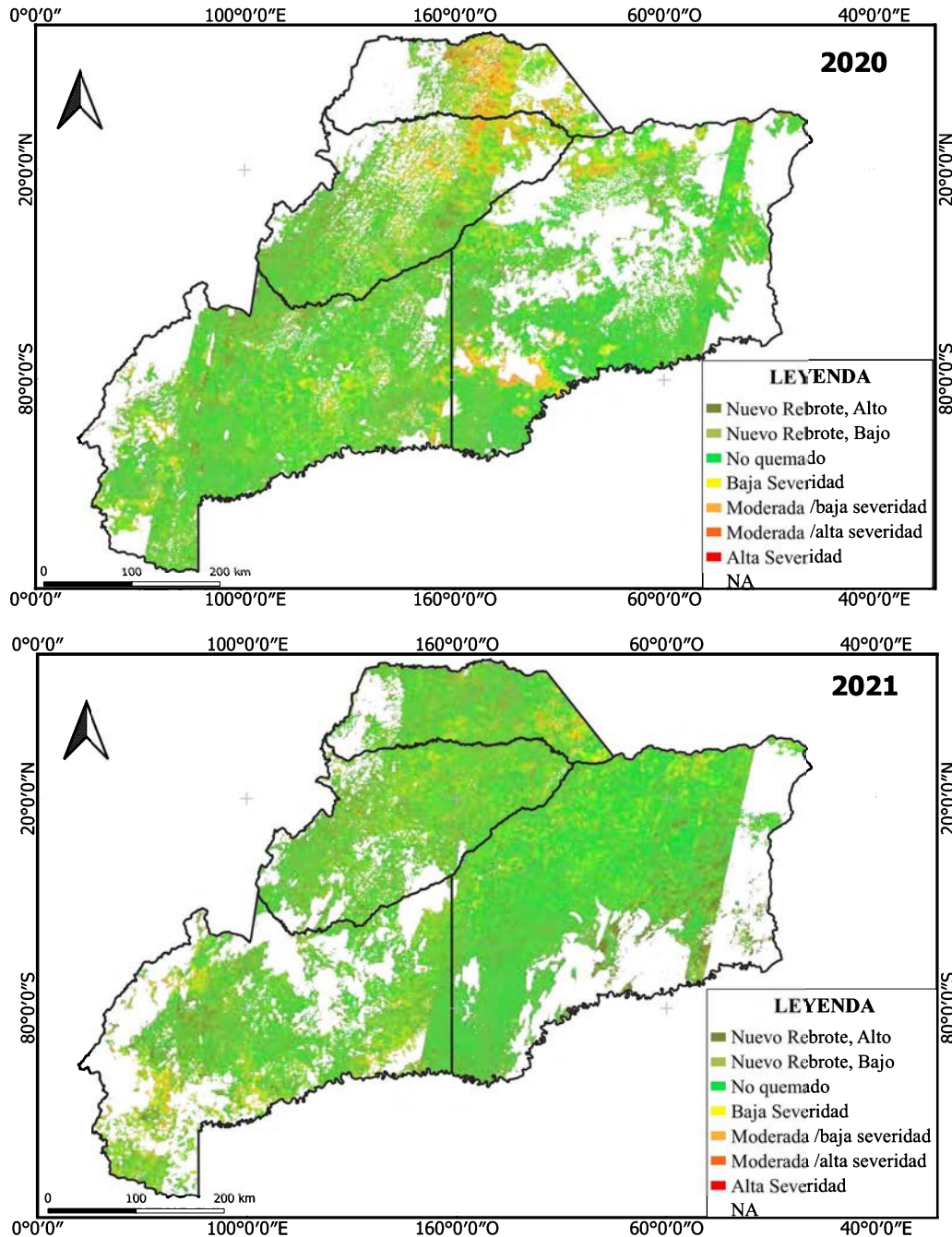


Figura 5. Mapa de clasificación del Índice Normalizado de Área Quemada (NBR) para el año 2020 y 2021

3. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en el presente trabajo permiten generar por medio de una comparación de técnicas de teledetección pasiva, una aproximación metodológica para la detección de incendios con información libre, la cual puede usarse no solo en la zona de la Orinoquía sino también en otras regiones del territorio colombiano. Esto es importante ya que contribuye en el proceso de identificación de tendencias en los eventos de incendios y por ende fortalece la toma de decisiones en la gestión del riesgo. No obstante, se debe tener presente que esta aproximación puede derivar en la detección de falsos incendios, por lo que se hace necesario formular a futuro, un protocolo que permita identificar los errores de comisión, errores de omisión, acuerdos de áreas quemadas y no quemadas, para obtener datos más fieles a la realidad.

Por otro lado, se observan variaciones en los resultados de detección de incendios obtenidos por MODIS y Sentinel-2. Si se define como referencia la detección de áreas quemadas por MODIS, se encuentra que para el año 2020, las áreas quemadas obtenidas con Sentinel-2 son superiores en un 16.6%, mientras que para el año 2021, estos valores cambian en un 3,8%. Por lo anterior, es importante profundizar en las técnicas de cuantificación y validación de áreas quemadas de la mano de plataformas de uso libre como Google Earth Engine que permite el análisis de grandes volúmenes de datos a escala planetaria y definir un protocolo que permita realizar estimaciones cada vez más ajustadas a la realidad.

La distribución espacial y temporal para todos los métodos mantiene un mismo patrón, en los resultados se evidencia que entre los meses de febrero y marzo se presentan los mayores eventos de incendios y los departamentos de Vichada y Meta son los más afectados, aunque para el año 2020 se observa una alta afectación en la zona fronteriza entre Colombia y Venezuela.

Los estudios científicos sobre incendios en Colombia muestran que desde siglos atrás, los incendios están fuertemente asociados a causas socioeconómicas como la expansión de la frontera agrícola y pecuaria. La Orinoquía Colombiana no ha sido ajena a esta situación, no obstante, el incremento observado en 2020 de los incendios, hacen considerar que elementos de salud pública como es la pandemia de Covid-19 pueden influenciar la ocurrencia de incendios. Por lo anterior, se recomienda realizar un estudio detallado de la dinámica de incendios en Colombia durante las últimas décadas, para determinar si eventos pandémicos pueden modificar el comportamiento de los incendios.

PUNTOS CLAVE

1. Al comprender la influencia de las variables ambientales y su distribución espacio-temporal sobre el origen de los incendios se puede entender que están fuertemente asociados con la intervención del hombre en áreas naturales.
2. La identificación de incendios a partir de sensores remotos permite generar una aproximación metodológica para la detección de incendios con información libre, que contribuye en el proceso de identificación de tendencias en los eventos de incendios y por ende fortalece la toma de decisiones en la gestión del riesgo.
3. Existen productos de uso libre que se utilizan para desarrollar metodologías que contribuyan al entendimiento de las dinámicas de los incendios en nuestro país.

PREGUNTAS A RESOLVER

1. Los incendios históricamente se asocian con dinámicas socio-económicas principalmente con las actividades agrícolas. El 2020 presentó un nuevo escenario de salud pública y un incremento significativo en la ocurrencia de incendios. ¿Los escenarios de crisis en la salud pública pueden influenciar los eventos de incendios en el país?

4. MATERIALES Y MÉTODOS

A continuación, se describe la metodología para la identificación de áreas quemadas iniciando por la obtención de datos a través de MODIS y Sentinel-2.

4.1 Descarga focos de calor o anomalías térmicas del sensor MODIS (hotspots)

Los focos de calor o anomalías térmicas (hotspots) del sensor MODIS se descargaron a través de la plataforma FIRMS (Fire Information for Resource Management System).

Esta información, se descargó en formato shapefile para el período comprendido entre diciembre de 2019 a junio de 2020 y diciembre de 2020 a junio de 2021. Los datos se filtraron con un nivel de confiabilidad igual o superior al 90%, de acuerdo con la metodología empleada por [19]. El procesamiento de la información se hizo a través del software ArcGis 10.5 y QGis 3.12.

4.2 Descarga del área quemada por el sensor MODIS

Se descargó los datos del Land Processes Distributed Active Archive Center (LP-DAAC) de la Universidad de Maryland, disponible para su descarga en formato HDF, GeoTIFF o Shapefile de la colección 6 de MODIS de áreas quemada a través del enlace: <ftp://ba1.geog.umd.edu>.

El producto MCD64A1 versión 6 se genera de forma mensual, presenta una resolución espacial de 500 m y nivel 3 (nivel de procesamiento de los datos satelitales, que se han mapeado en una cuadrícula, espacio-tiempo uniforme y de calidad controlada). Su procesamiento identifica áreas quemadas recientes (> 25 ha) y descarta las que ocurrieron en temporadas anteriores (no contempla áreas quemadas procesadas en cálculos anteriores, con el fin de evitar el reporte de valores que ya han sido previamente considerados). Los archivos se re proyectan en proyección Plate-Carree y cubren un conjunto de ventanas subcontinentales (**Fig. 6**).

Se descargó la información de la ventana 5 en formato shapefile (**Fig. 6**), para el período comprendido entre diciembre de 2019 a junio de 2020 y diciembre de 2020 a junio de 2021. A través del software ArcGis 10.5 y QGis 3.12 se realizó la delimitación de la información, el cálculo de las áreas afectadas y la composición del mapa.

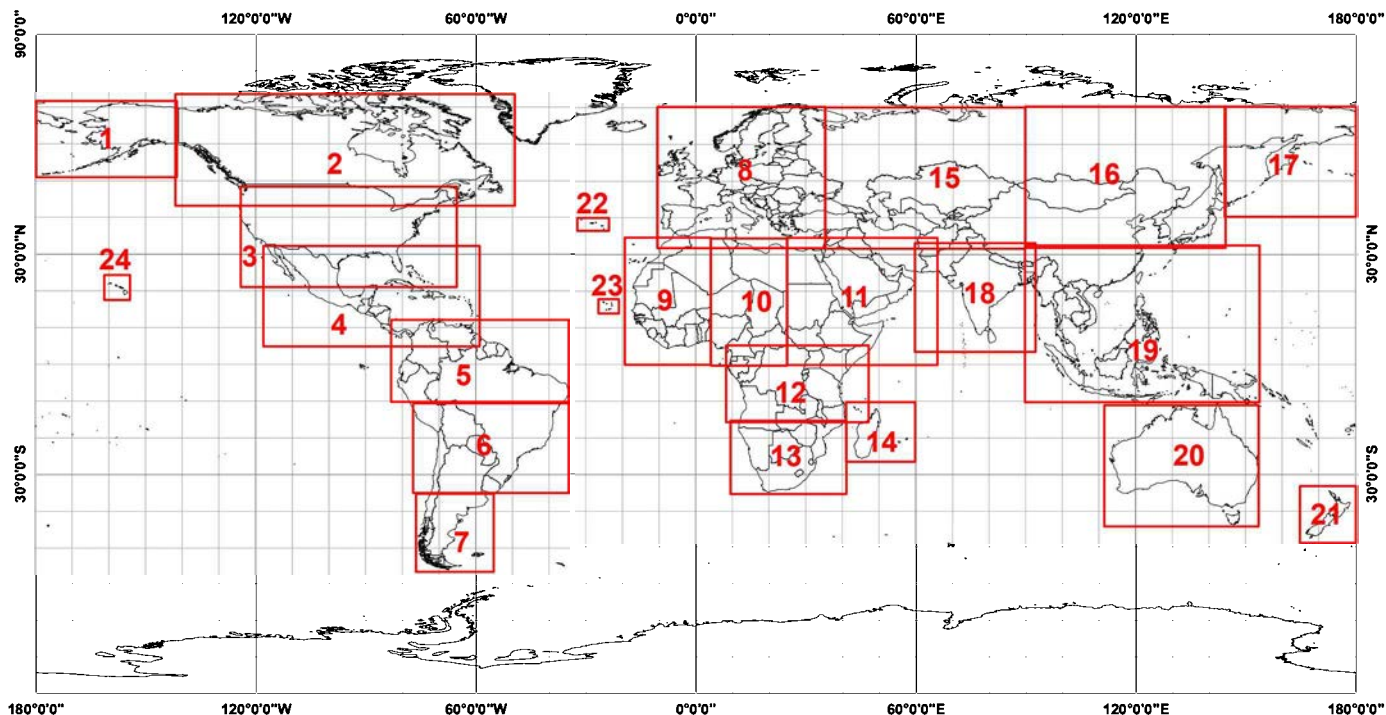


Figura 6. Cobertura de los subconjuntos de formato Shapefile [35]

4.3 Análisis de incendios a partir de imágenes de Sentinel-2

El procesamiento, el desarrollo de algoritmos y el cálculo de las áreas en donde hubo cambios en la vegetación se realizó a través de la plataforma Google Earth Engine (GEE) basada en la nube que permite para realizar análisis científicos y visualización de datos geospaciales de gran tamaño a escala planetaria.

Con el análisis de los focos de calor, se definió el mes de diciembre como un período donde la ocurrencia de incendios fue muy baja (pre-incendio) y a partir de abril como la época donde ya habían ocurrido la mayor parte de los incendios (post-incendios). De acuerdo con la disponibilidad de imágenes Sentinel-2 en GEE, se ajustó el período de análisis tal como se presenta en la **Tabla 5**.

Tabla 4. Características de las imágenes utilizadas para los análisis de áreas quemadas con Sentinel-2

Sensor	Período pre-incendio	No de imágenes	Período post-incendio	No de imágenes	Resolución espacial
Sentinel -2	28/12/2019-5/01/2020	89	20/04/2020-30/04/2020	127	NIR 10 m, borde rojo y SWIR 20 m y bandas atmosféricas a 60 m
	1/12/2020-31/12/2020	6	01/04/2020-30/04/2020	12	

4.3.1 Cálculo del índice normalizado de área quemada (NBR) a partir de Sentinel-2

Se calculó el NBR para las imágenes Sentinel 2, con una resolución de 30 m, el cual estima el área quemada por clase de gravedad. Para este proceso, se siguió la metodología descrita a continuación.

Máscara de nubes. Se aplicó un algoritmo de enmascaramiento de nubes y sombras de nubes, ya que las nubes impiden observar la superficie y las sombras tienen bajos niveles de reflectividad, por tanto, pueden confundirse con zonas de áreas quemadas.

Cálculo del Índice Diferencial de Área Quemada. Se calculó el NBR para las imágenes antes del incendio (NBR_{prefuego}) y para las imágenes posteriores al incendio (NBR_{postfuego}), el cual se define como:

$$NBR = \frac{(NIR - SWIR2)}{(NIR + SWIR2)}$$

donde,

NBR: Índice normalizado de área quemada

NIR: Infrarrojo cercano

SWIR2: Infrarrojo de onda corta

Posteriormente, se calculó el dNBR el cual se define como:

$$dNBR = NBR_{prefuego} - NBR_{postfuego}$$

donde,

dNBR: Diferencia normalizada de área quemada

NBR_{prefuego}: Índice normalizado de área quemada previo al incendio

NBR_{postfuego}: Índice normalizado de área quemada posterior al incendio

El dNBR se utilizó para obtener la severidad del incendio, ya que las áreas con valores de dNBR más altos indican daños más severos, mientras que las áreas con valores de dNBR negativos pueden mostrar una mayor productividad de la vegetación [32]. El dNBR se clasificó de acuerdo con los rangos de severidad de incendios propuestos por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) (Tabla 5).

Tabla 5. Niveles de severidad y rangos en incendios propuestos.

Nivel de severidad	Rango dNBR (escala de 10 ³)	Rango dNBR (no escalado)
 Nuevo rebrote, Alto	-500 a -251	-0.500 a -0.251
 Nuevo rebrote, Bajo	-250 a -101	-0.250 a -0.101
 No quemado	-100 a +99	-0.100 a +0.99
 Baja Severidad	+100 a +269	+0.100 a +0.269
 Moderada/baja Severidad	+270 a +439	+0.270 a +0.439
 Moderada/alta Severidad	+440 a 659	+0.440 a 0.659
 Alta Severidad	+660 a +1300	+0.660 a +1300

CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA CRediT

Conceptualización: Daniela Torinjano, Adriana Osorio. Metodología: Daniela Torinjano, Adriana Osorio. Redacción de primera versión: Daniela Torinjano, Adriana Osorio, Alejandro Marulanda. Figuras y tablas: Daniela Torinjano, Adriana Osorio. Administración de proyecto: Adriana Osorio, Alejandro Marulanda. Búsqueda de evidencia: Daniela Torinjano, Adriana Osorio.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores no declaran algún tipo de conflicto de intereses.

AGRADECIMIENTOS

Al Tecnológico de Antioquia I.U. principal financiador del proyecto bajo la modalidad de proyectos de investigación interna y a la Universidad EAFIT quien fue el cofinanciador.

IDENTIFICACIÓN DE AUTORES

Daniela Torinjano Jiménez [CvLAC](#)

Adriana Osorio Mosquera [CvLAC](#)

Alejandro Marulanda Tobón [CvLAC](#)

BIBLIOGRAFÍA

1. Robinne, F-N., Burns, J., Kant, P., Groot, B., Flannigan M.D., Kleine M., Wotton D. M (2018). *Global Fire Challenges in a Warming World*. International Union of Forest Research Organizations, Occasional Paper No. 32. <https://pure.iiasa.ac.at/id/eprint/15707/1/op32.pdf>
2. Díaz, R., Lloret, F. & Pons X. (2003). Influence of fire severity on plant regeneration by means of remote sensing imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 24(8), 1751–1763. <https://doi.org/10.1080/01431160210144732>
3. Armenteras D. (2020). *Smoke signals: policy solutions to sustain Colombian forests* (Report Climate and Environment Protection). United States Department of Agriculture. <https://www.rtachesn.org/resources/smoke-signals-policy-solutions-to-sustain-colombian-forests/>
4. di Bella, C.M., Jobbágy, E.G., Paruelo, J.M., & Pinnock, S. (2006). Continental fire density patterns in South America. *Global Ecology and Biogeography*, 15, 92–199. <https://doi.org/10.1111/j.1466-822X.2006.00225.x>
5. Armenteras, D., Romero, M. & Galindo G. (2005). Vegetation fire in the savannas of the Llanos Orientales of Colombia. *World Resource Review*, 17(4), 531–543. https://www.researchgate.net/publication/228625433_Vegetation_fire_in_the_savannas_of_the_Llanos_Orientales_of_Colombia
6. Armenteras, D., Rodríguez, N. & Retana J. (2013). Landscape Dynamics in Northwestern Amazonia: An Assessment of Pastures, Fire and Illicit Crops as Drivers of Tropical Deforestation. *Plos One* 8 (1), 1-9, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0054310>
7. IDIGER (Instituto Distrital de Gestión de Riesgos y Cambio Climático). (2019, 12 de diciembre). *Caracterización General del Escenario de Riesgo por Incendio Forestal*. Alcaldía Mayor de Bogotá. <https://www.idiger.gov.co/rincendiof>
8. UNGRD (Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres). (2019). *Lo que usted debe saber sobre incendios de cobertura vegetal*. Sistema Nacional de Gestión del Riego de Desastres. https://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/bitstream/handle/20.500.11762/28309/Cartilla_Incendios_2019-.pdf?sequence=4&isAllowed=y
9. Armenteras, D., Clerici, N., Kareiva, P., Botero, R., Ramírez-Delgado, J.P., Forero-Medina, G., et al. (2020). Deforestation in Colombian protected areas increased during post-conflict periods. *Scientific Reports*, 10 (4971), 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-61861-y>
10. IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales). *Incendios de la cobertura vegetal*. Recuperado el 20 de diciembre de 2020, de <http://www.ideam.gov.co/web/ecosistemas/incendios-cobertura-vegetal>
11. Gimeno, M. & Ayanz, J. (2004). Evaluation of RADARSAT-1 data for identification of burnt areas in Southern Europe. *Remote Sensing of Environment*, 92(3), 370–375. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.03.018>
12. Polychronaki, A., Gitas, I.Z., Veraverbeke, S., Debien, A. (2013). Evaluation of ALOS PALSAR imagery for burned area mapping in greece using object-based classification. *Remote Sensing*, 5(11), 680–701. <https://doi.org/10.3390/rs5115680>
13. Wainschenker, R.S., Ciccimarra, G., Tristan, P. & Doorn, J. (2003). *Generación de Mapas Temáticos a partir del Procesamiento de Imágenes* [Presentación de paper]. V Workshop de Investigadores en Ciencias de la Computación. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/21517>
14. Villegas, H. V. (2008). *Introducción a la percepción remota y sus aplicaciones geológicas* (Guía asistentes). Ministerio de Minas y Energía. Servicio Geológico Colombiano. <http://recordcenter.sgc.gov.co/B12/23008002524448/documento/pdf/2105244481102000.pdf>

15. Chuvieco, E. (1995). *Fundamentos de la teledetección espacial*. (2da ed.). Ediciones Rialp S.A. Madrid.
16. Soler, D & Hernández, P. (2018). Desarrollos y perspectivas de investigación en la Orinoquía. *Revista de Medicina Veterinaria*, 36, 7–13. <https://doi.org/10.19052/mv.5167>
17. Guzmán, D., Ruíz, J.F. & Cadena, M. (2014). *Regionalización de Colombia según la estacionalidad de la precipitación media mensual, a través de Análisis de Componentes Principales (ACP)* (Documento de difusión). Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21141/Regionalizacion+de+la+Precipitacion+Media+Mensual/1239c8b3-299d-4099-bf52-55a414557119>
18. Lasso, C. A., Rial, A., Matallana, C., Ramírez, W., Señaris, J., Díaz-Pulido, A., Corzo, G., & Machado-Allison, A. (Eds.). (2011). *Biodiversidad de la cuenca del Orinoco. II Áreas prioritarias para la conservación y uso sostenible*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
19. Armenteras, D., González-Alonso, F. & Aguilera, C.F. (2009). Distribución geográfica y temporal de anomalías térmica. *Caldasia*, 31, 303–318. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0366-52322009000200007&lng=en&nrm=iso&tlng=en
20. Romero, M. H., Flantua, S. G. A., Tansey, K., & Berrio, J. C. (2012). Landscape transformations in savannas of northern South America: Land use/cover changes since 1987 in the Llanos Orientales of Colombia. *Applied Geography*, 32(2), 766–776. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2011.08.010>
21. Lozano., Vasquez, C., Rivera, C., & Zapata, A. (2019). Efecto de la vegetación riparia sobre el fitoperifiton de humedales en la Orinoquía colombiana. *Acta Biológica Colombiana*, 24(1), 67–85. <https://doi.org/10.15446/abc.v24n1.69086>
22. Vásquez A., Toro, L., & González-Caro, S. (2018). Dinámica de incendios en Antioquia con énfasis. En E. Quintero-Vallejo, A. Benavides, N. Moreno & S. González-Caro (Eds.), *Bosques Andinos* (1ed., pp 87–102). Fundación Jardín Botánico de Medellín Joaquín Antonio. https://www.researchgate.net/publication/323074094_Dinamica_de_incendios_en_Antioquia_con_énfasis_en_Bosques_Andinos
23. Zamora, A. (2016). *Estudio metodológico para el monitoreo de alertas tempranas de deforestación basado en focos de calor en la Amazonía Peruana* [Tesis pregrado, Universidad Nacional Agraria la Molina Facultad de Ciencias Forestales]. Repositorio Institucional Universidad Nacional Agraria la Molina. <https://Hdl.Handle.Net/20.500.12996/2601>
24. Blumenfeld, J. (2019, 26 de Julio). *Wildfires Can't Hide from Earth Observing Satellites*. NASA. <https://earthdata.nasa.gov/learn/articles/feature-articles/wildfire-articles/wildfires-cant-hide-from-earth-observing-satellites>
25. NASA (National Aeronautics and Space Administration). (2001, 21 de agosto). *Detector Espacial de Incendios*. NASA. https://ciencia.nasa.gov/science-at-nasa/2001/ast21aug_1
26. SA (European Space Agency). (2021, 24 de junio). *Sentinel Overview, Sentinel Missions*. ESA. <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions>
27. Anaya, J.A., Sione, W.F., Rodriguez-Montellano, A.M. (2018). Identificación de áreas quemadas mediante el análisis de series de tiempo en el ámbito de computación en la nube. *Revista de Teledetección*, 51, 61-73. <https://doi.org/10.4995/raet.2018.8618>
28. Armenteras, D., González, T. M., & Retana, J. (2013). Forest fragmentation and edge influence on fire occurrence and intensity under different management types in Amazon forests. *Biological Conservation*, 159, 73–79. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2012.10.026>

29. Toriniano, D. & Osorio, A. (2020) *Análisis de la ocurrencia de incendios en la Orinoquia Colombiana durante la cuarentena obligatoria por Covid-19 a través de teledetección óptica y de radar*. [Tesis pregrado, Institución Universitaria Tecnológico de Antioquia]. Repositorio Institucional Institución Universitaria Tecnológico de Antioquia. <https://dspace.tdea.edu.co/handle/tdea/1434>
30. UNGRD (Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres) (2022, 12 de febrero). *Riesgo Por Incendio Forestal, Caracterización general*. Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres. <https://veronicab.gitlab.io/escenarios-de-riesgo/Riesgo-Incendio-Forestal.html>
31. Keeley, J. E. (2009). Fire intensity, fire severity and burn severity: a brief review and suggested usage. *International Journal of Wildland Fire*, 18(1), 116-126. <https://doi:10.1071/wf07049>
32. UN-SPIDER (2018, 2 de Febrero). *Step by Step: Burn Severity mapping in Google Earth Engine*. (2018,). United Nations. <https://un-spider.org/advisory-support/recommended-practices/recommended-practice-burn-severity/burn-severity-earth-engine>
33. Roy, D. P., Jin, Y., Lewis, P. E., & Justice, C. O. (2005). Prototyping a global algorithm for systematic fire-affected area mapping using MODIS time series data. *Remote Sensing of Environment*, 97(2), 137–162. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.04.007>
34. Paz, A (2020, 2 de abril). *Incendios, contaminación del aire y Covid-19: tres problemas que acechan a Colombia*. Mongabay. <https://es.mongabay.com/2020/04/calidad-del-aire-y-coronavirus-incendios-en-colombia/>
35. Giglio, L., Schroeder, W., Hall, J. & Justice, C. (2018). *MODIS Collection 6 Active Fire Product (User's Guide Revision B)*. NASA. http://modis-fire.umd.edu/files/MODIS_C6_Fire_User_Guide_B.pdf

CAPÍTULO
6

Usos de la evaluación integral del riesgo por inundación en la consolidación de comunidades resilientes: caso de estudio en cabeceras municipales de la ecorregión de la Mojana

Juan Camilo Olaya González^{1,3*}, Paula Andrea Villegas González^{1,4}, Jairo Andrés Valcárcel Torres^{1,5}, Julián Darío Arbeláez Salazar^{1,2,6}, Fabián Mauricio Caicedo Carrascal^{1,2,4}, José Ville Triana García^{1,2,7}, Lina Dorado González¹, Juan Pablo Forero Acevedo^{1,3} & Maykel Yiseth Gutiérrez¹

¹Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD). Avenida Calle 26 No. 92-32 Edificio Gold 4 Piso 2. Vinculación durante el desarrollo del proyecto. Bogotá, Engativá, Colombia.

²Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). Calle 25 D No. 96 B – 70, Bogotá, Colombia. Vinculación durante el desarrollo del proyecto.

³I+R Consultores en Ingeniería y Riesgos S.A.S. Calle 53#3-27, Bogotá, Colombia.

⁴Pontificia Universidad Javeriana, Facultad de Ingeniería. Carrera 7 No. 40 - 62, Bogotá, Colombia.

⁵Universidad de La Salle, Facultad de Ingeniería. Carrera 2 No. 10-70. Bogotá, Colombia.

⁶Universidad de los Andes, Facultad de Ingeniería. Carrera 1 No. 18A - 12, Bogotá, Colombia.

⁷Universität Salzburg. Salzburgo (Austria).

*Autor de contacto: Juan Camilo Olaya González, Consultor independiente, I+R Consultores en Ingeniería y Riesgos S.A.S. Calle 53#3-27, Bogotá, Colombia. Vinculado a la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres durante el desarrollo del proyecto. Correo-e: juanog88@hotmail.com/juan.olaya@irconsultores.co/jc.olaya52@uniandes.edu.co.

Resumen

En la Gestión del Riesgo de Desastre (GRD), la definición de medidas de reducción del riesgo se basa en el estudio previo de los posibles efectos de las amenazas en el territorio a partir de diversas metodologías. Para dar un soporte técnico al proceso de incorporación de la GRD en instrumentos de planificación territorial en Colombia, se desarrolló una metodología de Evaluación Probabilista de Riesgo (EPR) por inundación lenta a escala de detalle (1:2000). La metodología combina la evaluación de amenaza por inundación, exposición, vulnerabilidad física, vulnerabilidad social, y el cálculo de pérdidas económicas. Se emplea un enfoque probabilista en el componente de amenaza, vulnerabilidad física y cálculo de riesgo, y un enfoque integral a partir de la evaluación de vulnerabilidad social de comunidades que presentan eventos recurrentes de inundación lenta y factores subyacentes del riesgo de desastres en su dimensión social como pobreza e inequidad. Se recopilieron datos en campo con encuestas presenciales predio a predio para el levantamiento digital de información relevante de edificaciones. Se utilizaron cuestionarios realizados a comunidades para determinar condiciones de vulnerabilidad social, así como talleres de socialización y participación de actores. Como resultado y gracias a la escala de trabajo, se estableció que el modelo de riesgo calcula daños separadamente para los rubros de contenidos y de edificaciones, lo que permite estimar las contribuciones de pérdidas acorde con el proceso de generación de daño y con los patrones de vulnerabilidad física en función de medidas de intensidad de amenaza como profundidad de inundación y velocidad media de flujo. La metodología se aplica a cuatro estudios de caso en el delta hídrico de La Mojana y en este capítulo se presentan los resultados obtenidos para la cabecera municipal de Montelíbano (Córdoba). Recomendamos fomentar el conocimiento del riesgo con enfoques probabilistas e integrales como insumos para el desarrollo de comunidades resilientes a eventos de inundación.

Palabras clave: gestión del riesgo por inundación, resiliencia, amenaza por inundación, instrumentos de planificación territorial, vulnerabilidad física y social, gestión del riesgo de desastres.

Uses of comprehensive flood risk assessment in the consolidation of resilient communities: a case study in municipal capitals of the Mojana ecoregion

Abstract

In Disaster Risk Management (DRM), the definition of risk reduction measures is based on the prior study of the possible effects of hazards on the territory using different methodologies. To technically support the process of incorporating DRM into territorial planning instruments in Colombia, a Probabilistic Risk Assessment (PRA) methodology was developed for slow flooding at a detailed scale (1:2000). The methodology combines

the assessment of flood hazard, exposure, physical vulnerability, social vulnerability, and the calculation of economic losses. A probabilistic approach is used for the hazard component, physical vulnerability, and risk calculation, and a comprehensive approach is used for the social vulnerability assessment of communities with recurrent slow flooding events and underlying factors of disaster risk in its social dimensions such as poverty and inequity. Data were collected in the field with on-site surveys from property to property to survey relevant building information digitally. Questionnaires were used in communities to determine conditions of social vulnerability and socialization and stakeholder participation workshops. As a result, and thanks to the scale of the work, it was established that the risk model calculates damages separately for contents and buildings, which allows estimating loss contributions according to the damage generation process and physical vulnerability patterns based on hazard intensity measures such as flood depth and average flow velocity. The methodology is applied to four case studies in the La Mojana water delta and the results obtained for the municipal capital of Montelíbano (Córdoba) are presented in this chapter. We recommend promoting knowledge of risk with probabilistic and integral approaches as inputs for developing communities resilient to flood events.

Keywords: Flood risk management, resilience, flood hazard, territorial planning instruments, physical and social vulnerability, disaster risk management.

1. INTRODUCCIÓN

La resiliencia de una comunidad ante desastres derivados de eventos naturales puede definirse como su habilidad para anticiparse, absorber, recuperarse y mantener su funcionalidad ante la ocurrencia de eventos desastrosos, así como su capacidad para aprender, adaptarse y transformarse con el fin de reducir daños potenciales y garantizar su bienestar y seguridad ante eventos futuros [1,2].

Para fortalecer tales capacidades, es recomendable ejecutar medidas de intervención basadas en el conocimiento de la comunidad y de las posibles consecuencias por eventos desastrosos. Tal conocimiento puede enfocarse en diferentes componentes de la GRD: en el control/gestión de las amenazas, en el reforzamiento de la infraestructura, o en la respuesta a emergencias y en procesos educativos, entre otros.

La GRD requiere que las medidas adoptadas tengan en cuenta aspectos relacionados con las amenazas, los elementos expuestos, la propensión al daño y la vulnerabilidad social. En este sentido, en Colombia existen elementos normativos (ver **Caja 1**) que definen la integración de la GRD en la planificación territorial en términos de requisitos y reglamentaciones de obligatorio cumplimiento por parte de los entes territoriales.

En el caso de inundaciones lentas, existen limitaciones frente al conocimiento y la modelación de amenaza por inundación en los siguientes aspectos:

- La extensión, profundidad de la lámina de agua y frecuencia de ocurrencia de los eventos
- El comportamiento de las edificaciones e infraestructura expuesta ante la velocidad, y la profundidad de la lámina de agua y duración de la inundación.

- La capacidad técnica, económica y demás recursos y condiciones que inciden en el desarrollo de la población, en la conformación de asentamientos humanos y en la toma de decisiones de la comunidad frente al riesgo de desastre.

En consecuencia, como insumo para incorporar la GRD en los instrumentos de planificación territorial, se plantea como objetivo principal del capítulo la presentación de una metodología de EPR de desastre por inundaciones lentas a escala de detalle. En la metodología se consideran incertidumbres para estimar daños directos e indirectos y los factores que determinan la vulnerabilidad social para la región de La Mojana, en los municipios de Magangué y Mompo (Bolívar), San Marcos (Sucre), y Montelíbano (Córdoba). Los objetivos específicos del capítulo son: i) presentar detalles metodológicos de los componentes de amenaza, vulnerabilidad física y social, exposición y evaluación del riesgo por inundación lenta para escalas de detalle, ii) presentar resultados de la aplicación de la metodología propuesta en el estudio de caso para la cabecera municipal de Montelíbano (Córdoba), y iii) presentar conceptos, puntos clave y recomendaciones a futuro para la integración de la GRD por inundaciones en instrumentos de planificación territorial.

Con ello se pretende aportar a la planificación de medidas de reducción del riesgo que integren condiciones de incertidumbre y de contexto de las comunidades. También, a que las comunidades tengan la capacidad de anticiparse, responder y recuperarse oportunamente cuando las inundaciones ocurran. Finalmente, de aprender, adaptarse y transformarse para reducir los impactos futuros de las inundaciones contribuyendo a consolidar comunidades resilientes en el país.

Caja 1. Elementos normativos que integran la GRD en instrumentos de planificación territorial

La Ley 1523 de 2012 adopta la Política Nacional de Gestión del Riesgo de Desastre y se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastre [3].

El Artículo 189 del decreto ley 019 de 2012 dicta la incorporación de la GRD en la revisión de Planes de Ordenamiento Territorial (POT) [4].

El Decreto reglamentario 1807 de 2014 reglamenta el artículo 189 del Decreto Ley 019 de 2012 en cuanto a las condiciones y escalas de detalle para la incorporación de la GRD en lo relacionado con amenazas por remoción en masa, inundaciones y avenidas torrenciales en instrumentos de planificación territorial [5].

- Establece la evaluación de riesgo como “el resultado de relacionar la zonificación detallada de amenaza y la evaluación de la vulnerabilidad. Con base en ello, se categorizará el riesgo en alto, medio y bajo, en función del nivel de afectación esperada.”

El Decreto 1077 de 2015 compila las normas reglamentarias preexistentes dadas para el Sector Vivienda, Ciudad y Territorio, dentro de las cuales se encuentra el Decreto 1807 de 2014, en lo referente a la incorporación del riesgo en el ordenamiento territorial [6].

2. MATERIALES Y MÉTODOS

La definición de evaluación del riesgo del Decreto 1807 de 2014 relaciona la zonificación detallada de amenaza con la evaluación de la vulnerabilidad (ver Caja 1). Así, como resultado final de la metodología, el riesgo se categorizó en alto, medio y bajo en función del nivel de afectación esperada. Para apoyar técnicamente a los entes territoriales a incorporar la GRD a sus instrumentos de planificación territorial, la metodología se planteó con un enfoque probabilista en la modelación de la amenaza, vulnerabilidad física y cálculo de riesgo. Adicionalmente se planteó el diagnóstico y evaluación de la vulnerabilidad social siguiendo la metodología de UNGRD-IEIMP [7]. En este capítulo se resumen los componentes principales de la metodología apropiados para la escala de trabajo reglamentada por el Decreto 1807 de 2014. Todos los detalles metodológicos se pueden encontrar en UNGRD (2018) [8].

2.1. Evaluación de la amenaza

La metodología de amenaza por inundación se basa en la *Guía Metodológica para la Elaboración de Mapas de Inundación* [9], la cual contiene enfoques metodológicos para el análisis de inundaciones y la elaboración de mapas de inundación en función de la escala y su respectiva aplicación.

2.1.1. Información básica

Un modelo de amenaza por inundación evalúa variables como la extensión de la inundación, la altura de la lámina de agua, la velocidad del flujo y el tiempo de permanencia de la inundación. Para ello, es indispensable el análisis morfológico, hidrológico e hidráulico del cuerpo de agua. Dentro de la información básica necesaria es necesario contar con: las series hidrometeorológicas del área de estudio, un Modelo Digital de Elevación detallado (MDE), información histórica y gráfica georreferenciada de eventos históricos, con la cual se compara y validan los resultados de la modelación realizada.

Dos de los resultados principales del modelo son la profundidad de lámina de agua (o tirante hídrico), y la velocidad media de flujo, que corresponden a medidas de intensidad de amenaza de interés para la evaluación de los posibles efectos negativos de las inundaciones sobre la población y su infraestructura y medios de vida. Con esto es posible categorizar la amenaza por inundación en Alta, Media y Baja para diferentes periodos de retorno. El resultado del modelo de amenaza como insumo para la metodología de EPR por inundación es una colección de mallas de valores estimados de las profundidades de inundación y velocidad media de flujo, asociadas a diferentes períodos de retorno, para una localización particular.

2.1.2. Series hidrometeorológicas

Corresponden a registros históricos de precipitación, niveles y caudales del área de estudio, resultado del monitoreo hidrológico del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) u otras entidades que sigan los estándares de medición establecidos por la Organización Meteorológica Mundial (OMM) [10].

2.1.3. Modelo Digital de Elevaciones (MDE)

Para el análisis de amenaza por inundación es fundamental contar con un MDE acorde a la escala de trabajo. El MDE es una representación visual y matemática de los valores de altura con respecto al nivel medio del mar que típicamente se presenta en un formato ráster, el cual es una matriz de celdas (píxeles), organizadas en filas y columnas y que cubren alguna región del mundo. Para la EPR a nivel urbano, el MDE debe tener, como mínimo, una resolución espacial de 1 metro (pixel = 1×1 m) para

obtener cartografía a escala 1:2,000 tal como se especifica en el Decreto 1807 de 2014 [11]. El MDE debe contener la llanura inundable, el cauce del río/cuerpo de agua de interés, y todas las estructuras de protección de inundación y control hidráulico existentes en el sitio de análisis.

2.1.4. Mapas de eventos

Un formato efectivo de comunicación de los resultados del modelo para apoyar la toma de decisiones son los mapas de eventos de inundación. Se obtienen mediante la integración de información de sensores remotos, trabajo de campo y datos georreferenciados sobre eventos históricos provenientes de crónicas, fotografías, mapas, a partir de los cuales es posible validar los productos obtenidos con la modelación.

2.1.5. Metodología de análisis de amenaza por inundación a escala 1:2000

En la **Figura 1** se presenta el proceso metodológico utilizado para la modelación de amenaza por inundación a partir del análisis hidrológico, hidráulico y espacial. El análisis hidrológico comprende el cálculo de caudales máximos (o niveles máximos, según corresponda al tipo de inundación, ver **Caja 2**) de distintos períodos de retorno. De acuerdo con Chow et al. (1994) [12], la magnitud de un evento extremo está inversamente relacionada con su frecuencia de ocurrencia. Es decir, eventos muy severos ocurren con menor frecuencia que eventos más moderados. Estos caudales se transitan usando un modelo hidrodinámico bidimensional que, a partir del MDE ajustado y de la solución aproximada de ecuaciones de conservación de la masa y momento lineal (Ecuaciones de Navier-Stokes para flujo incompresible), permite calcular las profundidades de inundación y velocidades medias de flujo en cada nodo del dominio establecido. El modelo se somete a protocolos de calibración y validación con la información histórica y gráfica de eventos históricos.

Dado que los eventos de inundación son dinámicos en el espacio-tiempo, los mapas de amenaza deben ser actualizados periódicamente y se debe propender por su difusión, de tal manera que los tomadores de decisión puedan actuar en la implementación de medidas de reducción del riesgo.



Figura 1. Metodología análisis de amenaza de inundación. Fuente [9].

Caja 2. Tipos de inundación lenta

Inundación: el glosario de términos del reporte SREX del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) [13] define las inundaciones como: El desbordamiento de los confines normales de un arroyo u otro cuerpo de agua, o la acumulación de agua sobre zonas que normalmente no están sumergidas. Las inundaciones incluyen las inundaciones fluviales, las inundaciones repentinas, las inundaciones urbanas, las inundaciones pluviales, las inundaciones de alcantarillado, las inundaciones costeras y las inundaciones por desbordamiento de lagos glaciares. Particularmente, el caso de inundaciones lentas hace referencia a eventos que se producen sobre terrenos planos que desaguan muy lentamente (en un rango de semanas o meses), cercanos a las riberas de los ríos o en zonas de planicie donde hay alta pluviosidad.

Independientemente de su causa u origen meteorológico (ciclones tropicales, precipitaciones convectivas, u orográficas, deshielo, entre otros) las inundaciones lentas se pueden clasificar en:

Fluvial o por desbordamiento: se produce cuando el nivel de agua de un río, lago o arroyo sube y se desborda sobre las orillas, costas o terreno aledaño (llanura de inundación).

Pluvial o por encharcamiento: ocurre cuando un evento de lluvia extrema crea una inundación independiente de una masa de agua desbordada. Las inundaciones pluviales pueden producirse en cualquier lugar, ya sea urbano o rural, incluso en zonas sin cuerpos de agua en las proximidades.

2.2. Modelo de exposición

En la evaluación del riesgo catastrófico se considera que detallar las propiedades individuales de cada uno de los elementos expuestos resulta impráctico [14], debido a que: i) el trabajo de campo y el procesamiento de información de cada elemento demandan recursos –tiempo y dinero- que usualmente exceden el alcance de los EPR, y ii) el muestreo estadístico permite realizar una caracterización de los elementos expuestos lo suficientemente exhaustiva para el objetivo de los EPR. Como alternativa, se recomienda elaborar modelos de exposición mediante los cuales se representa la localización, tipos de elementos y su valor. A continuación, se presenta un procedimiento para elaborar modelos de exposición de edificaciones ante inundaciones.

2.2.1. Localización

La localización en planta se define mediante las coordenadas del centroide de las construcciones según la cartografía catastral del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) [15]. A su vez, se utiliza un MDE para identificar su posición en altura.

2.2.2. Tipologías estructurales

Una tipología estructural es una combinación de características tales como el sistema resistente, el material de la construcción, el número de pisos, entre otras. Para simplificar la estimación de daños es recomendable clasificar las edificaciones en tipologías estructurales [14], asumiendo que las edificaciones de una misma tipología tienen un comportamiento semejante ante inundaciones.

La **Tabla 1** presenta una descripción de las características incluidas en la definición de tipologías estructurales, las cuales se establecieron a partir de la revisión de estudios de riesgo elaborados por [14,16–20]. Las tipologías estructurales se definieron considerando las siguientes propiedades: sistema resistente a cargas, material de construcción, tipo de cubierta, sistema de soporte de la cubierta y número de pisos

Tabla 1. Propiedades utilizadas en la definición de tipologías estructurales.

Componente de la estructura	Características	Utilidad
Sistema resistente a cargas	Sistema resistente a cargas	Definir el tipo de estructura (muros, pórticos) y los materiales de construcción que estarán expuestos ante las cargas derivadas por el empuje del agua.
	Material sistema resistente	
	Fecha de construcción	Definir condiciones de ductilidad y de resistencia de los elementos estructurales
Pisos	Material del sistema resistente del piso	Determinar si existen condiciones de diafragma rígido.
	Sistema de soporte del piso	
	Conexión del piso a la estructura	
	Material de acabado del piso	Identificar condiciones de impermeabilidad
Techo	Forma del techo	Identificar la capacidad de drenaje de la cubierta
	Material de la cubierta	Identificar condiciones de impermeabilidad
	Material del sistema resistente del techo	Determinar si existen condiciones de diafragma rígido
	Sistema de soporte del techo	
	Conexión del techo a la estructura	
Paredes	Material de paredes	Identificar condiciones de impermeabilidad
	Porcentaje de abertura de paredes	Evaluar la superficie resistente a las presiones ejercidas por el agua.
Altura y número de plantas	Número de plantas sobre rasante	Determinar la altura de la estructura y la distribución de los elementos expuestos en cada planta.
	Número de plantas bajo rasante	
	Altura entrepiso	
Nivel sobre rasante y protecciones	Altura entrada sobre la rasante	Determinar si existen elementos de protección ante inundaciones y la altura a la cual la estructura estaría protegida.
	Altura protección	

Para clasificar las edificaciones en tipologías se adopta un procedimiento (**Fig. 2**) que divide el área de estudio en zonas homogéneas. En cada zona se asume que las edificaciones son semejantes según el uso, periodo de construcción, entre otros factores. A partir de inspecciones en una muestra de edificaciones se identifican las propiedades de la **Tabla 1** y se obtienen porcentajes de participación de las tipologías más frecuentes, clasificadas según el número de pisos. Teniendo en cuenta que en la información catastral se encuentra el número de pisos, es posible asignar a cada edificación una o varias tipologías estructurales de acuerdo con los resultados de las inspecciones.

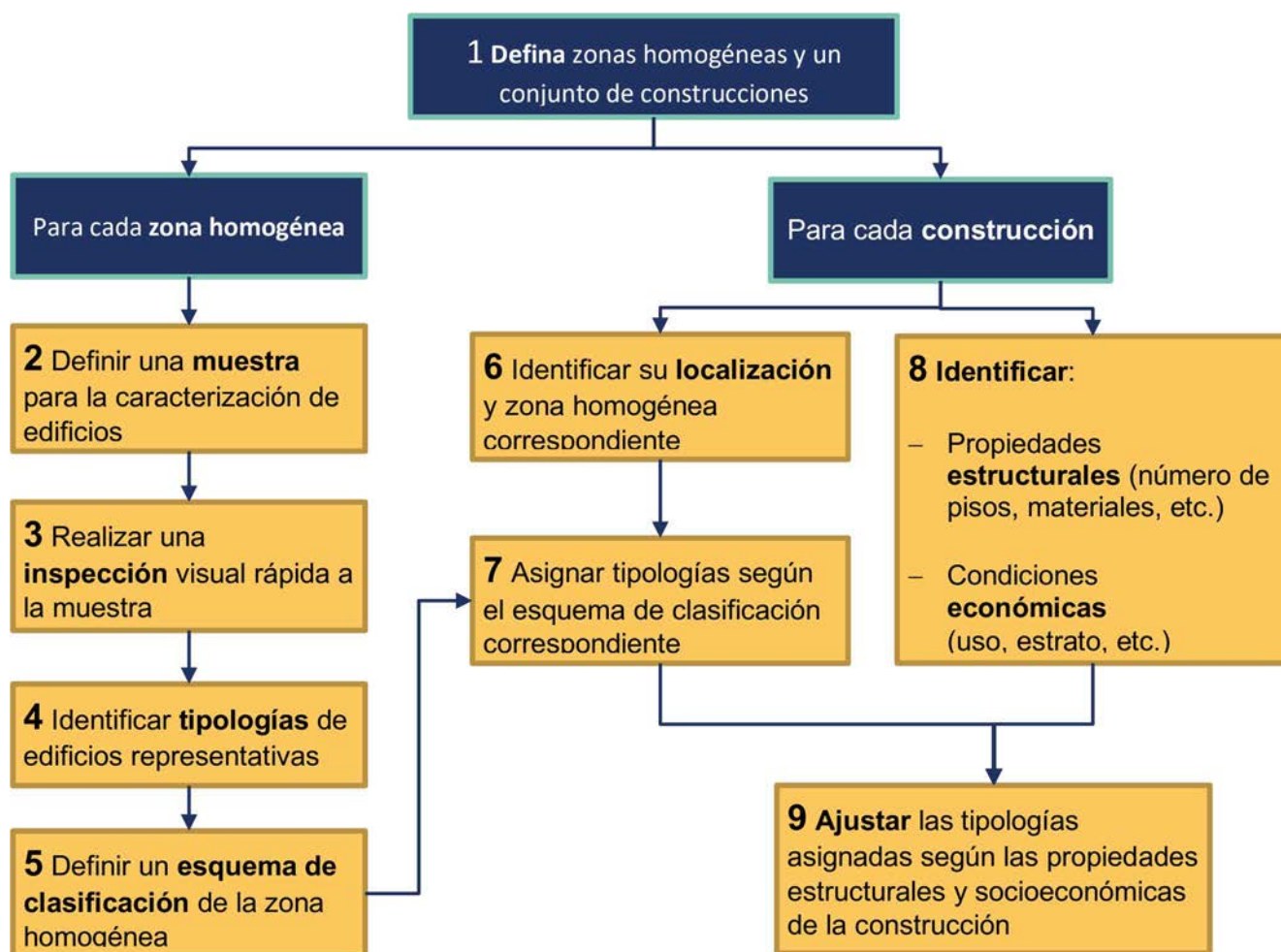


Figura 2. Procedimiento para la clasificación de edificios y asignación de tipologías estructurales. Fuente: [8].

Adicionalmente, en las inspecciones realizadas se incluyeron preguntas respecto a la existencia de medidas de protección ante inundaciones, así como la altura promedio de tales medidas. Esta información se considera relevante para identificar la capacidad de adaptación de la población

2.2.3. Valor económico y población expuesta

El valor económico de las edificaciones se determina según el avalúo catastral [15]. El valor de los contenidos se obtiene de encuestas mediante las cuales se determinan rangos de variación según el tipo de contenido y del estrato socioeconómico. La población expuesta se estimó usando el

censo de población y vivienda de 2005 según manzanas [21]. Usando proyecciones disponibles en el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), se estima la población al año de interés 2017. A partir de estos datos y conociendo el número de construcciones según manzanas, se obtienen valores promedio del número de habitantes según construcciones.

2.3. Evaluación y análisis de la vulnerabilidad física

El modelo de vulnerabilidad física propuesto plantea un método de análisis de las condiciones estructurales y de contenidos de edificaciones ante solicitudes ejercidas por eventos de inundación. El objetivo principal es construir funciones de vulnerabilidad a partir de técnicas de simulación considerando características identificables mediante inspecciones en campo. Se construyen funciones para cada tipología definida en el modelo de exposición, las cuales permiten representar las condiciones de vulnerabilidad en un grupo de elementos expuestos con características similares. La metodología considera que las pérdidas económicas en un elemento expuesto se concentran principalmente en dos rubros: los contenidos y la edificación (elementos estructurales y no estructurales).

2.3.1. Vulnerabilidad del rubro de contenidos

La metodología se basa en la propuesta de Huerta-Garnica et al. [22], y permite determinar las pérdidas en los contenidos de un inmueble específico partiendo de un tirante hídrico conocido y asumiendo que no se presenta el colapso de la estructura.

Bajo este supuesto, se generan realizaciones de inmuebles utilizando simulaciones de Montecarlo [23], considerando la incertidumbre asociada a la tenencia de enseres (tiene o no tiene), el valor de los contenidos, la localización en altura con respecto al piso y la altura libre de entrepiso. Los resultados de pérdida individual por tipo de contenido son integrados para obtener la pérdida total en el inmueble (**Fig. 3**).

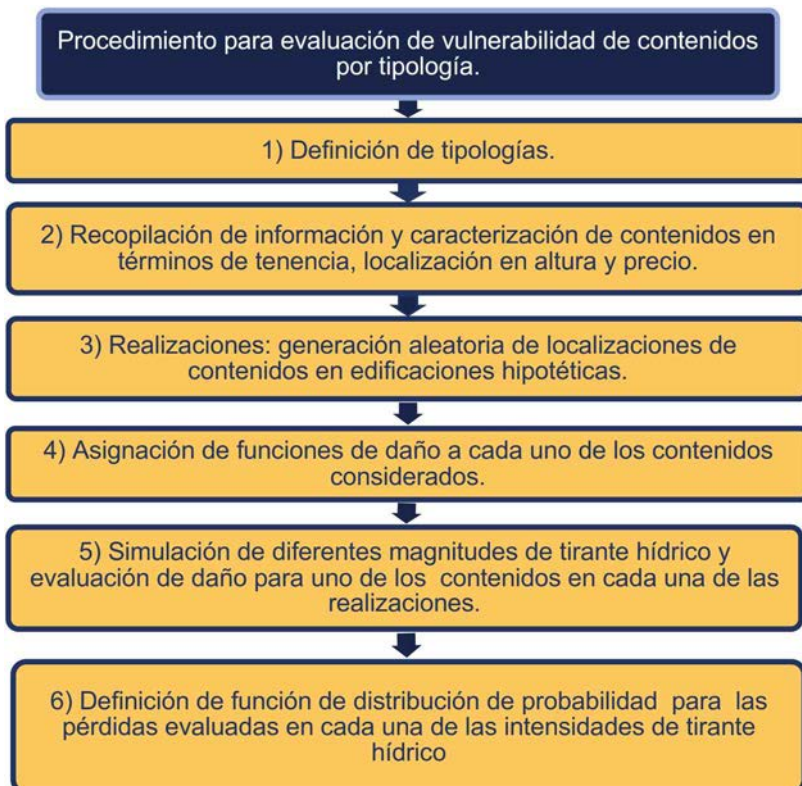


Figura 3. Procedimiento para evaluación de vulnerabilidad en rubro de contenidos. Fuente: [8].

El supuesto considerado para el daño de contenidos se resume así: para una realización j con N contenidos y para un tirante hídrico (TH), el porcentaje de pérdida se evalúa de acuerdo con la siguiente ecuación.

$$\%Daño_{j,th} = \frac{\sum_{i=1}^N (Fd_i(th) \cdot P_i)}{\sum_{i=1}^N P_i}$$

Donde;

$\%Daño_{j,th}$ = Porcentaje de daño en la realización j , evaluado para un TH particular

$Fd_i(th)$ = Función de daño para el contenido i , evaluado para un TH particular

P_i = Precio estimado del contenido

N = Número total de contenidos en la edificación hipotética definida en la realización

El resultado final del procedimiento es una función de vulnerabilidad (**Fig. 4**) que relaciona cada intensidad del tirante hídrico con el valor esperado del daño y su correspondiente desviación estándar. Los detalles del desarrollo de estas funciones de vulnerabilidad se encuentran en [8].

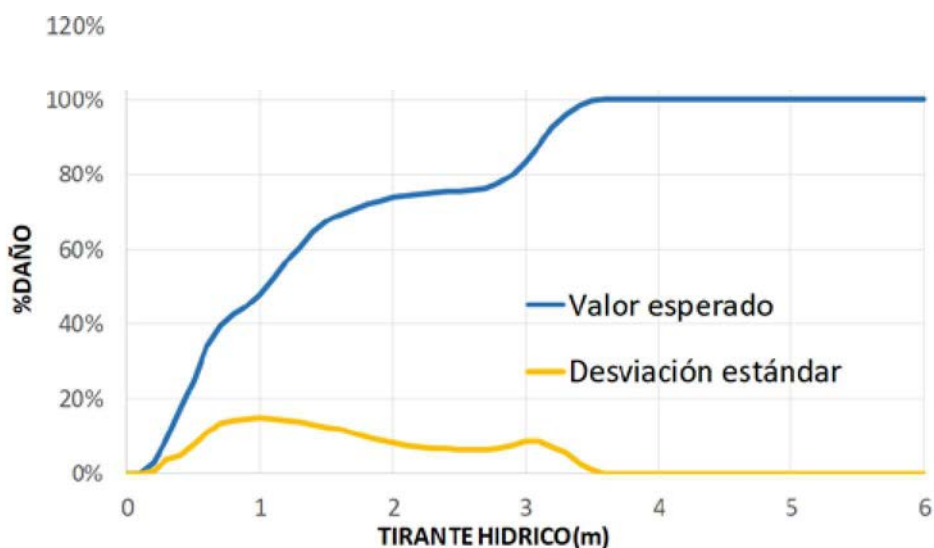


Figura 4. Ejemplo de función de vulnerabilidad para el rubro de contenidos. Fuente: [8].

2.3.2. Vulnerabilidad del rubro de edificaciones

De forma similar al análisis del rubro de contenidos, en el caso de edificaciones la evaluación de vulnerabilidad se realiza a partir de simulaciones mediante el método de Montecarlo. La metodología (**Fig. 5**) incluye modelos mecánicos de las tipologías constructivas que permiten definir diferentes estados de esfuerzos y de daño en sus elementos estructurales y no estructurales. Las variables consideradas en la evaluación del daño en estructuras son: el espesor de muros, la capacidad de los materiales, las cargas gravitacionales de cubierta y de placa, y el área aferente de cubierta y de placa sobre los muros.

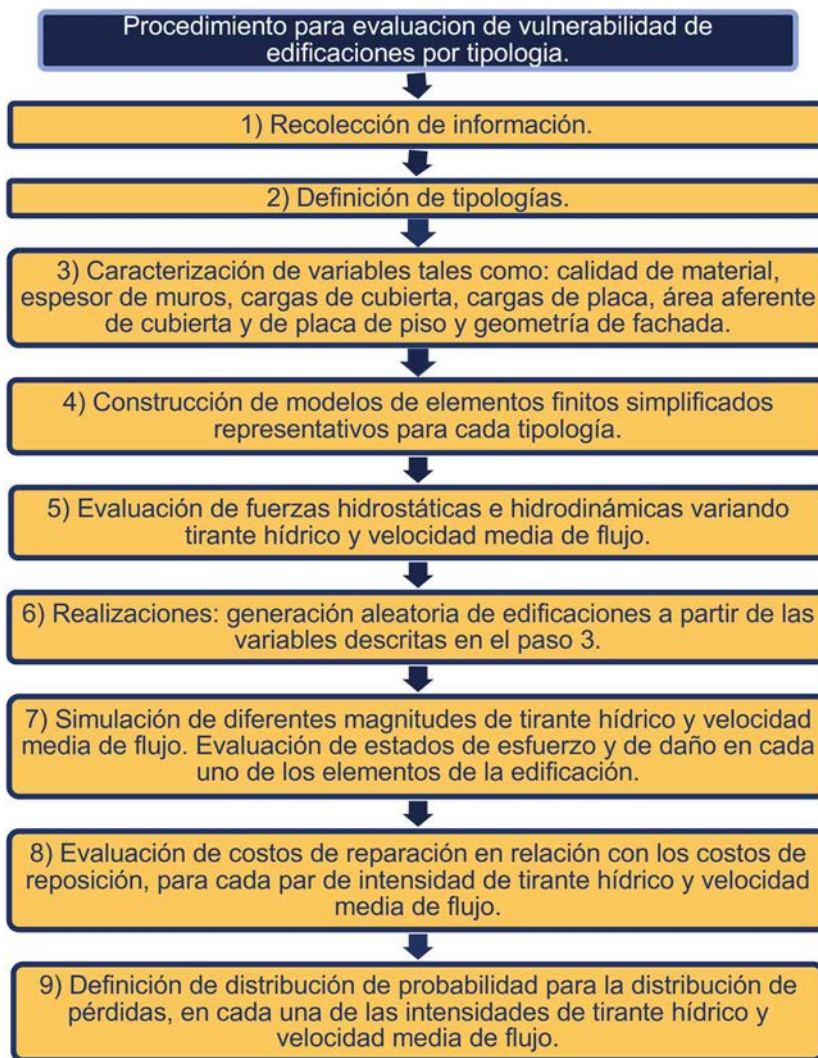


Figura 5. Procedimiento para evaluar la vulnerabilidad de edificaciones. Fuente: [8].

Para cada tipología se construyen modelos simplificados de elementos finitos que evalúan los efectos de fuerzas hidrostáticas e hidrodinámicas generadas por un evento de amenaza simulado. Un evento de inundación ejerce varios tipos de fuerzas sobre una edificación como el suelo hidrostático saturado, las presiones de agua hidrostáticas e hidrodinámicas, el impacto de escombros y fuerzas erosivas bajo la cimentación [24]. La metodología propuesta considera la presión de agua hidrostática e hidrodinámica para determinar el estado de esfuerzos en las edificaciones. El impacto de escombros, presión de suelos saturados y efectos de erosión no se incluyen. Los cálculos de fuerzas son realizados para todo el rango de velocidades flujo y de tirante hídrico estimadas en el componente de amenaza. La dirección de las fuerzas hidrodinámicas se asume como perpendicular a la fachada de la edificación. Con estas fuerzas y con información de espesor de muros, cargas y áreas aferentes de cubierta y de fachada, se definen los estados de esfuerzos. Con esto y la capacidad del material estructural se determinan los estados de daño: sin daño, inundado, fisurado, y estado de rotura.

Cada estado de daño tiene un costo de reparación que se expresa en proporción al costo de reemplazo del elemento. Estos costos de reparación se definen a partir de análisis de precios unitarios de las actividades requeridas para reestablecer las condiciones iniciales de la edificación. El porcentaje de daño en cada realización y para cada par tirante hídrico-velocidad media de flujo se define como la relación entre la sumatoria del costo de reparación y/o reemplazo de los elementos afectados y los costos

de reemplazo de la totalidad de los elementos considerados. Para una realización j , el porcentaje de daño en la edificación afectada por un tirante hídrico TH , y una velocidad media de flujo V se define como:

$$\%Daño_{j,th,v} = \frac{R \cdot RE_R + F \cdot RE_F + IN \cdot RE_{IN}}{N \cdot RE_R}$$

Donde;

$\%Daño_{j,th,v}$ = Porcentaje de daño en la realización j , evaluado para un TH particular

RE_R = Costo de reposición de un elemento en estado de rotura o elemento nuevo

RE_F = Costo de reparación de un elemento fisurado en proporción al costo de reposición de un elemento nuevo.

RE_{in} = Costo de reparación de un elemento inundado en proporción al costo de reposición de un elemento nuevo.

N = Número total de elementos considerados en la modelación

R = Número de elementos en estado de rotura

F = Número de elementos fisurados

IN = Número de elementos inundados

El resultado final del procedimiento es una función de vulnerabilidad (**Fig. 6**) de edificaciones que relaciona cada intensidad del tirante hídrico, y de velocidad media de flujo, con el valor esperado del daño y su correspondiente desviación estándar. Los detalles del desarrollo de estas funciones se encuentran en [8].

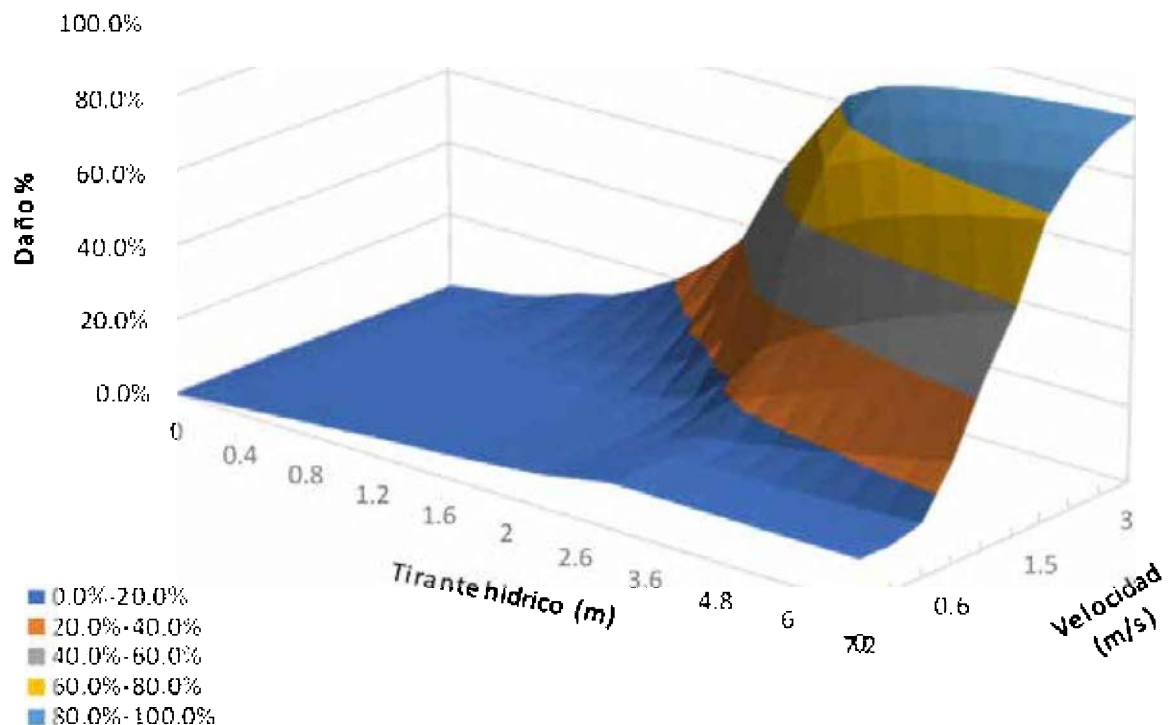


Figura 6. Ejemplo de función de vulnerabilidad para el rubro de edificaciones. Fuente: [8].

Los parámetros en orden de relevancia en la evaluación de vulnerabilidad de edificaciones y su relación con la vulnerabilidad se presentan en la **Tabla 2**.

Tabla 2. Relación entre parámetros considerados y variación de la vulnerabilidad.

Parámetro	Relación con la vulnerabilidad de edificaciones ante inundación
Material de Construcción	A mayor resistencia del material menor vulnerabilidad.
Espesor de muros	A mayor espesor de muros menor vulnerabilidad.
Número de pisos	A mayor número de pisos menor vulnerabilidad.
Existencia de diafragma rígido	La existencia de diafragma rígido reduce la vulnerabilidad.
Cargas de placa y cubierta	A mayor carga de cubierta y carga de placa menor vulnerabilidad.

Caja 3. Glosario modelo de evaluación y análisis de vulnerabilidad

Función de vulnerabilidad: relaciona cada intensidad del tirante hídrico con el valor esperado del daño y su correspondiente desviación estándar [25].

Realización: una realización de un experimento aleatorio es el resultado de una repetición de esa experiencia, condicionada por unos parámetros y funciones determinadas con anterioridad.

Relación Media de Daño (RMD): porcentaje de afectación expresado en términos de valor de reposición o reparación del daño causado a un elemento expuesto, normalizado con respecto al valor expuesto total del elemento [26].

Rubro: conjuga las posibles categorías constituyentes de un elemento expuesto particular. Para estos lineamientos, hace referencia a los componentes de dicho elemento, específicamente los contenidos y la edificación. Para la EPR por inundación se propone el análisis separado de los rubros de contenidos y edificación, generando una función de vulnerabilidad única para cada uno de ellos, para cada tipología estructural.

Tenencia: posesión de un enser o contenido individual (se define como tiene o no tiene) esta información se obtiene en las encuestas de campo para cada contenido en cada edificación.

Tipología estructural: combinación de un conjunto de propiedades estructurales que describen a un edificio [27].

Tirante hídrico: magnitud también conocida como calado o altura o profundidad de inundación en una zona particular.

Velocidad media de flujo: magnitud que representa la velocidad promedio (usualmente al 40% de la profundidad del cauce) en un punto de análisis.

2.4. Evaluación y análisis de la vulnerabilidad social

En los últimos años el país ha tenido notables avances en la evaluación del riesgo y específicamente en el análisis de la vulnerabilidad. La Ley 1523 de 2012 afirma que “La gestión del riesgo de desastres es un proceso social orientado a la formulación, ejecución, seguimiento y evaluación de políticas, estrategias, planes, programas, regulaciones, instrumentos, medidas y acciones permanentes para el conocimiento y la reducción del riesgo y para el manejo de desastres, con el propósito explícito de contribuir a la seguridad, el bienestar, la calidad de vida de las personas y al desarrollo sostenible” [3]. En este contexto,

se evidencia la necesidad de incorporar el análisis de la vulnerabilidad social a la evaluación de riesgo para construir un enfoque integral que considere elementos relacionados con la seguridad, el bienestar y la calidad de vida de la población.

Para la evaluación de la vulnerabilidad existen varias aproximaciones [28–35], que tienen en cuenta aspectos tales como: el económico, institucional, físico, ambiental, ecológico, tecnológico, científico, material, cultural, sanitario y epidemiológico [36].

Las orientaciones metodológicas surgen del documento elaborado por la UNGRD-IEMP en el año 2017 “Lineamientos para el análisis de la vulnerabilidad social en los estudios de la gestión municipal del riesgo de desastres” [7]; así como de la experiencia y lecciones aprendidas generadas en proyectos con comunidades. Los detalles metodológicos están en la **Figura 7**.

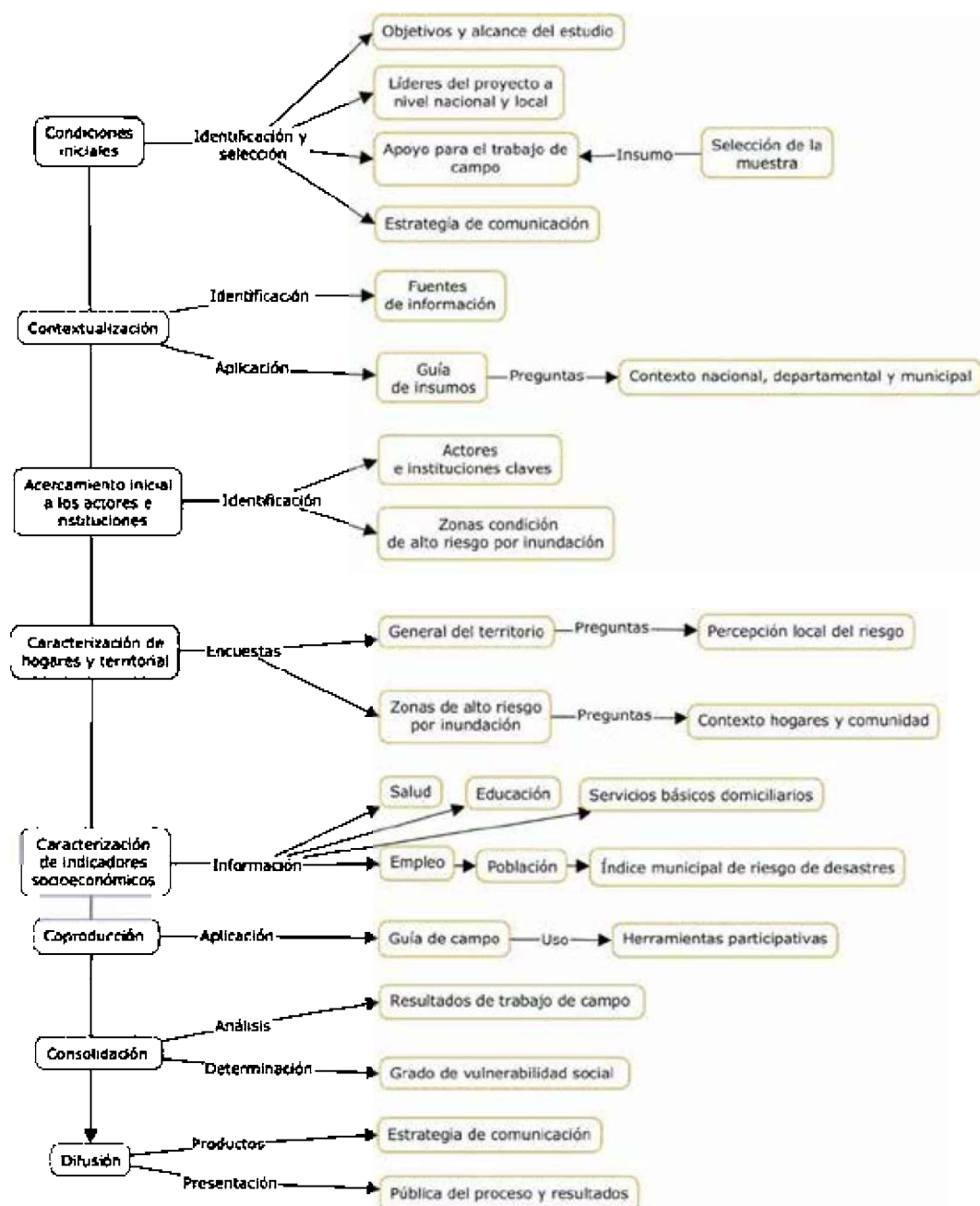


Figura 7. Esquema metodológico para el análisis de la vulnerabilidad social. Fuente: adaptado y complementado de [7].

Entre los aspectos clave de la metodología están: (i) realizar un acercamiento inicial a los actores e instituciones: elaboración de un mapeo de actores. (ii) Realizar la caracterización de los hogares y territorial: se recomienda incluir los componentes principales que se presentan en la **Figura 8**, y realizar un análisis de la percepción local del riesgo que son preguntas relacionadas no solamente con inundación, sino también con otras fuentes de peligro como sismos, tsunamis, volcanes, flujos de lodo, incendios urbanos, mala calidad sanitaria, entre otras. (iii) Realizar la caracterización de indicadores socioeconómicos: permiten medir la vulnerabilidad social en términos de los derechos básicos de las personas y de su acceso a los servicios del Estado [7].

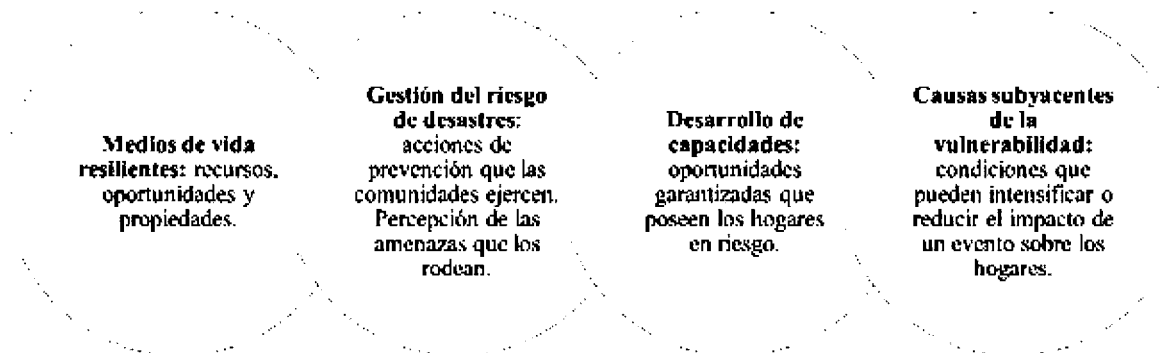


Figura 8. Elementos de análisis en las preguntas orientadoras del contexto hogares, individuos o comunidades. Fuente: adaptado y complementado de [7].

Se identificaron otros indicadores para complementar el análisis de vulnerabilidad, relacionados con la salud, dado que en diferentes investigaciones se ha encontrado que es uno de los puntos críticos para el análisis de la vulnerabilidad social [37]. Además, durante talleres de vulnerabilidad social, se identificó que esta variable se asocia a los periodos de inundación [8]. (iv) Coproducción: Resulta clave la construcción colectiva de conocimiento para el cambio transformativo entre diferentes actores. Las herramientas usadas se presentan a continuación. En la **Figura 9** se presentan algunos resultados de la implementación de estos espacios de coproducción.



Figura 9. Espacios de participación en el municipio de San Marcos (Sucre).

Caja 4. Conceptos clave de la vulnerabilidad social

Adaptación: comprende el ajuste de los sistemas naturales o humanos a los estímulos climáticos actuales o esperados o a sus efectos, con el fin de moderar perjuicios o explotar oportunidades beneficiosas. En el caso de los eventos hidrometeorológicos la adaptación al cambio climático corresponde a la gestión del riesgo de desastres en la medida en que está encaminada a la reducción de la vulnerabilidad o al mejoramiento de la resiliencia en respuesta a los cambios observados o esperados del clima y su variabilidad [3].

Construcción social del riesgo: se refiere a los procesos a través de los cuales la sociedad y los distintos agentes sociales contribuyen a la creación de contextos y entornos de riesgo. Esto ocurre o por la transformación de eventos naturales en amenazas debido a la inadecuada ubicación de edificaciones e infraestructuras, producción y satisfactores de la vida etc.; por la transformación de recursos naturales en amenazas a través de procesos de degradación ambiental; o por la creación y consolidación de condiciones diversas de vulnerabilidad, las cuales potencian la acción negativa de las amenazas y eventos peligrosos. Algunos autores también ven en el proceso de percepción y subjetivización del riesgo, un proceso de "construcción social" del riesgo [31].

Gobernanza del riesgo de desastres: sistema de instituciones, mecanismos, políticas y marcos legales y otros mecanismos diseñados para guiar, coordinar y supervisar la gestión del riesgo de desastres y áreas relacionadas con políticas públicas y privadas (a partir de UNGA (2016) [38].

Resiliencia: la capacidad de un sistema, comunidad o sociedad expuestos a una amenaza para resistir, absorber, adaptarse y recuperarse de sus efectos de manera oportuna y eficaz, lo que incluye la preservación y la restauración de sus estructuras y funciones básicas [39].

Vulnerabilidad: susceptibilidad o fragilidad física, económica, social, ambiental o institucional que tiene una comunidad de ser afectada o de sufrir efectos adversos en caso de que un evento físico peligroso se presente. Corresponde a la predisposición a sufrir pérdidas o daños de los seres humanos y sus medios de subsistencia, así como de sus sistemas físicos, sociales, económicos y de apoyo que pueden ser afectados por eventos físicos peligrosos [4].

Vulnerabilidad social: es una función de la capacidad de prever, enfrentar, y recuperarse de eventos críticos que implica la pérdida de activos materiales o inmateriales [40]. Una persona puede ser más o menos vulnerable ante la ocurrencia de eventos críticos externos dependiendo de cómo el individuo administre sus activos tangibles e intangibles, y cómo estos pueden verse afectados ante la ocurrencia de un desastre. La vulnerabilidad social entonces, va más allá de la afectación de estructuras físicas, e incluye las diferentes características y capacidades de los individuos [7].

2.5. Evaluación y análisis del riesgo

La EPR por inundación es gobernada por la incertidumbre [41,42]. Ese contexto, sumado a la baja o nula disponibilidad de información histórica con datos de consecuencias sobre la población y sus medios de subsistencia y a la posibilidad de la ocurrencia de eventos desastrosos, genera que las evaluaciones de riesgo deban enfocarse hacia metodologías probabilistas que involucren y propaguen las incertidumbres temporales y espaciales envueltas en el proceso [27].

En consecuencia, esta sección presenta un procedimiento general para la EPR por inundaciones lentas a escalas de detalle (1:2,000) en zonas urbanas (**Fig. 10**), con el objetivo de responder dos preguntas primordiales: i) ¿qué tanto daño puede producirse sobre un conjunto de elementos expuestos?; ii) ¿con qué frecuencia? La respuesta a estas preguntas se plantea por medio de una metodología que involucra los componentes de amenaza por inundación y vulnerabilidad física a partir de un proceso matemático de convolución, para un conjunto de elementos expuestos de interés.

El método de EPR propuesto se presenta en la **Figura 10**. El procedimiento se inicia a partir del primer evento de amenaza (k de N), para un elemento expuesto en particular (j de L). Sobre dicho elemento se realiza un proceso de simulación de Montecarlo que genera (n) realizaciones de tirante hídrico considerando los dos primeros momentos estadísticos de la intensidad de amenaza ($E_{th,V}$, $\sigma_{th,V}$) (tirante hídrico y velocidad media de flujo). Para cada una de las intensidades de amenaza simuladas, se realiza un segundo proceso de Montecarlo que genera (m) realizaciones de daño en los rubros de contenidos y de edificación, considerando los valores esperados –y su desviación estándar- del daño de cada rubro, definido en las funciones de vulnerabilidad correspondientes. Este proceso se realiza para todas las (n) realizaciones de amenaza del primer evento.

A partir del cálculo de las (m) realizaciones de daño por cada rubro, se realiza la suma de daños generados en cada uno de ellos y se estima la bondad de ajuste a una Función de Distribución de Probabilidad (FDP) conocida y se caracteriza por medio de los dos primeros momentos estadísticos de la pérdida. Posteriormente, se repite el proceso para todos los elementos expuestos de análisis (L), para el primer evento de amenaza considerado (k de N).

Para obtener el resultado de la pérdida del primer evento de análisis (FDP_{ev}), se efectúa la suma de los momentos estadísticos de daño estimados para todos los elementos expuestos (L), teniendo en cuenta la correlación de pérdidas inter-evento. Por último, el procedimiento mencionado se repite para todos los eventos de amenaza (N) que describen *todas* las posibles formas en las que se puede presentar una inundación en la zona de estudio, reportando la pérdida total para cada evento. A partir de esta información es posible calcular la Curva de Excedencia de Pérdidas (CEP) y los indicadores de riesgo que se derivan de ella: Pérdida Anual Esperada (PAE), Pérdida Máxima Probable (PML), Prima Pura de Riesgo (PPR), entre otras. Todos los detalles metodológicos del procedimiento se pueden consultar en [8].

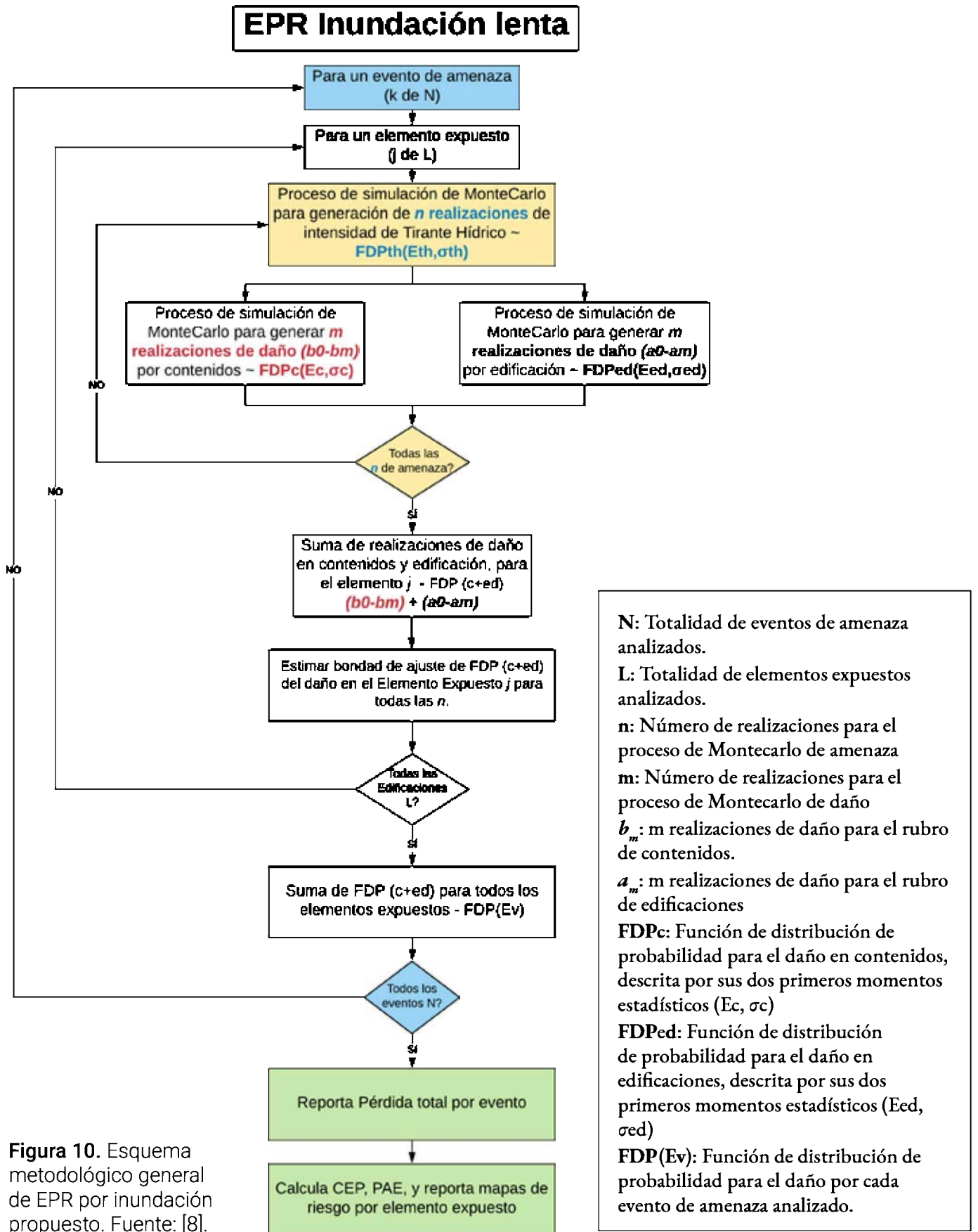


Figura 10. Esquema metodológico general de EPR por inundación propuesto. Fuente: [8].

Caja 5. Glosario modelo de evaluación probabilista de riesgo por inundación

Análisis y evaluación de riesgo: implica la consideración de las causas y fuentes del riesgo, sus consecuencias y la probabilidad de que dichas consecuencias puedan ocurrir. Es el modelo mediante el cual se relaciona la amenaza y la vulnerabilidad de los elementos expuestos, con el fin de determinar los posibles efectos sociales, económicos y ambientales y sus probabilidades. Se estima el valor de los daños y las pérdidas potenciales, y se compara con criterios de seguridad establecidos, con el propósito de definir tipos de intervención y alcance de la reducción del riesgo y preparación para la respuesta y recuperación [39].

Convolución: formalmente, es un operador matemático que se define como la integral del producto de dos funciones. En otros términos, se puede entender como un procedimiento que permite hallar la distribución de probabilidad de la operación entre dos funciones. Para el caso particular de la evaluación del riesgo, las dos funciones corresponden a las variables aleatorias que describen la amenaza y la vulnerabilidad de un elemento expuesto [43].

Curva de excedencia de pérdidas (CEP): curva que especifica las frecuencias, usualmente anuales, con que ocurrirán eventos en el futuro que excedan un valor determinado de pérdidas para un portafolio de elementos expuestos analizado [25].

Evaluación probabilista de riesgo (EPR): Valoración de las consecuencias negativas (usualmente pérdida de vidas, daños económicos, daños de infraestructura, entre otros) que pueden ocurrir producto de la ocurrencia de eventos de amenazas (de origen natural, tecnológico, antrópico, entre otros) sobre un conjunto de elementos expuestos (p. ej. Población, infraestructura vial, medios de sustento, etc.). La metodología de EPR evalúa las condiciones existentes de vulnerabilidad de los elementos expuestos ante los eventos de amenaza, involucrando la incertidumbre en el proceso de análisis.

Evento: formalmente se conoce como un subconjunto del espacio muestral. Específicamente, corresponde a cualquier subconjunto que contenga varios puntos de muestreo, los cuales hacen referencia a cada posible resultado presente en el espacio muestral.

Función de Distribución de Probabilidad (FDP): función y expresión matemática que determina la probabilidad para cada uno de los valores que una determinada variable aleatoria puede tomar [26].

Pérdida: cantidad asociada a una gran incertidumbre, proveniente de diversas fuentes y de los componentes de análisis de amenaza y vulnerabilidad. Por tanto, es una cantidad de la cual no se puede conocer su valor con exactitud o certeza y, por ende, es tratada como una variable aleatoria descrita por una distribución de probabilidad, condicionada a la ocurrencia de un evento [26].

Pérdida Anual Esperada (PAE): corresponde al valor de pérdida esperado en un lapso anual para un portafolio de elementos expuestos específico [25].

Pérdida Máxima Probable (PML): hace referencia a un valor de pérdida que ocurre con muy baja frecuencia, es decir, que se encuentra asociada a un período de retorno muy largo, o alternativamente, a una tasa de excedencia muy baja [25].

Período de retorno: también conocido como el período o intervalo de recurrencia. Puede ser definido como la probabilidad temporal que se mide en años. Específicamente mide el tiempo medio que transcurre entre eventos independientes [26].

Prima Pura de Riesgo (PPR): indicador típico en el sector asegurador para caracterizar el riesgo de un portafolio de elementos expuestos. Es obtenido a partir de la relación entre la PAE y el valor físico expuesto total para un elemento, o grupo de elementos analizados [25].

3. RESULTADOS ESTUDIO DE CASO: MONTELÍBANO (CÓRDOBA)

3.1. Zona de estudio

Como caso de estudio para la aplicación de la metodología propuesta se seleccionó la región de La Mojana. Esta región es un delta hídrico que comprende 11 municipios de 4 departamentos de Colombia, por la cual transitan los ríos Magdalena, Cauca y San Jorge hacia su desembocadura en el mar Caribe. Por su topografía plana, la región presenta las condiciones ideales para la ocurrencia de eventos de inundación lenta de diferentes tipologías como (i) por desbordamiento de ríos y/o canales, y (ii) inundación pluvial. Por estas dos condiciones, en conjunto con la disponibilidad de modelos digitales de terreno detallados (tecnología LiDAR), La Mojana fue seleccionada como zona de estudio. En particular, cuatro cabeceras municipales se priorizaron para los casos de estudio: Magangué y Mompox (Bolívar), San Marcos (Sucre) y Montelíbano (Córdoba). En este artículo, se presentan en detalle los resultados para la cabecera municipal de Montelíbano (Córdoba).

El Municipio de Montelíbano se localiza al sur del departamento de Córdoba. Limita con los municipios de Buenavista, Planeta Rica, San José de Uré, La Apartada, y Tierralta (**Fig. 11**). La cabecera municipal está localizada al nororiente del Municipio, ubicada entre los 40 y 50 m.s.n.m, en la ribera oriental del río San Jorge con temperaturas medias de 32°C y una precipitación media anual de 2500 mm con un período de lluvias entre mayo y septiembre. Corresponde a un municipio de Categoría 6, con una población estimada a 2022 de 69,277 habitantes.

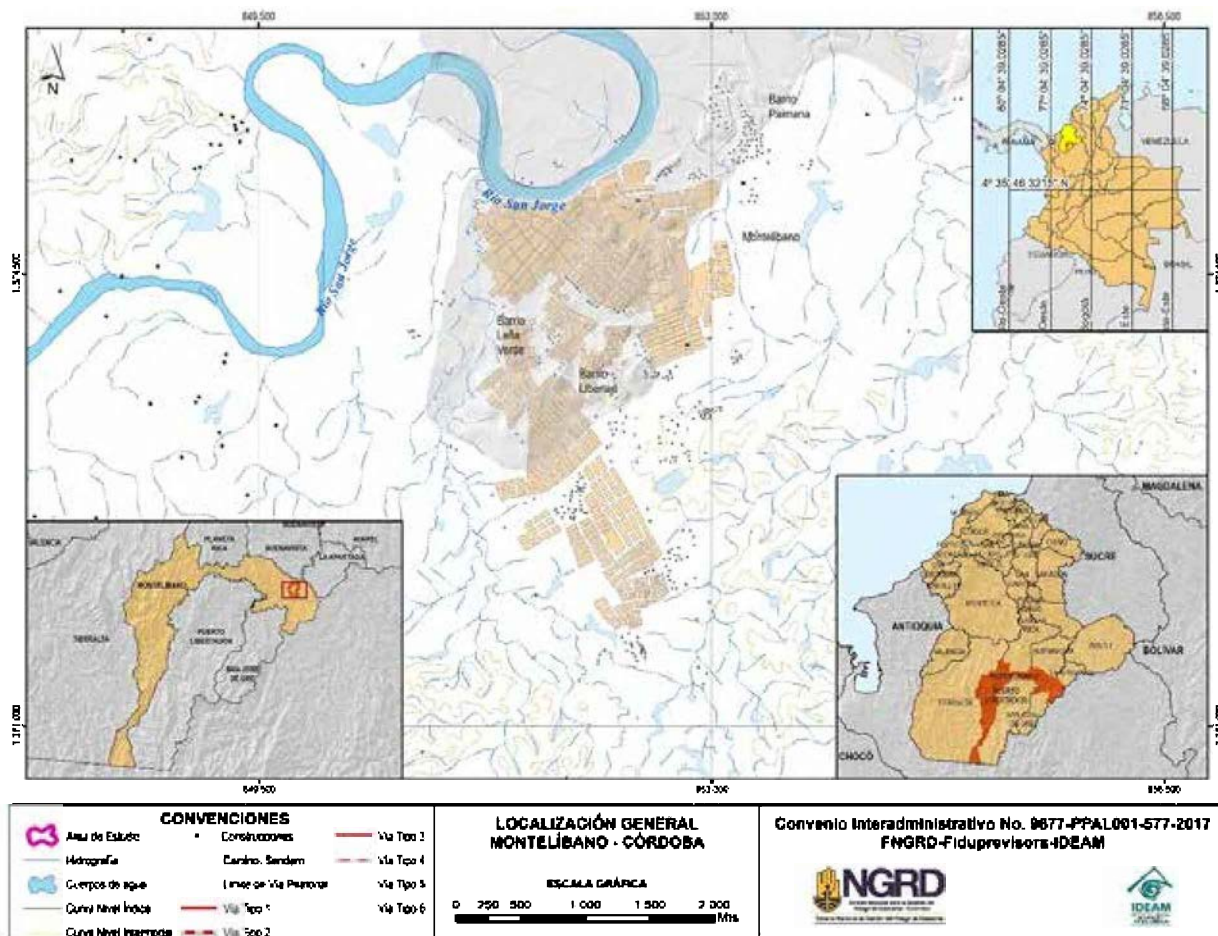


Figura 11. Localización general de la cabecera municipal de Montelíbano (Córdoba).

3.2. Evaluación de la amenaza Montelíbano

3.2.1 Información gráfica de un evento histórico

Se obtuvo la imagen del satélite Landsat 8 del 29 de septiembre de 2017 (**Fig. 12**) (resolución espacial de 15 m) e información georreferenciada en campo obtenida por el componente social del proyecto.



Figura 12. Imagen evento de inundación del 08 mayo de 2018. Fuente: [44].

3.2.2 Modelación hidrológica

Se realizó el análisis de frecuencias de caudales máximos instantáneos en la estación hidrológica Montelíbano (Cód. 25017010, **Fig. 13**) y un modelo hidrológico de precipitación-escorrentía para la microcuenca de la quebrada Muchajagua.

Figura 13. Estación Montelíbano el 17 de abril de 2018 (izquierda) y su estado el 9 de mayo de 2018 (derecha).



El periodo de datos seleccionados fue de 1974 a 2015, en donde el comportamiento de los caudales máximos demuestra la existencia de una tendencia positiva en los registros, según las pruebas T y Hotelling-Pabst (**Fig. 14**), se puede explicar a partir de fenómenos climáticos tipo El Niño Oscilación Sur (ENOS), cambio en la tecnología de medición o pérdida de capacidad hidráulica de la sección por acumulación de sedimentos en el punto de registro, entre otros. Por lo anterior, el análisis planteado correspondió al tratamiento de variables no estacionarias, en la que se debe demostrar aleatoriedad de los conjuntos estadísticos para el posterior ajuste de funciones teóricas usando la prueba de Kolmogorov (1931) [45].

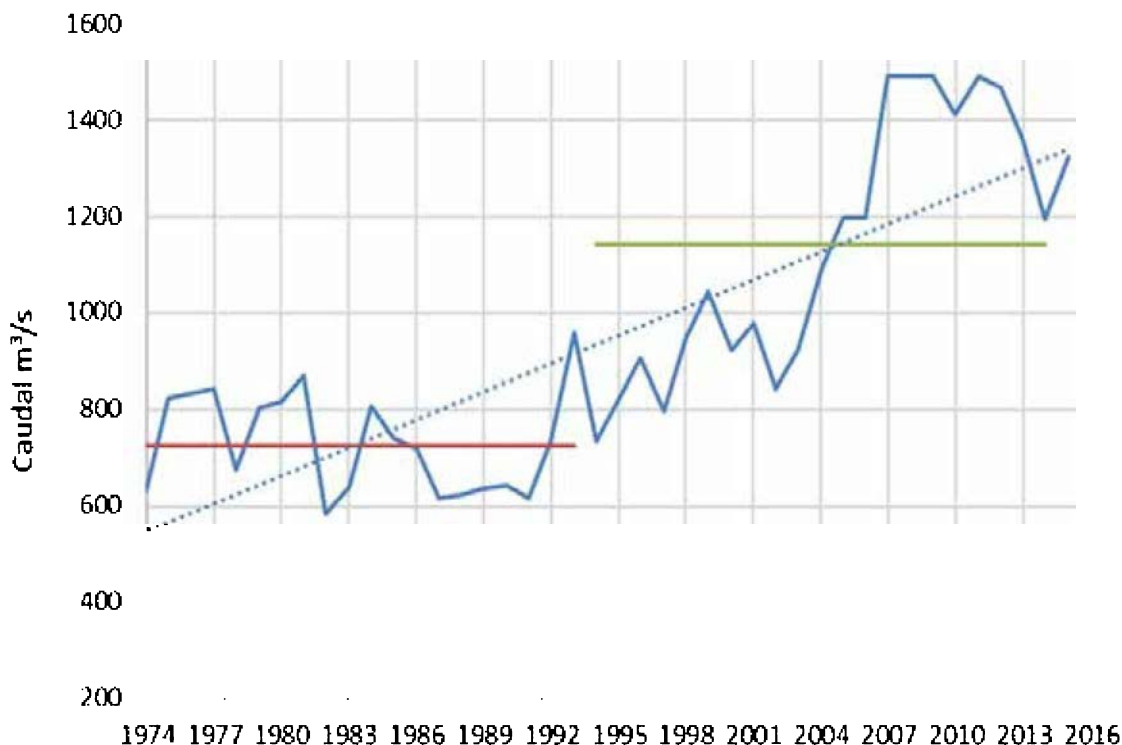


Figura 14. Serie de caudales máximos instantáneos estación Montelíbano (25017010).

A partir de la prueba de aleatoriedad de Rachas [46] se obtuvo que el conjunto de datos anual, así como los mensuales de enero, mayo, junio, agosto, y septiembre no corresponde a series aleatorias, por tal motivo no fue procedente su ajuste [47]. Por tanto, se seleccionó el mes de julio como el de mayor aporte de caudales en el año hidrológico, caracterizado como un subconjunto aleatorio. La FDP Gumbel_r (Gumbel con sesgo a la derecha), es la que mejor aproxima el universo completo de magnitudes con sus probabilidades para este mes. En la **Tabla 3** se presentan las magnitudes de caudal asociadas a los periodos de retorno de interés para el modelo de EPR.

Tabla 3. Periodos de retorno estación Montelíbano conjunto estadístico de julio

Cab. Municipal	Tr [años] / [Q m³/s]											
	2.33	5	10	15	25	40	50	60	75	100	150	300
Montelíbano	761.3	1007	1207	1319	1459.8	1587.2	1647.4	1691.2	1763.3	1833.6	1940.9	2130.2

3.2.3 Modelo digital de elevación

Se usó un MDE con resolución espacial de 1.0 m con el cual cuenta el IDEAM, producto del proyecto modelación hidrodinámica de la Mojana del Fondo de Adaptación [48].

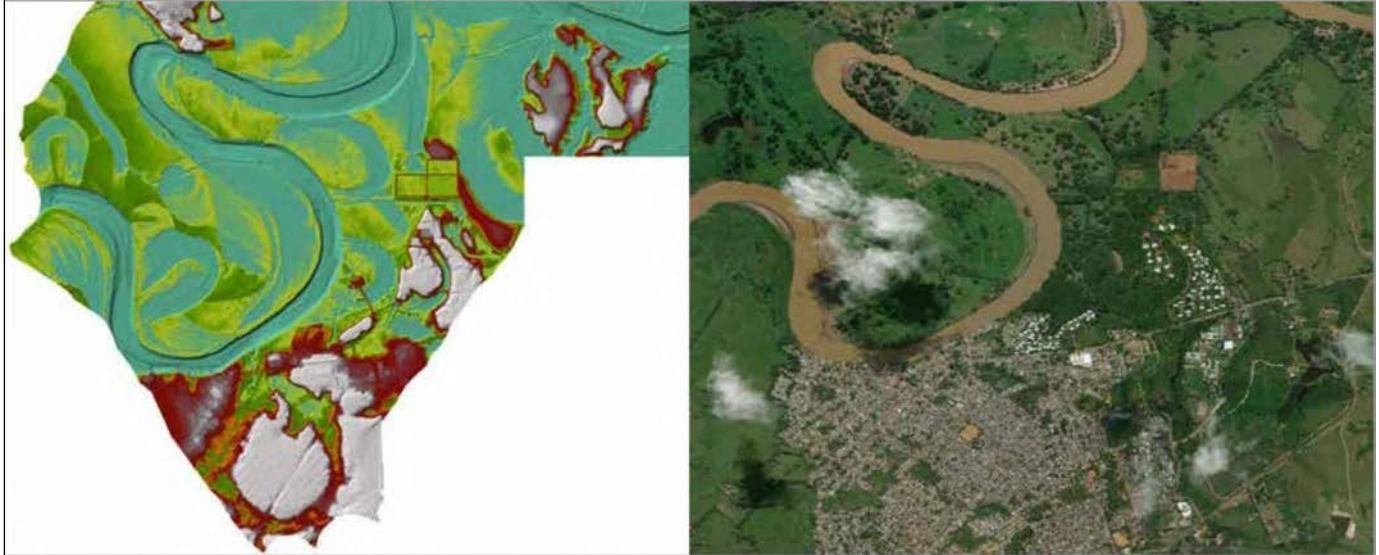


Figura 15. Modelo Digital de Elevación (MDE) e imagen de alta resolución Municipio de Montelíbano.

3.2.4 Modelación hidráulica

Se empleó el modelo hidrodinámico bidimensional HEC RAS 5.0.3 del U.S Army Corp of Engineers (USACE) [49] calibrado a partir de las cotas de lámina de agua de la estación Montelíbano (Cód. 25017010) y validado con información de campo e imágenes satelitales de un evento histórico (Fig. 12). El dominio computacional cubre un área de 20 km² (**Fig. 16**) abarcando 13.3 km del río San Jorge, conformado por 8106 celdas con un espaciamiento de $DX= 50$ m y $DY= 50$ m (**Fig. 16**).

La condición de frontera de entrada al modelo hidrodinámico son los caudales registrados en la estación Montelíbano para el escenario de calibración, y los caudales pico para cada período de retorno calculados en el análisis hidrológico (**Tabla 3**). La condición de frontera de salida se definió como la pendiente media de la lámina de agua, determinada a partir del análisis de las cotas de tirante hídrico de las estaciones Montelíbano y Pto. Córdoba.

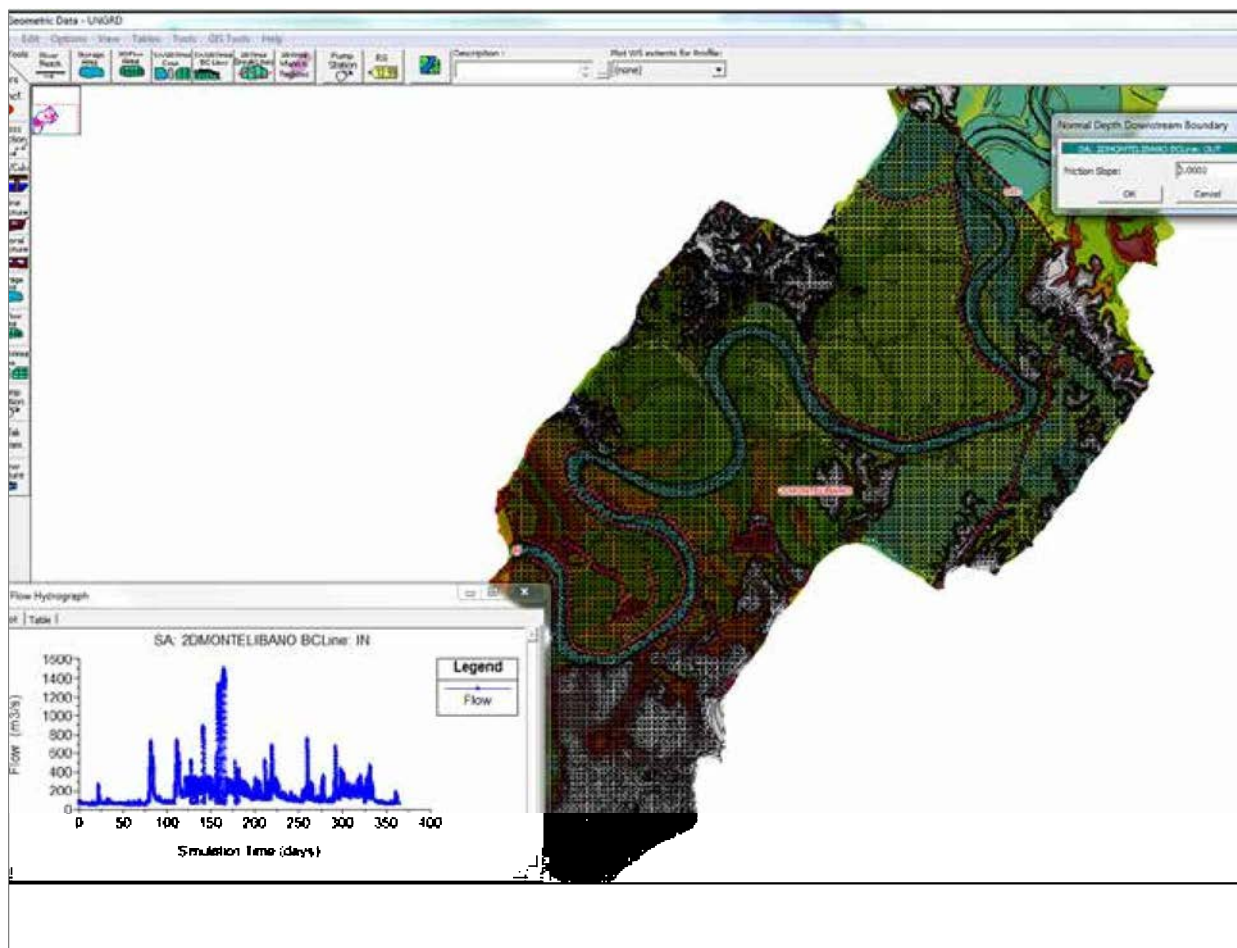
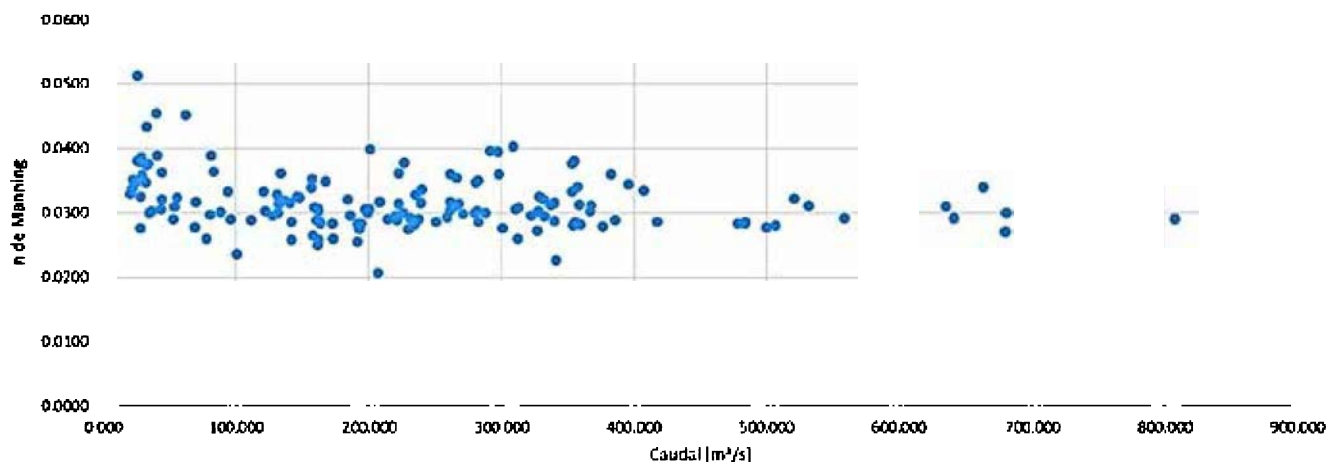


Figura 16. Dominio computacional y condiciones de frontera del modelo.

A partir de los aforos líquidos de la estación Montelíbano elaborados por el IDEAM entre 1973 y 2011 y la pendiente hidráulica media del tramo Montelíbano – Pto Córdoba, se hizo una estimación inicial del n de Manning con un valor medio de 0.0315, un mínimo de 0.0208 y un máximo de 0.051 con una desviación estándar de 0.004 para caudales entre 20.9 m³/s y 841.2 m³/s (**Fig. 17**). La calibración se realizó con las cotas de lámina de agua del año 2009, obteniendo un n de 0.03 para el cauce principal y de 0.08 para la llanura de inundación.



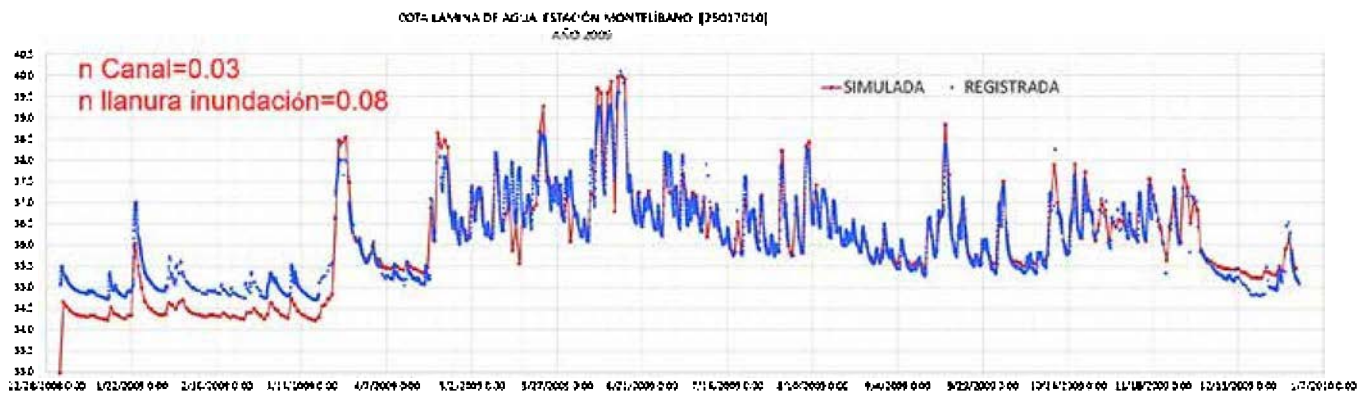


Figura 17. Estimación inicial del n de Manning a partir del resumen de aforos líquidos (arriba). Calibración hidrométrica del modelo hidráulico (abajo).

La validación de la extensión de la inundación se realizó a partir de la información de eventos históricos levantados en campo (**Fig. 18**).



Figura 18. Validación del modelo hidráulico a partir de la información levantada en campo.

Partiendo del modelo calibrado, se realizaron las modelaciones para cada uno de los períodos de retorno de interés, en donde se determinó que la profundidad en el cauce principal fue de 6.9 m para el período de retorno de 2.33 años y de 8.1 m para el período de retorno de 100 años, mientras que en las zonas del casco urbano donde se presentan las inundaciones, las profundidades oscilan entre 0.2 y 0.5 m para el período de retorno de 2.33 años y profundidades entre 0.5 y 1.5 m para el período de retorno de 100 años (**Fig. 19**).

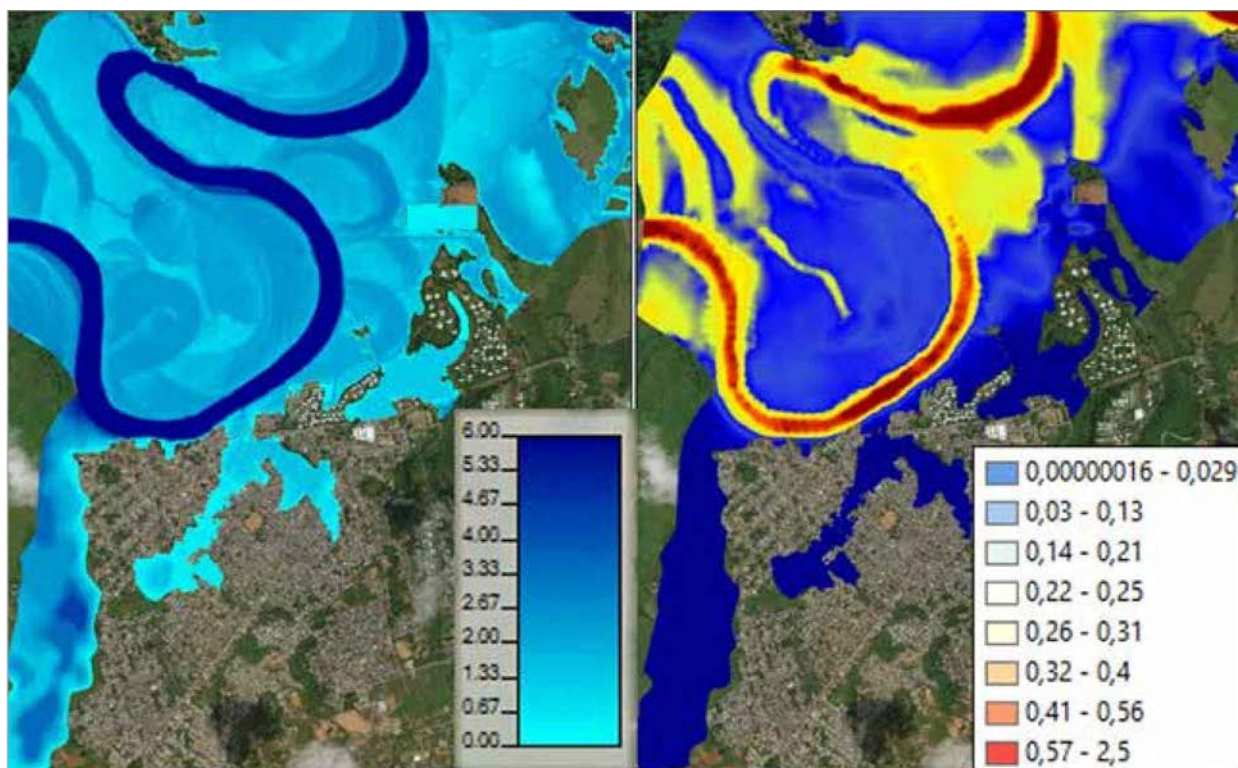


Figura 19. Profundidad [m], extensión y velocidades [m/s] de la inundación para el período de retorno de 100 años.

3.3. Modelo de exposición Montelíbano

3.3.1. Tipologías constructivas

A cada construcción identificada en la base de datos catastral se le asignaron tipologías estructurales siguiendo la metodología propuesta (**Fig.2**). Para la identificación de tipologías constructivas se realizaron 765 inspecciones. La **Tabla 4** presenta el porcentaje de participación de las principales tipologías identificadas en las inspecciones. Entre las tipologías más frecuentes se observan edificios de mampostería confinada de una planta (cubierta liviana) y edificios de pórticos de concreto reforzado, de una y dos plantas de cubierta liviana.

Tabla 4. Principales tipologías identificadas en el municipio.

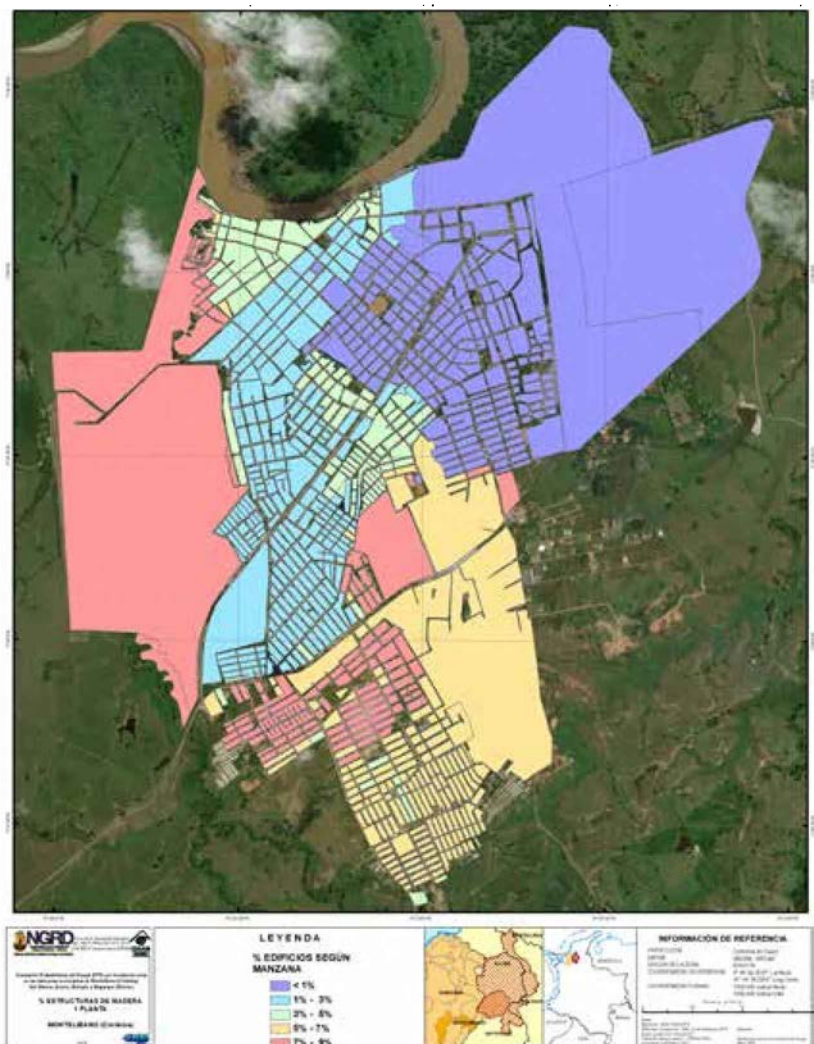
Tipologia			
Material y sistema resistente	Cubierta y número de plantas	Identificador	Porcentaje
Pórticos de concreto	Cubierta pesada; 1 planta	PRM-CO-1P-CP-CDR	3,0%
	Cubierta pesada; 2 plantas	PRM-CO-2P-CP-CDR	2,9%

Pórticos de concreto	Cubierta liviana; 1 planta	PRM-CO-1P-CL-SDR	6,7%
	Cubierta liviana; 2 plantas	PRM-CO-2P-CL-SDR	7,1%
	Cubierta liviana; 3 plantas	PRM-CO-31P-CL-SDR	2,1%
Madera	Cubierta liviana; 1 planta	M-MD-1P-CL-CDR	3,2%
Mamposteria confinada	Cubierta pesada; 1 planta	M-MD-1P-CP-CDR	3,7%
	Cubierta liviana; 1 planta	M-MD-1P-CL-SDR	69,3%
	Cubierta liviana; 2 plantas	M-MA-2P-CL-SDR	1,9%

Los resultados de la clasificación de edificios según tipologías se consolidaron a nivel de manzanas. Como ejemplo, la **Figura 20** presenta el porcentaje de participación de construcciones de madera respecto al total de construcciones de cada manzana. Se observa que esta tipología es más frecuente hacia el occidente y sur del municipio. En estos sectores los porcentajes de participación varían entre el 7% y el 9%.

3.3.2. Valor expuesto

El valor total de las construcciones se estimó en 395,818 millones de pesos. A su vez, el valor total de contenidos se estimó en 88,261 millones de pesos. La **Figura 20** (der.) presenta el valor de las construcciones urbanas de Montelíbano. De esta figura se observa que las construcciones de mayor valor (superiores a 200 Millones) se ubican en la ribera del río San Jorge, así como hacia el nororiente del municipio. Al comparar estos resultados con la **Figura 20** (izq.), se observa que las tipologías de madera son más frecuentes en sectores de menor valor de las construcciones.



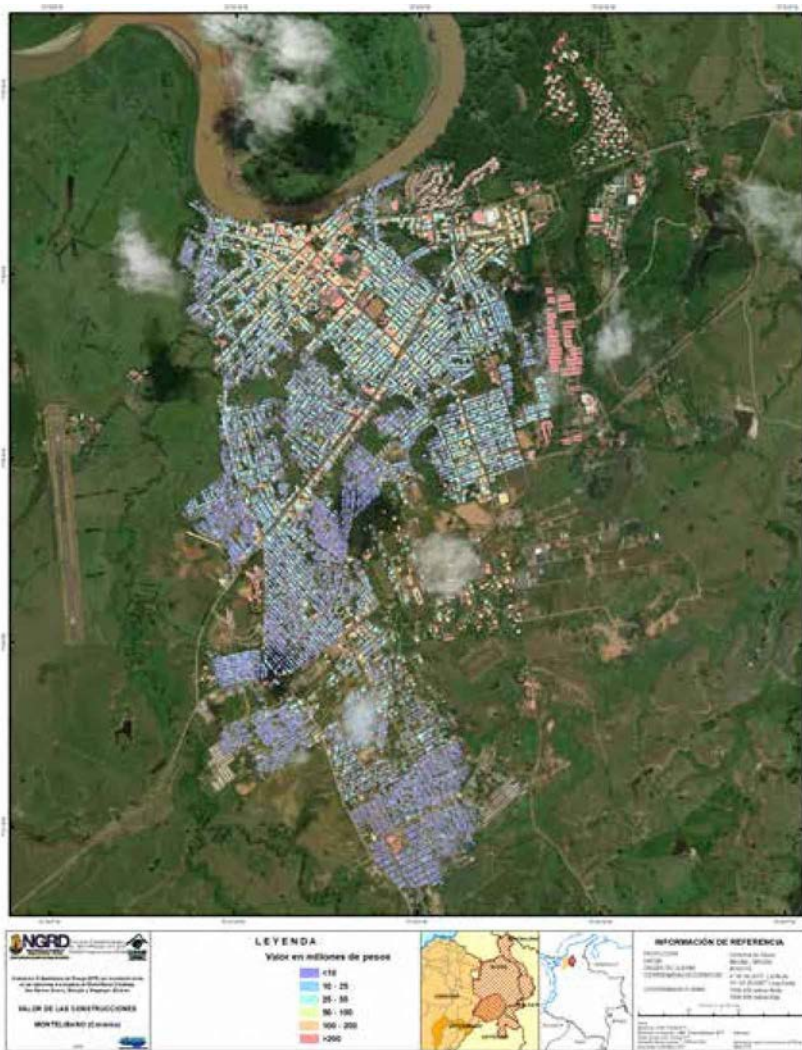


Figura 20. Porcentaje de edificaciones de madera respecto al total de edificaciones en cada manzana (izquierda). Valor catastral de las construcciones (derecha).

La **Tabla 5** presenta el valor de construcciones y contenidos según usos relevantes, así como el conteo de las construcciones en todo el municipio. Se observa que la mayoría del avalúo se concentra en las construcciones de viviendas de hasta tres pisos. En cuanto al valor de los contenidos, se encuentra que son relevantes tanto los edificios de viviendas, como los de comercio.

Tabla 6. Valores expuestos totales según usos relevantes

Uso	Valor construcciones (millones de pesos)	Valor de contenidos (millones de pesos)	% del valor total de construcciones	% del valor total de contenidos	Construcciones	
					Número	%
Vivienda hasta 3 pisos	296,914	56,646	75.0%	64.2%	14,558	91.5%
Colegios	18,441	5,839	4.7%	6.6%	118	0.7%
Hospitales / Clínicas	2,133	2,232	0.5%	2.5%	9	0.1%

Comercio	33,306	13,507	8.4%	15.3%	615	3.9%
Oficinas / consultorios	12,593	4,078	3.2%	4.6%	149	0.9%

Para tener una referencia de los elementos que están expuestos a inundaciones, se consolidaron los valores de las edificaciones localizadas en zonas en las que se estiman profundidades de inundación superiores a 0.5 m para un periodo de retorno de 100 años (evento con 1% de probabilidad de excedencia). A pesar de que la selección del periodo de retorno y de la profundidad de inundación es arbitraria, corresponde a eventos poco frecuentes en los cuales se esperan daños en contenidos y limitaciones en el acceso y uso de edificaciones. La **Figura 21** presenta un resumen de los resultados.



Figura 21. Resumen de elementos expuestos para mapa de amenaza de periodo de retorno de 100 años. Altura mayor a 0.5 m.

Cerca del 6 % de la población del municipio y alrededor del 3% de las construcciones de vivienda hasta 3 pisos se exponen en zonas en las cuales la profundidad de la inundación puede ser hasta de 0.5 m para eventos de periodo de retorno de 100 años. Mayores detalles tanto de la metodología como de los resultados de la evaluación del riesgo en los municipios de Montelíbano, Mompox, Magangué y San Marcos se pueden encontrar en el documento *Evaluación Probabilista del Riesgo por inundación lenta en las cabeceras municipales de San Marcos (Sucre), Montelíbano (Córdoba), Mompox (Bolívar) y Magangué (Bolívar)* [50].

3.4. Evaluación y análisis de la vulnerabilidad física Montelíbano

Esta sección presenta los resultados de funciones de vulnerabilidad para las tipologías de edificaciones identificadas en Montelíbano para los rubros de contenidos y edificaciones. Las funciones desarrolladas para contenidos relacionan el tirante hídrico con el valor esperado de la pérdida, expresada como un porcentaje de los costos de reposición. Se consideran dos condiciones de distribución de contenidos dentro de la edificación. La primera, llamada condición no adaptada, la cual representa la distribución cotidiana de contenidos, y la segunda, llamada condición adaptada, considera una distribución de contenidos en la cual los habitantes modifican su localización con el fin de proteger sus enseres del evento de inundación.

Se generan funciones de vulnerabilidad para contenidos en edificaciones de 1 a 3 pisos de usos residenciales de los estratos socioeconómicos 1 a 3, y para edificaciones de salud, educación, institucional y comercial de estrato socioeconómico único.

En el caso de las edificaciones, las funciones de vulnerabilidad relacionan un tirante hídrico y una velocidad media de flujo con la pérdida esperada en la edificación, también expresada como un porcentaje de los costos de reposición del elemento expuesto. Para el rubro de edificaciones se generan funciones de vulnerabilidad para edificaciones de mampostería de concreto de 1 piso, pórticos de concreto de 1 y 2 pisos, y de madera con cubierta liviana.

3.4.1. Funciones de daño para rubro de contenidos en edificaciones de uso residencial y comercial

Las **Figuras 22 y 23** presentan dos ejemplos de las funciones de vulnerabilidad calculadas para edificaciones de uso residencial y comercial. En general, para edificaciones de 1 piso se alcanza el daño total de contenidos para profundidades de inundación cercanas a 2 metros. Para el caso de edificaciones residenciales de 1 piso, el 50% del daño se alcanza en 0.5 metros de profundidad de inundación. Para el caso de edificaciones comerciales de 1 piso, el 50% del daño se alcanza en 0.8 m, aproximadamente.

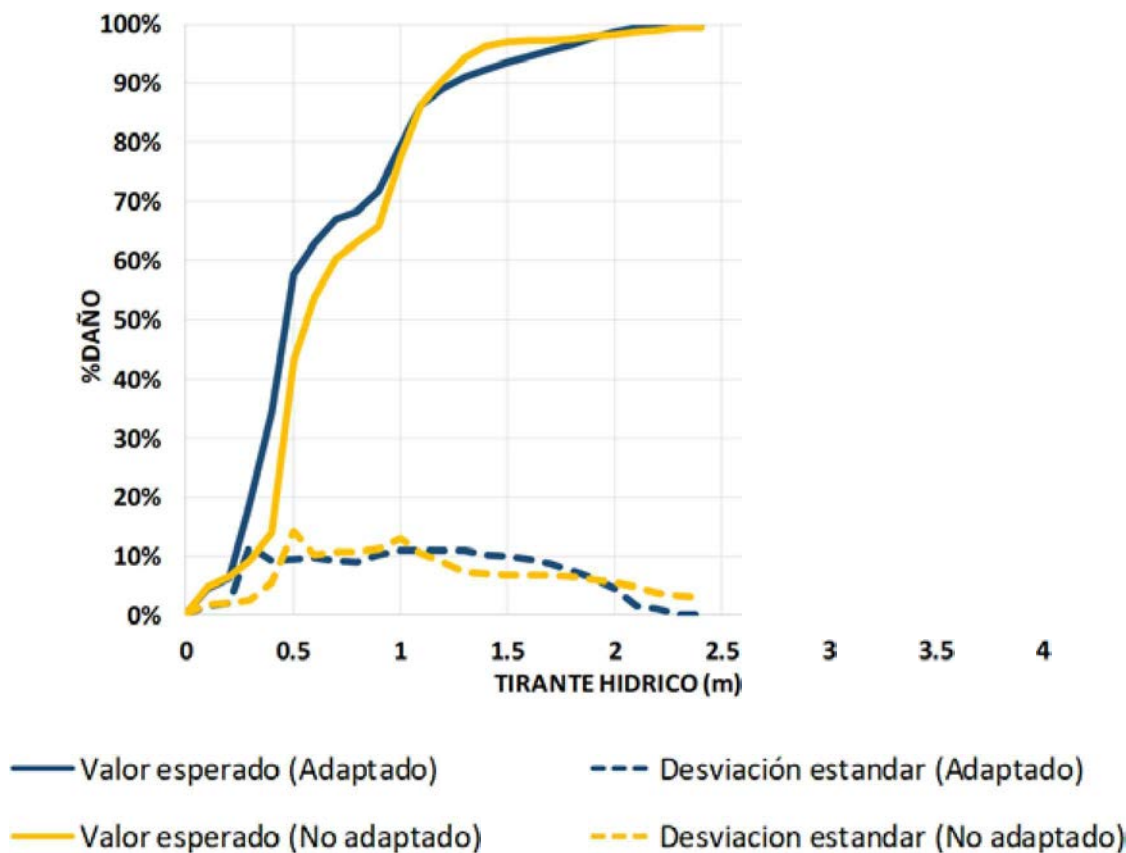


Figura 22. Residencial-estrato 1-1 piso.

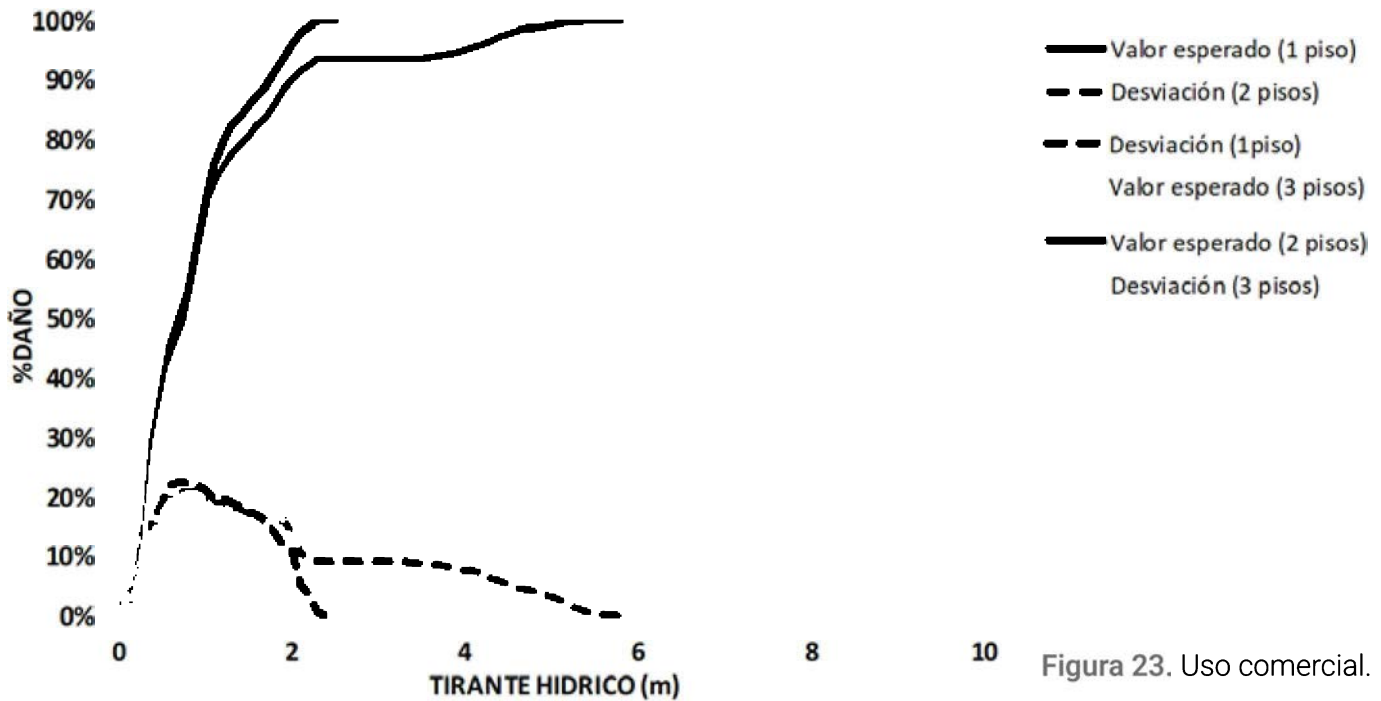


Figura 23. Uso comercial.

3.4.2 Funciones de daño para rubro de contenidos en edificaciones de uso educativo, institucional y de salud

Para usos educativo, institucional y salud, la información recopilada clasifica los contenidos en grupos. Para cada uno de ellos se definió el porcentaje del valor de sus contenidos en relación con los contenidos totales, el porcentaje localizado en cada uno de los pisos y la función de daño. Adicionalmente, la altura libre de entrepiso está involucrada en la generación de edificaciones aleatorias. Las **Figuras 24 a 26** presentan las funciones de vulnerabilidad desarrolladas para edificaciones de uso educativo, salud e institucional.

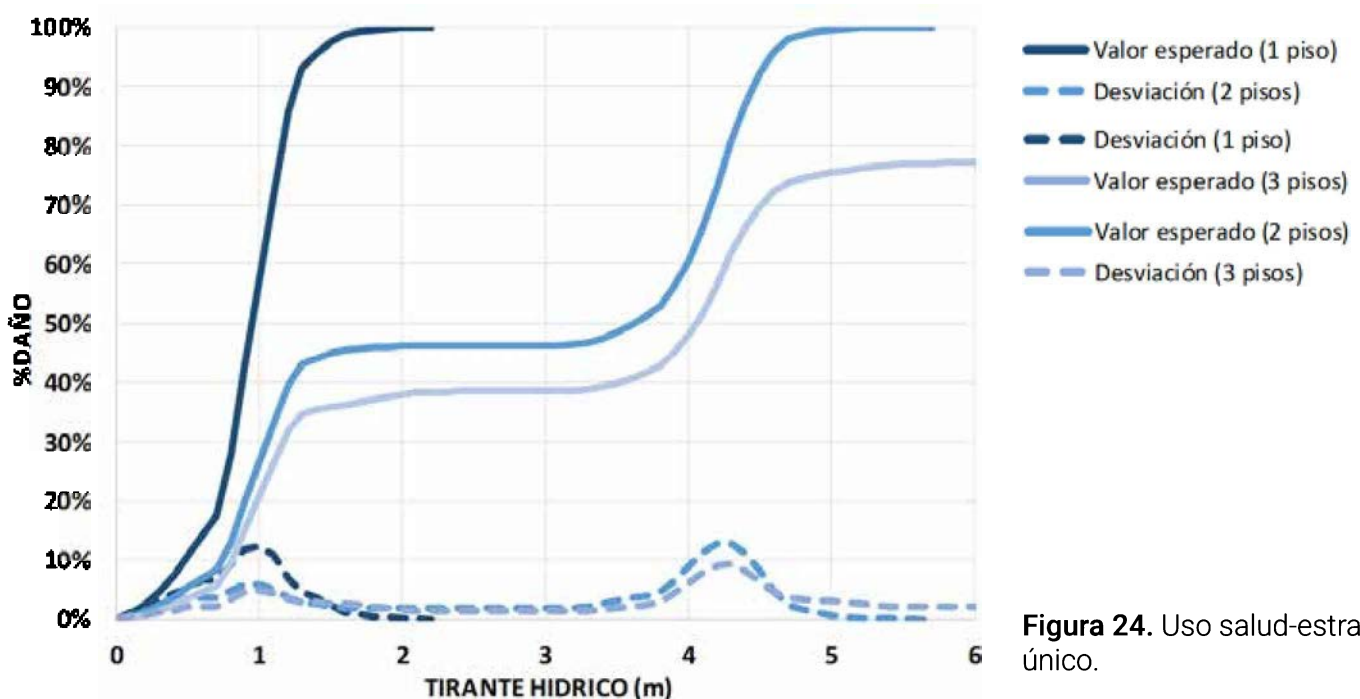


Figura 24. Uso salud-estrato único.

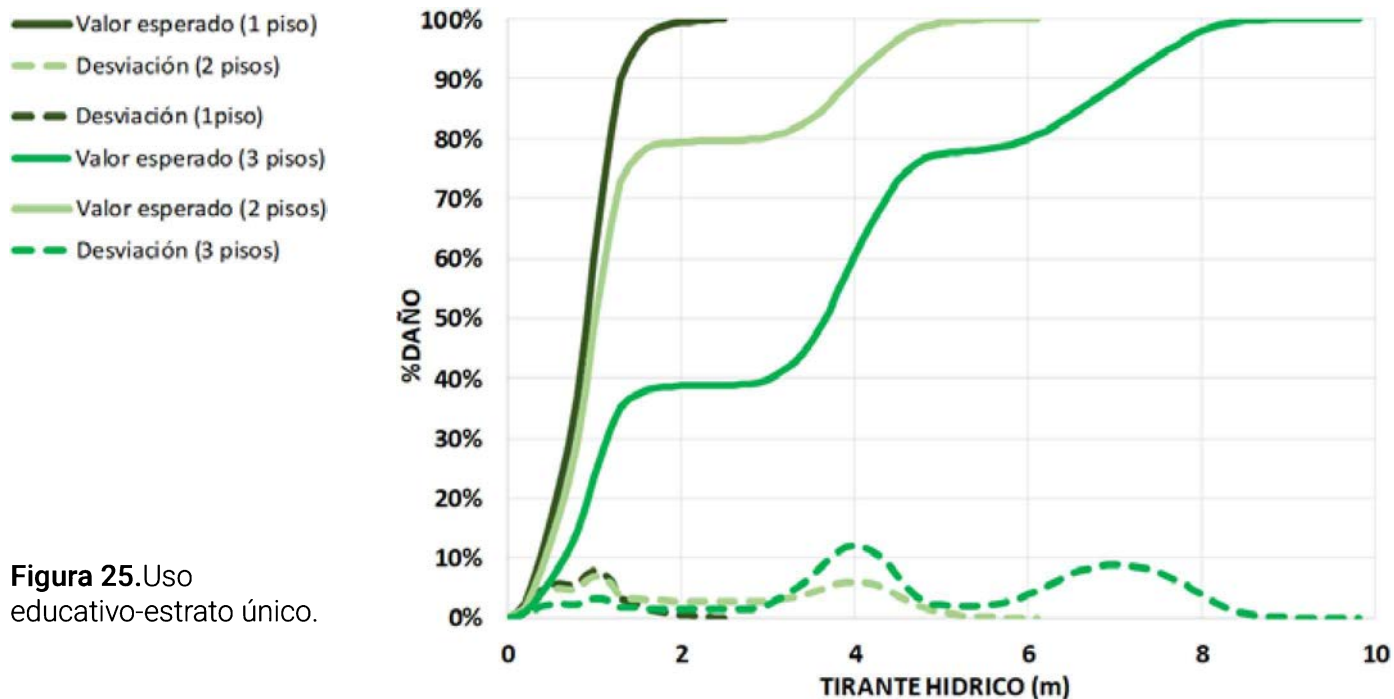


Figura 25. Uso educativo-estrato único.

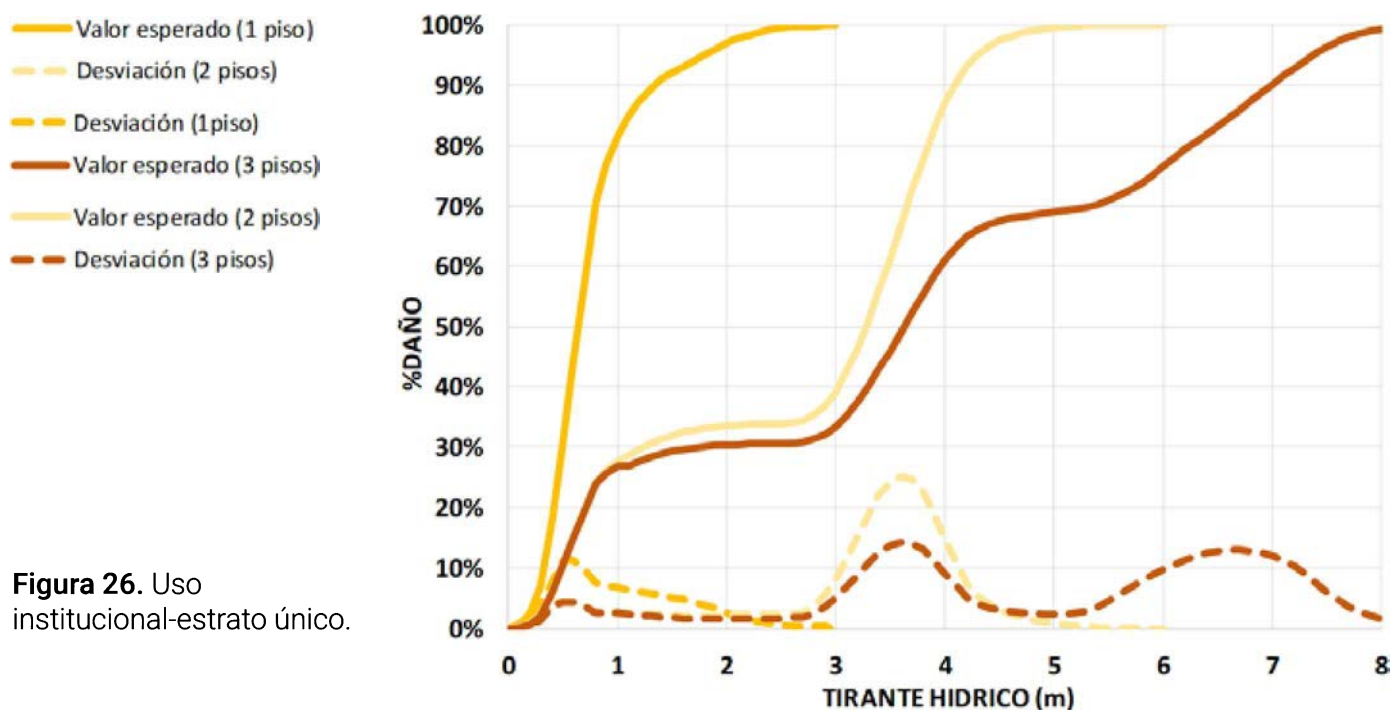


Figura 26. Uso institucional-estrato único.

3.4.3. Funciones de daño para rubro de edificaciones

La metodología plantea la generación de un número de edificaciones hipotéticas sobre las cuales se evalúa el daño de elementos estructurales y no estructurales. La **Tabla 7** presenta una ficha de vulnerabilidad de edificaciones de la tipología de mampostería de concreto de 1 piso y cubierta liviana. El parámetro más relevante en la evaluación de vulnerabilidad por contenidos es el uso de la edificación y el número de pisos. Los datos recopilados en el trabajo de campo no permitieron concluir que existe una variación clara de la vulnerabilidad en relación con los estratos socioeconómicos en términos de elementos

estructurales. Según los resultados, y considerando las bajas velocidades de flujo en los eventos de inundación típicos de la zona, se espera que las pérdidas se concentren en los contenidos. Para niveles bajos de velocidad no se espera daño estructural considerable en las edificaciones. En general, los daños esperados en las edificaciones se reducen a afectaciones de pinturas y acabados fácilmente reparables.

La totalidad de resultados de la evaluación de vulnerabilidad física se encuentran en el documento [50].

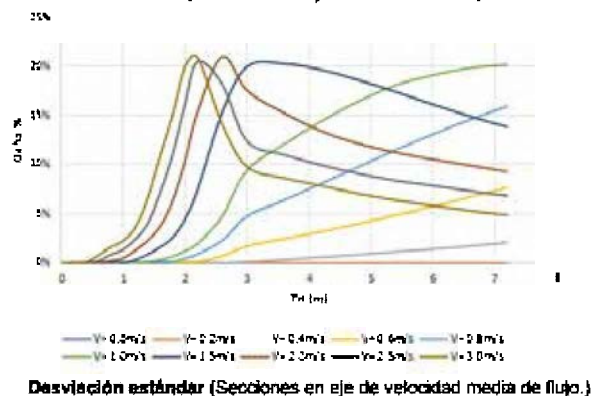
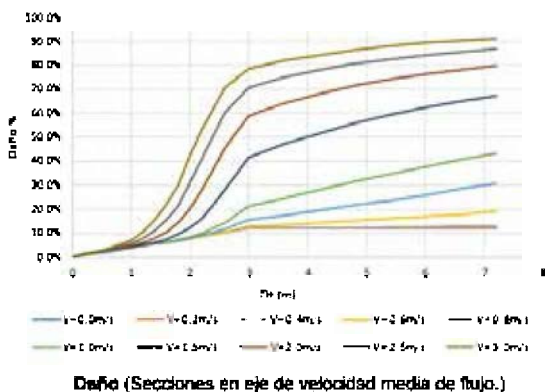
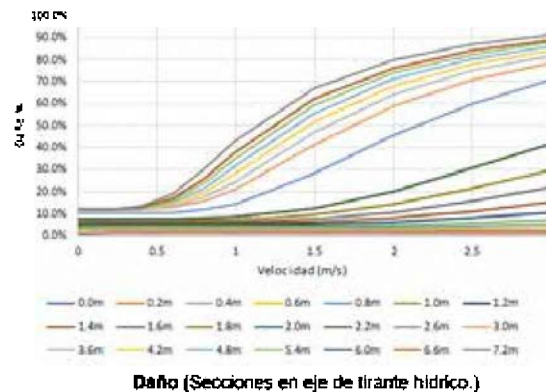
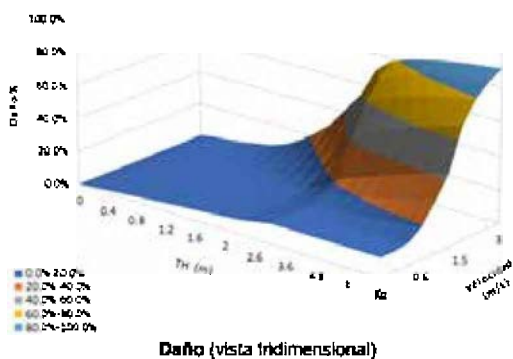
Tabla 7. Ficha de vulnerabilidad de edificaciones (mampostería de concreto 1 piso cubierta liviana).

Características de la tipología	Función de vulnerabilidad Para edificaciones.
Material: Mampostería de concreto.	# de pisos: 1 piso.
Espesor de muros: Entre 0.10 y 0.20cm.	Tipo de cubierta: Liviana sin diafragma rígido.
% de participación en municipio de Montellibano: 66%	

Edificaciones representativas:



Función de vulnerabilidad:



3.5. Evaluación y análisis de la vulnerabilidad social

Esta sección incluye algunos de los resultados del análisis de la vulnerabilidad social, relacionados con el contexto de los hogares e individuos. Para esto, se llevaron a cabo encuestas a 160 hogares ubicados en zonas de amenaza alta por inundación y encuestas de percepción local del riesgo a 22 personas, donde se incluyeron minorías étnicas, personas con capacidades diferentes, personas de la tercera edad, entre otras. Para cada uno de los numerales, se presentan algunos de los resultados obtenidos acorde a la metodología utilizada [7].

3.5.1. Dinámicas de vulnerabilidad social

Se presenta un análisis de la situación actual de los activos físicos (vivienda y tierra), financieros (trabajo-fuentes de ingreso formales e informales) y sociales (redes de apoyo) (estos son indagados por las preguntas orientadores en este aparte).

Se observa (**Fig. 27, izq.**) que un 96% de las personas encuestadas residentes de las zonas de mayor riesgo de inundación perciben que sus viviendas no son seguras, y el 67% de los mismos consideran que están ubicados en un área susceptible de amenaza (**Fig. 27, der.**). Las fuentes de peligro identificadas por la población encuestada se encuentran en la **Figura 28**.

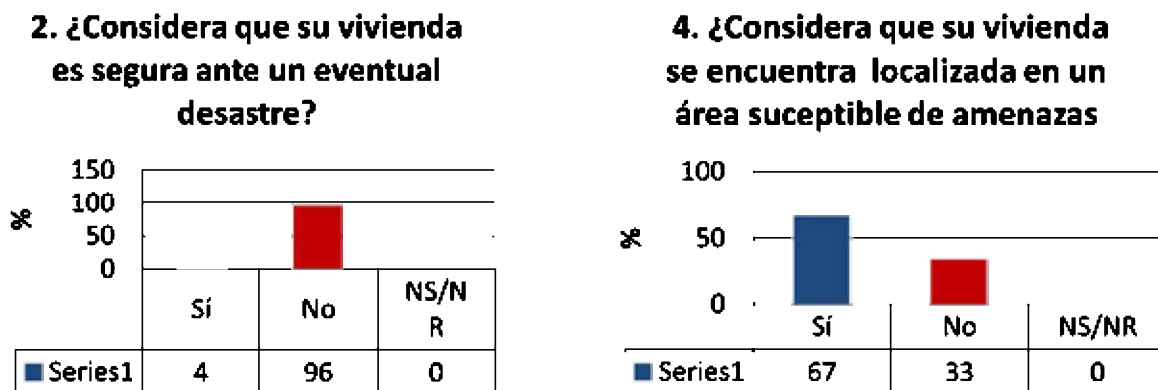


Figura 27. Pregunta 2 Contexto Hogar Montelíbano (Izquierda). Pregunta 4 Percepción del riesgo Montelíbano (Derecha).

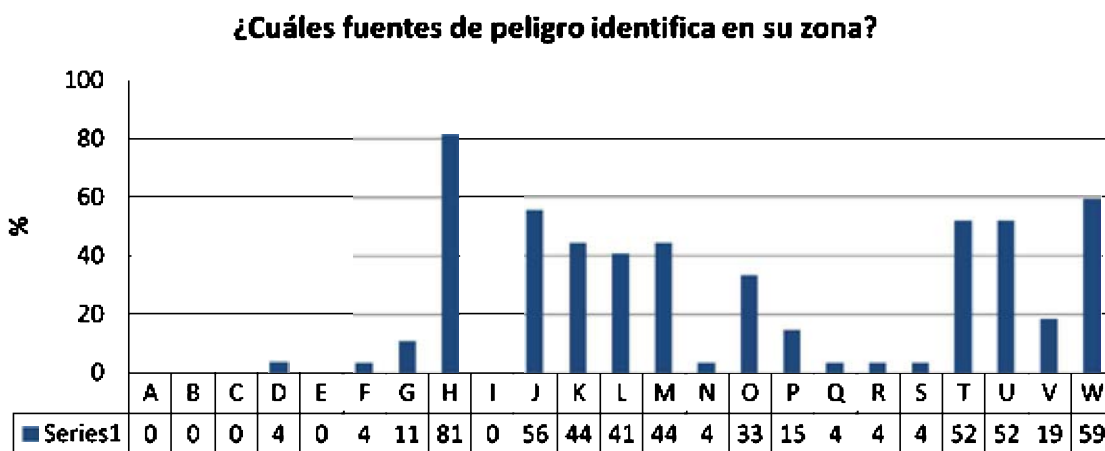


Figura 28. Pregunta 1 percepción local del riesgo Montelíbano. (A) Sismos, (B) Tsunamis, (C) Volcanes, (D) Flujos de lodo, (E) Movimientos en masa, (F) Hundimientos y agrietamientos, (G)

Ciclones tropicales, (H) Inundaciones pluviales y fluviales, (I) Granizadas, nevadas y heladas, (J) Lluvias torrenciales, (K) Tormentas eléctricas, (L) Vientos fuertes, (M) Temperaturas extremas, (N) Erosión, (O) Sequías, (P) Incendios forestales, (Q) Incendios urbanos explosiones, (R) Fugas y derrames de sustancias peligrosas, (S) Fuentes móviles, (T) Mala calidad sanitaria, (U) Ausencia del sistema de acueducto, (V) Precaria calidad de las aguas marinas, costeras o fluviales de la zona, (W) ausencia del alcantarillado para agua-lluvia.

3.5.2. Gestión del riesgo de desastres

Las familias residentes en los sectores más deprimidos son vulnerables debido a factores ambientales como la erosión, las inundaciones y la falta de cobertura de calidad de algunos de los servicios públicos básicos. Los sectores más expuestos al riesgo son los barrios Mucha Jagua, la Pesquera, Villa Clemen, Campo alegre, algunas edificaciones viejas y la clínica Regional. Se observa en la **Tabla 8** cómo los miembros de la comunidad establecen diferentes medidas para la prevención del desastre o eventos de riesgo.

Tabla 8. Trabajo de campo sobre medidas de prevención del riesgo.

<p>IDENTIFICACIÓN DE LAS ZONAS DE AFECTACIÓN</p> <ul style="list-style-type: none"> - Tener un plan de respuesta rápida ante una emergencia. <ul style="list-style-type: none"> - Medida: a corto plazo. - Responsables: Consejo Municipal de Gestión del Riesgo de Desastres. 	<p>ALCANTARILLADO PLUVIAL</p> <ul style="list-style-type: none"> - Previene la inundación por el agua lluvia en los barrios, en los puntos más críticos y bajos. <ul style="list-style-type: none"> - Medida: largo plazo. - Responsables: Gobierno y Municipio. 	<p>CAPACITACIONES A LA COMUNIDAD ANTE LAS EMERGENCIAS</p> <ul style="list-style-type: none"> - Previene las pérdidas humanas. <ul style="list-style-type: none"> - Medida: corto Plazo - Responsables: Consejo Municipal de Gestión del Riesgo de Desastres y las organizaciones de socorro
<p>REFORESTACIÓN DE LAS FUENTES HÍDRICAS</p> <ul style="list-style-type: none"> - Previene la erosión y con ellos los aludes de tierra. <ul style="list-style-type: none"> - Medida: mediano y largo plazo. - Responsables: CAR CVS y Municipios. 	<p>PLAN DE RESPUESTA RÁPIDA ANTE EMERGENCIAS</p> <ul style="list-style-type: none"> - Evita calamidades debido a que las personas están capacitadas ante la emergencia. <ul style="list-style-type: none"> - Medida: corto plazo - Responsables: Consejo Municipal de Gestión del Riesgo de Desastres. 	<p>DOTAR A LOS ORGANISMOS DE SOCORRO</p> <ul style="list-style-type: none"> - Previene ineficiencia a respuestas ante una emergencia. - Medida: corto y mediano plazo. - Responsables: Municipio.
<p>DRAGADO DE LAS FUENTES HÍDRICAS. (Ríos y Caños)</p> <ul style="list-style-type: none"> - Previene el rebosamiento y el fluir de las cuencas hídricas – Arrastre de la flora. <ul style="list-style-type: none"> - Medida: corto y mediano plazo. - Responsables: CAR, CVS, Municipios y Gobierno. 	<p>REUBICACIÓN Y PREVENCIÓN DE CONSTRUCCIONES EN ZONA DE ALTO RIESGO</p> <ul style="list-style-type: none"> - Personal afectado y emergencias. - Medida: corto y largo plazo. - Responsables: Consejo Municipal de Gestión del Riesgo de Desastres, Planeación, Gobierno Nacional, Min. Vivienda, Fondo de adaptación. 	<p>ADAPTACIÓN Y DOTACIÓN DE SITIOS PÚBLICOS PARA ALBERGUES</p> <ul style="list-style-type: none"> - Previene problemas de salud pública y sanitarios. - Medida: Mediano y largo Plazo. - Responsables: Municipio.

3.5.3 Percepción del riesgo

Se evidencia gran desconocimiento en factores importantes de la GRD en los habitantes de los diferentes barrios del municipio, siendo esto un factor que aumenta la vulnerabilidad de las familias. El 64% de los habitantes del municipio encuestados desconocen la ubicación y las funciones de la oficina de gestión del riesgo del municipio (Fig. 29).

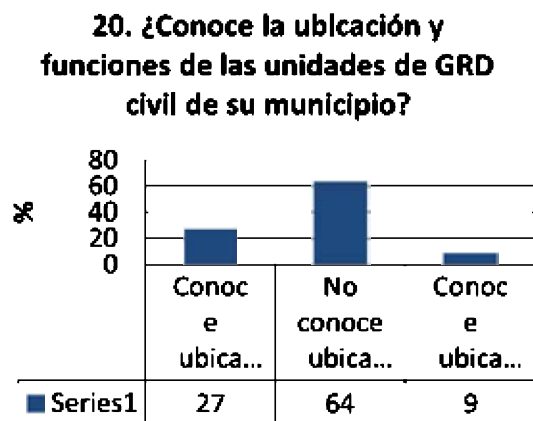


Figura 29. Pregunta 20 percepción del riesgo Montelíbano (Izquierda). Pregunta 22 Encuesta percepción del riesgo Montelíbano (Derecha).

3.5.4. Desarrollo de capacidades

Con relación a la percepción, el 94% de la población afirma que no posee suficientes conocimientos y habilidades para la prevención de desastres. Además, 92% considera que no se han implementado acciones educativas para la GRD como se observa en la Figura 30.

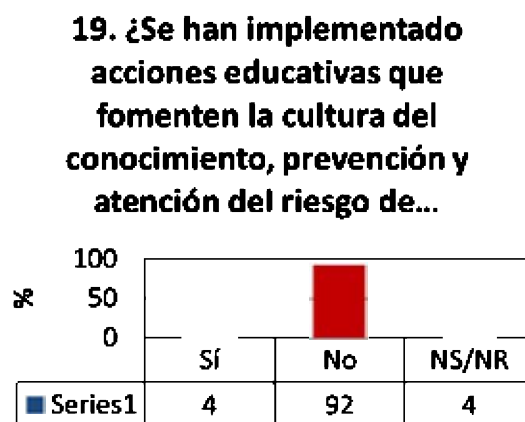
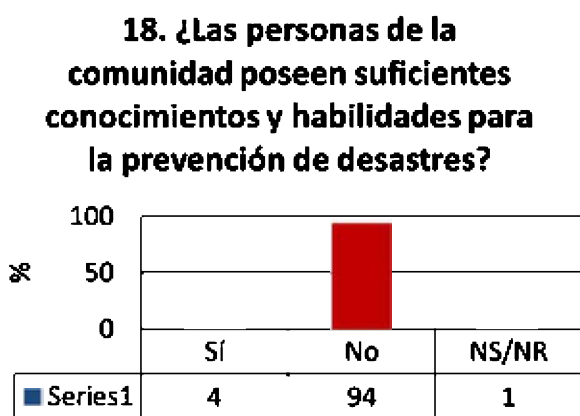


Figura 30. Pregunta 18 contexto hogar Montelíbano (Izquierda). Pregunta 19 Contexto hogar Montelíbano.

3.5.5 Causas de la vulnerabilidad social

En esta sección se hace una descripción de la situación actual de los activos naturales, sociales y una mirada general a cómo se desarrollan las relaciones al interior de los hogares. En el componente de enfoque diferencial y equidad de género, el 94% de la población encuestada afirma que si existe equidad entre hombres y mujeres.

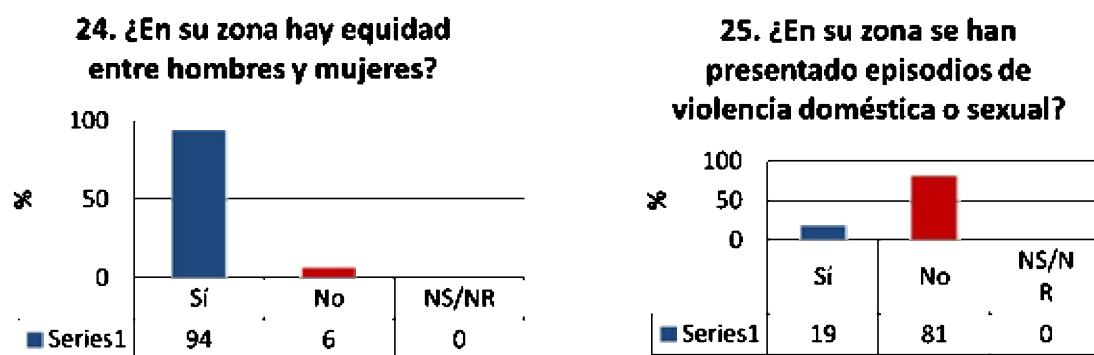


Figura 31. Pregunta 24 contexto hogar Montelíbano (Izquierda). Pregunta 25 Contexto hogar Montelíbano (Derecha).

3.5.6 Grado de vulnerabilidad en el municipio

Respecto a la condición de propensión a la vulnerabilidad social para el municipio, después de analizar los indicadores presentados en la **Tabla 9**, se obtiene la categoría media. Se puede observar una diferencia en la percepción del riesgo a nivel regional y local, dado que la comunidad percibe la condición de vulnerabilidad como alta y el Consejo Municipal de Gestión del Riesgo como baja. Entre los indicadores que inciden en el diagnóstico de la vulnerabilidad, se observa la tasa de desempleo, la cobertura de alcantarillado y acueducto.

Tabla 9. Grado de vulnerabilidad social del municipio de Montelíbano.

Variables	Condición de propensión a la vulnerabilidad social
Calificación Indicadores de contexto	
Puntaje contexto nacional, regional y municipal	Baja
Puntaje contexto hogar	Alta
Calificación percepción local del riesgo	Media
Clasificación indicadores socioeconómicos	Media
Vulnerabilidad Social ante Desastres del Municipio (VSDM)	Media

*Promedio de indicadores socioeconómicos.

Respecto al mapeo de las condiciones de vulnerabilidad en la zona de alto riesgo por inundación, en la **Figura 32** (Izq.) se observa que la condición de vulnerabilidad se encuentra entre alta (color rojo) y media (color amarillo) y estas áreas corresponden a las zonas de inundación modeladas por el IDEAM que se presentan en la **Figura 32** (Der.). Los niveles de inundación acorde a las encuestas de percepción del riesgo, por parte de la comunidad, se encuentran del orden de 0.5 y 1.5 m.

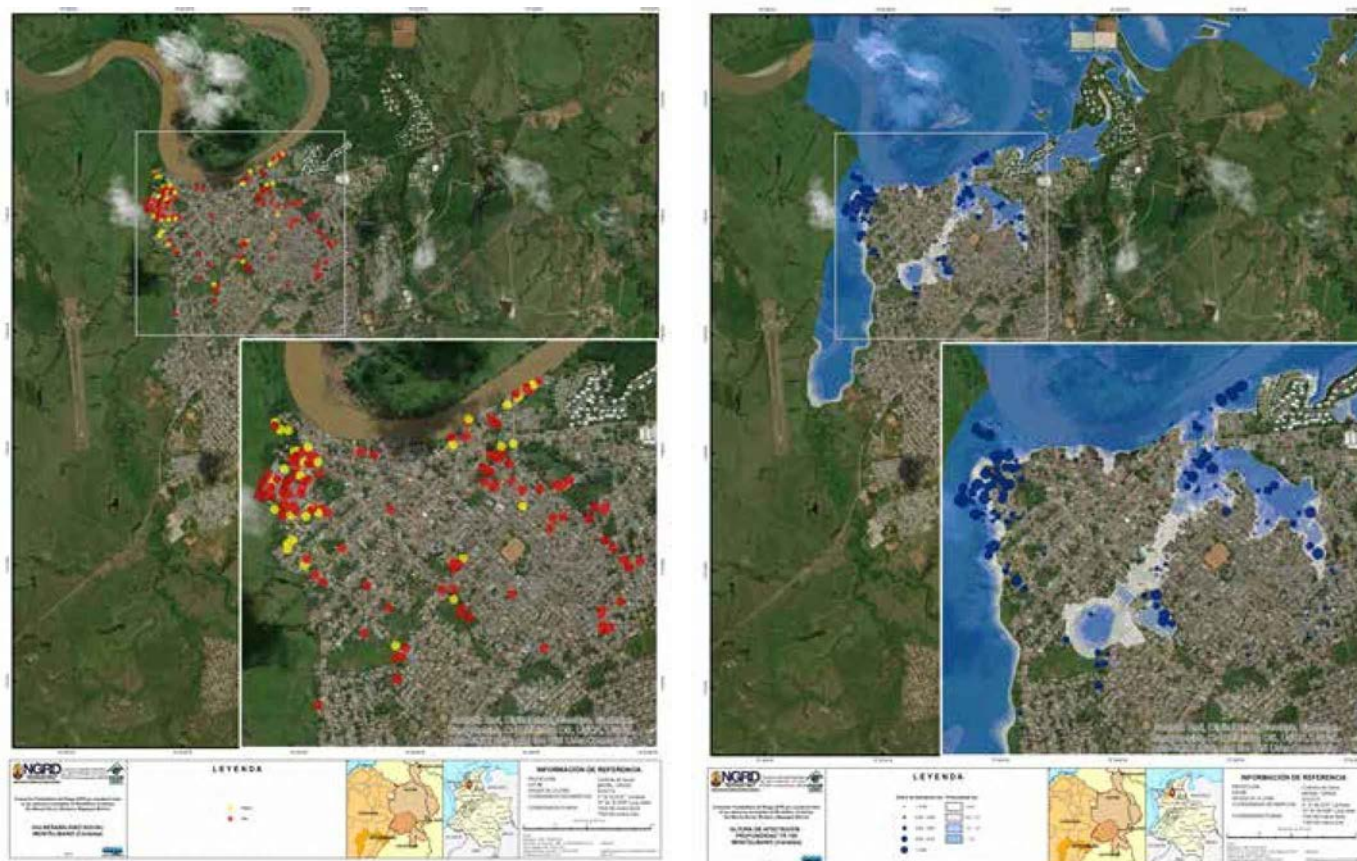


Figura 32. Zonificación de la vulnerabilidad social en el contexto hogar y comunidad en Montelíbano (Izquierdo). Zonificación del área de inundación y niveles de agua en Montelíbano

3.6 Evaluación y análisis del riesgo por inundación en Montelíbano

Siguiendo la metodología de EPR por inundación propuesta (**Fig. 10**) [8], se calculan las pérdidas potenciales para edificaciones localizadas en la cabecera municipal de Montelíbano por efecto de inundaciones lentas. Los resultados del cálculo de riesgo se presentan en términos de CEP, PAE por rubros, PML, mapa de riesgo de PAE relativa, y mapa de clasificación de riesgo en niveles alto, medio y bajo.

La Figura 33 presenta la CEP por eventos de inundación en edificaciones y contenidos. En esta figura se representan las frecuencias anuales con que ocurrirán eventos que igualan o exceden un valor específico de pérdida del conjunto de elementos expuestos analizado [26]. Esto comprende todas las edificaciones localizadas exclusivamente en la cabecera municipal de Montelíbano, en conjunto con los contenidos muebles de dichas edificaciones. La **Tabla 10** presenta la PAE discretizada por rubros de análisis y de manera general para toda la cabecera.

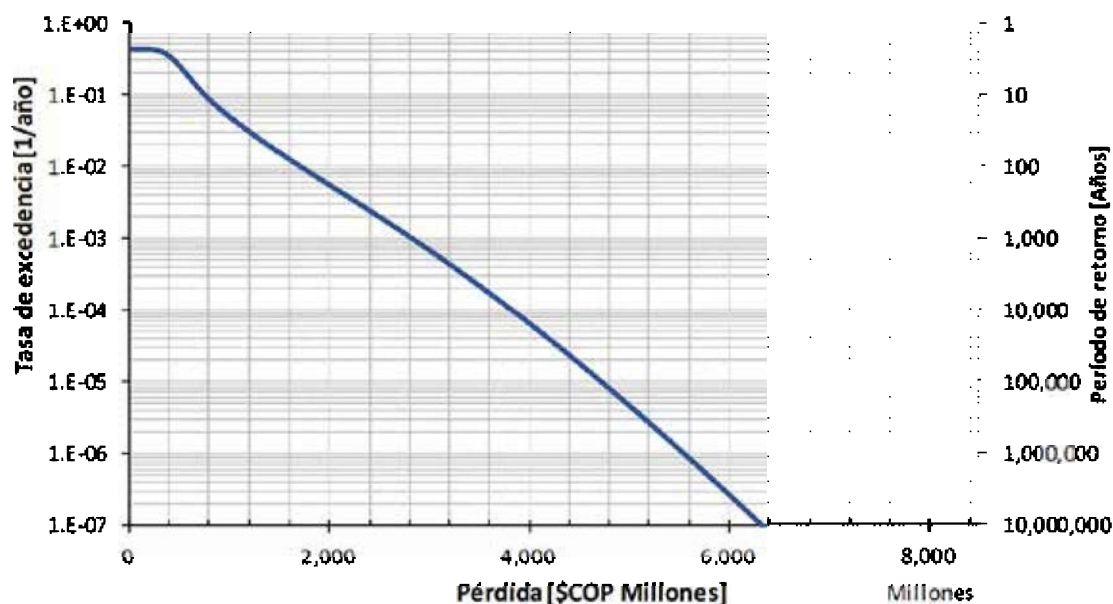


Figura 33. Curva de excedencia de pérdidas (CEP) para la cabecera municipal de Montelíbano (Córdoba).

Tabla 10 Pérdida anual esperada (PAE) discretizados por rubro: contenidos y edificación.

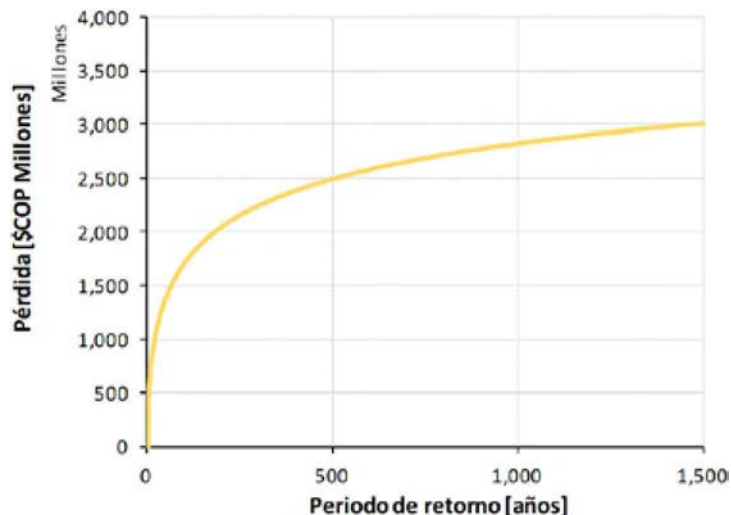
Rubro	Montelíbano - Córdoba			
	Valor expuesto	Pérdida anual esperada		Participación valor expuesto (%)
	[millones]	[millones]	[‰]*	
Contenidos	88,261.19	259.14	2.94	18.23
Edificación	395,817.90	16.10	0.04	81.77
TOTAL	484,079.09	275.24	0.569	100

Se observa que la PAE para la cabecera municipal se estima en \$275,242,283 pesos (0.6‰). Esta cantidad se obtiene a partir de calcular el área bajo la curva de la CEP (Fig. 40) y representa el valor promedio de la pérdida que al acumularla año tras año durante un periodo de observación lo suficientemente largo, es semejante al valor acumulado de las pérdidas que pueden ocurrir de manera aleatoria en el mismo periodo. La PAE debe entenderse como un “promedio a largo plazo”. Es decir, en un periodo de observación lo suficientemente grande (1000 años, por ejemplo¹) se espera que, en promedio, la pérdida sea de \$275,242,283 pesos al año en las edificaciones y contenidos de la cabecera de Montelíbano. Si se divide esta cantidad entre el valor expuesto total calculado (\$484,079 millones de pesos), se obtiene la prima de riesgo igual a 0.6‰.

La **Figura 34** presenta los valores de PML para la cabecera municipal de Montelíbano, considerando periodos de retorno entre 100 y 1500 años. Estos valores indican pérdidas que no ocurren con frecuencia

¹Los periodos de observación se dan en función de los elementos expuestos analizados. Por ejemplo, para infraestructura energética como hidroeléctricas, se considera usualmente ventanas temporales superiores a los 1000 años. Para otro tipo de infraestructuras como carreteras y diques, se consideran ventanas de tiempo menores, por ejemplo 100 años, dependiendo de la normativa vigente.

o en otras palabras, que se espera que ocurra en periodos de tiempo muy largos. En esta figura se evidencia que, para un período de retorno muy grande, se espera que la pérdida económica sea de \$2,825 millones de pesos, o más. Lo anterior corresponde al 0.58% del valor expuesto total en la cabecera municipal.

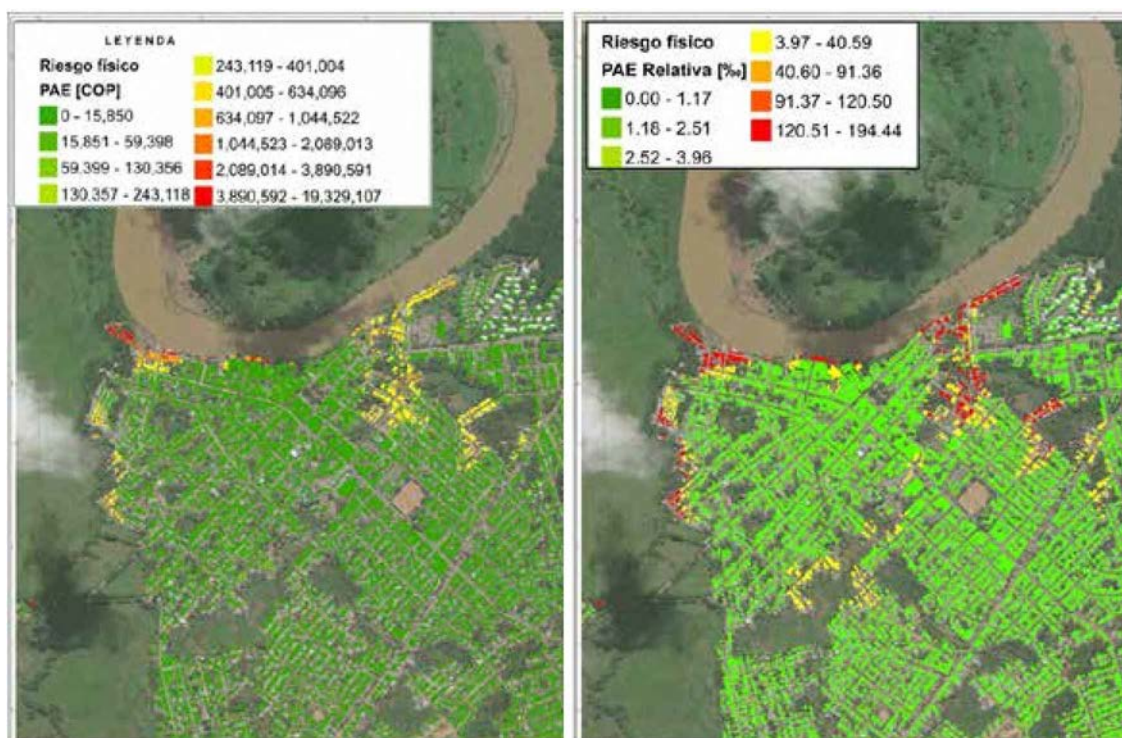


Valor expuesto [millones]	484,079.09	
Período de retorno	Pérdida	
[años]	[millones]	[%]
100	1,707.40	0.35%
250	2,156.67	0.45%
500	2,496.38	0.52%
1000	2,825.20	0.58%
1500	3,011.25	0.62%

Figura 34. Pérdida máxima probable (PML, por sus siglas en inglés) para la cabecera municipal de Montelíbano (Córdoba).

A partir de la PAE es posible construir mapas de riesgo que ilustran el riesgo de manera espacial. La **Figura 35** (Izq.) representa el riesgo para cada elemento expuesto en términos de la PAE en pesos colombianos [COP]. Si cada valor de pérdida reportado en la **Figura 35** (Izq.) se divide entre el valor expuesto total de cada elemento, se obtiene la **Figura 35** (Der.), la cual representa la PAE relativa y es adimensional debido a que es una proporción de dinero, que usualmente se representa en uno por cada mil (al millar) [%].

Figura 35. Mapa de riesgo físico por inundación: Pérdida Anual Esperada (PAE) en pesos colombianos [COP] para edificaciones-Montelíbano (Izquierda). Mapa de riesgo físico por inundación: Pérdida Anual Esperada (PAE) relativa al millar [%] para edificaciones-Montelíbano (Derecha).



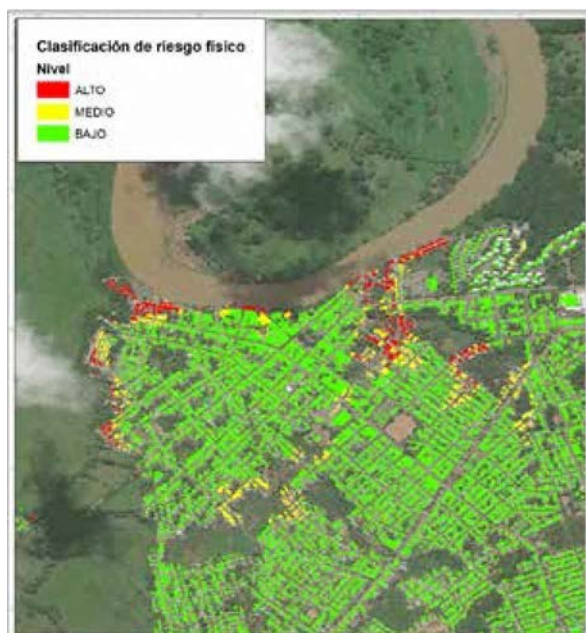


Figura 36. Mapa de categorización de riesgo físico por inundación – Montelíbano.

El mapa de PAE relativa representa la distribución espacial del indicador de riesgo físico que se propone sea tomado en cuenta como criterio para establecer las categorías de riesgo alto, medio y bajo. Para ello, se realiza un análisis de deciles de los valores de PAE relativa con el fin de segmentar los valores de pérdida en rangos equitativos que permitan clasificar el riesgo. Para este caso se obtiene un nivel de riesgo bajo para los deciles menores a 6, medio para los deciles 7 a 9 y alto para el decil 10 (**Fig. 36**). Lo anterior, para la cabecera municipal de Montelíbano, arrojó que un total de 318 edificaciones (10% del total) se catalogan en zonas de riesgo alto por inundación, particularmente en los barrios de: Muchajagua, y predios localizados en la ribera del río San Jorge, particularmente entre calles 12 y 19 y entre carreras 4 y 8.

Con el fin de tener una referencia respecto al monto de la pérdida, la **Tabla 11** presenta los ingresos totales y tributarios del municipio, así como los montos del Sistema General de Participaciones y sus destinaciones a los sectores de educación, salud, agua potable y gestión del riesgo de desastre. Estos valores se expresan normalizados según el valor de la PAE del municipio.

Tabla 11. PAE en comparación con rubros del presupuesto anual para la vigencia 2018 del Municipio de Montelíbano.

PAE [COP millones]	275.24	
Rubro	[COP millones]	PAE/Rubro [%]
Ingresos totales	67,596.29	0.41
Tributarios	15,732.00	1.75
Sistema General de Participaciones - SGP	29,918.06	0.92
Educación	3,570.10	7.71
Salud	19,010.24	1.45
Agua potable y saneamiento básico	4,118.75	6.68
Gastos Prevención y Atención de Desastres	650.52	42.31

Considerando los resultados de PAE en comparación con diferentes rubros del presupuesto anual para la vigencia fiscal de 2017 del Municipio de Montelíbano [51], se concluye que la PAE corresponde a (**Tabla 11**):

- El 0.41% de los ingresos totales anuales del Municipio, de los cuales corresponde al 1.75% de los ingresos tributarios sin considerar los rubros de sobretasa a la gasolina, estampillas, impuesto predial, entre otros.
- El 0.92% del rubro total del Sistema General de Participaciones (SGP) del Municipio, entre los cuales se destaca que representa el 7.71% del rubro de educación.
- El 42.31% de la inversión del año 2017 en el rubro de prevención y atención de desastres, lo cual significa que la PAE del Municipio estaría cubierta por lo invertido en este rubro en un 42%.

4. IMPORTANCIA Y USOS DE LA EVALUACIÓN INTEGRAL DEL RIESGO PARA LA CONSOLIDACIÓN DE COMUNIDADES RESILIENTES

En este capítulo se presentan los objetivos, alcances y recomendaciones para la EPR por inundación lenta con enfoque integral a escala 1:2.000. El modelo propuesto es producto de las metodologías existentes en el estado del arte para la GRD por inundaciones a nivel nacional e internacional. Entre los aportes destacables está la evaluación diferenciada de los rubros de contenidos y edificaciones, una propuesta metodológica para la estimación de la correlación de pérdidas entre localizaciones, la propuesta analítica de generación de funciones de vulnerabilidad física a partir de trabajo de campo, la evaluación de vulnerabilidad social de comunidades y el detalle del modelo de exposición como insumo de EPR por inundación.

Por un lado, se propone un enfoque probabilista basado en la generación de pérdidas por ocurrencia de eventos de inundación, involucrando las incertidumbres asociadas a los componentes de amenaza y vulnerabilidad física. Se selecciona este enfoque porque si bien es factible y es una práctica común la toma de decisiones con mapas de susceptibilidad, mapas de amenaza y/o evaluaciones de riesgo determinista, estos procedimientos no consideran la incertidumbre asociada al fenómeno y a la vulnerabilidad de los elementos expuestos. Por ende, es usual que no se describa el riesgo en términos de la frecuencia de las posibles pérdidas que se pueden generar a futuro. Una consecuencia de esto es que no se proporciona una medida del rango de pérdidas posibles que ofrezca garantías de conocimiento del riesgo para la seguridad fiscal de los entes gubernamentales por eventos desastrosos.

En contraste, las metodologías probabilistas permiten contar con la información más completa posible respecto de todos los componentes involucrados en el riesgo para la toma de decisiones en un ambiente de incertidumbre. Con esta información es posible hacer GRD a través de medidas de intervención producto de análisis de beneficio-costos, así como también plantear estrategias de aseguramiento colectivo. Mayor detalle sobre estas estrategias de reducción y protección a partir de metodologías probabilistas de evaluación del riesgo se pueden consultar en la experiencia del esquema de aseguramiento colectivo para la ciudad de Manizales [52], y en la iniciativa del Ministerio de Hacienda y Crédito Público para la generación de la Estrategia de Financiamiento del Riesgo de Desastres, particularmente en lo relacionado con el aseguramiento de activos públicos frente al riesgo catastrófico por sismos, en 2018.

Por otro lado, se propone un enfoque integral de la metodología que garantiza la incorporación de vulnerabilidad social, a partir de los espacios de validación de los resultados con las comunidades que permiten no solo fortalecer los modelos de amenaza por inundación, sino también analizar con la población las condiciones y causas de las inundaciones. A continuación, se describen dos ejemplos del impacto de la vulnerabilidad social en el proyecto:

- **Caso Montelíbano:** Gracias al trabajo con la comunidad y su relación con los eventos de inundación que se presentan por desbordamiento del río San Jorge, se evidenció la necesidad de generar una modelación de amenaza más exhaustiva que incluyera el aporte de la quebrada Muchajagua a la amenaza por inundación total en el cálculo del riesgo. Debido a la baja resolución del MDE, no fue posible registrar el efecto del aporte de esta quebrada al inicio del proyecto. Gracias al trabajo con la comunidad se estableció la necesidad de su integración en el análisis.
- **Análisis “adaptado - no adaptado”:** Al inicio del proyecto se consideró únicamente un escenario de análisis para la generación de pérdidas por eventos de inundación. Este escenario correspondía al de “no adaptado”. Es decir, el escenario asumía que, dada la ocurrencia de un evento de inundación, una vez la lámina de agua alcanzaba cierta cota, los contenidos (p. ej., nevera, lavadora, etc.) sufrían daño parcial o total. El trabajo de vulnerabilidad social permitió entender la relación de las comunidades con un fenómeno que para ellos es natural, y que lo entienden a partir de su experiencia de vida y de sus ancestros como una condición de su hábitat que no solo conlleva (en casos extremos) posibles daños a sus modos de vida, sino que atrae oportunidades de diversa índole. Dado el entendimiento de la cronología e intensidad del fenómeno, las comunidades han generado mecanismos de adaptación para proteger sus bienes materiales mediante el uso de “tambos” en los cuales ubican sus bienes. En consecuencia, se creó el escenario de análisis “adaptado” en el cual, como es de esperarse, las pérdidas materiales por daño en contenidos se reducen de forma sustancial. Esto permitió el enriquecimiento del modelo de EPR y lo convierte en un método con enfoque integral que se enriquece a partir de las experiencias reales de la comunidad. Por todo lo anterior se considera que el modelo y enfoque propuestos presentan insumos valiosos para enriquecer el proceso de GRD por inundaciones, impactando de forma directa en el incremento de la resiliencia de comunidades en sus distintas dimensiones a partir del conocimiento de sus condiciones de riesgo.

Las comunidades viven y comprenden las inundaciones desde su espacio territorial que generalmente se observa a nivel de barrio; pero este tipo de abordajes, les muestran los efectos regionales en un dominio más amplio. Este conocimiento no solo permite generar consciencia en la forma como se relacionan con su entorno, sino también en las decisiones que toman sobre sus formas de habitar. Este conocimiento puede soportar acciones del plan de GRD del municipio para construir comunidades menos vulnerables y más resilientes.

5. CONCLUSIONES

El modelo de EPR por inundación con enfoque integral es un insumo técnico para la construcción de conocimiento del riesgo tanto a nivel de comunidades y actores locales, como de personal técnico en entidades privadas y públicas, y tomadores de decisión a escalas locales y regionales. A su vez, es un instrumento metodológico y práctico que pretende generar aportes en la integración de la GRD por inundación en los instrumentos de planificación territorial, impactando así en la construcción de

comunidades más resilientes a los efectos de eventos de inundación e incrementando su conocimiento y capacidad de acción en los actores ya mencionados.

Se destaca que, dada la escala de detalle para la cual fue propuesto el modelo y el fuerte componente de trabajo de campo propuesto, se genera una serie de ventajas, entre las que sobresalen:

- El análisis separado de los rubros de contenidos y edificación para el cálculo del riesgo.
- La estimación de la correlación de pérdidas entre localizaciones para un evento de análisis a partir de información recopilada en campo y procesada en el modelo de exposición.
- Involucrar a los actores e instituciones que tienen relación directa con las condiciones de riesgo en los municipios y esta situación hace que los resultados que se van obteniendo en los demás componentes, se encuentren en un contexto real.
- La EPR permite la comparación cuantitativa y estandarizada entre localizaciones, zonas homogéneas, municipios, cuencas hidrográficas, departamentos, etc.
- La metodología se plantea para hacer uso de los insumos comúnmente conocidos y producidos para caracterizar la amenaza por inundación, estos son; mallas de resultados para tirantes hídricos asociados a períodos de retorno.
- La EPR permite identificar, categorizar y priorizar población y bienes expuestos en zonas de riesgo alto, medio y bajo, a partir de medidas cuantitativas, estandarizadas y reproducibles.
- El enfoque integral impacta el entendimiento y conceptualización de los demás módulos del método. Permitted la generación de escenarios de análisis para condiciones adaptadas en el proceso de generación de daño en el rubro de contenidos. Para el caso del modelo de amenaza, permitió la validación de mapas de amenaza por inundación.

PUNTOS CLAVE

1. Debido a la escala de detalle para la cual se plantea la metodología, para todos los componentes (amenaza, vulnerabilidad física y social, exposición y riesgo) es ineludible efectuar tareas de trabajo de campo acordes a la información de entrada que plantea el método.
2. Para la modelación de amenaza por inundación lo suficientemente detallada y que permita realizar análisis sobre eventos posibles, se hace necesaria la obtención de un modelo digital de terreno de buena resolución, la cual para el caso de cartografía 1:2.000 es recomendable una resolución espacial mínima de 1.0 m.
3. Si bien es posible definir la ubicación de los elementos a nivel de construcciones, esto no implica que se deban presentar los resultados de pérdidas esperadas a este nivel de detalle. Dado que los edificios se clasifican en tipologías estructurales, los daños estimados (bajo un conjunto de supuestos) reflejan las pérdidas esperadas para un tipo de edificio, más no las pérdidas de una estructura en particular.
4. La metodología de evaluación de vulnerabilidad física es aplicable a obras de infraestructura similares a edificaciones. Otras obras de infraestructura (p. ej., postes de luz, torres de energía, puentes, etc.) pueden ser estudiadas con estos procedimientos, aplicando variaciones en el cálculo de las fuerzas y posibles

mecanismos de colapso involucrados. El análisis de otras obras de infraestructura no se incluye en el análisis y casos de estudio debido a que exceden el alcance planteado para la planificación del ordenamiento territorial de los municipios.

5. Los resultados no deben ser interpretados como la evaluación de la vulnerabilidad individual de un elemento expuesto, sino como un indicador general de la vulnerabilidad de múltiples elementos expuestos que comparten las características de la tipología dentro de la cual son clasificados.
6. La metodología presenta avances en el análisis de la vulnerabilidad social y uno de los principales retos que surgen es la forma cómo incluir este componente en los estudios probabilistas de riesgo. Durante el caso piloto se identificó que el componente de salud podría ser el punto de partida para incluir la incertidumbre de este componente al modelo de riesgo.
7. A partir de análisis posteriores al cálculo de riesgo para el estado actual la metodología representa una herramienta valiosa para la selección de medidas de intervención para la reducción del riesgo más convenientes a partir de análisis beneficio-costos, cuantificando la pérdida comparativamente con las medidas adoptadas respecto de su costo de implementación.

RECOMENDACIONES Y NECESIDADES FUTURAS

1. Para la información topobatimétrica, el Fondo Adaptación dispone de información de alta resolución para la totalidad de la región de La Mojana para 1,100,000 hectáreas. Dicha información debe poder solicitarse y utilizarse por los municipios localizados en esta región para la elaboración de sus estudios de riesgo.
2. El trabajo de inspecciones en campo requiere la destinación de un presupuesto para la contratación de personal que debe recopilar la información de campo necesaria. Para reducir estos costos se propone:
 - a) Realizar inspecciones en campo en zonas prioritarias debido a su cercanía a cuerpos de agua o por la importancia de los valores expuestos.
 - b) Utilizar el criterio de experto para la definición de los porcentajes de participación de las tipologías en cada zona homogénea.
 - c) Complementar las inspecciones utilizando imágenes disponibles en Google Street View.
3. La metodología propuesta se basa en métodos analíticos. Sin embargo, recolección de datos de pérdidas en contenidos y edificaciones post-evento permitirían calibrar las funciones de vulnerabilidad propuestas considerando daños y pérdidas ciertas.
4. El país deberá avanzar en criterios para el análisis de la vulnerabilidad social. Esto contribuye al conocimiento de la percepción local del riesgo, los mecanismos de adaptación y las medidas adoptadas por los hogares para que las comunidades conozcan los riesgos a los que se enfrentan y puedan reaccionar efectivamente, y las relaciones entre la sociedad civil y las entidades, a la hora de enfrentar un evento extremo.

MATERIAL SUPLEMENTARIO

Las plantillas propuestas para trabajo de campo, datos, y detalles completos de la metodología propuesta se encuentran en el documento *Lineamientos técnicos para el desarrollo de estudios de riesgo por inundación lenta* [8].

La totalidad de resultados obtenidos para los casos de estudio seleccionados están en el documento *Evaluación Probabilista del Riesgo por inundación lenta en cabeceras municipales de San Marcos (Sucre), Montelíbano (Córdoba), Mompox (Bolívar) y Magangué (Bolívar)* [50].

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores no declaran conflicto de intereses.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA CRediT

Conceptualización: JCO, PAV, JAV, JDA. Metodología: JCO, PAV, JAV, JDA. Redacción de primera versión: JCO, PAV, JAV, JDA. Escritura. Revisión y edición de segunda versión: JCO, PAV, JAV. Figuras y tablas: JCO, PAV, JAV, JDA. Administración de proyecto: JCO. Búsqueda de evidencia: JCO, PAV, JAV, JDA.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen en primer lugar a la Subdirección para el Conocimiento del Riesgo de la UNGRD por servir como un gestor, patrocinador y garante de la ejecución del proyecto. A su directora Lina Dorado González, y a todo el equipo de trabajo que hizo posible la ejecución de todos los componentes del proyecto. Adicionalmente, los autores agradecen a las siguientes entidades y actores que prestaron un apoyo valioso al desarrollo del proyecto: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), Universidad de Cartagena, Comités Departamentales y Municipales de Gestión del Riesgo y Líderes de Juntas de Acción Comunal.

IDENTIFICACIÓN DE AUTORES

Juan Camilo Olaya González	https://orcid.org/0000-0002-4647-256X
Paula Andrea Villegas González	CvLAC
Jairo Andrés Valcárcel Torres	CvLAC
Julián Darío Arbeláez Salazar	LinkedIn
Fabian Mauricio Caicedo Carrascal	LinkedIn
José Ville Triana García	LinkedIn
Lina Dorado González	Función pública
Juan Pablo Forero Acevedo	LinkedIn

BIBLIOGRAFÍA

1. PreventionWeb. (2021). *Resilience*. <https://www.preventionweb.net/understanding-disaster-risk/key-concepts/resilience>
2. Parsons, M., Reeve, I., McGregor, J., Morley, P., Marshall, G., Stayner, R., McNeil, J., Glavac, S. & Hastings, P. (2020). *The Australian Natural Disaster Resilience Index: Volume II – Index Design and Computation*. Melbourne: Bushfire and Natural Hazards CRC. <https://www.bnhcrc.com.au/publications/biblio/bnh-7100>
3. Ley 1523 de 2012. Por la cual se adopta la política nacional de gestión del riesgo de desastres y se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y se dictan otras disposiciones. Abril 24 de 2012. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=47141>
4. Decreto Ley 19 de 2012. Por el cual se dictan normas para suprimir o reformar regulaciones, procedimientos y trámites innecesarios existentes en la Administración Pública. Enero 19 de 2012. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=45322>
5. Decreto 1807 de 2014. Por el cual se reglamenta el artículo 189 del Decreto-ley 019 de 2012 en lo relativo a la incorporación de la gestión del riesgo en los planes de ordenamiento territorial y se dictan otras disposiciones. Septiembre 19 de 2014. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=59488>
6. Decreto 1077 de 2015. Esta versión incorpora las modificaciones introducidas al Decreto Único Reglamentario del Sector Vivienda, Ciudad y Territorio a partir de la fecha de su expedición. Mayo 26 de 2015. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=77216>
7. UNGRD-IEMP (Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres-Instituto de Estudios del Ministerio Público). (2017). *Lineamientos para el análisis de la vulnerabilidad social en los estudios de la gestión municipal del riesgo de desastres*. Bogotá. D.C.
8. UNGRD (Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres). (2018). *Lineamientos técnicos para el desarrollo de estudios de riesgo por inundación lenta*. Subdirección para el conocimiento del riesgo. Bogotá, D.C., UNGRD.
9. IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales). (2017). *Guía Metodológica de elaboración de mapas de inundación*. Bogotá. IDEAM.
10. OMM (Organización Meteorológica Mundial). Hadeen, K., Guttman, N. (1994). *Homogeneity of data and the climate record. Papers presented at the WMO Technical Conference on Instruments and Methods of Observation (TECO-94)*. Instruments and Observing Methods Report No. 57 (WMO/TD-No. 588). Ginebra.
11. Decreto 1807 de 2014. Por el cual se reglamenta el artículo 189 del Decreto Ley 019 de 2012 en lo relativo a la incorporación de la gestión del riesgo en los planes de ordenamiento territorial y se dictan otras disposiciones. Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio. República de Colombia. 19 de septiembre de 2014. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=59488>
12. Chow, V., Maidment, D., & Mays, I. (1994), *Hidrología aplicada* (1st ed; M. Suarez, ed.). Bogotá, Colombia: McGraw-Hill.
13. IPCC (Panel Intergubernamental de Cambio Climático). (2012). Glossary of terms. *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation* En C.B. Field, V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor, and P.M. Midgley (Eds.). A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, pp. 555-564. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139177245.014>

14. Figueiredo, R., Martina, M. (2016). Using open building data in the development of exposure data sets for catastrophe risk modelling. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 16, 417-429. <https://doi.org/10.5194/nhess-16-417-2016>
15. IGAC (Instituto Geográfico Agustín Codazzi). (2022, 19 de enero). *Geoportal. Datos Abiertos. Subdirección de Catastro*. <https://geoportal.igac.gov.co/contenido/datos-abiertos-catastro>
16. De Risi, R., Jalayer, F., De Paola, F., Iervolino, I., Giugni, M., Topa, M.E., Mbuya, E., Kyessi, A., Manfredi, G., Gasparini, P. (2013). Flood risk assessment for informal settlements. *Natural Hazards*, 69, 1003-1032. <https://doi.org/10.1007/s11069-013-0749-0>
17. Figueiredo, R., Schröter, K., Alexander Weiss-Motz, A., Martina, M., Kreibich, H. (2017). Improving accuracy and quantifying uncertainty in flood loss estimations through the use of multi-model ensembles. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. <https://doi.org/10.5194/nhess-2017-349>
18. Gutenson, J.L. Oubeidillah, A.A., Ernest, A.N.S., Zhu, L., Zhang, X., Sadeghi, S.T. (2017) Investigating Uncertainty in Developing Regional Building Inventories for Flood Damage Prediction. *Natural Hazards Review*, 18(3): 04016013. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)NH.1527-6996.0000240](https://doi.org/10.1061/(ASCE)NH.1527-6996.0000240)
19. Gutenson, J.L. Oubeidillah, A.A., Ernest, A.N.S., Zhu, L., Zhang, X., Sadeghi, S.T. (2017). Rapid flood damage prediction and forecasting using public domain cadastral and address point data with fuzzy logic algorithms. *Journal of the American Water Resources Association*, 54(1), 104-123. <https://doi.org/10.1111/1752-1688.12556>
20. Rodríguez Gaviria, E.M (2016). *Diseño metodológico para la evaluación del riesgo por inundación a nivel local con información escasa*. Tesis de Doctorado, Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín.
21. DANE (Departamento Administrativo Nacional de Estadística). (2018, 17 de abril). *Sistema de consulta de información censal: Censo Básico. Ver: Sistema de consulta de información censal: Censo Básico*. <http://systema59.dane.gov.co/cgi-bin/RpWebEngine.exe/PortalAction?&MODE=MAIN&BASE=CG2005BASICO&MAIN=WebServerMain.inl>
22. Huerta-Garnica, B., Vega-Serratos, B., & Avelar-Frausto, C. E. (2006). *Caracterización del daño causado a estructuras y contenidos por inundaciones fluviales y costeras*. En XV Congreso Nacional de Ingeniería Estructural. Puerto Vallarta, México.
23. Metropolis Nicholas, S. U. (1949). The Montecarlo Metod. *Journal of the American Statistical Association*, 44. <https://doi.org/10.1080/01621459.1949.10483310>
24. FEMA (Agencia Federal para el Manejo de Emergencias) (2012). *Engineering: Principles and Practices for Retrofitting Flood-Prone Residential Structures*. <https://doi.org/10.1201/b13978>
25. Yamin, L. E., Ghesquiere, F., Cardona, O.-D., & Ordaz, M. G. (2013). *Modelación probabilista para la gestión del riesgo de desastre: El caso de Bogotá, Colombia*. (Banco Mundial & Universidad de Los Andes (Eds.). Banco Mundial.
26. Ordaz, M., Torres, M. A., & Domínguez, R. (2013). *Vulnerabilidad y Riesgo Por Inundaciones*. Instituto de Ingeniería - UNAM.
27. Torres, M., Jaimes, M., Reinoso, E., & Ordaz, M. (2014). Event-based approach for probabilistic flood risk assessment. *International Journal of River Basin Management*, 12(4), 377–389. <https://doi.org/10.1080/15715124.2013.847844>
28. Cardona, O. D. (2006). *Midiendo lo inmedible. Indicadores de Vulnerabilidad y Riesgo*. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/53920>
29. Wilches-Chaux, G. (1989). *Vulnerabilidad Global y Pobreza*. <http://hum.unne.edu.ar/revistas/geoweb/Geo2/contenid/vulner7.html>.

30. Gobierno regional Cusco. (2011). *Herramienta para integrar la reducción del riesgo de desastres en proyectos de agua y saneamiento rural*.
31. Lavell, A. (1997). *Viviendo en riesgo: Comunidades vulnerables y prevención de desastres en América Latina*. http://www.la-red.org/public/libros/1994/ver/ver_intro_nov-20-2002.pdf.
32. Banco Interamericano de Desarrollo. (2010). *Riesgos ante desastres naturales para Latinoamérica y El Caribe*. <http://www.iadb.org/es/noticias/articulos/2010-09-30/desastres-naturales-en-america-latina-y-el-caribe-bid.8017.html>
33. Botero, V. (2009). *Geo-information for measuring vulnerability to earthquakes: a fitness for use approach*. https://webapps.itc.utwente.nl/librarywww/papers_2009/phd/botero.pdf
34. INDECI. (2006). *Manual básico para estimar el riesgo*. Lima, Perú.
35. Cannon, T. (1991). *A hazard need not a disaster make: rural vulnerability and the causes of natural disasters*. Institute of Social Studies. La Haya.
36. Suárez-Méndez, C., Agudelo, O., Vargas, C., Cuesta, J., & Reyes, J. (2014). *Gestión del Riesgo de Desastres en la sede Tumaco de la Universidad Nacional de Colombia*. Informe final de la ODS 17. Universidad Nacional de Colombia – Sede Bogotá.
37. Villegas González, P. A. Obregón, Nelson (2018). Tesis doctoral en Ingeniería: *Gestión del riesgo por inundaciones: un metamodelo para el desarrollo de artefactos participativos Modelos integrados de sistemas socio-ecológicos: caso de estudio en la ecorregión de la Mojana*. Pontificia Universidad Javeriana.
38. United Nations General Assembly – UNGA. (2016). *Recommendations of the Open-ended Intergovernmental Expert Working Group on Indicators and Terminology relating to Disaster Risk Reduction*. Ginebra, Suiza.
39. UNISDR. (2009). *Terminología sobre Reducción del Riesgo de Desastres. Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres de las Naciones Unidas*. <http://www.unisdr.org/files/7817UNISDRTerminologySpanish.pdf>
40. Lampis, A. (2007). *Vulnerabilidad y Protección Social en Colombia: Estudios de Caso en Bogotá, Cali y Manizales*. En Zorro, C. (Comp.), *El Desarrollo: Perspectivas y Dimensiones – Aportes Interdisciplinarios*. Bogotá: CIDER, Embajada de los Países Bajos en Colombia.
41. Merz, B., Elmer, F., & Thielen, A. H. (2009). Significance of “high probability/low damage” versus “low probability/high damage” flood events. *Natural Hazards and Earth System Science*, 10(1), 1–14. <https://doi.org/10.5194/nhess-10-3-2010>
42. Merz, B., & Thielen, A. H. (2005). Separating natural and epistemic uncertainty in flood frequency analysis. *Journal of Hydrology*, 309(1–4), 114–132. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.11.015>
43. Mejía, C. E. (2019). Una convolución muy útil y unas derivadas ilustres. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 43, 168. <https://doi.org/10.18257/racefyn.767>
44. Planet Explorer. Planet (2018, febrero). <https://www.planet.com/explorer>
45. Kolmogorov, A. (1931). Über die analytischen Methoden in der Wahrscheinlichkeitsrechnung. *Mathematische Annalen*, 104(1), 415–458. Recuperado de <https://doi.org/10.1007/BF01457949>
46. Bendat, J. S., & Piersol, A. G. (2010). *Random data: Analysis and Measurement Procedures*. In *Wiley Series in Probability and Statistics*. Recuperado de <https://doi.org/10.1002/9781118032428>
47. Haan, C. (2002). *Statistical methods in hydrology* (2nd ed.; Wiley-Blackwell, ed.). Ames, Iowa.
48. Fondo Adaptación. (2015). *Modelación hidrodinámica de La Mojana*. Bogotá, Colombia.
49. US Army Corp of Engineers – USACE. (2015). HEC-RAS V.5.0.3 software. Davis, California.

50. UNGRD (Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres). (2018a). *Evaluación Probabilista del Riesgo por inundación lenta en las cabeceras municipales de San Marcos (Sucre), Montelíbano (Córdoba), Mompox (Bolívar) y Magangué (Bolívar)*. Subdirección para el Conocimiento del Riesgo (Ed.). Bogotá, D.C. <http://hdl.handle.net/20.500.11762/27249>
51. Alcaldía Municipal de Montelíbano. (2017). *Decreto No. 0861 del 18 de Diciembre de 2017*. Montelíbano, Córdoba.
52. ERN-AL. (2005). *Diseño de esquemas de transferencia de riesgo para la protección financiera de edificaciones públicas y privadas en Manizales en el caso de desastres por eventos naturales*. DNP, Banco Mundial. Disponible en: https://idea.manizales.unal.edu.co/sitios/gestion_riesgos/descargas/transferencia/02info~1.pdf

CAPÍTULO
7

Análisis de los desastres de Armero 1985 y Mocoa 2017 en Colombia utilizando el modelo Pressure and Release

Diana M. Rodríguez-Coca¹, Julián Alberto Espejo-Díaz^{2*} & William J. Guerrero²

¹College of Engineering, Architecture and Technology Oklahoma State University, 520 Engineering North, Stillwater OK, 74078-5061, United States

²Facultad de Ingeniería, Universidad de La Sabana, Campus del Puente del Común, Km. 7, Autopista Norte de Bogotá, Chía, Colombia

*Autor de contacto: Julián Alberto Espejo-Díaz, correo-e: julianesdi@unisabana.edu.co

Resumen

El 13 de noviembre de 1985, el Volcán Nevado del Ruiz (Tolima, Colombia) hizo erupción afectando poblaciones aledañas incluyendo Armero. Esta ha sido una de las erupciones con mayores pérdidas humanas a nivel mundial con aproximadamente 23 mil muertes. Por otra parte, en horas de la noche del 31 de marzo de 2017 y primeras horas de la mañana del primero de abril de 2017, fuertes lluvias causaron el desbordamiento de los ríos Mocoa, Mulata y Sangoyaco en el departamento del Putumayo, Colombia. Los desbordamientos causaron grandes movimientos de tierra y de lodo los cuales arrasaron gran parte de la zona urbana de Mocoa costando la vida de más de 330 personas, desapareciendo a cientos de personas y afectando a más de 40 mil personas. El presente capítulo aplica el modelo Pressure and Release para entender cuáles fueron las relaciones entre peligros y vulnerabilidades que destruyeron las poblaciones de Armero y Mocoa. Posteriormente, se realizó una comparación entre los desastres concluyendo que persisten fallas en acciones de mitigación las cuales aumentan la progresión de la vulnerabilidad de las poblaciones en riesgo. Adicionalmente, se observó que la respuesta a desastres ha mejorado considerablemente; sin embargo, falta establecer mecanismos efectivos de cooperación entre entidades estatales, nacionales, con entidades locales e internacionales.

Palabras clave: desastre de Armero, desastre de Mocoa, modelo Pressure and Release, vulnerabilidad, gestión del riesgo.

Analysis of the Armero 1985 and Mocoa 2017 disasters in Colombia using the Pressure and Release model

Abstract

On November 13, 1985, the Nevado del Ruiz Volcano, located in Tolima, Colombia, erupted, affecting several neighboring towns, including Armero. This volcanic eruption has been one of the disasters with the most significant human losses worldwide, resulting in approximately 23 thousand deaths. On the other hand, during the night hours of March 31, 2017, and early morning hours of April 1, 2017, heavy rain caused the overflowing of the Mocoa, Mulata, and Sangoyaco rivers in the department of Putumayo, Colombia. The overflows caused large movements of earth and mud, which reached a large part of the urban area of Mocoa, costing the lives of more than 330 people, hundreds more missing, and affecting more than 40 thousand people. This chapter applies the Pressure and Release model to understand the relationships between hazards and vulnerabilities in the Armero and Mocoa disasters. In addition, by comparing the disasters, we found persistent failures in mitigation activities that increase the progression of the vulnerability of the populations. Additionally, we found that the response to disasters has improved considerably. However, there is a need to establish effective cooperation mechanisms between national and local state entities.

Keywords: Armero disaster, Mocoa disaster, Pressure and Release model, vulnerability, risk management.

1. INTRODUCCIÓN

Piers Blaikie, Ben Wisner, Terry Cannon y Ian Davis desarrollaron en 1994 el modelo *Pressure and Release* (PAR) y lo presentaron en el libro *At Risk: natural hazards, people's vulnerability and disasters* [1]. El modelo analiza el riesgo de sufrir un desastre en términos de los peligros que lo originan y la vulnerabilidad de la población que se afecta ante la ocurrencia del desastre. En otras palabras, para los autores los desastres son el resultado de la interacción entre peligros y vulnerabilidad. La **Figura 1** muestra cómo el modelo PAR explica la progresión de la vulnerabilidad en términos de causas raíz, presiones dinámicas y condiciones inseguras.

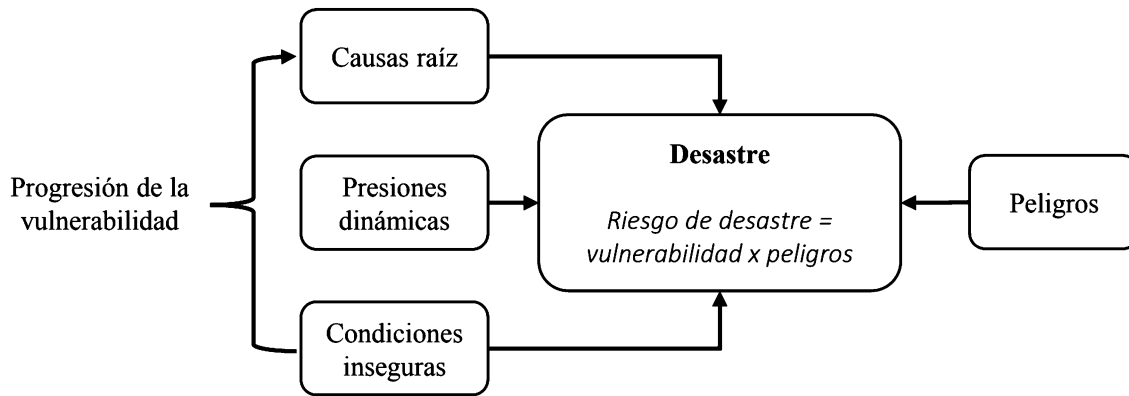


Figura 1. Estructura general del modelo PAR, adaptado de Blaikie, et al. [1].

Las causas tienen relación con las características propias de un grupo social y potencian el peligro al que se expone la población. Dichas características pueden ser sociales, económicas, demográficas, solo por mencionar algunas de ellas, y son el resultado de sistemas políticos o económicos. Por otra parte, las presiones dinámicas son el puente conector entre las causas y las condiciones inseguras y permiten establecer cómo las presiones se reflejan en el grupo social estudiado. El último aspecto incluido en el modelo PAR para explicar la vulnerabilidad de la población son las condiciones inseguras. Estas hacen referencia a situaciones tangibles e intangibles a las que se exponen las personas en su diario vivir y que tienen el potencial de incrementar su vulnerabilidad. La **Figura 2** muestra las distintas categorías dentro de los elementos del modelo PAR las cuales aplican para los desastres estudiados. El objetivo de este capítulo es mostrar la aplicación del modelo PAR en dos casos de estudio. Es de resaltar que nos enfocamos en la aplicación del modelo y no en su fundamentación teórica. El lector interesado en el marco teórico del modelo PAR puede consultar la referencia [1].

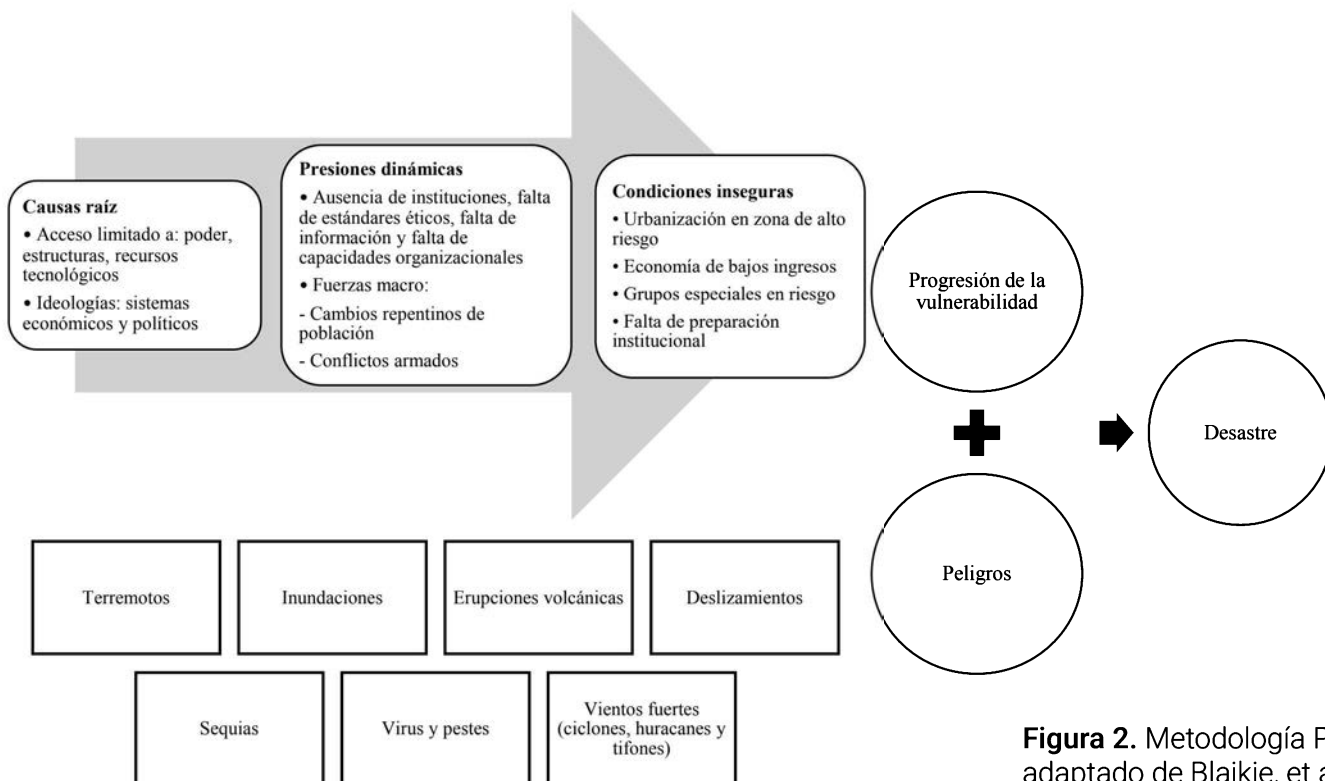


Figura 2. Metodología PAR, adaptado de Blaikie, et al.[1]

El modelo PAR se ha utilizado para analizar varios desastres en el mundo. Por ejemplo, el modelo fue aplicado para estudiar las epidemias en Kerala, India [2]. En ese trabajo el autor demostró que varios aspectos sociales, económicos y ecológicos propios de esa zona de estudio juegan un rol importante al incrementar el factor de vulnerabilidad. Por otra parte, el autor concluye que cualquier intento de prevención y mitigación en salud pública debe estar dirigido a la reducción de la vulnerabilidad. Adicionalmente, se utilizó el modelo PAR para estudiar los riesgos de desastres causados por inundaciones y deslizamientos en Brunéi, Asia [3]. Los autores concluyeron existe una percepción errónea de bajo riesgo en el país asiático, debido a que este no reporta la totalidad de los desastres en bases de datos internacionales. Lo anterior ocasiona que los riesgos y la vulnerabilidad se incrementen debido a que no existen estrategias de mitigación y adaptación efectivas ante eventos recurrentes de baja magnitud. Recientemente Mustofa y Cirella utilizaron el modelo PAR para evaluar cómo las situaciones sociopolíticas aumentan el riesgo de desastres [4]. Para ello utilizaron como casos de estudio los desastres causados por el tsunami del océano Índico del 2004 y el terremoto de Haití en 2010. Los autores concluyen que en las zonas estudiadas los impactos fueron mayores debido a las situaciones sociopolíticas que vivían en ese entonces.

A pesar del gran potencial del modelo PAR para analizar los riesgos de desastres, no encontramos a la fecha literatura la aplicación de este modelo en el contexto colombiano. En este trabajo estudiamos los desastres causados por la erupción volcánica de Armero en 1985 y por las inundaciones y deslizamientos de Mocoa de 2017. Mediante este trabajo, se quiere dar respuesta a las siguientes hipótesis/preguntas de investigación:

- 1) ¿Es el modelo PAR una herramienta apropiada para analizar la presión de la vulnerabilidad en desastres significativos en la historia de Colombia?
- 2) ¿Es posible generar lecciones aprendidas que puedan ser un insumo para políticas de gestión de desastres en el país a través de la aplicación del modelo PAR?

Las contribuciones de este capítulo de libro se presentan en la **Caja 1**.

Caja 1. Contribuciones al estado del arte en gestión de desastres

- Presentar la aplicación del modelo PAR a dos de los desastres más significativos de la historia colombiana.
- Realizar la comparación de la progresión de la vulnerabilidad en ambos desastres.
- Consolidar las lecciones aprendidas de la mitigación y la respuesta a la luz del modelo PAR, identificando oportunidades de mejora para disminuir la progresión de vulnerabilidad que puedan ser aplicadas por el sistema Nacional de Gestión de Riesgo de desastres colombiano.

El resto del capítulo del libro se organiza de la siguiente manera. En la Sección 2 se presenta la metodología de selección de los documentos insumo para aplicar el modelo PAR. En las Secciones 3 y 4 se aplica la metodología PAR para analizar los desastres de Armero y Mocoa, respectivamente. La Sección 5 compara y discute los hallazgos de la aplicación del modelo PAR a los casos de estudio, y finalmente, la Sección 6 presenta las conclusiones y recomendaciones del trabajo.

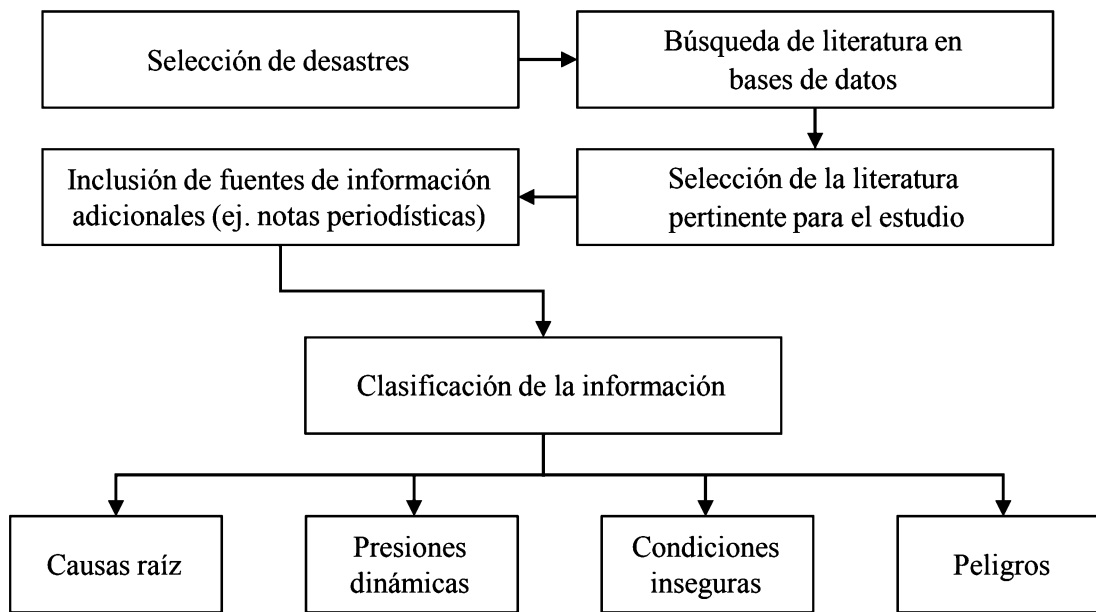


Figura 3. Metodología de revisión documental.

2. MODELO PAR APLICADO AL DESASTRE DE ARMERO DE 1985

Debido a su localización geográfica, Colombia se expone a diversas amenazas naturales como lo son terremotos, inundaciones, volcanes y deslizamientos de tierra. El Banco Mundial en su reporte *Natural Disaster Hotspots A Global Risk Analysis* menciona a Colombia como uno de los nueve países donde los volcanes son peligros concentrados en términos de área y población, junto con Japón, Filipinas, Indonesia, Estados Unidos, México, Centroamérica, Ecuador y Chile [5]. A continuación, se presenta una caracterización del desastre y luego se analiza la progresión de la vulnerabilidad al estudiar sus causas raíz, presiones dinámicas y las condiciones inseguras que dieron lugar al desastre.

2.1 Caracterización del desastre

The international Disaster Database del Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED) presenta la erupción de un volcán en Colombia el 13 de noviembre de 1985 como el segundo desastre volcánico que ha ocasionado más pérdidas humanas (21.800 personas) en el periodo comprendido entre 1900 y el 2021 [6]. Dicha erupción corresponde a la del Volcán Nevado del Ruiz por detrás de la erupción del Monte Pelée en Martinica, que dejó alrededor de 30 mil fallecidos en 1902. El volcán Nevado del Ruiz se ubica en el departamento del Tolima el cual contaba en 1985, año de la tragedia, con una población total de 1,245,631 personas de acuerdo con el Departamento Nacional de Estadísticas (DANE) [7]. Dicho volcán se localiza a 4,937 metros de altura sobre el valle donde se encontraba construido el municipio de Armero [8].

El Banco Mundial realizó la distribución del riesgo volcánico en términos de pérdidas económicas [5]. Vale la pena resaltar que el departamento del Tolima, donde se encuentra Armero, está en la escala más alta de riesgo asociado con pérdidas económicas [8-10]. De acuerdo con información del Servicio Geológico Colombiano, durante el periodo comprendido entre los años 1595 y 1985 el

volcán Nevado del Ruiz registró siete eventos considerables previos al desastre de noviembre de 1985 [9], indicando que el volcán estaba activo. Inclusive esos eventos causaron la muerte de aproximadamente mil personas.

El periodista Renny Rueda Castañeda describe en su blog del periódico El Espectador la evolución de la tragedia [10], la cual se resume en la **Caja 2**.

Caja 2. Evolución de la tragedia de Armero

- A las 3 de la tarde del 13 de noviembre de 1985, en el Volcán Nevado del Ruiz se presentaron anormales detonaciones que indicaban que la erupción estaba a punto de comenzar.
- El alcalde de Armero, Ramón Rodríguez, enterado de la gravedad de la situación, envía una comisión encargada de verificar el estado del Rio Lagunilla, que conectaba a Armero con el nevado. La afluente del Rio Azufrado y Lagunilla, lentamente, y durante horas, almacenó más de 200 millones de metros cúbicos de Lodo, material volcánico, agua de los ríos y el nevado, y restos vegetales, que al desatarse formaban olas de hasta treinta metros de altura, acumuladas de forma desigual a lo largo del cañón.
- A las 9:29 de la noche, el volcán emite una fuerte explosión, iluminando las cercanías a pesar de la pesada niebla que le rodeaba.
- A las 11:15 de la noche el alcalde reportó a las autoridades de emergencia, que el agua entraba precipitadamente a su vivienda.
- Desde las 11 de la noche, completando un recorrido de 48 kilómetros, el lodo y los residuos volcánicos, devastaron Armero, avanzando a una velocidad de más de 43 kilómetros por hora, cegando la vida a más de sus 23 mil pobladores, y configurando en medio de la noche, entre sofocados gritos de los habitantes del municipio, un panorama de cuerpos mutilados, inidentificables figuras, lodo y escombros.
- A las 11:28 de la noche, desde Bogotá, se perdió comunicación con los esfuerzos de radioaficionados en Armero.”

La erupción volcánica estuvo acompañada de agua (resultado del descongelamiento del nevado) y deslizamientos, los cuales generaron una mezcla de lodo, ceniza, y residuos que inundaron la población de Armero. La zona geográfica (localización y características) es uno de los principales aspectos que incrementa el impacto generado por un peligro natural.

Coppola en su libro *Introduction to International Disaster Management* presenta una descripción de cómo realizar la identificación y el análisis de los peligros naturales [11]. Si bien es cierto que Instituto Colombiano de Geología y Minería, INGEOMINAS, contaba con un mapa de peligro para el Volcán Nevado del Ruiz, el mapa no consideraba Armero como una de las posibles zonas en peligro en el caso de una erupción volcánica [12]. Identificado el peligro al que se exponía Armero. A continuación, se presenta el análisis de la progresión de la vulnerabilidad de la población de Armero respecto a sus causas raíz, presiones dinámicas y condiciones inseguras.

2.2 Causas raíz de la tragedia de Armero

El acceso limitado al poder, a las estructuras y a los recursos junto con ideologías políticas y económicas son los principales aspectos identificados en el modelo PAR como parte de las causas raíz que generan vulnerabilidad. En el caso particular de la tragedia de Armero se resalta lo siguiente.

Acceso limitado a recursos tecnológicos. Un grupo de expertos de la Central Hidroeléctrica de Caldas visitó el volcán Nevado del Ruiz después de que se percibieran algunos temblores en la zona. Como resultado de dicha visita, en febrero de 1985, se hizo evidente la necesidad de contar con cinco sistemas de registro sismológico, ubicados en lugares estratégicos, que monitorearán la actividad del volcán [10,12,13]. Dicho grupo de expertos reportó que el único equipo que estaba realizando dicha labor había dejado de funcionar en el mismo mes. Voight menciona que Minard Hall en representación de la Organización Mundial de Observatorios Vulcanológicos (WOVO, por sus siglas en inglés) y de la Organización de las Naciones Unidas para la Ayuda en Casos de Desastre (UNDRO, por sus siglas en inglés) visitó el volcán en mayo y manifestó su preocupación por que no se habían iniciado las actividades de monitoreo [12].

2.3 Presiones dinámicas de la tragedia de Armero

Los principales aspectos que el modelo PAR menciona, como parte de las presiones dinámicas, son la ausencia de instituciones, inversiones y mercados locales; entrenamiento y habilidades adecuadas de la población expuesta al riesgo, y estándares éticos. En el caso particular de la tragedia de Armero se identifican las siguientes:

Ausencia de instituciones locales. El alcalde de Armero, en 1985, manifestó en una entrevista que el comité de emergencia no tenía la información ni la capacidad económica necesaria para reaccionar frente a una catástrofe [12].

Falta de capacidades organizacionales. En el caso de Armero, la falta de mecanismos y capacidades de colaboración y coordinación para la articulación intersectorial entre instituciones estatales causó deficiencias en la etapa de respuesta. Por ejemplo, Treaster describe cómo la Cruz Roja requirió sin respuesta alguna a las fuerzas militares de Colombia una bomba de agua para ayudar a una de las víctimas del desastre [14]. Se trataba de la niña Omaira Sánchez, quien se encontraba atrapada por escombros y sumergida en agua turbia del cuello para abajo. A pesar de las recomendaciones de expertos nacionales e internacionales, es evidente que el monitoreo de la actividad del Nevado no se realizó de manera oportuna, ni con la tecnología necesaria. No es un objetivo de este capítulo de libro identificar responsables de dicha situación. Sin embargo, se hace necesario resaltar la importancia de realizar las gestiones o procesos requeridos para fomentar la colaboración y coordinación para contar con los recursos necesarios que permiten disminuir la vulnerabilidad de la población, realizando actividades antes de la ocurrencia del desastre. Por otro lado, el reto de fomentar la colaboración entre las fuerzas militares colombianas con la Cruz Roja para rescatar a Omaira Sánchez son un ejemplo de lo expresado por Hannigan en su libro *Disasters without Borders* [15]. En el libro, el autor menciona que los actores, nacionales e internacionales, que intervienen en la atención de un desastre muchas veces tienen dificultades de comunicación y organización entre ellos.

Falta de acceso a información. Los medios de comunicación no alertaron a la población sobre los peligros que la erupción traería. Treaster reportó que Alirio Oliveros, uno de los sobrevivientes, manifestó: “el gobierno no prestó atención alguna al pueblo. Yo escuché la radio y allí decían que no existía ningún peligro” [14]. Por otra parte, Hall relata cómo el periódico *La Patria* publicó el 7 de

mayo de 1985 una entrevista donde se resalta la seriedad de la situación del Volcán e invita al gobierno a obtener los equipos necesarios para observar la actividad volcánica [13].

Falta de estándares éticos. Desde 1965 el Movimiento Internacional de la Cruz Roja y de la Media Luna Roja declaró siete principios fundamentales de la ayuda humanitaria, entre ellos la humanidad, como estándar de ética. Este principio prevé que la acción humanitaria debe prevenir y aliviar el sufrimiento de los hombres en todas las circunstancias, proteger la vida y la salud, así como a hacer respetar a la persona humana [16].

Hall resalta como en la investigación realizada por la revista EPOCA se evidencia la burocracia en el gobierno colombiano [13]. Por lo tanto, hay falta de correspondencia entre el principio de humanidad y la burocracia y negligencia de las instituciones. Dicha evidencia es soportada de la siguiente manera: “en junio 26 de 1985, el embajador de Colombia en la UNESCO envía una carta al embajador de relaciones exteriores de Colombia donde le informa que lo único necesario para obtener ayuda técnica internacional es una carta del gobierno colombiano solicitando de manera formal dicha ayuda. Sin embargo, la carta apareció en el ministerio de educación dos meses después de que el embajador la envió”

Estrategia, poder, orgullo nacional, burocracia y aversión al riesgo son expuestos por Hanningan como algunos de los aspectos que usan los gobiernos al momento de aceptar o rechazar ayudas internacionales [15]. En el caso colombiano, se evidencia la burocracia como un factor limitante para obtener ayudas tecnológicas.

2.4 Condiciones inseguras de la tragedia de Armero

El modelo PAR menciona como principales categorías de las condiciones inseguras, las relacionadas con: el entorno, la economía local, las relaciones sociales y las instituciones. En el caso particular de la tragedia de Armero, se identifican las siguientes condiciones inseguras:

Entorno: urbanización en zona de alto riesgo. Como se resaltó anteriormente, debido a la actividad histórica del volcán Nevado del Ruiz, este era un peligro natural potencial para las poblaciones de la zona. Adicionalmente, en [8,12,17] se resalta que como resultado de las erupciones en los años de 1595 y 1845 se produjeron 636 y 1.000 personas muertas, respectivamente. Por otro lado, Kelman y Marther argumentan como el urbanizar en una zona volcánica representa oportunidades económicas y cómo es posible establecer un balance entre el riesgo y el desarrollo socio económico [18]. Adicionalmente, la actividad económica desarrollada en la zona volcánica motivó a la comunidad a habitar una zona de alto riesgo situación que debió ser controlada por el gobierno local, regional y nacional. Desafortunadamente, las personas que asumieron el riesgo de vivir en esa zona no hicieron un adecuado balance entre los riesgos y los beneficios.

Economía local: fuentes de ingreso en riesgo. La erupción del volcán destruyó el 60% del ganado de la región; el 30% de los cultivos de sorgo y arroz; medio millón de bultos de café; 3.400 hectáreas de tierra agrícola; 50 escuelas; 2 hospitales; 5.092 casas; 58 plantas industriales; y 343 establecimientos comerciales de acuerdo con Voight [12].

Adicionalmente, se estima que la erupción del volcán causó daños en actividades económicas primarias y secundarias por \$834.4 millones de pesos colombianos y en sistemas productivos por \$12,000 millones de pesos colombianos [19]. Sin duda alguna, el gran impacto de la tragedia cambió las dinámicas económicas en la zona. Armero pasó de ser un núcleo económico y un polo de desarrollo regional a ser una zona con altos niveles de desempleo que añora la alta productividad y el elevado nivel tecnológico previo al desastre [20].

Relaciones sociales: grupos especiales en riesgo. Si bien es cierto que todos los grupos sociales fueron afectados por el desastre, a manera de ejemplo se quiere resaltar el caso particular de los niños de Armero. Ellos se convirtieron en una población que estuvo expuesta a altos riesgos debido a la intensidad de la erupción volcánica, así como de los procedimientos de rescate. De acuerdo con Garibello, el Instituto Colombiano de Bienestar Familiar (ICBF) y la Fundación Armando Armero investigaron el futuro de varios niños que quedaron a la deriva después de la tragedia [21]. Cerca de 80 familias tienen indicios de que sus niños se encuentran con vida y que fueron entregados en adopción o vendidos a otras familias. El ICBF cuenta con el registro de cerca de 250 niños que fueron recibidos por el Instituto.

Algunos de ellos fueron entregados a sus familias y otros en adopción. La información de los niños entregados en adopción se ha mantenido en reserva a lo largo de 27 años, en un libro conocido como el libro rojo. En cuanto a la información de otros niños que no fueron entregados al ICBF el director de Protección del Bienestar Familiar, Camilo Andrés Domínguez, dice “la emergencia fue atendida por organismos de socorro, ONG y manos privadas que llegaron allá. Fue un enorme propósito proteger a los niños, pero muchos de ellos no pasaron por el ICBF”.

Preparación inadecuada de las instituciones para reaccionar ante una erupción. Voight menciona que Bruno Martinelli, quien representaba a *the Swiss Disaster Relief Corps and Swiss Seismological Service*, mencionó la existencia de una rivalidad entre el Comité Nacional de Emergencia colombiano de la época e INGEOMINAS [12]. Adicionalmente, el autor menciona que no eran claras las responsabilidades de cada institución. La principal consecuencia de dicha rivalidad fue que no se compartió información indispensable para realizar actividades previas a la erupción, que permitieran a los cuerpos de rescate y a la comunidad estar preparados para reaccionar correctamente a la tragedia.

3. MODELO PAR APLICADO AL DESASTRE DE MOCOA DE 2017

Mocoa es una ciudad ubicada en la parte sur de Colombia, cerca de las fronteras con Ecuador. Es la capital del Putumayo, un departamento fuertemente afectado por décadas de conflicto armado. De acuerdo con el DANE, a la fecha del desastre, la ciudad contaba con una población total aproximada de 43 mil habitantes de los cuales, cerca del 82% vivían en el área urbana [7]. Adicionalmente, se estima que aproximadamente el 60% de su población es desplazada de la violencia [22]. Históricamente, Mocoa ha atravesado múltiples retos y complejas dinámicas sociales, económicas y políticas las cuales aumentan la vulnerabilidad de la población. Por otra parte, de acuerdo con el Mapa Nacional de Amenaza por Movimientos en Masa realizado por el Servicio Geológico Colombiano, gran parte del municipio está en amenaza de nivel alto o muy alto frente a movimientos en masa [23]. Lo anterior, convirtió a Mocoa en un escenario de alto riesgo y alta vulnerabilidad [24], lo que desencadenó una de las tragedias más grandes de la historia reciente colombiana. A continuación, se realiza una descripción del desastre y luego se estudia la progresión de la vulnerabilidad respecto a sus causas raíz, presiones dinámicas y condiciones inseguras.

3.1 Descripción del desastre de Mocoa

Entre la noche del 31 de marzo y la madrugada del 1 de abril de 2017, fuertes movimientos de tierra y lodo ocurrieron en Mocoa destruyendo gran parte de su área urbana. Esos movimientos fueron causados por lluvias torrenciales que se extendieron por 4 días consecutivos seguidos por una fuerte lluvia la noche del evento [25]. El desastre dejó 332 muertos, 398 heridos, 77 desaparecidos, más de 22 mil personas

damnificadas y 48 barrios afectados [26]. De acuerdo con The international Disaster Database del Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED), el desastre de Mocoa en 2017 ocupa el puesto 24 dentro de los deslizamientos con más víctimas fatales en el periodo desde 1900 hasta 2021 en todo el mundo [6]. Vale la pena resaltar que la categoría de deslizamientos incluye avalanchas, hundimientos, deslizamientos de montaña y deslizamientos de lodo. El periódico El Tiempo recolectó testimonios de varios habitantes de Mocoa los cuales describieron las primeras horas de la emergencia [27], como se aprecia en la **Caja 3**.

Caja 3. Evolución de la tragedia de Mocoa

- Sobre las 10 de la noche del viernes 31 de marzo, comenzó un impresionante aguacero el cual estuvo precedido por varios días de lluvias.
- Sobre la media noche, los ríos que atraviesan Mocoa (Mulato, Mocoa, y Sangoyaco) y varias quebradas como la Taruca desplazaron toneladas de lodo sobre la zona urbana sepultando barrios enteros.
- Algunas personas lograron escapar de la ciudad antes que las vías de escape fueran bloqueadas por el desastre. Otras personas lograron salir de sus hogares a la calle, las cuales dieron testimonio de ríos de barro y de gente gritando de miedo.
- Después del gran desplazamiento de lodo, los primeros reportes oficiales realizados por el Comando General de las Fuerzas Militares reportaban al menos doscientas víctimas fatales, con cientos de personas desaparecidas.
- La gobernadora de la época en el Putumayo, Sorrel Aroca, informa que en la zona del desastre no hay suministro de energía eléctrica ni de gas, adicionalmente el acueducto quedó bastante afectado.
- La plaza de mercado (centro de acopio de alimentos) fue devastada afectando el abastecimiento de alimentos en medio de la emergencia.
- Desde las primeras horas del sábado, personal de socorro de la Policía y Fuerzas Militares fueron movilizados para hacerle frente a la emergencia.
- En horas de la mañana, el presidente de ese entonces, Juan Manuel Santos, se desplazó a la zona y declaró el estado de calamidad.
- Adicionalmente, el gobierno colombiano activó el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres para atender la emergencia.

La **Figura 4** muestra como los deslizamientos afectaron y sepultaron gran parte de la zona urbana de Mocoa. A continuación, se realiza el análisis de la progresión de la vulnerabilidad resaltando las principales causas raíz, presiones dinámicas y condiciones inseguras que desencadenaron la tragedia.



Figura 4. Afectación del área urbana de Mocoa. Fuente: UNGRD [28].

3.2 Causas raíz del desastre de Mocoa

El modelo PAR determina como causas raíz a los factores que aumentan la vulnerabilidad de las poblaciones. Estos suelen ser procesos económicos, demográficos y políticos que afectan la distribución de recursos dentro de los grupos sociales. Adicionalmente, las causas raíz también se relacionan con la función estatal, y el control ejercido por las instituciones. Las principales causas raíz que se identificaron para el desastre de Mocoa son las siguientes.

Acceso limitado a recursos. Mocoa, a la fecha del desastre, no contaba con los sistemas y equipos necesarios para afrontar un desastre de esta magnitud. De acuerdo con declaraciones del entonces secretario de gobierno de Mocoa, Eduardo Alfredo Jiménez, cuando ocurrió la tragedia Mocoa no contaba con los equipos de monitoreo que permitieran contar con alertas tempranas frente a estos deslizamientos [27]. Por otra parte, Siddiqui, Peers & Zulver resaltan la ausencia de medidas de disminución del riesgo de desastres en Mocoa previo a la ocurrencia del desastre [29].

Ideologías: sistemas políticos. Otra causa raíz que incrementó la progresión de la vulnerabilidad en Mocoa fue la inestabilidad social y política de la zona. Como se resaltó anteriormente, el departamento del Putumayo, de donde Mocoa es la capital, ha sido uno de los más afectados por décadas de conflictos armados. Adicionalmente, en noviembre de 2016, meses antes del desastre, el gobierno colombiano y el grupo insurgente Fuerzas Armadas Revolucionarias de Colombia (FARC) firmaron un acuerdo de paz poniendo fin a 52 años de conflicto [30]. Esto genera complejidades de gobernanza en la zona para el gobierno nacional, lo cual genera vulnerabilidades en la población y problemas en la distribución de recursos en la población.

3.3 Presiones dinámicas del desastre de Mocoa

De acuerdo con el modelo PAR, las presiones dinámicas corresponden a los procesos que llevan las causas raíz a las condiciones inseguras. A continuación, se describen las principales presiones dinámicas que aumentaron la vulnerabilidad de la población de Mocoa.

Fuerzas macro: cambios rápidos en la población. Una importante presión dinámica para este caso de estudio es la forma en que la composición poblacional de Mocoa cambió durante los últimos años. Ejemplo de lo anterior son las comunidades enteras que fueron víctimas de desplazamiento en zonas rurales cercanas, las cuales llegaban a Mocoa. Debido al anterior fenómeno, el 60% de la población de Mocoa correspondía a desplazados [22].

Fuerzas macro: conflictos armados. La violencia en zonas rurales del departamento del Putumayo y otros departamentos del sur del país corresponde a una de las más importantes presiones dinámicas para este desastre. Incluso en la segunda edición del libro en el cual se introduce el modelo PAR, se menciona como ejemplo de presiones dinámicas a la violencia rural y a la marginalización urbana en Colombia [1]. Según los autores, el desplazamiento forzado en donde los habitantes de zonas rurales son obligados a dejar sus tierras y deben irse a vivir a zonas urbanas bajo condiciones precarias, aumenta la vulnerabilidad de la población. Lo anterior corresponde sin duda alguna con el caso de Mocoa.

4.4 Condiciones inseguras del desastre de Mocoa

Siguiendo con el marco teórico del modelo PAR, las condiciones inseguras son las formas específicas en las que la vulnerabilidad de la población es expresada en el tiempo y en el espacio del peligro del desastre. A continuación, se presentan las principales condiciones inseguras del desastre de Mocoa.

Relaciones sociales. Grupos especiales en riesgo. De acuerdo con datos de la Red Nacional de Información Unidad para las Víctimas citados en [26], una gran parte de la composición poblacional de Mocoa corresponde a víctimas del desplazamiento forzado a causa de conflictos armados. Adicionalmente, un 11% de la población de Mocoa es población indígena asentada en múltiples resguardos a lo largo del territorio. Estos grupos pueden considerarse en riesgo, debido a que sus asentamientos y condiciones económicas y sociales no les permiten hacer frente a los desastres. Un ejemplo de lo anterior es que, de las 222 comunidades indígenas registradas en el departamento, 78 de ellas (desplazadas de otros departamentos) fueron damnificadas por la avalancha [31]. Estas comunidades no cuentan con redes de apoyo que les permitan hacer frente a estos grandes desastres.

Entorno: urbanización en zona de alto riesgo. De acuerdo con el plan para la reconstrucción del municipio de Mocoa, documento CONPES 3904 el cual incluye un análisis de Mocoa antes del desastre, en la ciudad existían múltiples asentamientos periurbanos [26]. Estos asentamientos se caracterizan por estar en zonas de alto riesgo y en condiciones de precariedad. Lo que sin duda es una condición insegura que desencadenó que estas infraestructuras fueran arrasadas por el deslizamiento.

Preparación inadecuada de las instituciones para reaccionar ante el desastre. Se destaca como condición insegura detonante del desastre de Mocoa en 2017 y que puede presentarse en otras zonas vulnerables del país, la no existencia de mecanismos efectivos de coordinación entre actores en caso de posibles desastres. Kuipers, Desportes and Hordijk estudiaron la fase de respuesta en el Mocoa respecto a las contribuciones de los distintos actores y partes interesadas [32]. En ese estudio se concluyó que en la fase de respuesta hubo tensiones y confrontaciones entre los actores afectando la respuesta al desastre. Adicionalmente, en el estudio encontraron que los actores estatales nacionales no contaron con la confianza y legitimidad por parte de la población en Mocoa. Además, los actores locales, los

cuales contaban con la confianza de la población, carecían de recursos y capacidad para actuar, lo que causó subutilización de sus fortalezas. Un claro ejemplo de lo anterior fue que el gobierno nacional tomó el liderazgo de la planeación de la reconstrucción de Mocoa dejando a un lado al gobernador del Putumayo y al alcalde de Mocoa, de acuerdo con Ávila Cortés [32]. Esto le quitó capacidades de actuación a los líderes de elección popular locales, lo que socavó la confianza y legitimidad de los actores estatales nacionales con la población local. A continuación, se discuten los principales hallazgos de la aplicación del modelo PAR en los casos de estudio de los desastres de Armero y Mocoa.

4. COMPARACIÓN Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

En 1985 Colombia contaba con instituciones como el comité de emergencia, INGEOMINAS y la defensa civil que podrían haber trabajado de manera conjunta para realizar actividades previas a la ocurrencia del desastre de Armero. Sin embargo, la burocracia, la centralización del gobierno, la ausencia de conocimiento, tecnología y recursos económicos, así como la no definición de líneas de mando, responsabilidades y procedimientos claros hicieron que dichas instituciones no actuarán un paso delante de la erupción del volcán. Adicionalmente, dos aspectos que incrementaron la vulnerabilidad de la población de Armero, potenciando así el riesgo, fueron: 1) la falta de conocimiento del riesgo puesto que el mapa de riesgo realizado por INGEOMINAS no consideraba que Armero estuviera en peligro ante una posible erupción volcánica, y 2) falta de comunicación hacia la población, dado que la información proporcionada por los medios de comunicación manifestaba que no había un peligro inminente. Esto sumado a la ubicación de la población de Armero, en el valle y junto al río Lagunilla, causó que el pueblo y la población fueran enterrados entre cenizas volcánicas, lodo y agua que obligó a los cuerpos de atención y al gobierno a declarar la zona como tierra santa ante la imposibilidad de rescatar todos los cuerpos sin vida.

En 2017 aún persistían problemas respecto a la mitigación de los peligros frente a desastres naturales. Inclusive cuando el Servicio Geológico Colombiano tiene identificadas las zonas de alto riesgo de deslizamiento en el Mapa Nacional de Amenaza por Movimientos en Masa [23], varias regiones no realizan actividades de mitigación frente a posibles desastres. Además, persiste el reto de realizar las acciones correspondientes de mitigación y alerta temprana en Mocoa, Colombia. Las difíciles condiciones sociales, económicas y políticas de la población de Mocoa, el no contar con los equipos de alerta temprana, y la falta de acciones de mitigación aumentaron la vulnerabilidad de la población en el desastre.

Respecto a las actividades de atención y respuesta, se refleja la importancia de generar mecanismos formales y eficientes de coordinación, colaboración, gobernanza y liderazgo que fomenten el aprovechamiento de las capacidades nacionales y locales para dar una respuesta eficaz y transparente durante la atención de desastres.

Para el caso particular de Armero, la situación vivida por las familias que aún buscan los que en ese momento fueron sus niños es un claro ejemplo de cómo algunas instituciones aprovechan la coyuntura para obtener beneficios usando como fachada el deseo de ayudar a la población afectada. En el caso de Mocoa, las actividades de atención y respuesta fueron significativamente mejores al desastre de Armero y es un ejemplo del aumento de capacidades, institucionalidad y recursos económicos. Sin embargo, aún quedan espacios de mejora en la etapa de respuesta, en especial en establecer mecanismos efectivos de cooperación entre entidades estatales nacionales con entidades locales. De esa forma se aprovechan las

fortalezas de las entidades locales frente a escenarios de respuesta a desastres. Los retos de colaboración y coordinación en las cadenas de suministros humanitarias aún son objeto de investigación. El lector puede ver el trabajo de Prasanna & Haavisto [33] para ampliar este tema en particular.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Como resultado de la aplicación del modelo Pressure and Release a la tragedia de Armero y el desastre de Mocoa se concluye que los peligros asociados con la localización geográfica de las comunidades afectadas fueron potenciados por la vulnerabilidad socioeconómica y las acciones inseguras. Como se observa en la Tabla 1, existen aspectos comunes entre los dos casos de estudio como son el limitado acceso a la tecnología, la urbanización en zonas de alto riesgo y la falta de mecanismos de coordinación entre los actores involucrados en la respuesta y recuperación del desastre.

Tabla 1. Comparación de la aplicación del modelo PAR para la tragedia de Armero y el desastre de Mocoa.

Categoría	Factor 1	Factor 2	Armero	Mocoa
Causas raíz	Limitado	Acceso a recursos	Falta de actividades de monitoreo	Falta de actividades de monitoreo
	Ideologías	Sistemas políticos	No aplica	Complejidad de gobernanza
Presiones dinámicas	Ausencia	Instituciones locales	Comité de emergencia local sin empoderamiento	No aplica
		Capacidades organizacionales	Falta de comunicación y colaboración entre instituciones	No aplica
		Acceso a información	Falta de alerta temprana a la comunidad	No aplica
		Estándares éticos	Lentitud en la solicitud formal de ayuda internacional	No aplica
	Fuerzas Macro	Cambios rápidos en la población	No aplica	60% de los habitantes eran víctimas del desplazamiento armado
Conflicto armado		No aplica	Violencia en zonas rurales del departamento del Putumayo	

Condiciones inseguras	Entorno	Urbanización en zona de alto riesgo	La zona habitada ya había sido afectada por erupciones previas	Múltiples asentamientos periurbanos en condiciones de precariedad
	Economía	Fuentes de ingreso en riesgo	Fuerte impacto económico para la economía local	No aplica
	Relaciones sociales	Grupos especiales en riesgo	Los niños desaparecidos de Armero	60% de los habitantes eran desplazados y 11% indígenas
	Instituciones	Preparación inadecuada	Falta de mecanismos de coordinación entre los diferentes actores	Falta de mecanismos de coordinación entre los diferentes actores

Adicionalmente, esta comparación ilustra los avances que ha tenido Colombia en gestión del riesgo. Además, haciendo uso del modelo PAR se logró entender las causas raíz, las presiones dinámicas, y las acciones inseguras que generan vulnerabilidad para las comunidades, y que los actores locales pueden identificar para gestionar mejor su riesgo. Por lo anterior se concluye que el modelo PAR resultó ser una herramienta apropiada para analizar la presión de la vulnerabilidad en Colombia (primera pregunta de investigación/hipótesis).

Por otra parte, se ha demostrado que las políticas actuales han consolidado varias lecciones aprendidas frente al conocimiento, gestión de la respuesta a desastres y la gobernanza del riesgo. Este conocimiento del riesgo de desastre y lecciones aprendidas llevan a recomendar el desarrollo futuro de investigación interdisciplinar en temas de liderazgo, gobernanza y conocimiento del riesgo, así como en el desarrollo de mecanismos de coordinación y colaboración de las múltiples agencias (gubernamentales, ONGs, privadas, entre otras) puesto que se identifican estos elementos como las oportunidades de mejora en la gestión del ciclo del desastre (segunda pregunta de investigación/hipótesis).

PUNTOS CLAVE

1. Se ha mejorado en Colombia en la política de gestión de riesgos de desastres. Sin embargo, dada la complejidad, ambigüedad, volatilidad e incertidumbre de la gestión del riesgo, recomendamos trabajar aún en temas de liderazgo, gobernanza, conocimiento, colaboración y coordinación de operaciones.
2. El modelo PAR es un marco de referencia que ha sido utilizado en el mundo para estudiar la progresión de la vulnerabilidad respecto a las causas raíz, presiones dinámicas y condiciones inseguras. Este modelo resulta útil para estudiar otros desastres importantes de Colombia; por ejemplo, el desastre de Salgar, Antioquia en 2015. Aparte de evaluar la progresión de la vulnerabilidad en otros desastres, se pueden identificar lecciones aprendidas, causas raíz comunes y estrategias para la mitigación de futuros desastres.

RECOMENDACIONES PARA LA TOMA DE DECISIONES

1. En un país como Colombia que está expuesto a varias amenazas naturales, es importante realizar perfiles de cada uno de los riesgos, que incluyan los riesgos secundarios, como una primera etapa de mitigación.
2. El fortalecimiento de las entidades locales, regionales y nacionales en el tema de administración de desastres es indispensable en Colombia. Sin embargo, es importante resaltar que se deben fortalecer en los cuatro componentes del ciclo de gestión de un desastre: mitigación, preparación, respuesta y recuperación.
3. Es necesario establecer estructuras de mando que coordinen las organizaciones nacionales e internacionales, presentes después de un desastre, para facilitar las etapas de respuesta y recuperación.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores no declaran conflicto de intereses

CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA CRediT

Todos los autores contribuyeron a la conceptualización y desarrollo de este proyecto.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la Universidad de La Sabana y a MINCIENCIAS por la financiación del proyecto con el código INGPLHD-8-2018.

IDENTIFICACIÓN DE AUTORES

Diana M. Rodríguez-Coca <https://orcid.org/0000-0001-7452-7938>

Julián Alberto Espejo-Díaz <https://orcid.org/0000-0002-1919-2407>

William J. Guerrero <https://orcid.org/0000-0002-9807-6593>

BIBLIOGRAFÍA

1. Blaikie, P., Cannon, T., Davis, I., & Wisner, B. (1994). *At risk: Natural hazards, people's vulnerability, and disasters*. Taylor & Francis. <https://doi.org/10.4324/9780203428764>
2. Santha, S. D. (2009). A Malady amidst Chaos: Examining Population Vulnerability to the Chikungunya Epidemic in Kerala, India. *Loyola Journal of Social Sciences*, XXIII(2), 110–129
3. Ndah, A. B., & Odihi, J. O. (2017). A Systematic Study of Disaster Risk in Brunei Darussalam and Options for Vulnerability-Based Disaster Risk Reduction. *International Journal of Disaster Risk Science*, 8(2), 208–223. <https://doi.org/10.1007/s13753-017-0125-x>
4. Mustofa, I., & Cirella, G. T. (2022). *Understanding the Disaster Risk of Human Settlements: Case Research*. En Cirella, G.T. (Eds) *Human Settlements. Advances in 21st Century Human Settlements* (pp. 43–57). Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-16-4031-5_3
5. Dilley, M., Chen, R. S., Deichmann, U., Lerner-Lam, A. L., & Arnold, M. (2005). *Natural Disaster Hotspots: A Global Risk Analysis*. <https://doi.org/10.1596/0-8213-5930-4>
6. Guha-Sapir, D., Below, R., & Hoyois, P. (2009). *EM-DAT: The CRED/OFDA International Disaster Database*. <https://www.emdat.be/>
7. DANE (Departamento Administrativo Nacional de Estadística). (2020). *Proyecciones de Población*. <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/proyecciones-de-poblacion>
8. BBC news. (1985). *Volcano kills thousands in Colombia*. http://news.bbc.co.uk/onthisday/hi/dates/stories/november/13/newsid_2539000/2539731.stm
9. Servicio Geológico Colombiano. (2021a). *Actividad histórica - Volcán Nevado del Ruiz*. <https://www2.sgc.gov.co/sgc/volcanes/VolcanNevadoRuiz/Paginas/Actividad-historica.aspx>
10. Rueda Castaneda, R. (2010). Armero, la negligencia y la incomunicación una tragedia colombiana en replica permanente. En *Conyuntura Política* (Vol. 2013). El espectador. <http://blogs.elespectador.com/coyuntura-internacional/2010/11/14/armero-una-tragedia-colombiana-en-replica-permanente/>
11. Coppola, D. P. (2011). *Introduction to International Disaster Management, 2nd Edition*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-382174-4.00018-5>
12. Voight, B. (1990). The 1985 Nevado del Ruiz volcano catastrophe: anatomy and retrospection. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 44(3–4), 349–386. [https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/0377-0273\(90\)90027-D](https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/0377-0273(90)90027-D)
13. Hall, M. L. (1990). Chronology of the principal scientific and governmental actions leading up to the November 13, 1985 eruption of Nevado del Ruiz, Colombia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 42(1–2), 101–115. [https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/0377-0273\(90\)90072-N](https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/0377-0273(90)90072-N)
14. Treaster, J. (1985). Rescue teams call for help to save thousands trapped in colombian volcano mud; “we need people.” *The New York Times*. <http://www.nytimes.com/1985/11/16/world/rescue-teams-call-for-help-save-thousands-trapped-colombian-volcano-mud-we-need.html?pagewanted=1>
15. Hannigan, J. (2012). *Disasters Without Borders*. Polity Press.
16. Valladares, Gabriel Pablo. 2003. “Contribución Del Comité Internacional de La Cruz Roja (CICR) Al Proceso de Creación de La Corte Penal Internacional.” *Agenda Internacional* 9(18):121–44.
17. Malagon Castro, D. (1986). *El flujo de lodo en la región de Armero (Tolima-Colombia) caracterización y manejo inicial*. <http://cidbimena.desastres.hn/docum/crid/Volcanes/pdf/spa/doc8563/doc8563-a.pdf>
18. Kelman, I., & Mather, T. A. (2008). Living with volcanoes: The sustainable livelihoods approach for volcano-related opportunities. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 172(3–4), 189–198. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2007.12.007>

19. Celis Teresita. (2015, 13 de noviembre). “La Tragedia de Armero Le Costó Al País 2,05% Del Producto Interno Bruto de 1985.” *La República*, <https://www.larepublica.co/economia/la-tragedia-de-armero-le-costó-al-país-2-05-del-producto-interno-bruto-de-1985-2321931>
20. Redacción El Tiempo (1997, 13 de noviembre), Lo que perdió el Tolima en Armero. *El Tiempo*. <https://www.eltiempo.com/archivo/documento/MAM-670016>
21. Garibello, A. (2013, 5 de mayo). Se reabrirán los archivos para conocer qué pasó en Armero’: ICBF. *Editorial EL TIEMPO*. <https://www.eltiempo.com/archivo/documento/CMS-12781202>
22. Ávila Cortés Carolina, (2018, 13 de noviembre). *¿Qué está pasando con la reubicación de desplazados en Putumayo?* *Editorial El Espectador*, <https://www.elespectador.com/colombia-20/conflicto/que-esta-pasando-con-la-reubicacion-de-desplazados-en-putumayo-article/>
23. Servicio Geológico Colombiano. (2021b). *Sistema de Información de Movimientos en Masa*. <https://simma.sgc.gov.co/>
24. Espejo-Díaz, J. A., & Guerrero, W. J. (2021). A multiagent approach to solving the dynamic postdisaster relief distribution problem. *Operations Management Research*. <https://doi.org/10.1007/s12063-021-00192-1>
25. Prada-Sarmiento, L. F., Cabrera, M. A., Camacho, R., Estrada, N., & Ramos-Cañón, A. M. (2019). The Mocoa Event on March 31 (2017): analysis of a series of mass movements in a tropical environment of the Andean-Amazonian Piedmont. *Landslides*, 16(12), 2459–2468. <https://doi.org/10.1007/s10346-019-01263-y>
26. Departamento Nacional de Planeación. (2017). *CONPES 3904*. <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Económicos/3904.pdf>
27. Editorial EL TIEMPO. (2017, 2 de abril). *La avalancha que provocó la peor catástrofe en la historia de Mocoa*. <https://www.eltiempo.com/colombia/otras-ciudades/avalancha-en-mocoa-cifras-de-la-tragedia-y-causas-73984>
28. UNGRD (Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres). (2017). *Atención Av Torrencial Mocoa, Putumayo: Sobrevuelos*. <https://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/handle/20.500.11762/27037>
29. Siddiqi, A., Peters, K., & Zulver, J. (2019). *‘Doble afectación’: living with disasters and conflict in Colombia*. <https://doi.org/10.17863/CAM.50182>
30. Palomino, S., Lafuente J., (2016, 13 de noviembre). *El Gobierno de Colombia y las FARC logran un nuevo acuerdo de paz*. *Periodico el País* https://elpais.com/internacional/2016/11/12/colombia/1478980675_158573.html
31. Ávila Cortés, C. (2017, 23 de octubre), “Indígenas en Mocoa que lo perdieron todo”, *Editorial El Espectador*, <https://www.elespectador.com/colombia-20/conflicto/indigenas-en-mocoa-que-lo-perdieron-todo-article/>
32. Kuipers, E. H. C., Desportes, I., & Hordijk, M. (2019). Of locals and insiders. *Disaster Prevention and Management: An International Journal*, 29(3), 352–364. <https://doi.org/10.1108/DPM-12-2018-0384>
33. Prasanna, S. R., & Haavisto, I. (2018). Collaboration in humanitarian supply chains: an organisational culture framework. *International Journal of Production Research*, 56(17), 5611–5625. <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1475762>

CAPÍTULO
8

Imbricación cultural, espacial y psicosocial en la percepción del riesgo de desastres. Reflexiones sobre casos de estudio en Colombia

Luz Adriana Muñoz-Duque^{1*} & Óscar E. Navarro Carrascal²

¹Grupo de Investigación en Psicología Sociedad y Subjetividades, Facultad de Ciencias Sociales y Humanas, y Grupo de Investigación Salud y Ambiente, Facultad Nacional de Salud Pública, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.

²Profesor de Psicología Social y Ambiental, Universidad de Nîmes, Francia. Presidente de la Asociación Francesa de Psicología Ambiental, ARPEnv.

*Autor de contacto: Luz Adriana Muñoz-Duque.
Correo-e: luza.munoz@udea.edu.co

Resumen

La evaluación que las personas hacen de un riesgo obedece a la confluencia de diversos elementos conducentes a la construcción de juicios sobre la peligrosidad de una actividad, situación u objeto. Las percepciones del riesgo pueden impactar las decisiones de las personas, así como su preparación para hacer frente a las amenazas. El fenómeno de la percepción del riesgo comporta múltiples dimensiones y elementos constitutivos que han sido explorados por diversos autores, siguen siendo objeto de estudio y discusión. En este capítulo nos proponemos recoger algunas reflexiones derivadas de experiencias investigativas acerca de la percepción del riesgo de desastres en Colombia. Realizamos una reflexión que incorpora consideraciones de algunos estudios sobre el tema, en los que hemos participado en los últimos años, a propósito de los riesgos colectivos de inundación, deslizamiento, sequía e inundación costera. Sostenemos que existe la necesidad de considerar los aspectos que pueden tener influjo en la percepción del riesgo, condicionando sus dinámicas: unos asociados a las características de las situaciones riesgosas en sí mismas, y otros, psicosociales,

propios de las personas y de su interacción entre ellas y con el ambiente. Concluimos que la percepción del riesgo difiere de acuerdo con el tipo de riesgo del que se trate; asunto imbricado con elementos socioculturales, con la vinculación afectiva de las personas con sus lugares y con la confianza de estas en las instituciones competentes respecto de la gestión de estos riesgos. Recomendamos, para ampliar la comprensión de la respuesta social a los riesgos de desastre, considerar la necesaria integración de los niveles cultural, espacial y psicosocial que intervienen en su construcción.

Palabras clave: percepción del riesgo, características del riesgo, aspectos psicosociales, apego al lugar, confianza en las instituciones.

Cultural, spatial and psychosocial imbrication in disaster risk perception. Reflections on case studies in Colombia

Abstract

In people's risk evaluation various elements converge, which leads to establishing judgments about the dangerousness of activities, situations, or objects. Risk perceptions can impact people's decisions and their preparedness to deal with threats. The risk perception phenomenon involves multiple dimensions and constitutive elements by various authors, which must continue being a subject of study and discussion. In this chapter, we intend to collect some reflections derived from research experiences about disaster risk perception in Colombia. We did a reflection that incorporates considerations of some studies on the subject, in which we have participated in recent years, regarding the collective risks of flooding, landslides, drought, and coastal flooding. We maintain that there is a need to consider the aspects that influence the risk perception, conditioning its dynamics: some associated with characteristics of the risky situations themselves, and others, psychosocial, specific to people and their interaction with each other and the environment. We conclude that the risk perception differs according to the type of risk involved; this issue is imbricated with sociocultural elements, with the people's affective bond with their places, and with the trust in the competent institutions regarding the management of these risks. We suggest improving the understanding of the disaster risks social response, considering the required integration of the cultural, spatial, and psychosocial levels, which comprise its construction.

Keywords: Risk perception, risk features, psychosocial aspects, place attachment, trust management.

1. INTRODUCCIÓN

Un acontecimiento deviene amenaza en función de sus características, como también de la forma en que es percibido por los individuos. En este orden de ideas, la peligrosidad de un evento es susceptible de evaluarse cuando el individuo o la población están realmente expuestos a este, y tal exposición, que depende de las condiciones sociales y ecológicas de existencia, se asocia con la variabilidad de la percepción del riesgo. Un riesgo puede considerarse como tal a partir de la evaluación que los individuos hacen de él, la cual involucra las características físicas del fenómeno de referencia y elementos disposicionales de las personas, tanto como aspectos sociales y culturales. En este sentido, se trata de una evaluación que obedece a una confluencia de condiciones e informaciones disponibles, conducente a juicios sobre la peligrosidad del evento.

El estudio de la percepción del riesgo se ha centrado en los juicios de las personas acerca de los riesgos relacionados con su valoración de la peligrosidad de actividades consideradas como amenazantes, riesgos naturales o derivados del uso de tecnologías [1]. Estas percepciones pueden impactar significativamente las decisiones que las personas toman, y determinar su nivel de preparación para hacer frente a los peligros de manera efectiva y, en consecuencia, las respuestas que puedan dar ante un problema ambiental real [2,3]. En este sentido, la percepción del riesgo no está influenciada únicamente por factores de naturaleza técnica (estimaciones de probabilidad y magnitud del riesgo), sino por otros aspectos, como si se percibe justo o no que ciertos grupos estén sujetos al riesgo, si este es o no voluntario, si es visto por las personas como artificial o natural, como predecible, controlable, familiar [1,4].

Los conocimientos sociales respecto de las amenazas y la percepción del riesgo han sido objeto de interés de la psicología, ámbito desde el que varias teorías han sido útiles para estudiar y entender la manera como las personas evalúan (cogniciones), sienten (afectos) y experimentan las situaciones riesgosas, así como su comportamiento frente a estas. El paradigma psicométrico de la percepción del riesgo ha sido considerado como un enfoque dominante al respecto, el cual asume que el riesgo se define subjetivamente por los individuos a partir de un amplio conjunto de factores psicológicos, sociales, institucionales y culturales, y que por medio de estudios adecuadamente diseñados estos factores y sus relaciones pueden medirse en función de comprender las respuestas de los individuos y sus sociedades a los riesgos a los que se enfrentan [3]. Desde esta lógica se han intentado identificar y formalizar los factores que explican la variabilidad interindividual de la percepción del riesgo, esto es, los aspectos y mecanismos que subyacen a la aversión, la indiferencia, la aceptación de ciertos individuos hacia ciertos riesgos. Esta perspectiva también se ha interesado por las diferencias entre las opiniones expertas y no expertas respecto de una misma situación peligrosa, es decir, por la influencia de las características y la forma de los conocimientos en la percepción del riesgo.

Por su parte, el enfoque psicosocial del riesgo sugiere que la valoración de la peligrosidad de un suceso y de sus posibles efectos no solo está determinada por las condiciones objetivas de exposición. Estas percepciones están fundamentalmente influenciadas por el conocimiento social desarrollado en los intercambios sociales, a través de los medios de comunicación y la comunicación interpersonal [5]. La noción de percepción remite al orden de lo sensible, es un modo de conocimiento que define una relación fenomenológica con lo real, con lo que el sujeto experimenta a través de sus sentidos [6], pero lo real activado por la experiencia del sujeto también está determinado por las representaciones socialmente construidas, ya que la experiencia de lo real es el producto tanto de la actividad sensible del sujeto como de la actividad social. Holahan [7] sostiene que en la percepción sensorial influye parcialmente el conocimiento que las personas tienen sobre los riesgos, ya que lo que él llama “experiencia indirecta”; es

decir, las creencias populares, la información de los medios de comunicación y las opiniones socialmente compartidas, influyen fuertemente en la construcción de este conocimiento. En este sentido, el riesgo es inseparable de su contexto social y de su elaboración como objeto social a través de la cultura, la comunicación y la memoria colectiva [8].

En este capítulo nos proponemos recoger algunas reflexiones derivadas de procesos investigativos acerca de la percepción del riesgo de desastres en Colombia, incorporando consideraciones de algunos estudios sobre el tema, en los que hemos participado en los últimos años, a propósito de los riesgos colectivos de inundación, deslizamiento, sequía e inundación costera. Si bien se han publicado resultados previamente, pretendemos ocuparnos de reunir algunas comprensiones suscitadas por estas experiencias de pesquisa. Para estos efectos, tomamos en cuenta dos estudios realizados en el departamento de Antioquia, uno en un corregimiento del municipio de Venecia, particularmente con una población que habita cerca de la rivera del río Cauca y quienes han experimentado, de manera directa o indirecta, eventos de ocupación de aguas; este estudio empírico-analítico, llevado a cabo entre los años 2012 y 2013, hizo uso de instrumentos para la evaluación de la percepción del riesgo de inundación y otras variables como el apego al lugar y las estrategias de afrontamiento [9–11]. El otro, realizado en la ciudad de Bello en el año 2015 [12,13], se aproximó a 250 personas y también utilizó instrumentos para la evaluación, entre otros aspectos, de la percepción del riesgo de deslizamiento, el apego al lugar y el afrontamiento.

Otra investigación que tomamos en consideración es una llevada a cabo en Cartagena, con una perspectiva comprensiva, basada en el interaccionismo simbólico y cuyo objetivo fue identificar fenómenos asociados con la percepción de riesgo de inundación costera, integrando los niveles cultural, espacial y psicosocial; este estudio fue desarrollado entre los años 2016-2019 y recogió los relatos de 33 habitantes de la ciudad [14]. Allí también, y en el mismo lapso, se realizó una aproximación empírico-analítica, con la aplicación de instrumentos para la evaluación tanto de la percepción del riesgo como de otras variables (apego al lugar y afrontamiento) [13,15].

Finalmente, recogemos consideraciones de una investigación llevada a cabo en 2018 en la ciudad de Santa Marta [16], territorio que sufre regularmente el impacto de violentas inundaciones y también se enfrenta a problemas de escasez de agua (sequías y crisis del agua). Este estudio, realizado a propósito de estos riesgos de inundación (asociada a precipitaciones) y sequía, centró su interés en el abordaje de la percepción del riesgo, el apego al lugar y los comportamientos adaptativos de la población. Un total de 626 personas participaron, 317 de las cuales respondieron a un cuestionario específico sobre las inundaciones y 309 a uno sobre las sequías, quienes residían en el centro y en barrios expuestos a crisis por escasez del agua, respectivamente.

En esta pretensión de recoger algunas reflexiones suscitadas a partir de tales experiencias investigativas, sostenemos que existe la necesidad de considerar los aspectos que pueden tener influjo en la percepción del riesgo, condicionando sus dinámicas: unos asociados a las características de las situaciones riesgosas en sí mismas y, otros, psicosociales, propios de las personas y de su interacción entre ellas y con el ambiente. Se trata de un tejido entre estas dimensiones, asunto que desarrollamos a continuación.

Caja 1. ¿Qué es la percepción del riesgo?

La percepción del riesgo hace referencia a los juicios de las personas respecto del grado de peligrosidad de actividades consideradas como amenazantes, riesgos naturales o derivados del uso de tecnologías [2]. Se trata de una construcción social, basada en la interacción entre individuos y grupos [1,8]. Las percepciones del riesgo impactan de manera significativa las decisiones que las personas toman frente a tales situaciones consideradas amenazantes [3].

Así, en términos generales, podríamos decir que la percepción del riesgo alude a la valoración que individuos y grupos hacen de la peligrosidad de un fenómeno o evento, así como de la posibilidad de correspondencia entre ese riesgo percibido y la acción, lo cual deriva en la toma de decisiones [17].

2. ASPECTOS INFLUYENTES EN LA PERCEPCIÓN DEL RIESGO

La revisión de antecedentes investigativos, tanto como los estudios realizados en nuestro país, a propósito de la percepción del riesgo de desastres, nos permiten resaltar algunos aspectos psicosociales que, en interacción con diversos fenómenos riesgosos, posibilitan ampliar la comprensión de la manera como las personas nos relacionamos con los riesgos ambientales. Así, la percepción del riesgo difiere de acuerdo con el tipo de riesgo del que se trate; asunto imbricado con elementos socioculturales, con la vinculación afectiva positiva de las personas con sus lugares y con la confianza de estas en las instituciones competentes respecto de la gestión de estos riesgos (**Figura 1**).

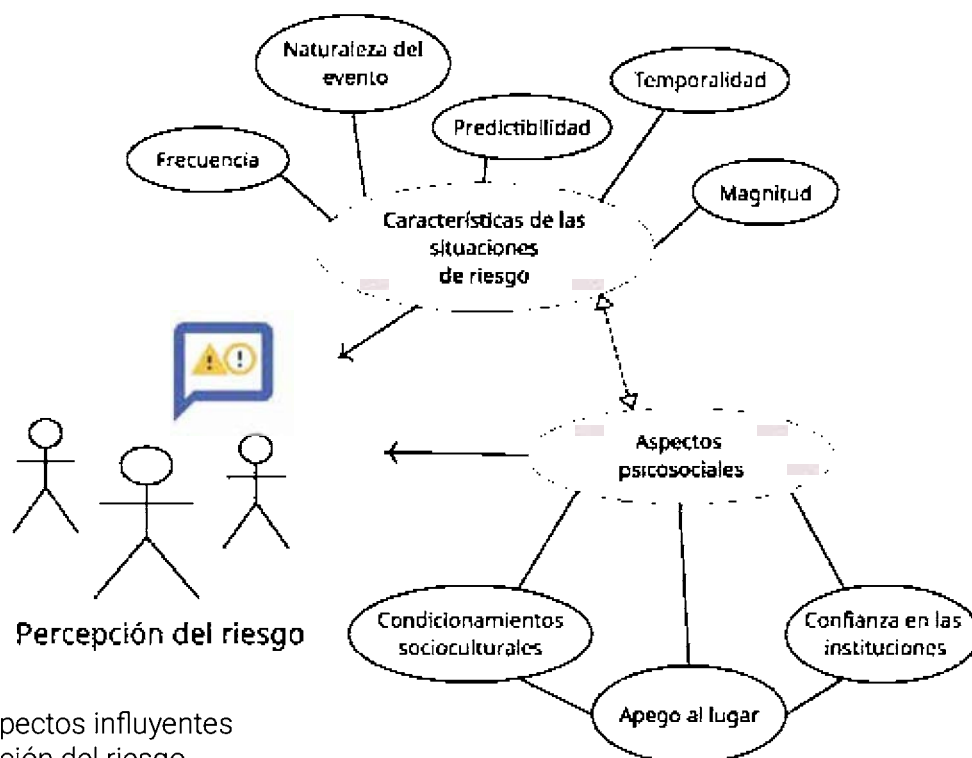


Figura 1. Aspectos influyentes en la percepción del riesgo.

2.1 Características del evento riesgoso y percepción del riesgo

Diversos estudios han señalado la importancia, para la comprensión de la percepción del riesgo, de considerar las características del riesgo del que se trate. Así, la naturaleza de los eventos de desastre ha resultado ser un relevante predictor de los juicios de las personas frente a las amenazas de su entorno. Aspectos como la temporalidad, referida a la velocidad de aparición de la situación de desastre y de sus consecuencias, o la duración del evento; la predictibilidad o percepción de un cierto “anuncio” de la posibilidad de ocurrencia del evento; la magnitud de los daños percibidos asociados al mismo, sus impactos o consecuencias, y la frecuencia de aparición de estos sucesos, bien pueden interactuar con aspectos psicosociales y derivar en una cierta forma de valorar el riesgo.

Inundaciones. Para el caso de las inundaciones, que constituyen riesgos colectivos al afectar núcleos poblacionales, estas se manifiestan por una elevación progresiva del nivel de agua, producto de lluvias fuertes o continuas, que sobrepasan la capacidad de absorción de los suelos, y de los represamientos por una insuficiente posibilidad de descarga de las fuentes hídricas. Las inundaciones se producen en tiempos más largos que las crecidas repentinas, por lo que dan tiempo para que las personas habitantes en las riberas de ríos, quebradas, lagos, se trasladen a lugares más seguros cuando van subiendo los niveles de agua; no obstante, este tipo de fenómeno hidrológico, que se presenta con frecuencia, causa daños en la infraestructura de las viviendas y en las pertenencias de los pobladores [18,19]. Cabe anotar que, comparativamente con otros fenómenos naturales, las inundaciones tienen características particulares, ya que usualmente implican grandes áreas afectadas, lo cual deriva en importantes pérdidas materiales y financieras, aunque menos pérdidas humanas que con otros eventos [1].

La posibilidad de anticipación de las inundaciones se encuentra asociada con la percepción de oportunidad de control del riesgo, en la medida en que permite desplegar acciones para la mitigación de sus impactos; igualmente, la frecuencia de aparición de este fenómeno, puede estar asociada a mayores prácticas adaptativas en las poblaciones [1]. Así, una mayor experiencia con el riesgo de inundación ha correlacionado positivamente con un mayor temor frente al riesgo; igualmente, se han evidenciado niveles más altos de percepción del mismo, mayor implicación con el problema y una evocación más frecuente de estrategias de afrontamiento activo, comparativamente con personas no expuestas a las inundaciones [9–11].

Deslizamientos. Por su parte, las avenidas torrenciales hacen referencia a movimientos de masa con un flujo rápido de sólidos y agua que, mezclados, pueden desplazarse a grandes velocidades [20]. Actualmente este fenómeno, que se presenta fundamentalmente en cuencas de montaña, se ha asociado con la modificación de regímenes de lluvia y sequía; esto es, cambios en la duración y las cantidades de lluvia, hoy producto del cambio climático [20,21]. Los deslizamientos, si bien pueden afectar áreas más pequeñas que las inundaciones y ser menos frecuentes, originan tanto grandes pérdidas materiales y financieras como humanas [1]. Generalmente, se trata de un evento de ocurrencia súbita, con gran magnitud en los daños, y cuyas características dificultan la anticipación de su advenimiento y, consecuentemente, derivan en un sentimiento de vulnerabilidad, ante la percepción de imposibilidad de control y para protegerse; asunto este que está asociado a la emergencia de estrategias de afrontamiento pasivas, las cuales hacen referencia a la evitación de emociones negativas que genera el pensar en la situación [12].

Las sequías. El fenómeno de las sequías obedece a una ausencia prolongada de precipitaciones que, en conjunto con altas temperaturas y evaporaciones, genera grandes impactos en el suelo y, por lo tanto, marcados efectos en la vida de las personas, dados sus impactos en la producción y acceso a alimentos, en la obtención de agua para el consumo y de energía, y en la generación de incendios; en general, se trata

de eventos que cubren mayores áreas geográficas, son más frecuentes y de mayor duración que otros fenómenos, por lo cual están asociados a importantes afectaciones en materia socioeconómica [23]. De acuerdo con algunos autores, mientras que las inundaciones pueden considerarse una amenaza puntual, las sequías, aunque con diversos niveles de gravedad, pueden ser constantes en algunos territorios y, en este sentido, ser concebidas como amenazas permanentes [24], parte de la cotidianidad de los individuos durante determinados períodos, por cuanto puede tratarse de un fenómeno conocido por las personas y visto como inherente a las condiciones de su entorno. Para el caso de las sequías se ha hallado que la adaptación de las personas está asociada a la sensación de exposición y al miedo que generan este tipo de eventos [16].

Inundaciones costeras. Pueden ser definidas como una ocupación temporal de las áreas costeras por las aguas del mar. De acuerdo con autores como Cutter et al. [25], la vulnerabilidad a este fenómeno está asociada a las desigualdades espaciales, a las características del entorno construido, al nivel de urbanización y al crecimiento económico de los territorios. Los eventos de invasión temporal marina son frecuentes en ciertas geografías y han incrementado en el mundo con los procesos de cambio climático. Dada la dificultad para predecirlos y el hecho de que no están relacionados con aspectos meteorológicos locales sino más globales, estos eventos pueden ser percibidos como incontrolables y frente a los cuales no hay posibilidades de acción percibida por los sujetos; no obstante, su alta frecuencia y sus impactos principalmente materiales, llevan a las personas a una cierta familiarización con el riesgo [14].

Sobre la base de estas consideraciones, la comprensión de la percepción del riesgo no solo involucra aspectos psicológicos, sino también situacionales, contextuales y asociados a las características del peligro y a la naturaleza del fenómeno riesgoso. En esta medida, la comunicación del riesgo debe incluir esta multiplicidad de aspectos, y tener presente que cada fenómeno natural supone experiencias, sensaciones y comportamientos diferenciados.

2.2 Dimensión sociocultural y percepción del riesgo

La percepción del riesgo se encuentra atravesada por elementos socioculturales; de hecho, algunos autores han planteado que los factores culturales pueden tener una importante influencia en esta percepción [26]. Siguiendo a Douglas [27,28], los riesgos son construidos por cada sociedad de manera diferencial; consecuentemente, la definición de riesgos y la percepción pública de los mismos están teñidas por valores sociales particulares.

En la literatura se hallan estudios interesados por las diferencias entre grupos poblacionales (con diversas características culturales) alrededor de aspectos psicosociales relacionados con la percepción del riesgo, sobre el supuesto de su determinación sociocultural. Así, por ejemplo, Gierlach et al. [26] encontraron diferencias significativas en los niveles de percepción del riesgo (para amenazas naturales y antrópicas) entre grupos de trabajadores de la salud de tres países, aunque en ninguno de los casos estos niveles se correspondían con las tasas de exposición real; hallaron también que la creencia en que uno es más inmune a los riesgos que las demás personas, puede ser un fenómeno transcultural, en tanto los tres grupos percibieron menores riesgos para sí mismos que para los otros. Igualmente, ha habido interés por las creencias religiosas y las concepciones de lo ancestral, la reverencia a la naturaleza o la idea de dominarla, la creencia en el destino o en planes divinos, en relación con las formas en que, individuos y grupos, construyen una comprensión de lo riesgoso [29–31].

También hay literatura centrada en cuestiones relativas a las desigualdades sociales y al análisis de la exposición de las poblaciones socialmente más vulnerables, a los principales riesgos ambientales. En

esta vía, se ha planteado que estas disparidades no sólo responden a una exposición desigual de ciertos grupos a unas determinadas amenazas, causada por inequidades sociales estructurales, históricamente arraigadas; sino también al acceso desigual a recursos medioambientales y sociales, lo cual se relaciona con una capacidad, también diferencial, de los individuos y grupos para juzgar las situaciones como riesgosas y responder a ellas [8,32].

A propósito de la dimensión sociocultural, para el caso de los estudios en que hemos participado llama la atención, particularmente en la investigación llevada a cabo en el corregimiento antioqueño, el lugar que tiene el río en la cotidianidad de la vida de los habitantes. La sensación de proximidad a esta fuente hídrica es vista como constitutiva y diferenciadora del lugar, como un referente territorial, soporte de las formas de identidad con asiento allí; consecuentemente, la posibilidad de inundación es leída como un atributo territorial [11]. Así también, otro elemento destacable es la interpretación de los cartageneros entrevistados, alrededor de las desigualdades en la gestión del riesgo de inundación costera en distintas zonas de la ciudad, gestión vista como excluyente e injusta.

Pese a que estos asuntos dan luces sobre aspectos socioculturales relevantes, hace falta avanzar en estudios orientados a dilucidar la dimensión sociocultural en relación con la percepción del riesgo de desastre en Colombia. Un aspecto importante tiene que ver con la diversidad sociocultural del territorio, lo cual podría dar lugar a formas diferenciadas de relacionamientos con los riesgos en distintas regiones y poblaciones del país, para las cuales, desde un punto de vista experto, también se han valorado riesgos diferentes [14].

2.3 Apego al lugar y percepción del riesgo

Aunque la literatura no es concluyente respecto del tipo de relación que hay entre estos dos fenómenos, la cual parece depender de los contextos [33], algunos autores han señalado asociaciones entre la forma en la que son percibidos los riesgos del entorno y el apego al lugar. Este último hace referencia al vínculo afectivo positivo hacia determinados lugares, en los que las personas prefieren permanecer y se encuentran confortables y seguras; en este sentido, su característica más destacada es la tendencia a mantener proximidad hacia el lugar de apego. Así, tiene que ver con el sentir el espacio como algo propio, lo cual se traduce en gusto y preferencia por estar allí [34–36].

Estudios han planteado que el riesgo (antrópico o natural) al cual han sido expuestas algunas personas, ha contribuido a incrementar su vinculación emocional con el lugar de residencia, a fortalecer su apego hacia este y a buscar permanecer en él [29,30]; otros han evidenciado la preferencia de algunas personas por enfrentarse al riesgo, antes que salir del lugar querido [37], o el desencadenamiento de comportamientos preventivos o preparatorios de las personas para hacer frente a un evento calamitoso [31]; así también, se ha hallado relación entre un alto nivel de apego al lugar y una alta percepción de control del riesgo [33].

En el estudio llevado a cabo en Santa Marta [16], por su parte, el apego al lugar se asoció directamente con la forma de evaluar el riesgo de inundación; un fuerte apego al propio barrio fue asociado con un mayor temor y sentimiento de exposición frente a este riesgo. Paralelamente, hubo una relación directa del apego al lugar con el comportamiento proambiental y con conductas adaptativas (de prevención y protección) respecto del riesgo; asuntos que se asemejan a los hallazgos de otros estudios con habitantes de zonas expuestas a inundaciones, los cuales dan cuenta de relaciones positivas entre el apego al lugar y el compromiso conductual [38,39]. Por otro lado, en este estudio también se evidenció que el apego al lugar se asocia con un mayor conocimiento general sobre las sequías; así, el apego al propio barrio parece

conducir a un mayor interés de las personas por los riesgos de su entorno, a una mejor percepción de este riesgo y a un comportamiento más adaptativo frente al mismo [16].

Los habitantes del corregimiento antioqueño, por su parte, mostraron un fuerte vínculo con su lugar, aun cuando las condiciones del mismo representan un permanente riesgo de inundación y, en consecuencia, de pérdidas, y pese a los altos montos de temor que esta situación les significa. Sin embargo, los niveles de apego al lugar se presentaron con independencia del nivel de percepción del riesgo; lo cual explicamos desde la cercanía de la población a la fuente hídrica y, por ello, al riesgo de inundación, asunto interpretado por los habitantes como inherente a su entorno de vida, como un atributo del lugar [11].

En otros estudios se confirmó la correlación entre el apego al lugar y la percepción del riesgo, tanto de deslizamiento como de inundación costera [12,13]. Cabe señalar que para el caso de los deslizamientos el riesgo percibido está determinado, entre otros aspectos, por la antigüedad residencial (elemento importante del apego al lugar); asunto que no ocurre en el caso de las inundaciones costeras [13]. En Cartagena, los hallazgos del estudio desarrollado destacan un importante papel de la experiencia previa con el riesgo de inundación costera, de la habituación al mismo (familiarización con el riesgo) y del vínculo afectivo con el lugar como condicionantes de la percepción del riesgo [14].

Caja 2. Para pensar el riesgo percibido: ¿Es relevante preguntarnos por las relaciones de las personas con sus lugares?

Pensar los vínculos afectivos de las personas con sus lugares resulta ser un punto clave para entender la manera como ellas se relacionan con los riesgos propios de su entorno. Aunque la investigación en la materia no ha sido concluyente, sí nos muestra la importancia de considerar las interacciones entre personas, procesos psicosociales y características de los lugares, en función de alcanzar mayores comprensiones respecto de la forma como experimentamos los riesgos con asiento en estos.

2.4 Confianza en las instituciones y percepción del riesgo

En la literatura se ha incluido la confianza en las instituciones como un fenómeno asociado a la percepción y aceptación del riesgo [40–43]; no obstante, hay preguntas sobre su rol respecto de estas. También se ha señalado que puede ser importante en ciertos casos de toma de decisión frente al riesgo, pero no necesariamente en otras situaciones [41] y que factores contextuales, físicos y sociales del evento amenazante pueden determinar tal confianza o las emociones negativas movilizadas [42]. Igualmente, se ha mostrado que la relación entre confianza y percepción del riesgo varía según el tipo de riesgo, las condiciones sociales y las políticas de gestión, y está condicionada por los conocimientos sobre los riesgos y la importancia que se les atribuya [44,45], siendo más significativa la confianza en los casos en los que las personas carecen de información para decidir, puesto que, para esto, requieren apoyarse en una evaluación indirecta del riesgo, aquella realizada por las instituciones [40].

Siguiendo a algunos autores, el nivel de confianza o desconfianza en las autoridades responsables de la gestión del riesgo puede ser determinante de la manera como los ciudadanos tratan la información sobre los riesgos y de su adherencia o no a las recomendaciones y orientaciones de protección o prevención

[42,46]. En este sentido, el abordaje de la confianza en las instituciones se torna relevante para alcanzar mayores comprensiones sobre la percepción del riesgo de desastres; considerando, además, que en la comunicación del riesgo no solo juega un papel fundamental la calidad del mensaje, sino también la legitimación social de la fuente.

En el estudio realizado en Santa Marta [16], se halló una tendencia de los participantes a confiar en los expertos y en las autoridades competentes en lo que respecta a la gestión del riesgo de inundación. Además, los hallazgos sugieren que cuanto más los individuos perciben conocimiento de los expertos y expresan su temor a las inundaciones, tienden más a aceptar las medidas institucionales propuestas para su gestión. En cuanto al riesgo de sequía, la adaptación individual se encontró asociada, entre otros aspectos, a la percepción del conocimiento experto; así, la aceptación de las medidas institucionales es aún más importante cuando los individuos perciben este conocimiento y se sienten fuertemente expuestos a las sequías, al ser conscientes de los impactos y las consecuencias de este riesgo.

En lo que respecta al estudio llevado a cabo en Cartagena, a propósito del riesgo de inundación costera, en los relatos de los participantes emergió la idea de las instituciones gubernamentales como las principales responsables de la generación de acciones estructurales para la protección ciudadana; de la formulación, implementación y fortalecimiento de políticas públicas para hacer frente a este riesgo, y de la materialización de intervenciones dirigidas a la comunicación del riesgo y a la prevención y mitigación de impactos. No obstante, este ideal de participación institucional dista de la presencia y eficacia institucional percibidas; en este sentido, sobresale la desconfianza en estas instituciones respecto de su lugar en la gestión de este riesgo, resaltando situaciones de abandono, ineficacia, cooptación, negligencia y corrupción; así como la distribución socialmente desigual de recursos para hacer frente al riesgo de inundación costera en diferentes sectores de la ciudad. Esta desconfianza parece incrementar los sentimientos de desesperanza e impotencia para afrontarlo, así como el sentimiento de vulnerabilidad de los habitantes [14].

Cabe señalar que las desigualdades sociales y la precariedad de la presencia del Estado constituyen aspectos estructurales que intensifican los sentimientos de vulnerabilidad de las personas [8]. En este contexto, la gestión de los riesgos requiere de un mínimo de confianza para la reducción de tal sentimiento y para la disposición de mecanismos para el manejo de las situaciones riesgosas; como ya lo señalaba Slovic [43], reconocer la importancia de la confianza y comprender las razones de su destrucción, tendrá efectos sobre el abordaje de riesgos en el futuro.

3. CONSIDERACIONES FINALES

La percepción del riesgo varía en función de la evaluación que las personas hacen de la posibilidad de impacto sobre su bienestar [47]; así también, las capacidades para protegerse de un riesgo difieren entre las sociedades, y el uso y efectividad de las estrategias individuales y colectivas de protección no dependen tanto de la decisión de personas y grupos, como de otros aspectos psicosociales y de las condiciones socialmente desiguales en las sociedades [8]. Incluso los autores del enfoque psicométrico de la percepción del riesgo han planteado la idea de la construcción social de la percepción, acercándose a perspectivas sociológicas y culturales. La percepción del riesgo, los juicios sobre la peligrosidad de un fenómeno y su control, son también el resultado de creencias, conocimientos y actitudes de los grupos sociales, de su relación histórica y material con el fenómeno del que se trate, considerado como un riesgo por grupos como las autoridades. En esta vía, planteamos la necesidad de un análisis de la evaluación del

riesgo ambiental que integre varios niveles y enfoques teórico-metodológicos, que permitan aprehender la complejidad del fenómeno.

La literatura sobre el tema, complementada con aproximaciones investigativas propias, nos ha permitido identificar aspectos que probablemente estén asociados a las acciones cotidianas de gestión del riesgo. Estos elementos son de distinta naturaleza y nivel: sociales, culturales, individuales y contextuales-situacionales, y nos permiten comprender mejor la relación de las personas con un riesgo ambiental. De esta forma, aspectos socioculturales, tales como los arreglos sociales que llevan a una distribución desigual de los riesgos y de los recursos para hacerles frente, así como las relaciones con las instituciones encargadas de su gestión, determinan las características de la vulnerabilidad de las personas y grupos. Estos asuntos remiten a las condiciones sociohistóricas de exposición y relación con los riesgos, su definición, evaluación y gestión.

No se trata de desestimar los aspectos individuales, psicológicos o disposicionales, referidos a la experiencia de las personas en relación con los riesgos, y ampliamente abordados en la literatura. Más bien, planteamos la relevancia de pensar estos elementos en interacción o vinculación dinámica con las características del fenómeno riesgoso y con la dimensión sociocultural a la que hemos hecho referencia. Concurso de elementos que dan lugar a unas determinadas formas de evaluar las situaciones y a unas ciertas respuestas individuales y colectivas frente al riesgo.

PUNTOS CLAVE

1. El trabajo que presentamos, siguiendo las pistas de la literatura y de los estudios realizados, presume diferencias en la percepción del riesgo según el tipo de evento del que se trate, particularmente de su carácter catastrófico. Consecuentemente, planteamos que la comunicación del riesgo debe tener presente que cada fenómeno natural entraña experiencias, sensaciones, afectos y comportamientos diferenciados en las personas.
2. Sentirse personalmente implicado en una situación riesgosa y estar apegado al lugar en el que se vive podría ayudar a entender por qué es más probable que una persona tome medidas para resolver el problema. Así, se hace necesario, para ampliar la comprensión de la percepción del riesgo y de la respuesta de las comunidades a este, aproximarnos a conocer qué tanto las personas se sienten parte de los eventos riesgosos y cómo es su relación con el lugar del que se trate.
3. Estudiar la percepción del riesgo aisladamente de otros fenómenos psicosociales no permite comprender los comportamientos de las personas respecto de los riesgos de desastre. Dimensiones psicológicas, situacionales, contextuales e incluso socioeconómicas y políticas, son fundamentales para entender la respuesta social a una amenaza determinada. En última instancia, se hace fundamental la integración de los niveles cultural, espacial y psicosocial que intervienen en su construcción.

NECESIDADES FUTURAS

1. En la investigación sobre la materia en contextos colombianos, sería relevante abordar dimensiones socioculturales asociadas a la percepción del riesgo, en relación con las vinculaciones afectivas de las personas con sus lugares, así como relativas a la (des)confianza en las instituciones competentes en la gestión del riesgo.
2. Dada la diversidad sociocultural del país, se torna relevante plantear estudios que aborden las diferencias regionales y poblacionales en la percepción del riesgo.
3. Considerando que la percepción del riesgo es más que un proceso intrapsíquico, es relevante avanzar en estudios orientados a la integración de la dimensión sociohistórica en la formación del pensamiento social alrededor del riesgo, y su dependencia de las formas de socialización y comunicación social.
4. Se torna relevante complementar el abordaje de la percepción del riesgo con enfoques cualitativos, que permitan ampliar la comprensión del fenómeno.

AGRADECIMIENTOS

A todos los participantes de nuestras investigaciones, habitantes de zonas de riesgo, que dedicaron su tiempo a responder a nuestras cuestiones.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA CRediT

Conceptualización: LAMD, OENC. Redacción de primera versión: LAMD, OENC. Escritura, revisión y edición de segunda versión: LAMD, OENC. Búsqueda de literatura: LAMD, OENC.

IDENTIFICACIÓN DE AUTORES

Luz Adriana Muñoz Duque <https://scholar.google.com/citations?user=sbKZWp4AAAAJ>

Óscar E. Navarro Carrascal <https://scholar.google.com/citations?user=gtgnoXkAAAAJ>

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores no declaran conflicto de intereses

BIBLIOGRAFÍA

1. Weber, J. M., Hair, J. F., & Fowler, C. R. (2000). Developing a measure of perceived environmental risk. *Journal of Environmental Education*, 32(1), 28–35. <https://doi.org/10.1080/00958960009598669>
2. Corral V., V., Frías A., M., & González L., D. (2003). Percepción de riesgos, conducta proambiental y variables demográficas en una comunidad de Sonora, México. *Región y Sociedad*, XV(26), 50–72.
3. Slovic, P. (2000). *The perception of risk*. Washington: Earthscan.
4. Wester-Herber, M. (2004). Underlying concerns in land-use conflicts - The role of place-identity in risk perception. *Environmental Science and Policy*, 7, 109–116. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2003.12.001>
5. Joffe, H. (2003). Risk: from perception to social representation. *The British Journal of Social Psychology*, 42, 55–73. <https://doi.org/10.1348/014466603763276126>
6. Doise, W. (1986). *Levels of explanation in social psychology*. Cambridge: Cambridge University Press.
7. Holahan, C. (2004). *Psicología ambiental: un enfoque general*. México: Limusa editores.
8. Navarro, O. (2017). Social inequality and environmental risk perception. En G. Fleury-Bahi, E. Pol, & O. Navarro (Eds.), *Handbook of environmental psychology and QOL research*. Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-31416-7_27
9. Muñoz-Duque, L.A., & Navarro, O. (2020). Percepción del riesgo y estrategias de afrontamiento en población expuesta a inundación en Antioquia, Colombia. En P. Olivos J., O. Navarro, & A. Loureiro (Eds.), *Cómo afrontar una catástrofe. Percepción de riesgo y factores psicosociales de la adaptación* (pp. 61–90). Cuenca: Ediciones de la Universidad de Castilla-La Mancha.
10. Navarro, O., Chavez, L., Piñeres, J., & Noreña, M. (2016). Percepción del riesgo y estrategias de afrontamiento en población expuesta y no expuesta al riesgo de inundación. *Interamerican Journal of Psychology*, 50(3), 331–346.
11. Muñoz-Duque, L.A., & Arroyave, O. (2017). Percepción del riesgo y apego al lugar en población expuesta a inundación: un estudio comparativo. *Pensamiento Psicológico*, 15(2), 79–92. <https://doi.org/10.11144/Javerianacali.PPSI15-2.pral>
12. Zapa-Pérez, K., Navarro, O., & Rendón-Rivera, A. (2017). Modelo de análisis de la vulnerabilidad psicosocial en la gestión del riesgo de desastres. *Ista de Gestão Social e Ambiental*, 11(2), 91–110. <https://doi.org/10.24857/rgsa.v11i2.1309>
13. Navarro, Oscar, Restrepo-Ochoa, D., Muñoz-Duque, L.A., Zapa-Perez, K., Ameline, A., Mercier, D., & Fleury-Bahi, G. (2020). Determinants of coping strategies in two types of natural hazards: Flash floods and coastal flooding. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 46(January). <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2020.101514>
14. Muñoz-Duque, L.A., Navarro, O., Restrepo-Ochoa, D., & Fleury-Bahi, G. (2021). Risk perception and trust management in inhabitants exposed to coastal flooding: The case of Cartagena, Colombia. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 60(April), 102261. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2021.102261>
15. Lemée, C., Navarro, O., Restrepo-Ochoa, D., Mercier, D., & Fleury-Bahi, G. (2020). Protective behaviors regarding coastal flooding risk in a context of climate change. *Advances in Climate Change Research*, 11(4), 310–316. <https://doi.org/10.1016/j.accre.2020.12.001>
16. Guillard, M., Navarro, O., Cortes, S., & Fleury-Bahi, G. (2021). How do we adapt when we are faced with the effects of climate change? *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 65. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2021.102586>

17. Navarro, O. (2022). *Psychologie environnementale. Enjeux environnementaux, risques et qualité de vie*. De Boeck supérieur.
18. UNGRD (Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres). (2020, 12 de agosto). Boletín de prensa 091. *¿Cuál es el riesgo por inundaciones en Colombia?* https://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/bitstream/handle/20.500.11762/29910/Boletin_de_prensa_N_091.pdf?
19. COSUDE (Agencia Suiza para el Desarrollo y Cooperación) / ALARN (Apoyo Local para el Análisis y Manejo de los Riesgos Naturales). (2002). *Instrumentos de apoyo para el análisis y la gestión de los riesgos naturales. Guía para el especialista*. Managua.
20. Caballero, J. (2011). Las avenidas torrenciales: una amenaza potencial en el Valle de Aburra. *Gestión y Ambiente*, 14(3), 45–50.
21. Alvioli, M., Melillo, M., Guzzetti, F., Rossi, M., Palazzi, E., von Hardenberg, J., ... Peruccacci, S. (2018). Implications of climate change on landslide hazard in Central Italy. *Science of the Total Environment*, 630, 1528–1543. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.315>
22. Spizzichino, D., Capriolo, A., & F., D. G. (2015). Climate change, flash flood risk assessment and adaptation policies: the urban area of Ancona municipality. *Engineering Geology for Society and Territory*, 5, 1–7. https://doi.org/10.1007/978-3-319-09048-1_159
23. UNGRD (Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres). (s.f.). *Sequías*. <http://gestiondelriesgo.gov.co/snigrd/pagina.aspx?id=148>
24. Reser, J., & Swim, J. (2011). Adapting to and coping with the threat and impacts of climate change. *The American Psychologist*, 66(4), 277–289. <https://doi.org/10.1037/a0023412>
25. Cutter, S. L., Boruff, B. J., & Shirley, W. L. (2003). Social vulnerability to environmental hazards. *Social Science Quarterly*, 84(2), 242–261. <https://doi.org/10.1111/1540-6237.8402002>
26. Gierlach, E., Belsher, B. ., & Beutler, L. . (2010). Cross-cultural differences in risk perceptions of disasters. *Risk Analysis*, 30(10), 1539–1549. <https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.2010.01451.x>
27. Douglas, M. (1996). *La aceptabilidad del riesgo según las ciencias sociales*. Barcelona: Paidós.
28. Douglas, M. (2001). Los riesgos a los que se enfrenta un técnico de prevención de riesgos. *Revista Empresa y Humanismo*, IV(2/01), 267–290.
29. Røislien, H. E. (2007). Living with Contradiction : Examining the Worldview of the Jewish Settlers in Hebron. *International Journal of Conflict and Violence*, 1(2), 169–184.
30. Billig, M. (2006). Is my home my castle? Place attachment, risk perception, and religious faith. *Environment and Behavior*, 38(2), 248. <https://doi.org/10.1177/0013916505277608>
31. Mishra, S., Mazumdar, S., & Suar, D. (2010). Place attachment and flood preparedness. *Journal of Environmental Psychology*, 30(2), 187–197. <https://doi.org/10.1016/j.jenvp.2009.11.005>
32. Roussel, I., Gailhard-Rocher, I., Lelievre, F., Lefranc, A., Tallec, A., Menard, C., & Beck, F. (2009). Diversité des perceptions de la pollution de l'air extérieur, disparités sociales et territoriales. Comment construire une politique égalitaire ? *Air Pur*, 76, 30–35.
33. Bernardo, F. (2013). Impact of place attachment on risk perception: Exploring the multidimensionality of risk and its magnitude. *Estudios de Psicología*, 34(3), 323–329. <https://doi.org/10.1174/021093913808349253>
34. Hidalgo, M. del C., & Hernández, B. (2001). Place attachment: conceptual and empirical questions. *Journal of Environmental Psychology*, 21(3), 273–281. <https://doi.org/10.1006/jevp.2001.0221>

35. Jorgensen, B. S., & Stedman, R. C. (2001). Sense of place as an attitude: Lakeshore owners attitudes toward their properties. *Journal of Environmental Psychology, 21*(3), 233–248. <https://doi.org/10.1006/jevp.2001.0226>
36. Vidal, T., Pol, E., Guàrdia, J., & Però, M. (2004). Un modelo de apropiación del espacio mediante ecuaciones estructurales. *Medio Ambiente y Comportamiento Humano, 5*(1 y 2), 27–52.
37. Urcan, I. (2012). Flood hazards perception. The result of an opinion survey made in the little towns from lower Aries Corridor. *Riscuri Și Catastrofe, 11*(2), 202–210.
38. Bonaiuto, M., Alves, S., De Dominicis, S., & Petrucci, I. (2016). Place attachment and natural hazard risk: Research review and agenda. *Journal of Environmental Psychology, 48*, 33–53. <https://doi.org/10.1016/j.jenvp.2016.07.007>
39. De Dominicis, S., Fornara, F., Ganucci C., U., Twigger-Ross, C., & Bonaiuto, M. (2015). We are at risk, and so what? Place attachment, environmental risk perceptions and preventive coping behaviours. *Journal of Environmental Psychology, 43*, 66–78. <https://doi.org/10.1016/j.jenvp.2015.05.010>
40. Siegrist, M., & Cvetkovich, G. (2000). Perception of hazards: The role of social trust and knowledge. *Risk Analysis, 20*(5), 713–719. <https://doi.org/10.1111/0272-4332.205064>
41. Siegrist, M. (2019). Trust and risk perception: a critical review of the literature. *Risk Analysis, 27*. <https://doi.org/10.1111/risa.13325>
42. Siegrist, M., & Zingg, A. (2014). The role of public trust during pandemics: Implications for crisis communication. *European Psychologist, 19*(1), 23–32. <https://doi.org/10.1027/1016-9040/a000169>
43. Slovic, P. (1993). Perceived risk, trust, and democracy. *Risk Analysis, 13*, 675–682. <https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.1993.tb01329.x>
44. Earle, T. C. (2010). Trust in risk management: A model-based review of empirical research. *Risk Analysis, 30*, 541–574. <https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.2010.01398.x>
45. Earle, T. C., Siegrist, M., & Gutscher, H. (2007). Trust, risk perception, and the TCC model of cooperation. In M. Siegrist, T. C. Earle, & H. Gutscher (Eds.), *Trust in cooperative risk management: Uncertainty and scepticism in the public mind* (pp. 1–49). London: Earthscan.
46. Frewer, L. J. (2003). Trust, transparency, and social context: Implications for social amplification of risk. En N. F. Pidgeon, R. E. Kasperson, & P. Slovic (Eds.), *The social amplification of risk* (pp. 123–137). Cambridge: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511550461.006>
47. Fleury-Bahi, G., Marcouyeux, A., Préau, M., & Annabi-Attia, T. (2013). Development and validation of an environmental quality of life scale: study of a French sample. *Social Indicators Research, 113*(3), 903–913. <https://doi.org/10.1007/s11205-012-0119-4>

CAPÍTULO
9

Gestión del riesgo de desastres en Colombia: una mirada diferencial para los campesinos y su vida digna

Sandra Eliana Alzate Vargas^{1*} & Sandra Patricia Duque Quintero¹

¹Facultad de Derecho y Ciencias Políticas, Grupo Estudios de Derecho y Política. Universidad de Antioquia, calle 70 No. 52 – 21, Medellín, Colombia

*Autor de contacto: Sandra Eliana Alzate Vargas, Facultad de Derecho y Ciencias Políticas, Grupo Estudios de Derecho y Política. Universidad de Antioquia, calle 70 No. 52 – 21, Medellín, Colombia. Correo-e: seliana.alzate@udea.edu.co, sanalzate@yahoo.com

Resumen

La gestión del riesgo de desastres es un proceso social que además de los aspectos técnicos, debe incorporar factores sociales, económicos y culturales como la pobreza y la marginalidad social. Estos factores inciden en la configuración de la vulnerabilidad y por ende del riesgo, agravando las consecuencias devastadoras de los desastres. Para dar respuesta a las reales necesidades de las poblaciones expuestas y afectadas, la gestión del riesgo debe entender sus características culturales, sociales y económicas, de modo que las intervenciones propuestas mitiguen o prevengan el riesgo. Considerando que los campesinos son una de las poblaciones con mayor grado de vulnerabilidad debido a sus precarias condiciones de vida y marginalidad, en este capítulo se aborda primero, la gestión del riesgo de desastres como un proceso técnico, científico, social y se establece un punto de intersección con el derecho a la vida digna de los *campesinos*. Segundo, se describen los conceptos de enfoque diferencial y del concepto campesino. La metodología implementada es cualitativa con enfoque hermenéutico, en el capítulo se presentan los resultados del primer momento de la metodología referido al análisis textual donde la pregunta de investigación, como proyecto de sentido, permite conversar con los textos-literatura especializada. El método permitió identificar el alto grado de vulnerabilidad de los campesinos. Se concluye que es necesario incorporar en la gestión del riesgo de desastres, una mirada

diferenciadora de los campesinos, lo que posibilitará unas mejores condiciones de existencia y bienestar y, por consiguiente, la concreción en la práctica de su derecho a la vida digna. Finalmente, se recomienda iniciar con la recolección de información específica para esta población.

Palabras clave: gestión del riesgo de desastres, desastres socio-naturales, campesinos, enfoque diferencial, vida digna.

Disaster risk management in Colombia: a necessary differential view for the dignified life of farmers

Abstract

Disaster risk management is a social process that, in addition to the technical aspects of the threat, incorporates socio-economic and cultural factors such as poverty and social marginality. These factors influence the configuration of vulnerability and risk, aggravating the devastating consequences of disasters. To respond to the real needs of the populations exposed and affected, risk management must understand their own cultural, social, and economic characteristics, so that the proposed interventions mitigate or prevent the risk. Considering that one of the populations that presents a greater degree of exposure and vulnerability are the farmers, due to their precarious living conditions and the marginality in which they find themselves; this chapter first deals with an analysis of the management of the disaster risk and it is described as besides being a technical-scientific process, it is also a social process and, to that extent, a point of intersection is established with the right to a dignified life of farmers. In a second moment, it described the farmers' concept and its necessary recognition as a differentiated subject in disaster risk management. The methodology implemented is qualitative with a hermeneutical approach. The chapter shows the results of the first moment of the methodology, which is indicated to textual analysis, where the research question, as a project of meaning, allows conversation with the texts -specialized literature. The method allowed them to identify the farmers' high degree of exposure and vulnerability. It is concluded that it is necessary to incorporate in disaster risk management a differentiating view of farmers as a group of special protection by law, which will enable better conditions of existence and well-being and realize their right to a dignified life. Finally, it is recommended to start by recollecting specific information about this population.

Keywords: Disaster risk management, socio-natural disasters, farmers, differential approach, dignified life.

1. INTRODUCCIÓN

La mayor extensión del territorio colombiano corresponde a suelo rural [1]. El 22.9% de la población nacional es rural, de la cual el 15.8% es población rural dispersa y el restante 7.1% habita en alguno de los 6,896 centros poblados rurales. El 30.22% de población rural dispersa vive con necesidades básicas insatisfechas (NBI) y el 10.51% viven en la miseria con deficiencias significativas de vivienda, prestación de servicios públicos, asistencia en salud y dependencia económica. Estos porcentajes aumentan a nivel regional porque el desarrollo regional ha sido desequilibrado, y las poblaciones rurales más alejadas de los centros urbanos de poder económico y político presentan cifras alarmantes en las condiciones de pobreza y marginalidad. Por ejemplo, en Antioquia el porcentaje de personas rurales con NBI es del 26.77%, en Chocó de 62.58%, y en Vaupés de 86.17%. Del mismo modo ocurre con los porcentajes de población rural en la miseria, que en Antioquia corresponden al 9.13% de la población, en Chocó al 30.35%, y en Vaupés al 58.27% [1].

Es necesario precisar, que la población campesina está inmersa tanto en la población de centros poblados rurales como en el área rural dispersa, representando la mayoría de dicha población. Al respecto, según la Encuesta Nacional de Calidad de Vida 2019 (ECV) [2], el 84.8% de la población de centros poblados y rural dispersa se reconoce como campesina, así como el 84.7% de los hogares. En cuanto a las NBI de esta población, el 35.4% de los hogares campesinos tiene incidencia de pobreza multidimensional y el 65.4% de los jefes de hogar campesino se perciben como pobres [2]. Es importante anotar que dicha información se discrimina para los campesinos sólo a partir del año 2020, y no se tienen registros diferenciados de censos o encuestas de calidad de vida anteriores.

Caja 1. Encuesta de calidad de vida (ECV)

La ECV es una operación estadística que el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE) realiza con el objeto de recoger información sobre diferentes aspectos y dimensiones del bienestar y las condiciones de vida de los hogares, incluyendo temas como el acceso a bienes y servicios públicos, privados o comunales, salud, educación, atención integral de niños y niñas menores de 5 años, entre otros. La consideración de estos aspectos hace posible realizar posteriores análisis a los factores que explican los diferentes niveles de vida existentes en la sociedad. La ECV es, además, la fuente de información del cálculo del Índice de Pobreza Multidimensional (IPM) [3].

Los índices de pobreza multidimensional de los hogares campesinos encontrados por el DANE [2] como analfabetismo 18%, bajo logro educativo 70.4%, desempleo de larga duración 11.5%, trabajo informal 86.7%, y hacinamiento crítico 8.9% develan la existencia de condiciones de vulnerabilidad y de vulneración de los campesinos en Colombia. Los datos confirman que los campesinos en Colombia son una población poco abordada desde la mirada de la gestión del riesgo de desastres, siendo un grupo social que ocupa sectores rurales que los hacen vulnerables a mayores consecuencias en el momento de la ocurrencia de un desastre. Este desconocimiento hace que esta población pueda ser excluida y marginada cuando se realizan las políticas públicas [4] (ver **Fig. 1**).

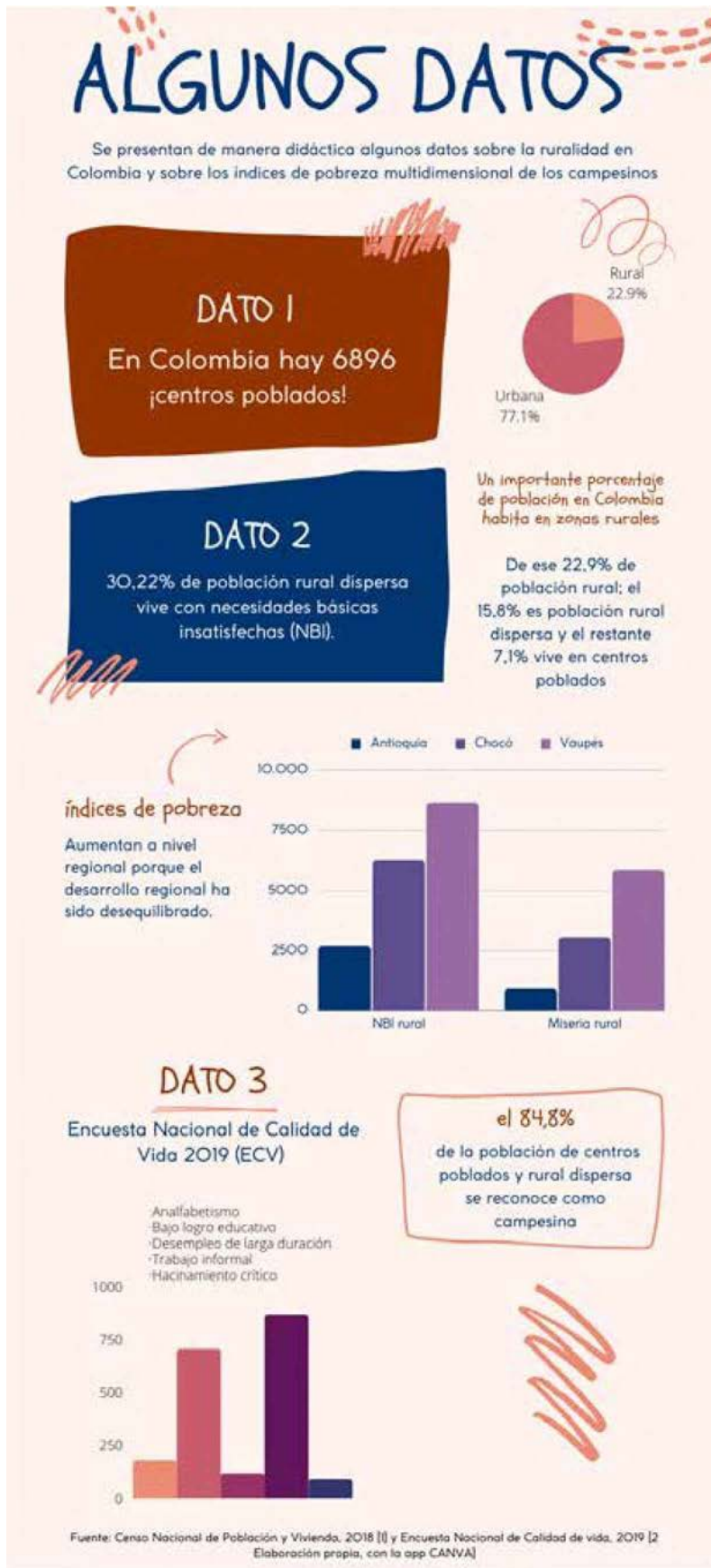


Figura 1. Algunos datos sobre los campesinos en Colombia. Fuente: Censo Nacional de Población y Vivienda, 2018 [1] y Encuesta Nacional de Calidad de Vida de 2019 [2]. Elaboración propia utilizando la APP Canva.

Se reconoce que la situación de vulnerabilidad y exclusión de los campesinos ha pasado desapercibida para el resto de la sociedad, lo que los sitúa en unas condiciones de mayor debilidad y fragilidad que al resto de la población [4]. A la precariedad en las condiciones de vida de los campesinos identificadas por el DANE y reconocidas por los mismos campesinos en la ECV 2019 [2], se suma la existencia de constantes amenazas y riesgos de desastres socio-naturales en el territorio, tales como movimientos en masa, inundaciones, avenidas torrenciales, e incendios forestales [5,6] que eventualmente agravan su situación de precariedad tornando indigna su vida [4].

Caja 2. Derecho a una vida digna de los campesinos en Colombia desde una noción aspiracional

La dignidad de la vida es un concepto amplio que incluye elementos de dignidad humana como no sufrir tratos crueles o degradantes, de calidad de vida como tener acceso a una vivienda o al agua potable, y elementos aspiracionales propios de la capacidad de los seres humanos de soñar con un mundo mejor.

La noción aspiracional de vida digna para los campesinos tiene cuatro elementos [4]:

- 1) La aspiración al reconocimiento político de los campesinos y campesinas, que implica la aceptación de la validez de la economía campesina como modelo alternativo de desarrollo.
- 2) La aspiración a que se respete la vida y los derechos humanos.
- 3) La aspiración a formas de interacción social y económica solidarias centradas en la cooperación y el respeto, más que en la competencia.
- 4) La aspiración a un relacionamiento más armónico con la naturaleza.

En Colombia, el 84.7% de la población y el 86.6% de los activos, habitan o se localizan en áreas expuestas a dos o más amenazas naturales [5]. Según datos del Sistema de Inventario de Desastres (DesInventar) [7], durante 2017 se presentaron 2,972 eventos, que reportaron 610 muertos, 1,234 heridos, 109 desaparecidos, 1,568 casas destruidas y 30,899 casas afectadas. Datos más recientes indican que entre el 16 de marzo y el 6 de abril de 2022, se produjeron 202 eventos meteorológicos en 131 municipios de 17 departamentos del país. En total 9,100 personas resultaron afectadas, 14 personas murieron y 28 resultaron heridas. En cuanto a los daños, 1,151 viviendas resultaron afectadas y 39 fueron destruidas. [8]. Los datos indican altos índices de riesgo y amenaza [9], lo que asociado a las condiciones de alta marginalidad de los campesinos contribuye a incrementar su vulnerabilidad y la de sus bienes aumentando los impactos y el potencial destructor de estos eventos.

En consonancia con lo anterior, la pobreza y exclusión social son factores determinantes de los niveles de vulnerabilidad de las personas frente a los desastres socio-naturales [10,11,12,13]. Igualmente, se resalta que los desastres socio-naturales y el cambio climático están asociados a la vulnerabilidad social, regional y sectorial de las comunidades [14] y se reconoce que reducen el bienestar de la población y aumentan la pobreza [15]. En una relación bidireccional la pobreza aumenta la vulnerabilidad socioeconómica y física, pero a su vez, la ocurrencia de un desastre empobrece a la población afectada. Existe una relación entre el riesgo medioambiental y la pobreza, ya que este es un factor que incide directamente en la vulnerabilidad afectando la vivienda, el ingreso y la salud en este sentido la vulnerabilidad y la pobreza están estrechamente relacionadas [16].

De otro lado, la situación de especial fragilidad de la población campesina está asociada a un modelo de desarrollo rural ineficiente con características que lo convierten en un factor de alto deterioro del ambiente y la biodiversidad, que no promueve el desarrollo humano y que hace a la población rural más vulnerada y vulnerable [17].

Esta vulnerabilidad manifiesta de los campesinos en la dignidad de su vida, se refleja y acrecienta por la inexistencia de políticas nacionales de gestión del riesgo y de gestión ambiental con énfasis rural que reconozcan sus especificidades territoriales y culturales [17]. Aunque los fenómenos naturales no tienen fronteras político-administrativas, las políticas públicas tienen un enfoque hacia lo urbano, desconociendo así la magnitud devastadora que los desastres tienen para los campesinos, ya que sus condiciones de vida están muy por debajo de las condiciones de la población urbana [18].

La conjunción de altos niveles de vulnerabilidad y exposición a desastres, implica una afectación a su derecho fundamental a una vida digna, que en el caso de los campesinos, además de afectar su integridad física y sus medios de existencia, rompe su especial relación con la tierra y con la naturaleza, sus redes de apoyo comunitario y su forma de trabajo familiar forzándolos en muchos casos a desplazarse a otros territorios y a vincularse a los circuitos económicos comerciales y al trabajo asalariado, desestructurando su forma de vida campesina [4]. Ante este panorama, se hace imperativo que la gestión del riesgo de desastres, reconozca la vulnerabilidad de los campesinos y su derecho fundamental a gozar de una vida en condiciones dignas y a respetar su identidad campesina para lo cual se propone desde el saber jurídico la incorporación en la gestión del riesgo de desastres de un enfoque diferencial que permita el reconocimiento de la identidad propio del sujeto campesino y su derecho a la vida digna.

En este capítulo se pretende mostrar que incorporar una mirada diferenciadora en la gestión del riesgo de desastres de los campesinos posibilita unas mejores condiciones de existencia y bienestar y por consiguiente la concreción en la práctica del derecho a la vida digna para esta población.

2. LA GESTIÓN DEL RIESGO DE DESASTRES COMO PROCESO SOCIAL

La categoría riesgo de desastres de origen natural y socio-natural se ha investigado ampliamente desde distintas áreas del conocimiento, especialmente desde la geología [18], la ingeniería [10, 19], y desde algunas ciencias sociales como la sociología [20], también desde las teorías del desarrollo [14,15, 21] o la geografía [10,18]. En contraste, el derecho poco se ha ocupado del estudio del riesgo, más allá de la creación de legislación para regular los seguros o la conformación y funcionamiento de organismos de socorro. En Colombia, apenas desde 2012 se creó una política pública de gestión del riesgo de desastres que trasciende los aspectos de intervención en el desastre y post-desastre, para ocuparse de la reducción y mitigación de estos [22].

La evolución teórica y conceptual de la gestión del riesgo de desastres ha sido globalmente muy dinámica y existe un consenso de la relación entre los desastres con las condiciones sociales de las poblaciones [11]. Así mismo, que para establecer las características y la magnitud del riesgo es necesario considerar que las condiciones sociales son amplificadores del mismo [23].

De ahí se entiende al riesgo como un fenómeno de origen natural o antrópico que altera el medio ambiente ocupado por una comunidad vulnerable [13], que también se define “como la probabilidad de pérdidas futuras, que es el resultado de existencia de un peligro latente asociado con la posibilidad de que se presenten fenómenos peligrosos y de unas características propias o intrínsecas de la sociedad que la predisponen a sufrir daños en diversos grados” [10, p.21].

Por su parte, el Comité Nacional para el Conocimiento del Riesgo del Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (SNGRD) reconoce el riesgo como “Un proceso construido en el tiempo por la sociedad y en consecuencia se define la Gestión del Riesgo de Desastres (GRD) como un proceso social. Se reconoce además que los desastres no son naturales, y que por el contrario existen factores políticos, sociales y culturales que inciden en el grado de vulnerabilidad de los individuos al momento de enfrentar y recuperarse de la ocurrencia de un evento físico” [24, p.21].

Estas definiciones parten de reconocer la relación bidireccional existente entre los desastres y las condiciones sociales, económicas y políticas de las poblaciones amenazadas o afectadas. A partir de las mismas, es evidente que en Colombia en las áreas rurales, la marginalidad y los altos niveles de pobreza contribuyen a incrementar la vulnerabilidad de las poblaciones y sus bienes, y se identifica que los campesinos son un grupo altamente expuesto y vulnerable frente a los desastres socio-naturales.

Así, desde un necesario reconocimiento del derecho que todos tenemos a una vida digna, es fundamental considerar el riesgo no sólo como de origen natural, sino también, como un concepto social, consecuencia de un modelo de desarrollo económico y ambiental insostenible [6,19]. Esto implica que el riesgo está dado por la amenaza, pero también incorpora factores socioeconómicos y culturales que se expresan en un mayor o menor grado de exposición de las personas y sus bienes. En este sentido, existen enfoques como los descritos, que asocian la pobreza a la vulnerabilidad y que incluyen la pobreza como uno de los factores que definen el riesgo, indicando que a mayor pobreza se incrementa la vulnerabilidad [13, 16].

En el caso colombiano, el enfoque de análisis de la vulnerabilidad en su relación estrecha con la pobreza y con el desarrollo económico, es sustentado, entre otros por Villareal Camacho [19] quien señala que existe una relación causa-efecto entre desastres y pobreza, la cual se profundiza por el contexto de cambio climático. Así mismo, se plantea que cubrir las necesidades básicas de la población reduce el impacto y ocurrencia de desastres; no obstante, estar por encima de los niveles mínimos de calidad de vida no es suficiente para reducir el riesgo y puede llevar a configurar escenarios de vulnerabilidad [25]. Otra forma de expresarlo es con la ecuación: pobreza/riesgo medioambiental = problema de desarrollo [16, p.127]. Desde el derecho, “la vulnerabilidad debe entenderse como la falta de recursos económicos, y lo que es más importante, como la falta permanente de derechos políticos y sociales” [15, p.127].

En tanto, en el *Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction* (GAR) [26] en el mismo sentido, se concluye que la relación entre el riesgo de desastre y el desarrollo es clara y que la incorporación de la reducción del riesgo de desastres en la planificación del desarrollo y en los presupuestos para impulsarlo, es ciertamente un indicador de desarrollo insostenible.

Por consiguiente, la gestión del riesgo de desastres se configura como una estrategia fundamental para el desarrollo, incluyendo la adaptación al cambio climático, coadyuvando a que éste sea sostenible desde el punto de vista ambiental y también como un desarrollo seguro. Pasando de enfoques restauradores post-evento a enfoques preventivos, y a la inclusión en todos sus procesos (conocimiento del riesgo, reducción del riesgo y manejo de desastres) de acciones diferenciadoras de los distintos sujetos damnificados por los desastres.

3. EL ENFOQUE DIFERENCIAL EN LA GESTIÓN DEL RIESGO DE DESASTRES

El enfoque diferencial hace referencia a la necesidad de establecer un trato diferente a grupos de población que están en una situación de mayor vulnerabilidad en razón de sus condiciones propias como de etnia, género, edad, orientación sexual o discapacidad, lo cual requiere la adopción de medidas que permitan superar esa vulnerabilidad. Conceptualmente se entiende el enfoque diferencial como un proceso político en el que se afirman derechos identitarios y consiste en reivindicar y conceder derechos jurídicos, políticos, sociales y culturales a poblaciones históricamente marginadas [27].

Para que la gestión del riesgo de desastres incorpore el enfoque diferencial y a partir de este implementar acciones diferenciadoras, es necesario revisar la forma en que se recolecta la información de los desastres y sus efectos, la cual además de dirigirse a entender las dinámicas de los desastres, debe permitir resolver preguntas técnicas como ¿qué factores inciden en la ocurrencia de los eventos?, ¿quiénes son los damnificados por los desastres? o ¿cuáles pérdidas se generan?, así como preguntas socio-culturales que posibiliten identificar elementos culturales que reducen o incrementan la vulnerabilidad.

Otra característica de la problemática asociada a la recolección de la información discriminada, viene dada por el énfasis primordialmente urbano de la política de gestión del riesgo de desastres según grupos sociales. Así, el artículo 81 de la Ley 1523 de 2012 establece que el gobierno nacional podrá promover, ejecutar y financiar proyectos de “desarrollo urbano” para efectos de reubicación de asentamientos y de viviendas, mientras que frente a la posibilidad de desarrollar viviendas rurales para procesos de reubicación no hay mención alguna. Esta característica se manifiesta también en el hecho de que los conceptos se expresan en términos urbanos y en que el énfasis de los estudios se dirige a las problemáticas urbanas.

La Ley 1523 de 2012 está pensada para lo urbano, con fundamento en que las áreas urbanas tienen una mayor concentración de población, lo que potencia los impactos. Sin embargo, analizando los datos de DesInventar 2003, se determina que sólo el 30% de los desastres se localizan en ciudades [28]. De esta manera, puede observarse que desde la política nacional no hay un enfoque específico para lo rural, tampoco para los campesinos a pesar de su vulnerabilidad. Por consiguiente, es necesaria una resignificación del concepto riesgo de desastre que incluya una mirada diferencial para las comunidades campesinas en el país.

4. EL CAMPESINO Y SU NECESARIO RECONOCIMIENTO COMO SUJETO DIFERENCIADO EN LA GESTIÓN DEL RIESGO DE DESASTRES

A continuación, se desarrolla el concepto de *campesino* como un primer aporte a la configuración de este grupo poblacional, como un sujeto diferenciado a ser incorporado en la gestión del riesgo y se precisa que se entiende por enfoque diferencial.

Las categorías campesino y ruralidad han tenido distintas connotaciones como categorías mediadoras del relacionamiento del Estado con un determinado grupo de la población rural [29]. El término campesino ha servido en doble vía como objeto de norma, regulación y mecanismo de mediación estatal, como forma para nombrar a los sujetos de distintas demandas sociales en contextos históricos específicos [30].

El término campesino, además de ser un concepto retórico, es decir que hace parte de la construcción de un discurso, es también un concepto relacional, ya que lo constituyen las relaciones intersubjetivas, políticas y sociales. De manera que es pertinente reflexionar sobre las asociaciones que se hacen a la noción y a la multiplicidad de sus significados [30]. Esa multiplicidad de asociaciones y significados que se convocan por la expresión campesino, son cambiantes y dinámicos dependiendo de las ideas, formas sociales y culturales con que se relacionan y al contexto histórico y espacial.

Un recorrido por las principales teorías que se ocupan de la categoría social-campesino y su papel en la sociedad desde el marxismo, a la teoría chayanoviana, se hace un llamado a que los estudios sobre el campesinado se abran a nuevas formas de pensamiento [31]. Mostrando que la categoría campesino, como no encaja en las lógicas del capitalismo ha sido invisibilizada o se le ha restado importancia. Tanto los estudios de la economía clásica, como los de economía marxista consideran la categoría social-campesinado como una categoría en proceso de extinción, anacrónica y que es un obstáculo para el desarrollo [31]; sin embargo, la categoría pervive: los campesinos son personas, comunidades y unidades de producción familiar en medio del auge del desarrollo capitalista.

El campesino hoy se nombra como un sujeto global que lucha por su identidad, por visibilizarse y por diferenciarse cultural y socialmente frente a otros grupos. Las luchas campesinas actuales entran en diálogo con el discurso multiculturalista y con las experiencias de exclusión de las minorías étnicas. El campesino se auto-reconoce y se auto-identifica como un grupo poblacional y a su vez como un actor político.

Caja 3. Elementos para la conceptualización del campesino

El Instituto Colombiano de Antropología e Historia (ICANH) elaboró un documento técnico con los elementos para la conceptualización de lo campesino dirigido a su inclusión como sujetos diferenciados en el Censo del DANE. Dichos elementos son [32]:

1. Dimensión socio-territorial.
 - Relación estrecha con la tierra.
 - Formas de posesión de la tierra asociativas y vecinales.
 - Vinculación con la naturaleza.
2. Dimensión socio-cultural.
 - Autoreconocimiento individual, familiar y comunitario como campesinos.
 - Formas de vida campesinas.
3. Dimensión Político-productiva.
 - Trabajo con la tierra: recolectores, cultivadores, pescadores y criadores.
 - Productores de alimentos, de valores de uso y de materias primas.
 - Sujeto económicamente multiactivo.
 - Autoconsumo.
4. Dimensión organizativo-política.
 - Sujeto participativo.
 - Autoafirmación como campesino.

Es importante reiterar que la población campesina ha estado sumida en unas condiciones de pobreza, desigualdad social, abandono del Estado y de la sociedad, que han llevado a que en muchas ocasiones el concepto campesino se asocie con el concepto de pobreza; es decir, que campesino-pobreza se consideren como sinónimos o incluso que la pobreza se perciba como una característica identificadora del campesino [17,33,30].

La inexistencia de un concepto claro de campesino que defina a un sujeto social específico es una de las causas por las que el problema del campo y de los campesinos sigue sin resolver a pesar de las políticas estatales dirigidas a este sector [33].

La configuración de una identidad campesina, más allá de representar una forma de relacionamiento entre los campesinos y el Estado, implica la posibilidad de su reconocimiento como sujetos especiales de derecho. Al respecto, es menester mencionar que la constitución de 1991 no reconoce a los campesinos como un grupo culturalmente diferenciado y, por tanto, tampoco reconoce una condición de especial protección de sus derechos a diferencia de los indígenas y los afrocolombianos [34,30].

Frente a los campesinos, la Constitución Política se limita a identificar la problemática de los trabajadores agrarios para su acceso a la propiedad de la tierra (artículo 64 C.P), que se aborda desde el derecho agrario y las políticas públicas de desarrollo rural basadas en el aumento de la productividad. En contraste, no hay una garantía específica dirigida a proteger el derecho de los campesinos a tener una vida digna, o de sus derechos económicos, sociales, culturales y ambientales (verbigracia el derecho a que se protejan sus semillas y conocimientos tradicionales), ni de sus derechos civiles y políticos (como podría ser por ejemplo, el derecho a la consulta previa establecido para comunidades étnicas).

Caja 4. Derechos económicos, sociales y culturales

Los derechos económicos, sociales y culturales pueden definirse como los derechos que nacen de la dignidad humana y son, por ende, inherentes a la persona humana. Por tanto, son derechos directamente relacionados con la protección de las necesidades y capacidades que garantizan una calidad de vida [35]. En la Constitución de 1991 se consagran principalmente en el Capítulo 2 del Título II, artículos 42 a 77.

A diferencia de los grupos étnicos, los sectores campesinos mestizos tienen que apelar a su inclusión en las lista de desplazados o su vinculación como guardabosques para acceder a los beneficios de las políticas sociales focalizadas [36], así que en un contexto de desmantelamiento de la política agraria, de pobreza y desempleo rural, el ingreso a la categoría de población vulnerable frente a la violencia es una nueva estrategia de rebusque económico y de inclusión política y social usada por los campesinos. Sin embargo, el uso de esta estrategia se puede objetar por cuanto está asociada a los fenómenos de violencia que ha sufrido el país, lo que se constituye en una forma de re-victimización [37]. Además, esta estrategia no reconoce la identidad campesina, dejando por fuera a quienes no pueden hacer uso de la misma, por no tratarse de víctimas directas de la violencia, es decir un buen número de ellos. Si bien, la categoría campesino se invisibiliza permanentemente en las políticas públicas, ésta sigue siendo vigente como categoría cultural y como un referente de autodefinición [38].

La idea de identidad como estrategia de relacionamiento con y frente al Estado a través del derecho, se constituye como un campo de lucha por el reconocimiento identitario como sujeto de derecho diferente

a otros grupos que les permita acceder en condiciones de equidad a sus derechos. En otras palabras, el proceso de reivindicación político-jurídico de lo campesino, plantea que los derechos campesinos deben reconocerse explícitamente en la norma; sin embargo, en la práctica esto es difícil de conseguir, incluso para sujetos especiales con reconocimiento constitucional como tal desde 1991, como es el caso de los indígenas [38].

El desconocimiento de la condición de campesino tiene una importante incidencia para esta población en los procesos de gestión del riesgo de desastres, los cuales no desarrollan ninguno de sus procesos de manera diferenciada para esta población. Esto los deja en una situación de aumento de su vulnerabilidad en aspectos como la exposición de sus medios de vida, la ruptura de su especial forma de relacionamiento con el territorio y el desconocimiento de sus particularidades culturales. Por razones de espacio nos referimos únicamente al proceso del conocimiento del riesgo de desastres.

En el proceso del conocimiento del riesgo, que implica la recopilación y análisis de información específica para la población campesina, desde la identificación de la vulnerabilidad (física, social, económica y cultural), el nivel de exposición, las causas de los desastres, la forma en que los afectan y la magnitud de los impactos, es fundamental para garantizar los derechos de los campesinos, ya que permite que en los procesos de reducción del riesgo y manejo de desastres se tengan en consideración las particularidades de esta población.

Un enfoque diferencial permitirá a la gestión del riesgo identificar las necesidades específicas de los campesinos, establecer su vulnerabilidad actuando sobre ella y tener en consideración las diferencias socio-económicas y culturales al momento de planear las intervenciones. Para ello, se propone entender el enfoque diferencial como un proceso político en el que se afirman derechos asociados a una identidad [27]; es decir, que reconoce “las diferencias físicas, sociales y culturales de cada grupo poblacional y de cada sujeto, individual y colectivo, de forma que sea posible reconocer su experiencia e historia particular que los identifica o representa” [37, p.29]. De igual manera permite adoptar orientaciones que indican acciones y caminos específicos a seguir en los distintos procesos de la gestión del riesgo frente a las poblaciones campesinas en Colombia para asegurar sus derechos humanos, en especial su derecho a una vida digna.





Figura 2. Proceso social de la gestión del riesgo de desastres. Elaboración propia con la APP Canva.

5. CONCLUSIONES

La gestión del riesgo de desastres de origen natural y socio–natural debe entenderse como una política de desarrollo estrechamente vinculada con las políticas de protección social, que se constituye en un posibilitador de calidad de vida y bienestar para la población, por ende, para la concreción en la práctica del derecho a la vida digna. Sin embargo, para todos los grupos poblacionales, este derecho no se concreta de igual forma por lo que es necesario realizar acciones positivas frente a los grupos más vulnerables como los campesinos. Para ello se requiere inicialmente que la recolección de información se diferencie y que se realicen estudios que se enfoquen específicamente en este grupo poblacional.

La tarea propuesta no es sencilla, ya que si bien frente a grupos positivamente diferenciados, como por ejemplo las comunidades étnicas o las mujeres, existen niveles de aprobación frente a quienes

los integran y la necesidad de brindarles una especial protección desde el derecho. En el caso de los campesinos aún no existe consenso en su conceptualización como categoría, ni sobre quiénes son los sujetos individuales que forman este grupo social y menos sobre su consideración como grupo sujeto especial de derecho. Por lo anterior, es indispensable considerar la relación riesgo/desarrollo sostenible desde la implementación de la política de gestión del riesgo de desastres dirigida a los campesinos que dé respuesta anticipada a los impactos negativos que los desastres socio-naturales tienen sobre el bienestar de estas poblaciones, y cómo las políticas públicas de protección social pueden generar soluciones acordes a las características y condiciones propias de los campesinos.

La política de gestión del riesgo de desastres con enfoque diferencial requiere incluir acciones de protección social, pero en una relación de doble entrada. Las políticas de protección social deben incorporar la gestión del riesgo de desastres, específicamente el conocimiento del riesgo y la reducción del riesgo. Esto se constituye en una estrategia que les permite obtener mejores resultados a ambas políticas.

Se propone una política de gestión del riesgo de desastres con enfoque diferencial para los campesinos que focalice la reducción de desastres teniendo como punto de partida la planificación y el ordenamiento del territorio más que el diseño y construcción de obras de mitigación, que priorice acciones de protección social como son empleo, subsidios o transferencias de efectivo y seguridad social direccionados a las comunidades campesinas.

Para lograrlo se requiere aumentar considerablemente la información y las evaluaciones sobre el riesgo de desastres y considerando la desproporcionada afectación que los grupos de población más vulnerable sufren con los desastres, es importante que la información recogida facilite la identificación de los tipos de sujetos, por cuanto la recolección de información sin tener en cuenta indicadores que diferencien los grupos poblacionales (como por ejemplo mujeres, niños, indígenas o campesinos) encubre la gravedad de los impactos de los desastres para las poblaciones campesinas.

La legitimación de la recolección de información diferenciada para las comunidades campesinas, se fundamenta en que contar con información específica posibilita desenmascarar las profundas desigualdades derivadas de la pobreza y la exclusión social. Si se asocian los efectos devastadores intrínsecos de los desastres socio-naturales a la existencia de una alta vulnerabilidad generada por la existencia de altos índices de pobreza, entonces se percibe claramente que la vulnerabilidad socioeconómica es clave en el entendimiento de las causas de los desastres, y cómo las consecuencias de estos no son homogéneas, sino que se distribuyen según las condiciones de dicha vulnerabilidad.

Asimismo, si se logra que las medidas adoptadas sean más acordes a las características, idiosincrasia y cultura de las comunidades y damnificados, y se incorporan medidas alternativas creadas por los saberes propios de las comunidades, en este caso comunidades campesinas, se garantiza un mayor nivel de éxito, el intento de homogeneización de los conceptos de reducción y adaptación, desarrollados sólo desde el lado técnico, no permite identificar los demás sistemas que responden a otras realidades, cosmovisiones, prácticas y ethos [38].

En igual medida, se considera importante señalar que el enfoque diferencial permite a la gestión del riesgo de desastres entender que los derechos humanos son una integralidad y que su concreción en la práctica contribuye a superar las condiciones de invisibilización de los campesinos partiendo del reconocimiento identitario de los campesinos, lo cual implica que la planificación del territorio y la gestión del riesgo de desastres se realice con la participación de los mismos, de forma que posibilite la protección de sus derechos, sobre todo, el derecho a disfrutar de una vida en condiciones óptimas y dignas.

6. MATERIALES Y MÉTODOS

El método implementado es cualitativo y el enfoque que orientó la investigación es el hermenéutico [39], que comprende tres pasos o momentos, el acercamiento interpretativo a los textos, el acercamiento a las comunidades campesinas en cuanto sujetos–objetos de investigación y la síntesis que conjuga la interpretación textual, con la interpretación que el investigador realiza de lo expresado por los sujetos. En este artículo se presentan los resultados del primer momento en el cual, en la búsqueda de una creación, de un aporte al saber jurídico, se desenvuelve una experiencia que es el momento del pensamiento, del cuestionamiento, de la reflexión sobre la pregunta de investigación que nos llevó a cuestionarnos sobre las propuestas que desde el derecho, contribuyen al mejoramiento de la calidad de vida de las poblaciones, para el caso de estudio indagar sobre cómo desde la gestión del riesgo de desastres socio-naturales se puede posibilitar el derecho a la vida digna de los campesinos en Colombia.

La pregunta de investigación, como proyecto de sentido, posibilita por medio del proceso interpretativo conversar con los textos -literatura especializada, jurisprudencia de la Corte Constitucional y normatividad. Las técnicas e instrumentos utilizados fueron los reseñados en la **Tabla 1**.

Tabla 1. Técnicas e instrumentos para la recolección de la información. Elaboración propia.

Técnicas e instrumentos para la recolección de la información		
Técnicas	Instrumentos	Fuentes
Revisión bibliográfica	- Fichas de resumen	· Bibliografía especializada nacional e internacional
Revisión jurisprudencial.	- Fichas de análisis - Fichas textuales	· Jurisprudencia Corte Constitucional 1992-2021.
Revisión normativa	- Fichas de análisis - Fichas textuales	· CONPES, Política Nacional y Legislación en materia de propiedad rural, ordenamiento territorial, gestión del riesgo de desastres y desarrollo rural.
Revisión de datos.	-Fichas estadísticas	· Encuesta Nacional de Calidad de Vida (ECV) 2019. · Censo Nacional de Población y Vivienda 2018. · Encuesta Nacional Agropecuaria 2010, 2014. · Censo Nacional Agropecuario 2014. · Datos del Departamento Administrativo de Planeación Nacional. · Datos de la Unidad Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD). · Datos del Sistema de Alertas Tempranas del Valle de Aburrá (SIATA). · Datos de la Unidad de Planificación Rural Agropecuaria (UPRA).

PUNTOS CLAVE

1. La gestión del riesgo de desastres debe considerarse como una política pública de protección social y por tanto incorporar aspectos como generación de empleo, subsidios o transferencias de efectivo y seguridad social, como mecanismos adicionales para la gestión del riesgo de desastres direccionados a las comunidades campesinas.
2. El campesino es un sujeto histórico que se ha configurado según cada época pero que siempre se ha auto reconocido como campesino.
3. Es necesario realizar una gestión del riesgo de desastres con enfoque diferencial, de forma que se identifiquen los distintos sujetos de la misma y sus intersecciones.

NECESIDADES FUTURAS

- Es necesario que la gestión del riesgo en Colombia incorpore un enfoque diferencial para las comunidades campesinas, con el objetivo de cumplir con el mandato constitucional del artículo 7, en virtud del cual se reconoce y protege la diversidad étnica y cultural. El primer paso a dar es la recolección de información discriminada para este grupo poblacional, que refleje como los desastres los afectan realmente.
- En un segundo momento, es necesario revisar si los datos recopilados de forma discriminada frente a diferentes grupos poblacionales, inciden o no en la adopción de medidas igualmente diferenciadas.

CONFLICTO DE INTERESES

Las autoras no declaran conflicto de intereses

CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA CRediT

Conceptualización: SEAV, SPDQ. Metodología: SEAV, SPDQ. Redacción de primera versión: SEAV, SPDQ. Escritura. Revisión y edición de segunda versión: SEAV, SPDQ. Figuras y tablas: SEAV, SPDQ. Administración de proyecto: SEAV, SPDQ. Búsqueda de evidencia: SEAV.

IDENTIFICACIÓN DE AUTORES

Sandra Eliana Alzate Vargas

<https://scholar.google.com/citations?user=ey6NHAYAAAAJ>

Sandra Patricia Duque Quintero

<https://scholar.google.es/citations?user=i0jZIGsAAAAJ>

BIBLIOGRAFÍA

1. DANE (Departamento Administrativo Nacional de Estadística). (2019). *Manual de Conceptos Censo Nacional de Población y Vivienda-Cnpv 2018*. <https://www.dane.gov.co/files/censo2018/informacion-tecnica/CNPV-2018-manual-conceptos.pdf>
2. DANE (Departamento Administrativo Nacional de Estadística). (2020). *Encuesta Nacional de Calidad de Vida ECV 2019, Resultados-Identificación Subjetiva De La Población Campesina*. https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/condiciones_vida/calidad_vida/2019/presentacion-ECV-2019-poblacion-campesina.pdf
3. DANE (Departamento Administrativo Nacional de Estadística). (2021). *Metodología General Encuesta Nacional de Calidad de Vida*. <https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/fichas/ECV.pdf>
4. Mantilla García, J.C. (2016). *Vida digna: Hacia un horizonte normativo para el Desarrollo Humano en la Colombia Rural*. [Tesis de doctorado, Pontificia Universidad Javeriana] <https://doi.org/10.11144/Javeriana.10554.34461>
5. MADS (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible), PNUD (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo), Bárcenas Sandoval J, Gómez Castiblanco L, Wilches-Chaux, G. (2016), *Curso en Gestión del Riesgo de Desastres para Autoridades Ambientales en Colombia. Unidad I: Marco conceptual, institucional y normativo*. <https://www.undp.org/es/colombia/publications/curso-en-gesti%C3%B3n-del-riesgo-de-desastres-para-autoridades-ambientales-de-colombia>
6. MADS (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible), PNUD (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo), Carrión Barrero, GA. (2016). *Curso en Gestión del Riesgo de Desastres para Autoridades Ambientales en Colombia. Unidad II: Gestión de riesgos de desastre en la planificación territorial*. https://www.co.undp.org/content/colombia/es/home/library/environment_energy/curso-en-gestion-del-riesgo-de-desastres-para-autoridades-ambien.html
7. UNDRR (Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres). (2021, 3 de agosto). *DesInventar Sendai*. <https://db.desinventar.org/DesInventar/profiletab.jsp>
8. UNGRD (Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres). (2022, 8 de abril). *Monitoreo de Amenazas Naturales - 8 de abril de 2022*. [https://www.paho.org/es/monitoreo-amenazas-naturales-8-abril-2022#:~:text=Colombia%20\(Actualizaci%C3%B3n\).de%2017%20departamentos%20del%20pa%C3%ADs](https://www.paho.org/es/monitoreo-amenazas-naturales-8-abril-2022#:~:text=Colombia%20(Actualizaci%C3%B3n).de%2017%20departamentos%20del%20pa%C3%ADs)
9. UNGRD (Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres), Cardona Arboleda, O., Bernal, G., Marulanda Fraume, P., Villegas, C., González, D.; Escovar, M. A., Carreño, M., Marulanda Fraume, M., (2019) *Atlas de Riesgo de Colombia: Revelando los Desastres Latentes*. <https://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/handle/20.500.11762/27179>
10. Cardona Arboleda, O. (2001). *Estimación Holística del Riesgo Sísmico Utilizando Sistemas Dinámicos Complejos*. <https://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/bitstream/handle/20.500.11762/19751/?sequence=1>
11. Blaikie, P., Terry, C., Davis, I., Wisner, B. (1994). *At risk. Natural Hazards, People's Vulnerability, and Disasters*. Taylor & Francis e-Library. <https://doi.org/10.4324/9780203714775>
12. Turner, B., Kasperson, R., Matson, P., Matsone, P., McCarthy, JJ., Corell, RW., et al. (2003). A framework for vulnerability analysis in sustainability science. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 100(14), 8074–9. <https://doi.org/10.1073/pnas.1231335100>
13. Wilches-Chaux, G. (2017). Vulnerabilidad Global. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 8(9),1–58.

14. Soares, D., Murillo-Licea, D. (2013). Percepciones Sociales y Cambio Climático. *Cuadernos de Desarrollo Rural*, 10(72),181–199.
15. De la Fuente, A. (2010). Desastres Naturales y Pobreza En América Latina: Impacto Al Bienestar y Soluciones de Protección Social. *Bienestar y Política Social*, 6(1),1–16.
16. Lampis, A. (2010). *Pobreza y Riesgo Medioambiental: Un problema de Vulnerabilidad y Desarrollo*. https://www.desenredando.org/public/varios/2010/2010-08-30_Lampis_2010_Pobreza_y_Riesgo_Medio_Ambiental_Un_Problema_de_Development.pdf
17. PNUD (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo). (2011). El Campesinado Reconocimiento para construir País. *Cuaderno del Informe de Desarrollo Humano, Colombia*. https://www.co.undp.org/content/colombia/es/home/library/human_development/el-campesinado--reconocimiento-para-construir-pais.html
18. Mosquera Téllez, J., Gómez Carvajal, ER. (2012). Bases Conceptuales para la Gestión Integral del Riesgo. *Luna Azul*, (34):148–69. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1909-24742012000100010&lang=es
19. Villareal Camacho, KA. (2016). Aporte de la Política de Gestión del Riesgo de Desastres a la Reducción de la Pobreza en Colombia desde un Enfoque de Vulnerabilidad Social. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/59542>
20. Campos-Vargas, M., Toscana-Aparicio, A., Campos Alanís, J. (2015). Riesgos Socionaturales: Vulnerabilidad Socioeconómica, Justicia Ambiental y Justicia Espacial. *Cuadernos de Geografía. Revista Colombiana de Geografía*, 24(2):53–69. <https://doi.org/10.15446/rcdg.v24n2.50207>
21. Mora, M., Saffon, M. P., Gómez, P. (2018). Investigación-Acción Durante Desastres: Uso de Redes y Derechos. *Revista Mexicana de Sociología*, (80), 95–119. <https://doi.org/10.22201/iis.01882503p.2018.0.57775>
22. Acuña Gamba, E. J., (2016). Responsabilidad Del Estado Por Fallas Geológicas. *Revista Vía Iuris*, 21(8), 47–67.
23. Kasperson, RE., Renn, O., Slovic, P., Brown, HS., Emel, J., Goble, R., et al. (1988). The Social Amplification of Risk: A Conceptual Framework. *Risk Analysis*, 8(2):177–87. <https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.1988.tb01168.x>
24. Unidad Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres - UNGRD, Comité Nacional para el Conocimiento del Riesgo - SNGRD. (2017). Terminología sobre Gestión del Riesgo de Desastres y Fenómenos Amenazantes. <https://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/bitstream/handle/20.500.11762/20761/Terminologia-GRD-2017.pdf?sequence=2>
25. Pérez Aldana, LY. (2016). El desarrollo como Determinante de la Magnitud de los Desastres en Colombia 2000-2012. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/57913>
26. Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres -UNDRR. (2019). *Informe de Evaluación Global sobre la Reducción del Riesgo de Desastres (síntesis). Hacia el Desarrollo Sostenible*. <https://www.eird.org/americas/docs/gar-sintesis-2019.pdf>
27. Olivar Rojas, AF. (2020). Políticas Públicas y Enfoques Diferenciales: Aproximaciones desde la Interculturalidad y la Democracia Radical. *Iztapalapa Revista Ciencias Sociales y Humanidades*, 88(1). <https://doi.org/10.28928/ri/882020/aot1/olivarrojas>
28. Lampis, A. (2019). ¿Qué Ha Pasado con la Vulnerabilidad Social en Colombia? Conectar Libertades Instrumentales y Fundamentales. *Sociedad y Economía*. (19), 229-261. https://sociedadyeconomia.univalle.edu.co/index.php/sociedad_y_economia/article/view/4106/6315

29. Yie Garzón, SM. (2018) *¡Vea, Los Campesinos Aquí Estamos!: Etnografía De La (Re)Aparición Del Campesinado Como Sujeto Político En Los Andes Nariñenses Colombianos*. [Tesis doctoral, Universidade Estadual de Campinas. Instituto de Filosofia e Ciências Humanas]. <https://core.ac.uk/download/pdf/296899589.pdf>
30. Velasco Olarte, ME. (2021, 2 de agosto). *Quienes Son Hoy los/as Campesinos/as: Un Acercamiento al Proceso de Construcción de Identidad Campesina en el Marco del Conflicto Armado en Colombia. Caso de Estudio: Las Zonas de Reserva Campesina*. <https://www.flacsoandes.edu.ec>.
31. Mora Delgado, J. (2008). Persistencia, Conocimiento Local y Estrategias de Vida en Sociedades Campesinas. *Revista de Estudios Sociales*, (29),122–33. <https://doi.org/10.7440/res29.2008.07>
32. ICANH (Instituto Colombiano de Antropología e Historia). (2017, febrero). *Elementos para la conceptualización de lo “campesino” en Colombia Documento técnico elaborado por el ICANH*. <https://www.dejusticia.org/wp-content/uploads/2017/11/Concepto-técnico-del-Instituto-Colombiano-de-Antropología-e-Historia-ICANH.pdf>
33. Salgado Araméndez, C. Los Campesinos Imaginados. (2002). *Cuadernos Tierra y Justicia*. ILSA, (6):40.
34. Chacón Hernández, D. (2018). ¿Y qué hay de los derechos humanos campesinos? *Alegatos - Revista Jurídica de la Universidad Autónoma Metropolitana*, 18(1):815–41.
35. Duque Quintero, SP., Duque Quintero, M., González Sánchez, P. (2019). Sobre el Derecho Fundamental Al Mínimo Vital o a La Subsistencia: Análisis Jurisprudencial. *Revista Encuentros*, 17(01):80–95. <https://doi.org/10.15665/encuent.v17i01.1917>
36. Rodríguez, JN., Camacho, SJ. (2013). ¿Quiénes son los campesinos colombianos hoy? *Universidad, Ciencia y Desarrollo*. <https://repository.urosario.edu.co/handle/10336/4774>
37. Arteaga Morales, BI. (2012). El Enfoque Diferencial: ¿Una Apuesta Para La Construcción De Paz? [Internet]. En: Observatorio de Construcción De Paz. (Eds.), *Identidades, Enfoque Diferencial y Construcción de Paz. Serie Documentos Para La Paz (N° 3.*, p.p.15–38). Universidad Jorge Tadeo Lozano. <https://doi.org/10.17141/iconos.66.2020.4012>
38. Salinas, V., Cevallos, W., Levy, K. (2020). Afrodescendientes e Indígenas Vulnerables Al Cambio Climático: Desacuerdos Frente A Medidas Preventivas Estatales Ecuatorianas. *Iconos*, 24(66),107–29. <http://10.0.66.245/iconos.66.2020.4012>
39. González Agudelo, E. (2011). Sobre La Experiencia Hermenéutica o Acerca de Otra Posibilidad Para La Construcción Del Conocimiento. *Discusiones Filosóficas*, 12(18),125–43.

CAPÍTULO
10

Sistemas de control de respuesta estructural para la mitigación del riesgo sísmico en la infraestructura colombiana. Necesidad inmediata de una normativa para el país

Carlos Mario Piscal Arevalo^{1-3*} & Juan Andrés Oviedo Amezcua²

¹Universidad de La Salle, Programa de Ingeniería Civil, Bogotá, Colombia

²efe-Prima-ce Control y Diseño de estructuras SAS, Medellín, Colombia

³Red Colombiana de Investigación en Ingeniería Sísmica (CEER)

*Autor de contacto: Carlos Mario Piscal Arevalo, Universidad de La Salle, Programa de Ingeniería Civil, Bogotá, Colombia. Correo-e:cpiscal@unisalle.edu.co

Resumen

Colombia es un país con una amenaza sísmica importante, por lo cual su infraestructura está expuesta a eventos que, dependiendo tanto de la fragilidad estructural como de la intensidad de estos, pueden generar daños, colapsos y la interrupción del normal funcionamiento de las comunidades, lo cual implica graves impactos sociales y económicos. Con la finalidad de mitigar el riesgo por sismo, alcanzar infraestructura resiliente y aportar en el desarrollo económico y humano, en el país se están incorporando nuevas tecnologías en la infraestructura como lo son los sistemas de control de respuesta estructural. Sin embargo, su implementación actual sigue requisitos dispuestos en estándares internacionales que pueden generar inconsistencias técnicas o sobrecostos. Es por lo anterior que en este trabajo se muestra la necesidad urgente de una normativa local que rija el análisis, diseño y construcción de estos sistemas de control, además se presenta un breve avance de la misma.

Palabras clave: aislamiento sísmico, disipación de energía, mitigación del riesgo sísmico, nivel de desempeño, sistemas de control de respuesta estructural.

Disaster risk management in Colombia: a necessary differential view for the dignified life of farmers

Abstract

Colombia has an important seismic hazard; therefore, its infrastructure is exposed to events that, depending on both the structural fragility and the intensity of the events, might generate damages and collapses and a disruption of the normal functioning of the community, which entails severe social and economic impacts. New technologies have been incorporated into the country, such as the structural response control systems to mitigate risk for earthquakes, achieve resilient infrastructure, and contribute to economic and human development. However, its current implementation follows requirements contained in international standards that could generate technical inconsistencies or cost overruns. Due to the limitations mentioned above, this work shows the urgent need for a local regulation that governs those systems' analysis, design, and construction. Also, a quick advance of the first Colombian code in the subject is presented herein.

Keywords: Energy dissipation, seismic isolation, seismic risk mitigation, structural response controls systems, performance level.

1. INTRODUCCION

Es evidente el importante papel que tiene la infraestructura en el desarrollo de los países. También se ha hecho evidente que su diseño, construcción, mantenimiento y reciclaje, no solo debe obedecer a criterios únicos, como posiblemente son los económicos, sino que debe ser incluyente de otros que aporten a un desarrollo que garantice entre otras cosas: a) una vida digna y una adecuada protección de la misma y b) un uso de los recursos dentro de los límites que tiene el planeta. Es decir, que desde la gestión de la infraestructura de un país se debe aportar al desarrollo sostenible.

Con el incremento de población mundial ha crecido también la demanda de infraestructura necesaria para educación, salud, vivienda, transporte y demás servicios sociales, esenciales y de atención a la comunidad. Por ende, en la actualidad existe una mayor infraestructura expuesta a amenazas geológicas como los sismos y sobre todo una mayor cantidad de vidas humanas por proteger.

Teniendo en cuenta todo lo anteriormente mencionado y reconociendo que a nivel mundial la ingeniería, en constante evolución, se adapta a los desafíos, necesidades y oportunidades de mejora que requiere el mundo actual, es de relevancia generar opciones, que al implementarse reduzcan (mitiguen) los impactos negativos (o riesgos) generados por los sismos. A la vez dichas opciones deben orientarse hacia un desarrollo económico y bienestar humano sostenible.

Para mitigar el riesgo desde una perspectiva sostenible se requiere fomentar el diseño y construcción de infraestructura que brinde, adicional a lo que brinda la actual, la: a) reducción de vulnerabilidades y por ende posibles daños, b) construcción de capacidades de respuesta eficientes ante desastres y c) operatividad continua (pre-durante-post). Es decir, infraestructura que aporte a la gestión del riesgo,

incrementando a través de sus funciones o usos básicos la capacidad de la sociedad para absorber, adaptarse y recuperarse de los efectos de amenazas naturales, de una manera oportuna, eficiente y bajo una inversión económica razonable; capacidad que hoy en día se conoce como resiliencia. Con este objetivo, una de las estrategias adoptadas por la ingeniería estructural ha sido la incorporación en la infraestructura de los denominados sistemas de control de respuesta estructural (SCRE), ya actualmente en uso en algunos edificios y puentes de Colombia, como en la Clínica Amiga de Comfandi de Cali y en el Viaducto helicoidal en Risaralda.

Sin embargo, en el país su implementación actual sigue requisitos dispuestos en estándares internacionales que pueden generar inconsistencias técnicas o sobrecostos. Es por lo anterior que en este trabajo se muestra la necesidad urgente de una normativa local que rijas el análisis, diseño y construcción de estos sistemas en Colombia, partiendo desde conceptos básicos, implementación internacional y local de la técnica, inconsistencias encontradas para la aplicación de normas extranjeras en Colombia y propuestas locales obtenidas a partir de resultados de investigación. Finalmente, se esboza un breve avance hacia el desarrollo de la primera norma de SCRE para Colombia.

2. SISTEMAS DE CONTROL DE RESPUESTA ESTRUCTURAL

Caja 1. Definición, tipos y ventajas de los sistemas control de respuesta estructural

Los sistemas de control de respuesta estructural (SCRE) consisten básicamente en un conjunto o serie de dispositivos que se incorporan en las estructuras. Dichos dispositivos pueden clasificarse inicialmente en términos de la variación temporal de su aporte al sistema estructural. Si las propiedades del sistema de control son constantes en el tiempo (no varían), se denomina un sistema de control pasivo. Por otro lado, si las propiedades del dispositivo varían con el tiempo, ante la acción de fuentes de energía externas, se denomina un sistema de control activo.

Aquellos sistemas que combinan, para su adecuado funcionamiento, sistemas de control estructural pasivo y activo, se denominan híbridos. Finalmente, los denominados sistemas de control semiactivos se diferencian de los activos en el hecho que en los primeros, se presenta solo alguna característica variable en el tiempo y ésta se controla mediante dispositivos o fuentes de energía externas correspondientes a dispositivos pasivos. Vale la pena mencionar que el hecho de que las propiedades de los sistemas activos varíen en el tiempo permite controlar la respuesta estructural en función de la naturaleza de la sollicitación (demanda) que experimente el sistema y no solo obedece a una sollicitación de diseño máxima como en los sistemas pasivos. Sin embargo, son estos últimos los sistemas más usados a nivel mundial en la actualidad, por lo cual son en los que se enfoca este trabajo.

Los SCRE tienen como finalidad principal reducir los desplazamientos, aceleraciones y fuerzas que las estructuras experimentarían bajo eventos extremos como son los sismos. Para tal fin los dispositivos deben tener una o varias de las siguientes características: a) modificar las propiedades dinámicas de la estructura, b) disipar la energía que ingresa al sistema y c) ejercer fuerzas que contrarrestan las sollicitaciones.

Dentro de los SCRE pasivos, diferentes dispositivos han sido creados con alguna o algunas de las características anteriormente mencionadas, lo cual permite subdividirlos en tres grandes grupos principales: aisladores sísmicos, disipadores de energía y masas activas. Los aisladores sísmicos y los disipadores de energía son los sistemas pasivos con mayor desarrollo y aplicación en infraestructura a nivel mundial, y por lo tanto son los que actualmente se incorporan en las normativas internacionales para aplicación de sistemas de control de respuesta estructural, por ende, son los que aquí se estudian y presentan.

2.1 Aisladores de base

Son dispositivos con una alta capacidad de carga vertical y cuya flexibilidad en las direcciones horizontales es alta cuando se compara con la de una estructura convencional. Los aisladores se ubican primordialmente en la base de la estructura principal de edificaciones o las superestructuras en puentes, y en la actualidad pueden generalmente clasificarse dentro de dos grandes grupos, estos son aisladores de fricción y aisladores elastómericos. Esta clasificación obedece principalmente a las características de los materiales de los dispositivos, acero y goma respectivamente y a sus mecanismos de disipación de energía, fricción y deformación de materiales, respectivamente. Sin embargo, vale aclarar que su comportamiento específico depende también de características adicionales determinadas por variables como los componentes que incluyen (núcleo de plomo, goma de alto amortiguamiento) y la geometría que poseen (altura de las capas de goma, radio de curvatura de la superficie de fricción). Imágenes de los dispositivos y una clasificación más extensa de los mismos pueden encontrarse en los trabajos en la temática desarrollados por Piscal et al. [1–6].

El beneficio que estos dispositivos aportan a las estructuras proviene de la flexibilización del sistema o elongación del periodo estructural y del incremento del amortiguamiento respecto al 5% del amortiguamiento crítico, presente en estructuras convencionales [7,8]. Lo anterior induce en la infraestructura una reducción de aceleraciones, fuerzas y desplazamientos, lo cual conlleva a una disminución del posible daño estructural, no estructural y en contenidos a presentarse en eventos sísmicos extremos.

2.2 Disipadores de energía o amortiguadores

Por otro lado, los dispositivos de control de disipación de energía, comúnmente conocidos como disipadores de energía, son elementos estructurales especiales que se instalan estratégicamente dentro de un sistema estructural principal (para una edificación u otro tipo de infraestructura) de resistencia sísmica, para absorber y/o disipar parte o la totalidad de la energía de vibración impuesta por el terremoto a la estructura, reduciendo así el daño sísmico en elementos estructurales, no estructurales y contenidos.

Los disipadores de energía se agrupan esencialmente en dos tipos dependiendo de su comportamiento: disipadores de energía dependientes del desplazamiento, y disipadores de energía dependientes de la velocidad. Un disipador dependiente del desplazamiento es aquel cuya respuesta de fuerza generada es función principalmente del desplazamiento relativo entre los extremos del dispositivo. Como ejemplos de este tipo de disipador están las placas a flexión ADAS o TADAS, las barras de corte, los disipadores de fricción y las riostras de pandeo restringido.

Por otro lado, en un disipador dependiente de la velocidad, la relación fuerza-desplazamiento es principalmente una función de la velocidad relativa entre los extremos del dispositivo. El dispositivo más común de este tipo es el disipador de fluido viscoso.

La mayoría de los disipadores de energía dependiente de desplazamiento basan su disipación en la fluencia del material base con el que se fabrican, por lo que estos actúan como elementos de “sacrificio” dentro del sistema estructural, los cuales se reemplazan si presentan un daño significativo. Es importante resaltar que este aspecto no debe verse como una desventaja, pues actúan como un fusible para proteger los elementos estructurales principales.

Sin importar el tipo de dispositivo de disipación de energía empleado dentro de una estructura, estos deben siempre ser inspeccionados luego de un evento sísmico moderado. En el caso de los disipadores viscosos, pueden llegar a presentar fugas de material fluido en el evento de un terremoto.

En un artículo publicado en 2006 en Colombia, los autores Oviedo y Duque [9] presentan un compendio de los diferentes sistemas de protección sísmica y dan ejemplos de algunos de los disipadores de energía mencionados. Posteriormente, en 2009, los mismos autores [10] concluyeron que la protección pasiva de estructuras sería la más apta para ser adoptada en Colombia, resaltando los disipadores de energía tipo riostras de pandeo restringido (riostra BRB por sus siglas en inglés) como una excelente alternativa para el desarrollo, fabricación e implementación en las edificaciones colombianas. A la fecha, ya se cuenta con este desarrollo de riostras BRB en el país.

3. APLICACIÓN DE SISTEMAS DE CONTROL DE RESPUESTA ESTRUCTURAL EN EL CONTEXTO INTERNACIONAL

Diversos autores han publicado investigaciones y documentos técnicos con reportes acerca de la cantidad de edificaciones con aislamiento sísmico y disipación de energía en los países con más implementación de la tecnología, países que se caracterizan por una amenaza sísmica alta, como Japón, China, Rusia, EE.UU., Italia, Chile, Nueva Zelanda, entre otros. Entre los años 2013 y 2019 se reportaron, a nivel mundial, más de 14,000 edificaciones con aislamiento sísmico y más de 6,500 edificaciones con disipadores de energía, vale anotar que los usos reportados corresponden a hospitalario, educativo, industrial y residencial [11–14]. En cuanto a puentes se refiere, se reportaron más de 1500 puentes con aislamiento sísmico y más de 600 con disipadores de energía [11–14].

Las anteriores cifras, en constante crecimiento a nivel mundial, se deben entre otras cosas, al buen comportamiento estructural evidenciado por una cantidad importante de estructuras con sistemas de control expuestas a sismos severos. El buen comportamiento estructural se refiere a daños mínimos post-sismo que no impiden el adecuado funcionamiento de la infraestructura y a un evidente control de la respuesta estructural a través de los sistemas incorporados; control evaluado a partir de la medición de variables definidas en edificaciones instrumentadas. Como ejemplo de lo anterior y de acuerdo con un estudio realizado por la Asociación Japonesa de Aislamiento Sísmico (JSSI) [15,16], para 20 edificaciones con alturas entre 2 y 25 pisos, aisladas en la base, instrumentadas y expuestas al sismo de Tohoku (Japón) de 2011 (M_w 9.0), se obtuvo un factor de amplificación de aceleración (FAA) de 0.6, correspondiente a la relación entre la aceleración a nivel de techo y la aceleración pico del terreno (PGA), lo cual indica el evidente beneficio de la implementación del sistema al obtener una reducción de aceleraciones en la estructura. El FAA reportado corresponde a valores medidos de PGA superiores a 0.1g.

Vale anotar que, adicionalmente se definió, mediante encuestas el estado de daño de aproximadamente 300 edificaciones aisladas, concluyendo que para ninguna se presentó daño estructural, en los elementos no estructurales o en los dispositivos. En cuanto a disipadores de energía, el mismo estudio reporta que para 11 edificaciones instrumentadas y sometidas al mismo sismo, con alturas entre 5 y 54 pisos, se obtuvo una deriva de piso promedio máxima de 0.4%, deriva que sugiere una tendencia hacia comportamiento elástico y por ende daños mínimos. Al igual que en el caso de las edificaciones aisladas, se definió, mediante encuestas, el estado de daño de aproximadamente 130 edificaciones con disipadores de energía, concluyendo que para ninguna se presentó daño estructural, en los elementos no estructurales o en los dispositivos. Con el fin de comparar los anteriores resultados, de acuerdo con los estudios de Pu y Kasai [15] y Motosaka y Mitsuji [17], se concluye que algunas edificaciones convencionales (sin sistemas de control) expuestas al sismo de Tohoku, 2011, fueron seriamente dañadas; y en aquellas instrumentadas (3), se reportó un FAA promedio de 3.5, incremento de aceleración con tendencia a daño en la infraestructura.

4. NECESIDAD DE UNA NORMATIVA LOCAL PARA SCRE

4.1 Alta amenaza sísmica en Colombia

Colombia se ubica en una de las zonas sísmicamente más activas de la tierra. Dentro del país, la mayoría de la población (87%) se encuentra en zonas de amenaza sísmica alta e intermedia [18]. Lo anterior indica que la mayor parte de la infraestructura nacional se expone a una importante amenaza sísmica, la cual se define en términos de intensidad y probabilidad de ocurrencia de eventos sísmicos.

Aspectos relacionados con la amenaza como el contenido frecuencial característico de los movimientos sísmicos y las amplificaciones de las intensidades debido a los efectos de sitio, son relevantes en el diseño de los SCRE, por lo cual, a pesar de que las normativas internacionales permiten el uso de los espectros de diseño prescritos, se recomienda emplear estudios sísmicos particulares de sitio.

Información más detallada de las características de la sismicidad del país, puede encontrarse el modelo nacional de amenaza sísmica para Colombia [19].

4.2 Comportamiento estructural de nueva infraestructura ante sismos

Caja 2. Visión normativa del comportamiento estructural esperado

Mencionando específicamente el caso de edificaciones nuevas en el país, actualmente estas deben diseñarse y construirse siguiendo obligatoriamente los requisitos del Reglamento Colombiano de Construcciones Sismo Resistentes NSR-10. Dicho reglamento en su numeral A.1.2.2 define el estado límite de daño (desempeño) para elementos estructurales y no estructurales de edificaciones, cuando éstas se exponen al denominado sismo de diseño (sismo fuerte). Afirma que frente a dicho sismo se presentarán daños estructurales y no estructurales, pero no colapso, además se protegerá la vida. Este desempeño denominado completo o total, es dual, como generalmente sucede en los reglamentos [20], siendo el primer objetivo de desempeño la necesidad de garantizar seguridad a la vida. Lo anterior mostrado de forma gráfica, y únicamente para una vivienda individual, se presenta en la Figura 1, frente a un nivel de desempeño inicial de seguridad a la vida.



Figura 1. Representación del nivel de desempeño normativo para una edificación residencial. Adaptado de Peer [21].

El desempeño de un conjunto de edificaciones sometidas al sismo de diseño se ve como en la **Figura 2**. Se observa en algunos casos daños en elementos estructurales, daños en elementos no estructurales y en ciertos casos colapsos. De acuerdo con la información contenida en el inventario de edificaciones publicado por la sociedad de ingeniería sísmica de Nueva Zelanda [22], puede inferirse que los edificios de la **Figura 2** corresponden a estructuras con diseño sismo resistente.

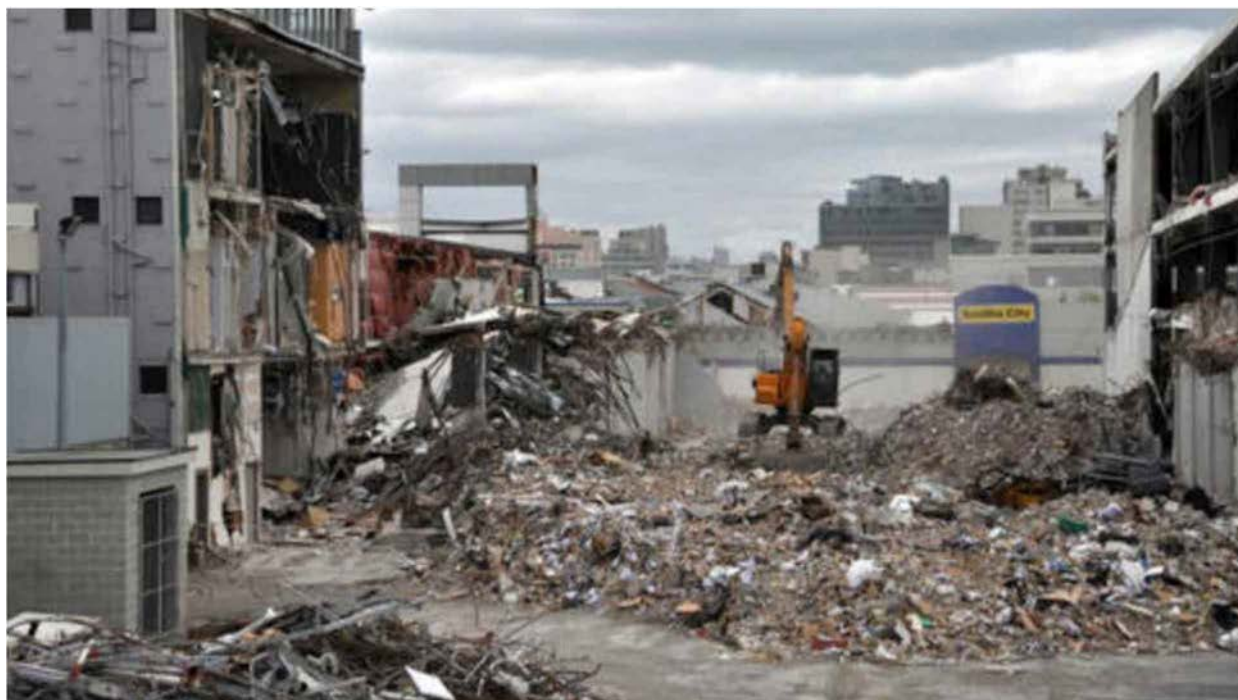




Figura 2. Representación del nivel de desempeño normativo para un conjunto de edificaciones. Adaptado de [23–25].

La **Figura 1** y la **Figura 2**, correspondientes respectivamente a edificaciones de EE.UU. y Nueva Zelanda, expuestas a sismos fuertes, son comparativas con el caso colombiano, ya que los reglamentos de dichos países, como la mayoría a nivel internacional, tienen la misma filosofía de diseño, daño sin colapso. Filosofía aceptada, entre otras cosas, por los altos costos requeridos para alcanzar infraestructura con niveles de desempeño más elevados, es decir, con menos daño.

Para el caso puntual de edificaciones indispensables, el Reglamento NSR-10 menciona en su numeral A.1.2.2.5 que, siguiendo los requisitos por éste planteados, se espera menor daño, de tal forma que no se inhiba ni la operación ni la ocupación inmediata. Estudios como el desarrollado por la *Federal Emergency Management Agency* (FEMA) [26], han mostrado que los requisitos normativos actuales en códigos como el americano, base del colombiano, no son suficientes para alcanzar este objetivo de desempeño.

Es importante mencionar que el diseño sismo resistente de edificaciones a nivel mundial, contiene componentes probabilísticos importantes, por ende, el desempeño esperado, tiende también a ser probabilístico. De acuerdo con la *American Society of Civil Engineers* (ASCE, 7) [27], se puede presentar en las edificaciones expuesta al sismo de diseño, además de los daños esperados, entre un 2 y 10% de probabilidad que la edificación colapse.

Caja 3. Impacto de las consideraciones actuales de diseño sismo resistente

Un escenario de daño o colapso por sismo de la infraestructura implica impactos negativos en sectores como la salud, educación, economía, industria y desarrollo de una ciudad o país. Estas experiencias, vividas por países como Nueva Zelanda y México, requieren importante intervención del sector privado y sobre todo del estado para iniciar los procesos de demolición y reconstrucción. Procesos que conllevan, entre otros, un alto costo económico.

4.3 Generalidades del comportamiento estructural de infraestructura existente ante sismos

El reforzamiento sísmico y estructural de edificaciones existentes es una actividad necesaria e inevitable en Colombia; y no es un caso exclusivo del país. Todas las edificaciones sufren cierto grado de deterioro durante su vida útil por mecanismos artificiales o naturales, por lo que es necesario restablecer sus condiciones de funcionalidad, seguridad y resistencia. Otras edificaciones presentan deficiencias o vulnerabilidades estructurales y algunas otras son patrimonio cultural o de gran relevancia para la población (hospitales, escuelas, estaciones de bomberos, etc), por lo que deben conservarse y protegerse; por ende, actualizarse a los lineamientos de reglamentos actuales que reflejan recientes investigaciones y experiencias en el área de la sismo resistencia.

En cuanto a las situaciones donde se requiera reforzamiento de una edificación, las cuales se enuncian en el numeral A.10.9.1 de NSR-10, se distinguen aquellas requeridas en estado de servicio y aquellas requeridas luego de un evento sísmico. En condiciones de servicio, cuando la estructura pierde parcialmente la capacidad de resistencia, estabilidad y/o rigidez ante cargas gravitacionales o laterales distintas al sismo (p.ej. viento); también se puede presentar en el caso en que se requiera una actualización sísmica normativa. Por otro lado, luego de la ocurrencia de un sismo moderado o fuerte, los elementos estructurales del sistema estructural sufren cierto nivel de daño, en el cual se compromete también, su resistencia, estabilidad y/o rigidez.

Tradicionalmente en Colombia se ha optado por dos tipos de estrategias de reforzamiento estructural sísmico: Primero, reforzamiento de elementos estructurales existentes, y/o segundo, adición de elementos estructurales nuevos. Aunque, a partir de estas técnicas se puede alcanzar los requisitos de rigidez y resistencia exigidos por reglamentos como NSR-10, se evidencia que el impacto de las intervenciones generadas es muy elevado desde el punto de vista económico, no solo por los costos directos del reforzamiento, sino por los indirectos derivados de la cantidad importante de tiempo necesaria para la compleja intervención estructural. Por otra parte, desde el punto de vista técnico, rigidizar las estructuras e incrementar su peso, impacta con aceleraciones más elevadas y fuerzas sísmicas importantes que no benefician a este tipo de estructuras. Es esencial mencionar que, a nivel mundial, una alternativa convencional, no muy habitual, consiste en la reducción del peso de la estructura, ya que al reducir peso de esta, la energía de vibración impuesta por el sismo disminuye. Dicha técnica, junto al refuerzo de elementos estructurales, fue empleada en algunas edificaciones en Japón, después del sismo de Kobe en 1995.

Finalmente, se hace notar que alcanzar los niveles de desempeño que actualmente requiere reglamentos como NSR-10 en edificaciones existentes indispensables y de atención a la comunidad, es cada vez más complejo y costoso con estas técnicas convencionales [28]. Por ende, llevar las estructuras a un nivel de desempeño superior al de NSR-10, tal como el mundo actual lo demanda, es decir un nivel de desempeño con daño mínimo en la infraestructura, es una tarea que no es viable de alcanzar por estos medios convencionales.

4.4 Iniciativas internacionales y locales para un cambio en el paradigma de la infraestructura sismo resistente

Las situaciones de daño severo y colapso en infraestructura sometida a movimientos sísmicos importantes, sumado a la pérdida de vidas humanas, heridos, familias damnificadas, falta de servicios básicos, entre otros, ha hecho que los Gobiernos y la sociedad en general, soliciten a la ingeniería, nuevos alcances para la infraestructura sismo resistente.

Como ejemplo de algunas iniciativas mundiales que buscan un cambio en el paradigma de la infraestructura sísmo resistente, puede mencionarse el interés planteado por los estados miembros de las naciones unidas (ONU) para, desde la infraestructura, aportar al desarrollo sostenible mundial, lo cual requiere [29]:

- a) Desarrollar infraestructura resiliente y de calidad, para apoyar el desarrollo económico y bienestar humano.
- b) Asegurar el acceso de todas las personas a viviendas y servicios básicos adecuados, seguros y asequibles.
- c) Proporcionar acceso a sistemas de transporte seguros.
- d) Redoblar esfuerzos para proteger y salvaguardar el patrimonio cultural del mundo.
- e) Reducir el número de muertes causadas por los desastres y el número de personas afectadas por ellos.
- f) Reducir considerablemente las pérdidas económicas directas provocadas por los desastres, en comparación con el producto interno bruto mundial.
- g) Aumentar el número de ciudades que adopten e implemente políticas y planes de resiliencia ante desastres.
- h) Desarrollar y poner en práctica, la gestión integral de los riesgos de desastre a todos los niveles.

Otra iniciativa que se puede mencionar es la adoptada por el otrora Ministerio de la Protección Social, a través de la Resolución 976 de 2009, mediante la cual se acogió a la iniciativa global “Hospital Seguro Frente a Desastres” de la Organización Mundial de la Salud, como un programa nacional para la reducción del riesgo sísmico. Esta iniciativa plantea “que todos los hospitales nuevos se construyan con un nivel de resiliencia que le permita seguir funcionando en situaciones de desastre y se implementen medidas de mitigación para reforzar los establecimientos de salud existentes, en particular los que son prioritarios en la atención en salud”. Desde la expedición de la Resolución 976 de 2009, se han presentado diferentes decretos y resoluciones donde se definen plazos para realizar estudios de vulnerabilidad y para ejecutar las obras de reforzamiento estructural.

Recientemente, el Ministerio de Salud y Protección Social a través de la Resolución 2132 de 2021 modificó nuevamente los plazos para los estudios de vulnerabilidad sísmica y ejecución de obras de reforzamiento en edificaciones indispensables, ampliándolo a diciembre de 2024. En este sentido, el sector público es llamado a dar ejemplo en garantizar la operatividad de sus edificaciones institucionales e indispensables luego de un evento sísmico fuerte.

La **Tabla 1** muestra un resumen de algunos documentos normativos relacionados con la iniciativa de Hospital seguro frente a desastres (a entendimiento de los autores). Es claro que se ha extendido el tiempo para tener una infraestructura de los hospitales del país con una menor vulnerabilidad ante sismos.

Tabla 1. Documentos normativos relacionados con la iniciativa de Hospital seguro frente a desastres.

Documento	Reemplaza	Entidad	Plazos	
			Vulnerabilidad	Reforzamiento
Ley 715 de 2001		Gob. Nal	Dic 2005	Dic 2009
Ley 1151 de 2007	Ley 715 de 2001	Gob. Nal	Dic 2009	Dic 2013

NSR-10	Ley 400 de 1997	Gob. Nal.	Dic 2013	Dic 2016
Res. 5381 de 2013	Ley 715 de 2001	Min. Salud y Prot. Social	Dic 2017	Dic 2021
Res. 5240 de 2017	Res. 5381 de 2013	Min. Salud y Prot. Social	Dic 2021	Dic 2025
Res. 2132 de 2021	Res. 5240 de 2017	Min. Salud y Prot. Social	Dic 2024	Dic 2024

Una tercera iniciativa por mencionar corresponde a la denominada iniciativa mundial por escuelas seguras, desarrollada por los gobiernos socios de la Alianza Global para la Reducción del Riesgo de Desastres y Resiliencia en el Sector de la Educación [30]. Para definir que una escuela se clasifique como segura, entre otras cosas, se requieren instalaciones de aprendizaje seguras, donde la infraestructura debe ser resiliente ante las amenazas, entre éstas el sismo. Lo cual en este momento no se está alcanzando.

4.5 Búsqueda de alternativas

Ante el panorama presentado en los numerales 4.1 a 4.4, se pueden plantear cinco preguntas clave para la sociedad:

1. ¿Son conscientes los gobiernos y la población en general, del nivel de daño que se va a presentar en la infraestructura denominada sismo resistente cuando este expuesta al sismo fuerte?
2. ¿El Gobierno y la sociedad está preparada para asumir consecuencias de los sismos como: reconstrucción (costos, organización y tiempos), pérdida de operatividad de infraestructura (pérdidas en producción, transporte, cadena de abastecimiento), pérdida de infraestructura de atención servicios básicos (hospitales, colegios, entidades bancarias, estaciones de bomberos, policía)?
3. ¿De qué manera se va a realizar de aquí en adelante el diseño sísmico o reforzamiento estructural?
4. ¿Cómo se va a garantizar el adecuado desempeño estructural?
5. ¿Cuál es la manera de aportar a las iniciativas mundiales y locales?

La ingeniería ha desarrollado nuevas tecnologías como los sistemas de control de respuesta estructural atendiendo tanto las necesidades mundiales de mitigación del riesgo, resiliencia y sostenibilidad, como el beneficio económico y social que implica alcanzar estos objetivos para la humanidad. Dichos sistemas brindan una alternativa adecuadamente económica y suficientemente segura para reducir el impacto de los sismos en la infraestructura de los países con importante amenaza sísmica, como Colombia.

Los SCRE que se diseñan y construyen adecuadamente son capaces de brindar a la nueva infraestructura mínimo el mismo nivel de desempeño de las estructuras convencionales sin sistemas de control, pero primordialmente se concibieron para alcanzar niveles de desempeño más elevados, donde el nivel de daño frente al sismo de diseño tienda a ser mínimo o nulo y se alcance la resiliencia. Por lo tanto, se cambia una filosofía de desempeño de *seguridad a la vida*, donde para tal fin se requiere daño sin colapso, por una de *operación continua*; en las dos se conserva el fin primordial de proteger la vida humana, siendo la segunda donde mayor probabilidad existe que esta premisa se cumpla.

Respecto a la infraestructura existente y lo relacionado a su reforzamiento, la estrategia de reducción de energía sísmica impuesta sobre la estructura es la manera más eficiente frente a un terremoto. Esta estrategia utiliza los SCRE para que los dispositivos sísmicos instalados absorban y disipen la energía de

vibración impuesta por el sismo. De esta manera, se reduce el daño y se otorga una mayor protección a los elementos estructurales y componentes no estructurales, protegiendo así, la vida, operación y contenidos de una edificación [16, 31–33]. Esta opción permite que la infraestructura existente puede alcanzar la resiliencia.

4.6 Aplicación de sistemas de control de respuesta estructural en Colombia

Colombia requiere y tiene las capacidades técnicas y económicas para afrontar proyectos de reforzamiento (repotenciación) estructural usando SCRE, que sin duda otorgan a la infraestructura un nivel mucho más alto de seguridad, operatividad y resiliencia ante los terremotos.

En el país actualmente se tienen varios proyectos muy significativos donde se han implementado SCRE, tanto en puentes como en edificaciones con diseños nuevos como con reforzamiento estructural. Se estima que son aproximadamente 60 proyectos; no obstante, su uso aún se considera muy bajo. En el numeral 5 se amplía la información de cantidad de proyectos.

En 2009, Oviedo y Duque [9] reportaron los resultados de un estudio sobre la situación de la implementación y aceptación de los SCRE en el país. En su estudio encontraron que Colombia está lejos de considerarse líder en la implementación de estos sistemas, estando relegado comparado con los avances en otros países latinoamericanos como Chile, y México. Entre las razones principales de la poca aplicación de los SCRE está la desconfianza general por el desconocimiento de las diferentes técnicas de control y de sus dispositivos, unido al limitado conocimiento de sus ventajas técnicas y económicas sobre los proyectos y el desempeño sísmico de la infraestructura. Adicional a lo anterior, los autores dejaron clara la necesidad de disposiciones más expeditas para los procesos de diseño de estructuras con SCRE, adaptadas a las condiciones locales colombianas.

4.7 Incoherencias normativas

Para el caso de la implementación de SCRE en edificaciones, el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10), indica que al carecer de requisitos específicos para el país se debe seguir todos los consignados en documentos internacionales como: a) *NEHRP Recommended provisions for seismic regulation for new buildings*, FEMA 450 o, b) *Minimum design loads for buildings and other structures*, ASCE 7-10, sin embargo, estos documentos solo son aplicables directamente al país para el que fueron elaborados; es decir, a EE.UU. La aplicación directa a otros países, como Colombia, puede traer implicaciones técnicas y económicas negativas.

Los estudios de Piscal y Almansa [5, 34–40] han mostrado algunas incompatibilidades entre los requisitos del reglamento NSR-10, con los requisitos contenidos por FEMA 450 y ASCE 7-10. En los mismos estudios se han propuesto alternativas para discusión en el país. Como ejemplo se puede mencionar la propuesta de usar para Colombia la Ecuación 1, para estimar el desplazamiento del sistema de aislamiento (D_M), obtenida en la literatura de la relación entre pseudoaceleraciones y pseudodesplazamientos y muy empleada en la dinámica estructural. Lo anterior con base en el hecho de que la Ecuación 2 empleada en ASCE 7, incluye en su formulación, particularidades de la amenaza de EE.UU.

$$D_M = \frac{g S_M T_M^2}{4 \pi^2 \beta_M} \quad (1)$$

$$D_M = \frac{g S_{M1} T_M}{4 \pi^2 \beta_M} \quad (2)$$

Para las Ecuaciones 1 y 2, g indica la gravedad, S_M y S_{MI} corresponden a la aceleración espectral para el periodo aislado y para 1 s respectivamente, T_M es el periodo aislado y β_M el factor de modificación debido al amortiguamiento.

De no emplearse la Ecuación 1, para el caso colombiano podría en ciertos casos incurrirse en una subestimación de D_{M^2} poniendo en riesgo el adecuado comportamiento estructural de la infraestructura que incorpore aislamiento de base. Información adicional acerca de la estimación de desplazamientos puede encontrarse en el trabajo de Piscal y Almansa [5]. Información acerca del manejo o relación de parámetros de amenaza de Estados Unidos en el contexto local puede encontrarse en publicaciones técnicas desarrolladas por la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS) [41]. Adicionalmente una vez la norma salga a la luz podrán conocerse todos los detalles de esta.

Piscal y Almansa [5, 34–40] proponen también, emplear unos factores de reducción por amortiguamiento (FRA) estimados con las características de la amenaza local colombiana, en lugar de los planteados en la Tabla 17.5-1 de ASCE 7-16, los cuales son derivados a partir de la amenaza de EE.UU. En la **Figura 3**, se muestra una comparación entre los factores planteados por ASCE y los propuestos por Piscal-Almansa.

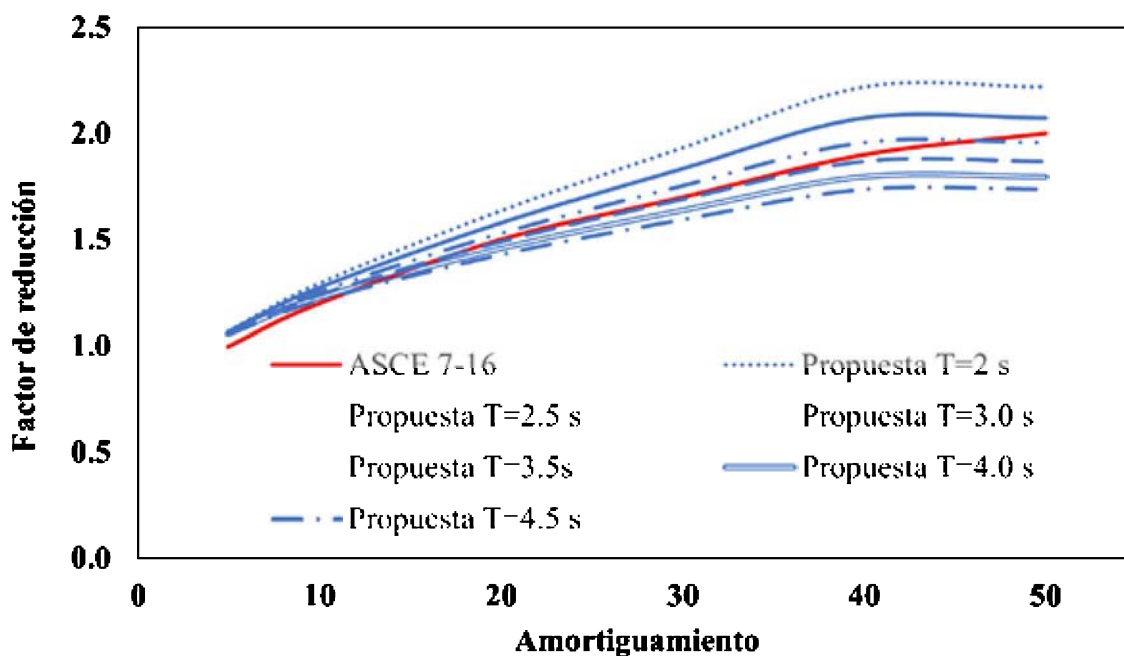


Figura 3. Comparación de factores de amortiguamiento derivados para Colombia y los contenidos en ASCE 7-16.

Se observa que: a) la expresión planteada (propuesta) para los FRA, es dependiente del periodo, como lo muestra la investigación internacional actual, mientras que en la que contiene ASCE 7-16. b) Para periodos estructurales que igualen o superen los 3.0 s, típico de edificaciones aisladas, el FRA de ASCE 7-16 sobrestima la reducción, por ende, al emplearlo bajo estas circunstancias, se obtendrían fuerzas de diseño inferiores a las que en realidad se presentarían en las estructuras aisladas para el caso colombiano.

Dentro de algunas otras incoherencias estudiadas por Piscal et al. [42,43], se encuentran las expresiones para el cálculo de la metodología de Fuerza Horizontal Equivalente y las expresiones para el diseño de elementos no estructurales en edificaciones aisladas y demás.

El trabajo de Oviedo y Jaramillo [44], sobre el desempeño estructural de edificaciones de uso hospitalario en zonas de amenaza sísmica alta en Colombia con y sin aislamiento sísmico, junto a la visión de Piscal y Almansa [5] acerca de la no necesidad de incorporar requisitos de ductilidad exigentes en estructuras con comportamiento estructural esperado cercano al elástico, sumado al estado del arte a nivel internacional [45], permitieron aclarar y definir una propuesta para el tipo de detallamiento estructural (DES, DMO, DMI) requerido en edificaciones de concreto con aislamiento sísmico en Colombia, en función de la amenaza sísmica de exposición. El uso de requisitos de detallamiento para alta ductilidad no coherentes con el comportamiento estructural esperado en este tipo de edificaciones, llevaría a sobrecostos en las mismas.

Para el caso de los sistemas de disipación de energía, también se han identificado incompatibilidades entre el documento base ASCE 7-16 y el reglamento NSR-10, en algunos requisitos para la aplicación de estos sistemas en edificaciones. Uno de los aspectos más relevantes que se identifica en el Capítulo 18 del documento ASCE 7-16, es que los requisitos allí dispuestos tienen aplicación explícita para disipadores viscosos, por lo tanto, con disipadores como los dependientes del desplazamiento algunos requisitos no se pueden cumplir o generarían altos sobrecostos. Tal es el caso de lo propuesto en cuanto a ensayos de laboratorio y comportamiento estructural esperado. La identificación de estas incompatibilidades ha llevado a proponer nuevos requisitos para ensayos de prototipo y producción.

Frente al anterior panorama y conociendo que actualmente en el país se sigue diseñando y construyendo infraestructura empleando documentos internacionales que requieren ser adaptados al contexto local para garantizar así una mitigación del riesgo sísmico a través de los SCRE, es una necesidad urgente para el país la elaboración de un reglamento en la temática.

5. HACIA UNA NORMATIVA PARA EDIFICACIONES CON AISLAMIENTO DE BASE Y DISIPACIÓN DE ENERGÍA PARA COLOMBIA

Frente al anterior panorama, y en función de la necesidad de una norma que rija el diseño de los SCRE en Colombia, la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS) decide crear el 4 de septiembre de 2015, dentro de sus comités técnicos, uno nuevo denominado comité AIS 700, encargado de los temas de aislamiento sísmico y disipación de energía. Este comité estuvo inactivo por cerca de 1 año y medio, hasta que la Junta Directiva decidió activarlo nuevamente a partir del 24 de marzo de 2017.

Desde ese momento, el Comité AIS-700 trabaja en su misión: generar un espacio de estudio, trabajo y discusión en torno a la elaboración y actualización de documentos normativos (y complementarios), para la aplicación de los SCRE dentro del contexto de la práctica de diseño estructural de edificaciones y puentes en Colombia.

A continuación, se describe brevemente la estructura del comité AIS-700 y se mencionan generalidades del trabajo desarrollado.

El Comité AIS-700 se divide en dos subcomités: Subcomité de Aislamiento Sísmico y Subcomité de Disipación de Energía. Al momento, el Comité AIS-700 está compuesto por cerca de 40 miembros, todos socios de AIS. Entre los miembros del comité, se encuentran representadas las siguientes ciudades del país: Bogotá, Medellín, Cali, Bucaramanga, Barranquilla, Villavicencio, y 4 miembros internacionales (Canadá e Italia).

Como primer ejercicio del comité AIS-700 de la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica se realizó un esfuerzo por tener un inventario nacional de edificaciones con SCRE. Al interior del comité se logró identificar que en el año 2006 se tuvo la primera aplicación en nuestro país, en el año 2012 se tenían aproximadamente 5 estructuras y a finales del año 2017 cerca de 40 que incorporaban técnicas de protección. Se evidencia así el uso progresivo, posiblemente hacia un uso extensivo de estos sistemas. Entre las estructuras mencionadas, aproximadamente el 65% de los casos reportados obedecen a edificaciones, mientras que el 35% restante a puentes. Para el caso de edificaciones, el uso que más ha incorporado alguna de las técnicas de protección corresponde a instituciones prestadoras de salud, seguidas de instituciones educativas. Las principales ciudades que han incursionado en estas técnicas son: Cali, Manizales, Pereira, Bucaramanga, Armenia, Medellín, y recientemente Bogotá.

Desde el año 2018 al presente se tiene conocimiento de nuevas implementaciones de SCRE tanto para el reforzamiento estructural como en proyectos nuevos (edificaciones, puentes), y se espera que esta tendencia siga en aumento, fortalecida e impulsada con la primera normativa en el país. Desde el Comité AIS-700 se continuará haciendo seguimiento y registro de proyectos que incorporen SCRE.

El trabajo conjunto del comité, inició seleccionando algunos reglamentos internacionales que sirvieran de base para la futura norma colombiana de SCRE. Se estudiaron y analizaron los reglamentos de EE.UU. Japón, China, Rusia, Italia y Chile [5]. Posteriormente el comité votó a favor de seguir el estándar ASCE 7-16 de EE.UU. Lo anterior en función de la robustez en investigación en la que se soporta ASCE 7-16 y por la extensa trayectoria de adaptación desde las normas americanas de ingeniería al contexto colombiano, tal como se evidencia en NSR-10.

Tras recibir la autorización de uso por parte de la Asociación Americana de Ingenieros Civiles (ASCE), se tradujeron al español los Capítulos 17 y 18 que tratan sobre los requisitos del diseño sísmico para estructuras con aislamiento sísmico, y sobre los requisitos del diseño sísmico para estructuras con amortiguadores o disipadores de energía, respectivamente.

Unificando terminología técnica y revisando la traducción completa de los documentos, se tenía una primera versión en español de los mismos, la cual se procedió a estudiar detenidamente para iniciar las discusiones acerca de los requisitos que requerían y podían adaptarse al contexto colombiano.

El comité se reunió con consultores expertos, fabricantes de dispositivos, desarrolladores de normas, ingenieros, profesores e investigadores de diferentes países, y se discutió el estado del arte a nivel mundial y nacional en la materia. Las propuestas técnicas se sometieron a consenso por medio de votaciones y a través de la revisión a documentos borradores. Después de cinco años la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica generó la primera propuesta normativa para implementar las técnicas de aislamiento sísmico y disipación de energía en edificaciones colombianas. Otras técnicas de protección se estudiarán a futuro.

Así las cosas, la propuesta normativa incluye los avances recientes de la ingeniería estructural sobre el tema, donde se adaptan normativas y procedimientos a la práctica de la ingeniería y construcción colombiana, se resalta la inclusión de resultados de investigaciones nacionales que han aportado un conocimiento valioso para el entorno local.

De forma paralela a la elaboración de la primera propuesta normativa, el comité trabaja en el desarrollo de documentos de consulta y apoyo para los ingenieros y constructores, en cuanto a la adecuada aplicación de los documentos normativos. Se están elaborando documentos técnicos con ejemplos de diseño y con aspectos constructivos y de supervisión técnica en obra. Todo esto con el propósito de fomentar las buenas prácticas de uso e implementación de los SCRE y sus lineamientos

normativos. Finalmente se espera que la primera propuesta normativa sea incluida dentro de la próxima actualización del Reglamento NSR-10, impulsando así la implementación de los SCRE para dotar las estructuras de un nivel de desempeño sísmico mucho mejor.

6. FABRICACIÓN LOCAL DE DISPOSITIVOS COMO SCRE

Como se mencionó en el Numeral 2, los sistemas de control de respuesta estructural (SCRE) consisten básicamente en un conjunto o serie de dispositivos que se incorporan en las estructuras. Dichos dispositivos en la mayoría de los proyectos actuales en Colombia, han sido importados de países como EE.UU., Italia, Chile, o Canadá, donde se encuentran empresas que los fabrican con una gran trayectoria en el mercado mundial. Algunas de estas empresas tienen oficinas en Colombia.

Sin embargo, el hecho de carecer de dispositivos locales, encarece los proyectos, por lo cual ciertas empresas del país han empezado a desarrollarlos y fabricarlos localmente. Algunos de ellos continúan dentro de la etapa de investigación y validación en universidades, mientras que unos pocos se encuentran disponibles comercialmente. A la luz del conocimiento de los autores, los dispositivos que están disponibles comercialmente son un tipo de aisladores sísmicos y un disipador tipo riostra BRB.

En cuanto a los aisladores sísmicos, se encuentran el desarrollado por la empresa E&M SA, empresa reconocida en el país por su fabricación de apoyos de neopreno para puentes. E&M ofrece aisladores de caucho con núcleo de plomo.

Por otro lado, recientemente investigadores de la Universidad Javeriana en Cali [46], desarrollaron y probaron un aislador de bajo costo, fabricado con caucho reciclado y fibras plásticas. Este aislador no tiene núcleo de plomo, y está orientado a edificaciones de hasta mediana altura.

En cuanto al disipador de energía tipo Riostra BRB, la empresa efe-Prima-ce Control y Diseño de Estructuras SAS, en alianza con la Universidad EIA, ha sido pionera en Colombia en el desarrollo e investigación de este tipo de dispositivo sísmico. A la fecha se han realizado cuatro programas experimentales, donde se han fabricado con materiales y mano de obra local cerca de 40 prototipos de riostra BRB, investigando diversas características estructurales, mecánicas y de comportamiento, en las que se incluye, entre otros: resistencia, materiales, fatiga, rigidez y capacidad de disipación de energía. Recientemente se llevó a cabo la Fase IV de investigación donde se ensayaron por primera vez en el país riostras de 6 m de longitud, siendo estas tal vez las riostras más largas ensayadas en Latinoamérica [47–56]. Este desarrollo ha sido posible a través del trabajo continuo por más de 15 años, para otorgar confianza al gremio sobre el buen comportamiento de estos dispositivos sísmicos. Adicional a lo anterior, se han desarrollado metodologías de diseño y cuantificación de índices de daño como herramientas de apoyo para el gremio de ingeniería estructural.

Diversas publicaciones nacionales e internacionales dan soporte técnico a todos estos años de trabajo continuo [47–56], junto con un reconocimiento muy valioso recibido en 2019 cuando Camacol Antioquia otorgó el primer lugar del Premio a la Innovación Camacol Antioquia a efe-Prima-ce por este desarrollo. La **Figura 4** muestra prototipos de riostra BRB siendo ensayada en el Laboratorio de Mecánica Estructural de la Universidad EIA. En la imagen inferior se observa el nuevo marco de carga construido para llevar a cabo la Fase IV de todo el programa de investigación; donde por primera vez en Colombia se ensayaron riostras BRB de hasta 6 m de largo y con fuerzas de hasta 1300 kN.



Figura 4. Primer ensayo en Colombia de prototipos de Riostra efe-Prima-ce -BRB- Universidad EIA.Superior: Proyecto Fase III. Inferior: Proyecto Fase IV.

7. CONCLUSIONES

Es de relevancia para el país concientizar a entidades gubernamentales, sector privado y población en general acerca del nivel de daño que tendrá la infraestructura diseñada y construida con sistemas convencionales (sin sistemas de control) después de un evento sísmico fuerte. Es importante también hacer notar las repercusiones políticas, económicas y sociales que la anterior situación conlleva.

Los sistemas de control de respuesta estructural son la mejor alternativa para que en el país se alcance infraestructura menos susceptible a daño por eventos sísmicos fuertes, se permita que infraestructura esencial, como hospitales, siga funcionando tanto durante como después del evento sísmico y se pueda pensar en obtener ciudades resilientes a través de su infraestructura.

Es esencial para Colombia implementar políticas de reducción de riesgo por sismo, que incentiven el incremento en el país de infraestructura menos susceptible a daño por eventos sísmicos fuertes, es decir que incentiven la infraestructura que incorpore sistemas de control.

Colombia requiere una normativa local urgente que regule el diseño y construcción de SCRE, para que los proyectos que incorporen dichos sistemas se hagan de la forma más segura y económica posible, de tal manera que se aprovechen todas las ventajas que estas técnicas de protección sísmica brindan.

Es necesario el apoyo del país en estas temáticas de investigación, ya que es a partir de los resultados de las mismas que se construyen las normas que rigen la práctica profesional.

PUNTOS CLAVE

1. Colombia es un país cuya infraestructura se encuentra expuesta a una elevada amenaza sísmica.
2. La filosofía actual de diseño contemplada en NSR-10 para las edificaciones, acepta daños en éstas frente a eventos sísmicos fuertes. lo cual corresponde a un criterio de diseño mundialmente aceptado y validado.
3. La filosofía de daño en la infraestructura implica altos costos de reparación, post-sismo, pérdida de la operación de todo tipo de infraestructura (incluyendo la esencial, como lo son los hospitales), infraestructura sin capacidad de resiliencia y un sin número de problemas sociales como la pérdida de servicios esenciales de salud, educación, transporte, alimento y demás. Por ende, frena el desarrollo e impacta notablemente la calidad de vida de la población.
4. Los sistemas de control de respuesta estructural (SCRE) son una opción muy viable para reducir el nivel de daño en la infraestructura nueva y existente de un país, expuesta a eventos sísmicos importantes. A través de esta técnica se puede mitigar el riesgo sísmico, garantizar la operación continua de la infraestructura y alcanzar la resiliencia de las ciudades.
5. Colombia actualmente cuenta con infraestructura que incorpora SCRE, sin embargo, la implementación de la técnica aun es escasa, debido entre otras cosas a la ausencia de una normativa local.
6. El desarrollo de una normativa para el adecuado diseño y construcción de infraestructura con SCRE es una necesidad urgente para Colombia. Ésta impulsará la implementación de más proyectos, garantizado un nivel de seguridad superior y una adecuada economía en los mismos.
7. El avance de la norma para SCRE que actualmente se desarrolla en Colombia, es un gran aporte para la sociedad y cuenta con una adaptación robusta de normas internacionales al contexto local, resultado del trabajo conjunto del comité AIS-700, aportes en investigaciones nacionales e internacionales y opiniones de expertos en la académica y en el sector profesional.

NECESIDADES FUTURAS

1. Ya que la normativa base para el país en los temas de sistemas de control de respuesta estructural es ASCE 7-16, y la cual se enfoca principalmente en el uso de SCRE para edificaciones esenciales, Piscal y Montañez [57], trabajan en nuevas propuestas normativas para que los futuros requisitos en Colombia impulsen el uso de estos sistemas en edificaciones residenciales, edificaciones que son las que existen en una mayor cantidad en todos los países. Piscal y Montañez afirman que no existe resiliencia en las ciudades solo protegiendo ciertas edificaciones, se deben proteger todas. Por lo tanto, se requiere mayor investigación y por ende financiación

de los gobiernos y entidades adscritas a estos para poder desarrollar versiones futuras de normas que permitan alcanzar menor daño, funcionalidad y resiliencia en toda la infraestructura del país.

2. Se requiere mayor desarrollo local de dispositivos para SCRE y paralelo a esto laboratorios adaptados en el país para el testeo adecuado de los dispositivos.
3. Se requiere una mayor divulgación de las técnicas y sus beneficios a nivel gubernamental y de la sociedad en general.

8. MATERIALES Y MÉTODOS

Todo lo aquí presentado es el resultado del:

- a) Trabajo conjunto del comité AIS-700.
- b) Búsqueda, recopilación, y análisis de información científica llevada a cabo por los autores del trabajo.
- c) Investigaciones científicas desarrolladas por los autores.
- d) Aportes de cada uno de los autores.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores no declaran conflicto de intereses

AGRADECIMIENTOS

A la Asociación de Ingeniería Sísmica, por el apoyo para el desarrollo de la primera norma de la temática en el país, a los miembros del comité AIS-700 por todo su apoyo y trabajo, a la Universidad de La Salle y a la Universidad EIA por los espacios brindados para la investigación en estas temáticas.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA CRediT

Todos los autores contribuyeron a la conceptualización y desarrollo de este proyecto.

IDENTIFICACIÓN DE AUTORES

Carlos Mario Piscal Arevalo

<https://orcid.org/0000-0003-1271-3406>

Juan Andrés Oviedo Amézquita

<https://orcid.org/0000-0001-9973-2823>

BIBLIOGRAFÍA

1. Ángel Giraldo, D. C. & Rincón Chuscano C. A. (2019). *Análisis del comportamiento estructural de una tribuna en concreto reforzado para un estadio con y sin aisladores de base* [Trabajo de grado - Pregrado]. Universidad de la Salle.
2. Calderón Guamán, F. L. & Ríos Valencia, L. D. (2020). *Estudio de pórticos en concreto para zonas de amenaza sísmica alta, aislados sísmicamente y diseñados con $R=1$ y disipación de energía mínima vs $R=2$ con disipación de energía especial*. [Trabajo de grado - Pregrado]. Universidad de la Salle.
3. Erazo Cerón, A. D. (2021). *Evaluación del impacto de los límites de deriva en el diseño de edificaciones en concreto reforzado con aislamiento sísmico de base*. [Trabajo de grado - Pregrado]. Universidad de la Salle.
4. Manotas Viloría, V. E. (2021). *Evaluación del comportamiento estructural y del costo directo aproximado de implementar aislamiento de base en edificaciones de uso indispensable en Colombia*. [Trabajo de grado - Pregrado]. Universidad de la Salle.
5. Piscal Arévalo, C. M. (2018). *New design considerations for seismic isolated buildings in Colombia*. [Tesis Doctoral]. Universidad Politécnica de Cataluña.
6. Ruiz Osorio, J. C. & Gutiérrez Maestre, J. J. (2020). *Evaluación del costo directo de implementar aislamiento de base en edificaciones de uso normal en Colombia*. [Trabajo de grado - Pregrado]. Universidad de la Salle.
7. López-Almansa, F., Piscal Arevalo, C. M., Carrillo, J., Leiva-Maldonado, S. L. & Moscoso, Y. F. (2022). Survey on Major Worldwide Regulations on Seismic Base Isolation of Buildings. *Advances in Civil Engineering*, 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/6162698>
8. Piscal Arevalo, C.M, Erazo Ceron, D, Bonett R & Arroyo O (2022). Desempeño estructural de pórticos con aislamiento sísmico diseñados considerando diferentes límites de deriva. *10 Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, 2022*
9. Oviedo, J. A. & Duque, M. del P. (2006). Sistemas de control de respuesta sísmica en edificaciones, *Revista EIA*, 6, 105-120.
10. Oviedo, J. A. & Duque M. del P. (2009), Disipadores histeréticos metálicos como técnica de control de respuesta sísmica en edificaciones colombianas, *Revista EIA*, 6(11), 51-63.
11. Martelli, A., Clemente, P., De Stefano, P., Forni, M. & Salvatori, A (2014). Recent development and application of seismic isolation and energy dissipation and conditions for their correct use. *Perspectives on European earthquake engineering and seismology*, Springer, Cham, 2014, pp. 449-488. https://doi.org/10.1007/978-3-319-07118-3_14
12. Mason, A. (2015), Seismic isolation—the gold standard of seismic protection, *STRUCTURE Magazine*, 12.
13. Nakamura, Y. & Okada, K. (2019). Review on seismic isolation and response control methods of buildings in Japan. *Geoenvironmental Disasters*, 6, 1–10. <https://doi.org/10.1186/s40677-019-0123-y>
14. Kani N. (2000), Current state of seismic-isolation design, *Journal of Disaster Research*, 45(6), 2000.
15. Kasai, K., Pu, W., & Wada, A. (2012). Response of passively-controlled tall buildings in Tokyo during 2011 Great East Japan Earthquake, *15 World Congress of Earthquake Engineering*.
16. Kasai, K., Mita A., Kitamura, H., Matsuda, K., Morgan, T. A., & Taylor A. W. (2013), Performance of seismic protection technologies during the 2011 Tohoku-Oki earthquake», *Earthquake Spectra*, 29 (1) suppl, 265-293. <https://doi.org/10.1193/1.4000131>
17. Motosaka, M., & Mitsuji, K, (2012). Building damage during the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, *Soils and foundations*, 52 (5), 929-944. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2012.11.012>

18. AIS (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica). (2010). *Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10*.
19. Arcila Rivera, M. M., García, J., Montejo Espitia, J. S., Eraso, J. F., Valcárcel Torres, J. A., Mora Cuevas, M. G., Viganò, D. , Pagani, M., & Díaz Parra, F. J. (Eds.). (2020). *Modelo nacional de amenaza sísmica para Colombia* (Vol. 43). Libros del Servicio Geológico Colombiano. <https://doi.org/10.32685/9789585279469>
20. Tsompanakis, Y. (2014). Earthquake return period and its incorporation into seismic actions», *Encyclopedia of Earthquake Engineering*, 1-35. https://doi.org/10.1007/978-3-642-36197-5_116-1
21. PEER (Pacific Earthquake Engineering Research Center), (2022, 14 de enero). *Expected earthquake performance of buildings designed to the California building*. https://peer.berkeley.edu/sites/default/files/peer2019-05_ssc19-01_11x17.pdf
22. Puranam, A., Filippova, O., Pastor-Paz, J., Stephens, M., Elwood, K. J., Ismail, N., Noy, I., & Opabola, E. (2019). A detailed inventory of medium to high-rise buildings in Wellington’s central business district. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, 52(4), 172–192. <https://doi.org/10.5459/bnzsee.52.4.172-192>
23. NIST (National Institute of Standards and Technology). (2021, 27 de enero). *New Report Charts Path Toward Superior Earthquake Recovery*. <https://www.nist.gov/news-events/news/2021/01/new-report-charts-path-toward-superior-earthquake-recovery>
24. Cartera de fotos e imágenes de stock de Nigel Spiers | Shutterstock. (2002, 14 de enero), <https://www.shutterstock.com/es/g/nigelspiers>
25. Manhire, T. (2011, 14 de enero). *Christchurch welcomes blueprint for rebuilding after earthquake*, *The Guardian*. <https://www.theguardian.com/world/2011/aug/11/christchurch-earthquake-rebuild-blueprint>
26. Hamburger, R. O., Rojahn, C. , Heintz, J. & Mahoney, M. G. (2012) FEMA P58: Next-generation building seismic performance assessment methodology, *15th world conference on earthquake engineering*, (10) 10.
27. American Society of Civil Engineers ASCE 7-16 (2016). *Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures*, 7. ASCE standard 7–16.
28. Kabeyasawa, T. (2005). Recent development of seismic retrofit methods in Japan, *Japan Building Disaster Prevention Association*.
29. ONU (Organización de Naciones Unidas), (2022, 18 de enero). *Objetivos De Desarrollo Sostenible*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/cities/>
30. Fernandez, R., Yamin, L, Reyes, J.C., Garcia, A., Fuentes, G. & Echeverry, J. (2021). Mitigación del riesgo sísmico de la infraestructura escolar. En Comisión Nacional Asesora para la Investigación en Gestión del Riesgo de Desastres (Eds), *Investigaciones en gestión del riesgo de desastres para Colombia: Avances, Perspectivas y Casos de estudio*. Unidad Nacional para la gestión del Riesgo de Desastres. <http://hdl.handle.net/20.500.11762/32470>
31. EERI (Earthquake Engineering Research Institute). (2013, 10 de agosto). *The Mw 6,6 Earthquake of April 20, 2013 in Lushan, China. Special Earthquake Report, 2013*. <https://www.eeri.org/images/archived/wp-content/uploads/Lushan-China-Earthquake-Report.pdf>
32. Almazán, J. (2012). Comportamiento de estructuras antisísmicas durante el terremoto del Maule y su posible efecto en las normas de diseño sísmico en Chile, *Revista Sul-americana de Engenharia Estrutural*, 7, (2 &3), 4-28. <https://doi.org/10.5335/rsee.v7i2&3.2594>
33. Nagarajaiah, S. & Sun, X. (1996), Seismic performance of base isolated buildings in the 1994 Northridge earthquake, Proceedings. 11th WCEE. Paper number 598.

34. Piscal Arévalo, C. M. & López Almansa, F. (2019). *Aplicabilidad del código ASCE 7-16 para el diseño de edificaciones con aislamiento sísmico en Colombia*. IX Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica 2019.
35. Piscal Arévalo, C. M. & López Almansa, F. (2019). *Cambios recientes en la filosofía de diseño de edificaciones aisladas de acuerdo a ASCE 7: aplicabilidad a Colombia*. IX Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica: actas, 1-10.
36. Piscal Arévalo, C. M. & López Almansa, F. (2017). *Comparación de códigos de aislamiento sísmico a nivel mundial: implicaciones para Colombia*. VIII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, 1-8.
37. Piscal Arévalo, C. M. & López Almansa, F. (2019). Comparación de las dos metodologías de análisis y diseño más recientes de ASCE 7, para el análisis de su posible empleo en edificaciones con aislamiento sísmico de base en Colombia. *Ingeniería y desarrollo*, 37(1), 57-70. <https://doi.org/10.14482/inde.37.1.624.2>
38. Piscal Arévalo, C. M. & López Almansa, F. (2019). *Propuesta de factores de modificación del espectro de NSR-10 para valores de amortiguamiento diferentes al 5%*. IX Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica: actas, 1-10.
39. Piscal Arévalo, C. M. & López Almansa (2018). Propuesta para la futura norma de aislamiento sísmico de edificaciones en Colombia. *Dyna*, 85 (207), 306-315. <https://doi.org/10.15446/dyna.v85n207.72296>
40. Piscal Arévalo, C. M. & López Almansa. (2018). Propuesta para las futuras normas de aislamiento sísmico en Latinoamérica. *IX Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica: actas*, 1-10.
41. Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. (2013). *Recomendaciones para requisitos sísmicos de estructuras diferentes de edificaciones*. AIS, 180-213.
42. Rojas, T. & Piscal, C. (2023). *Determinación de expresiones matemáticas para la aplicación del método de fuerza horizontal equivalente en pórticos de concreto con aisladores sísmicos de base en Colombia*. [Trabajo de grado - Maestría]. Universidad Militar Nueva Granada.
43. Moreno, S & Piscal, C. (2022). *Evaluación del comportamiento estructural y los costos de construcción de mampostería no estructural diseñada para edificaciones con aislamiento de base*. [Trabajo de grado - Pregrado]. Universidad de La Salle.
44. Jaramillo, N. & Oviedo, J. A. (2019). *Desempeño estructural de edificaciones de uso hospitalario en zonas de amenaza sísmica alta en Colombia con y sin aislamiento sísmico*. IX Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica: actas.
45. Asociación Chilena de Sismología e Ingeniería Sísmica & Instituto Nacional de Normalización. (2013). NCh 2745, *Análisis y diseño de edificios con aislación sísmica*.
46. Ortega, L., Herazo, M., Alvarez, A., Ortiz A., & Madera, I. (2021). *Caracterización mecánica de prototipos de aisladores sísmicos con matriz de caucho reciclado mediante compresión monotónica y residual*. *Jornandas geotécnicas y estructurales*.
47. Oviedo Amezcuita, J. A., Jaramillo Santana, N., Blandon Uribe, C. A., & Bernal Zuluaga, A. M. (2021). Development and validation of an acceptance criteria and damage index for buckling-restrained braces (BRB), *Journal of Building Engineering*, 43, 102534, <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102534>
48. Benavent Climent, A. y Mollaioli, F. (2021). Energy-Based Seismic Engineering. *Springer*. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-73932-4>
49. Oviedo, J. A., Ortiz, N., & Blandon. (2017). *Evaluación Experimental del Comportamiento de Riostras Restringidas contra Pandeo Fabricadas en Colombia*. VIII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica.
50. Oviedo, J. A., Buitrago, J., Patiño, J. & Hoyos, D. (2015). *Evaluación Experimental del Desempeño de un Disipador de Energía por Deformación Tipo Riostra*. VII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica.

51. Oviedo, J.A., Hoyos, D., & Buitrago, J. (2015). *Calibración Matemática para Determinar el Desempeño de un Disipador de Energía por Deformación Tipo Riostra*. VII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica.
52. Oviedo, J. A. (2015). *Desempeño de un Elemento Estructural de Disipación de Energía por Deformación*. Reporte F'C Control y Diseño de Estructuras SAS - FASE I.
53. Oviedo, J. A. (2017). *Desempeño de un Elemento Estructural de Disipación de Energía por Deformación*. Reporte F'C Control y Diseño de Estructuras SAS - FASE II.
54. Oviedo, J. A. (2018). *Desempeño de un Elemento Estructural de Disipación de Energía por Deformación*. Reporte F'C Control y Diseño de Estructuras SAS - FASE III.
55. Oviedo, J. A., Jaramillo, N. & Blandón, C. (2019). *Evaluación Experimental bajo Condiciones de Fatiga de Riostras Restringidas contra Pandeo Fabricadas en Colombia*. Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica. 2019.
56. Pelaez, A., Giraldo, J., & Oviedo, J. A. (2013). *Pórticos de Concreto Reforzado Equipados con Riostras Metálicas Restringidas contra Pandeo*, Medellín, 2013.
57. Montañez, F. & Piscal Arevalo, C. M. (2023). *Evaluación del comportamiento estructural del uso de aisladores de base en estructuras residenciales bajo una nueva visión de desempeño sísmico*. [Trabajo de grado - Maestría]. Universidad Militar Nueva Granada.

CAPÍTULO
11

La gestión integral de la biodiversidad y sus servicios ecosistémicos para la gestión del riesgo y el cambio climático

Dorotea Cardona Hernández^{1*}

¹ Instituto de investigación de recursos biológicos Alexander von Humboldt. Centro de soluciones basadas en la naturaleza-Línea de Ordenamiento Ambiental y Planificación Territorial. Calle 28a # 15-09, Bogotá, Colombia Correo-e: dcardona@humboldt.org.co

Resumen

Los riesgos de desastre y en especial aquellos exacerbados por el cambio climático aumentan cada día y con ello la insostenibilidad del territorio. Estos impactos negativos han deteriorado la biodiversidad y sus servicios ecosistémicos (BDSE); por otro lado, los ecosistemas saludables se vislumbran como una oportunidad para evitar, reducir y corregir escenarios de riesgo promoviendo el bienestar de la población y el desarrollo sostenible del territorio. No obstante, son aún incipientes, y escasos los análisis de la relación entre biodiversidad-servicios ecosistémicos, gestión del riesgo de desastres, y cambio climático, por lo que resulta pertinente identificar puntos de articulación que propendan por potencializar los esfuerzos que se hacen para gestionar la biodiversidad, el riesgo de desastres, y el cambio climático. Este capítulo resalta la pertinencia de la gestión integral de la biodiversidad y sus servicios ecosistémicos para la gestión del riesgo de desastres, destacando los escenarios exacerbados por el cambio climático. Para ello se proponen dos rutas desde la gestión integral de la BDSE: i) ver la BDSE como conjunto vulnerable objeto de afectarse por el desastre, y ii) la BDSE como conjunto atenuador de riesgos de desastres e impactos que desde el enfoque de soluciones basadas en la naturaleza (SbN) se consoliden como acciones estratégicas para fortalecer los procesos sociales de planeación, ejecución, y monitoreo de acciones para conocer y reducir el riesgo y manejar situaciones de desastre, teniendo en cuenta además el contexto de cambio climático.

Palabras clave: biodiversidad, servicios ecosistémicos, riesgo de desastres, cambio climático, soluciones basadas en la naturaleza.

Integrative management of biodiversity and its ecosystem services for risk management and climate change

Abstract

Disaster risks, especially those exacerbated by climate change, increase daily, worsening the territory's unsustainability. These negative impacts have deteriorated biodiversity and its ecosystem services (BDES); on the other hand, healthy ecosystems are seen as an opportunity to avoid, reduce and correct risk scenarios promoting the human population's well-being and the territory's sustainable development. However, analysis of the relationship between biodiversity-ecosystem services, disaster risk management, and climate change is still incipient. Therefore, it is pertinent to identify the articulation points between these and how they can best assist the efforts made to manage biodiversity, disaster risk, and climate change. In this sense, this chapter highlights integrated BDES's relevance for risk management and the exacerbating effects of climate change. Further, two pathways are proposed from the BDES integral management point of view: i) Bring to the forefront the vulnerability of BDES to get affected by disaster, and ii) approach BDES as a mitigating strategy to disaster risks and related impacts. This is to consolidate it as a nature-based solution strategy that simultaneously seeks to strengthen the social processes of planning, execution, and monitoring of actions designed to understand and reduce the risk and manage disaster situations, while considering the context of climate change.

Keywords: Biodiversity, ecosystem services, disaster risk, climate changed, nature-based solutions.

1. EL PAPEL TRIPLE PROPÓSITO DE LAS SOLUCIONES BASADAS EN LA NATURALEZA

La gestión integral de la biodiversidad y sus servicios ecosistémicos para la gestión del riesgo de desastres en escenarios exacerbados por el cambio climático es aún incipiente y son escasos los análisis de la relación entre estos [1].

Los riesgos de desastre asociados al cambio climático han aumentado sin precedentes en las últimas décadas y la biodiversidad y sus servicios ecosistémicos se impactan de manera directa [2]; aunque por otro lado, la biodiversidad ofrece soluciones que pueden reducir y dar cierta resiliencia a los riesgos derivados del cambio climático desde el enfoque de las SbN.

Caja 1. Definiciones

Biodiversidad y servicios ecosistémicos: definida como la variabilidad de organismos vivos de cualquier fuente (terrestres, acuáticos y marinos) y los complejos ecológicos de los que forman parte (composición, estructura y función). Comprenden la diversidad de cada especie, entre las especies y de los ecosistemas. En cuanto a los servicios ecosistémicos se refieren a los beneficios directos e indirectos que la humanidad recibe de la biodiversidad y que son el resultado de la interacción entre los diferentes componentes, estructuras y funciones que constituyen la biodiversidad [1].

Riesgo de desastres: corresponde a los daños o pérdidas potenciales que pueden presentarse debido a los eventos físicos peligrosos de origen natural, socio-natural tecnológico, biosanitario o humano no intencional, en un período de tiempo específico y que son determinados por la vulnerabilidad de los elementos expuestos; por consiguiente, el riesgo de desastres se deriva de la combinación de la amenaza y la vulnerabilidad [3].

Cambio climático: cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables [4].

Soluciones basadas en la naturaleza: enfoque sombrilla que agrupa acciones estratégicas para proteger, gestionar y restaurar los ecosistemas naturales o modificados, con el fin de abordar los desafíos de la sociedad como (i) mitigación y adaptación al cambio climático, (ii) reducción del riesgo de desastres, (iii) desarrollo económico y social, (iv) salud humana, (v) seguridad alimentaria, (vi) seguridad hídrica, y (vii) degradación ambiental y pérdida de la biodiversidad de manera eficiente y adaptativa en pro del bienestar humano y los beneficios para la biodiversidad [5].

Las SbN se apoyan en los ecosistemas naturales y transformados y los servicios que estos proveen para responder a diversas problemáticas como el riesgo de desastres, el cambio climático y la pérdida y deterioro de la biodiversidad [5]; lo que conforma su papel triple propósito.

Para articular estos temas, se identifican elementos en común, partiendo de las políticas públicas, que buscan dar directrices desde los gobiernos para atender asuntos de interés colectivo y dar alcance a compromisos internacionales como el Convenio Marco de Diversidad Biológica 2015–2030, el Marco de Sendai 2015–2030, y el Convenio Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático para favorecer a la población y alcanzar un desarrollo sostenible en temas de biodiversidad, riesgo y cambio climático.

Caja 2. Alcances de convenios internacionales

Convenio Marco de Diversidad Biológica: busca reducir las presiones directas sobre la diversidad biológica y salvaguardar los ecosistemas para aumentar los beneficios para la población, al mejorar su aplicación e incorporación en los hábitos gubernamentales [6].

Marco de Sendai: en ruta la reducción del riesgo y el aumento de la resiliencia de las naciones y las comunidades ante los desastres, resaltando la necesidad de comprender mejor el riesgo de desastres en todas sus dimensiones relativas a la exposición, vulnerabilidad y características de las amenazas [7].

Convenio Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático: asiente que los ecosistemas se adapten naturalmente al cambio climático, asegurar que la producción de alimentos no se vea amenazada y permitir que el desarrollo económico prosiga de manera sostenible [8].

La Política Nacional para la Gestión Integral de la Biodiversidad y sus Servicios Ecosistémicos (PNGIBSE) busca maximizar el bienestar humano a través de la planificación, ejecución y monitoreo de las acciones para la conservación de la biodiversidad y sus servicios ecosistémicos tomando como base la resiliencia de los sistemas socio ecológicos a diferentes escalas [1].

En el contexto del riesgo de desastres, la Política Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (PNGRD) se complementa con la PNGIBSE, ya que se orienta como un proceso social para asegurar la sostenibilidad, la seguridad territorial, los derechos e intereses colectivos, mejorar la calidad de vida de las poblaciones y las comunidades en riesgo. Esto se logra a través de la formulación, ejecución, seguimiento y evaluación de las diferentes estrategias, medidas y acciones para conocer y reducir el riesgo, y para manejar el desastre en caso de presentarse [3].

Por otro lado, la Política Nacional de Cambio Climático (PNCC) expresa que proyecta incidir en las “decisiones públicas y privadas para avanzar en una senda de desarrollo resiliente al clima y bajo en carbono, que reduzca los riesgos del cambio climático y permita aprovechar las oportunidades que éste genera, en concordancia con los objetivos mundiales y los compromisos nacionales” [9].

En cuanto a elementos de articulación identificados, las políticas coinciden en referir el bienestar humano, la resiliencia y el cuidado del ambiente los cuales consolidan la sostenibilidad del territorio (adaptado de [3,4,9]).

Se resalta el cuidado del ambiente, el cual representa la base natural y donde la biodiversidad como elemento estructurante del territorio propicia acciones desde el enfoque de SbN para proteger y gestionar de forma sostenible los ecosistemas naturales o modificados de manera eficaz y adaptativa, al tiempo que proporciona beneficios para las poblaciones humanas y la biodiversidad [10]. A continuación, la **Figura 1** muestra la articulación de las políticas desde los elementos comunes que soportan la sostenibilidad del territorio.

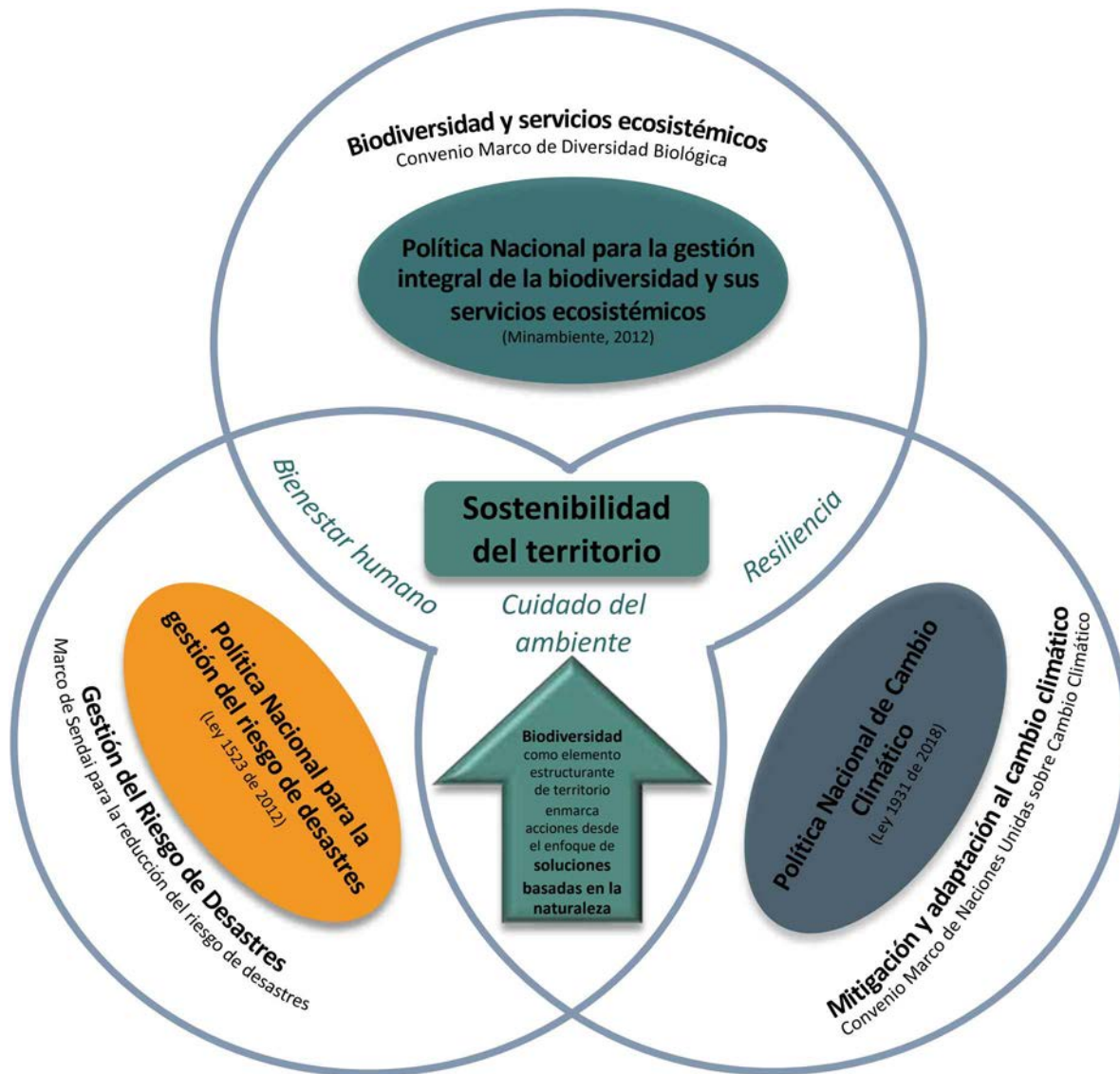


Figura 1. Esquema de articulación de políticas públicas colombianas y marcos internacionales relacionados con la biodiversidad y sus servicios ecosistémicos, riesgo de desastres y el cambio climático; donde el bienestar humano, la resiliencia y el cuidado del ambiente se perfilan como elementos emergentes que consolidan la sostenibilidad del territorio, resaltando del cuidado del ambiente la biodiversidad como eje para el desarrollo del enfoque de SbN. Fuente: Elaboración propia

2. RUTAS ESTRATÉGICAS PARA GESTIONAR EL RIESGO DE DESASTRES Y EL CAMBIO CLIMÁTICO DESDE LA GESTIÓN INTEGRAL DE LA BIODIVERSIDAD Y SERVICIOS ECOSISTÉMICOS

La biodiversidad y sus servicios ecosistémicos como expresión concreta en el territorio (ecosistemas, especies e individuos) consolidan el soporte de desarrollo social, cultural y económico, y a todo esto se denomina socioecosistema [11]. Como resultado de la interacción de las partes del socioecosistema, se evidencian los conflictos socioecológicos, que para el presente capítulo se enmarcan en los escenarios de riesgo de desastre y algunos de ellos exacerbados por el cambio climático.

Caja 3. Socioecosistema y conflictos socioecológicos

Socioecosistema: integración de la biodiversidad y sus servicios ecosistémicos como soporte del desarrollo social, cultural y económico [1].

Conflictos socioecológicos: también se conocen como conflictos socioambientales, y se refieren a las interacciones negativas que resultan de la apropiación social sobre la biodiversidad y sus servicios ecosistémicos generando su deterioro [1]. Parte de estos conflictos socioecológicos son los escenarios de riesgo de desastre, que en algunos casos se exacerbaban por el cambio climático.

Las diversas actividades humanas han generado la transformación de los ecosistemas, ocasionando pérdida de biodiversidad [1] y promoviendo nuevos escenarios de riesgo de desastres. Algunos de estos escenarios se asocian a condiciones hidroclimatológicas exacerbadas por el cambio climático que son cada vez más frecuentes e intensas, aumentando con ellas los conflictos socioecológicos [12].

El cambio climático ha afectado la biodiversidad y sus servicios ecosistémicos, alterando los ciclos naturales, la composición, estructura y función de los ecosistemas, así como el microclima, generando escenarios de riesgo o posibles impactos como consecuencia de la interacción de la amenaza, la exposición y la vulnerabilidad [13].

Es por esto que la gestión del riesgo frente al cambio climático desde la biodiversidad y sus servicios ecosistémicos se centra en la reducción de la exposición y la vulnerabilidad a la vez que se aumenta la resiliencia a los potenciales impactos adversos [14] mediante el reconocimiento de la naturaleza como atenuador de impactos y elemento clave para la adaptación frente al cambio climático.

Para incorporar la biodiversidad y sus servicios ecosistémicos en la gestión del riesgo de desastres y el cambio climático se reconocen los socioecosistemas como los espacios donde el ser humano, sus expresiones culturales y desarrollo económico hacen parte integral de los ecosistemas para gestionar la biodiversidad [6]. Desde el enfoque de SbN se proponen estrategias para abordar los conflictos socioecológicos, en este caso relacionados con el riesgo de desastres y el cambio climático desde dos rutas (**Fig. 2**). A continuación, se desarrollan cada una de estas rutas propuestas.

- i) La BDSE como conjunto vulnerable receptor de impactos.
- ii) La BDSE como conjunto para atenuar riesgos e impactos.

Socioecosistema

Conflictos socioecológicos
en el marco del riesgo de desastres y el cambio climático



Figura 2. Rutas para abordar los conflictos socioecológicos relacionados con el riesgo de desastres y el cambio climático desde la gestión integral de la biodiversidad y sus servicios ecosistémicos (bajo el enfoque de las SbN). Fuente: Elaboración propia.

2.1 Biodiversidad y servicios ecosistémicos como conjunto vulnerable

La vulnerabilidad se define como la “susceptibilidad o fragilidad física, económica, social, ambiental o institucional que tiene una comunidad de afectarse o de sufrir efectos adversos en caso de que un evento físico peligroso se presente. Corresponde a la predisposición a sufrir pérdidas o daños de los seres humanos y sus medios de subsistencia, así como de sus sistemas físicos, sociales, económicos y de apoyo que puedan ser afectados por eventos físicos peligrosos” [3].

La vulnerabilidad puede analizarse desde varias dimensiones dependiendo del objetivo de evaluación. Sin embargo, en lo relacionado con la BDSE como conjunto vulnerable, el análisis de vulnerabilidad parte de los ecosistemas degradados, en el cual la pérdida de los servicios ecosistémicos —especialmente los de regulación de riesgos— los hacen más susceptibles a la amenaza y donde las dimensiones que describen mejor estas condiciones de vulnerabilidad son la ambiental y la física precisadas en las siguientes definiciones [15].

La vulnerabilidad desde la dimensión ambiental se refiere a la explotación inadecuada de los recursos naturales, la cual genera el deterioro de los ecosistemas [15]. La vulnerabilidad se relaciona con los motores de transformación y pérdida de la biodiversidad, los cuales se consideran a nivel mundial como los factores de cambio ambiental global causantes de superar los umbrales de estabilidad y cambio de los sistemas socioecológicos que impactan negativamente la biodiversidad y sus servicios ecosistémicos [1].

Caja 4. Motores de transformación y pérdida de la biodiversidad

- Cambios de uso del territorio (continental o acuático).
- Sobreexplotación de ecosistemas nativos y agroecosistemas.
- Invasiones biológicas.
- Contaminación.
- Cambio climático.

Si bien algunos eventos naturales como las inundaciones y deslizamientos se identifican como disturbios inherentes a las dinámicas de transformación y precursores de adaptación de los socioecosistemas [1], las nuevas condiciones asociadas al cambio climático que influyen en la variación de la precipitación pueden afectar de manera puntual un ecosistema dado. También estas nuevas condiciones pueden afectar las capacidades de un ecosistema para soportar una perturbación y estabilizarse (resiliencia), mientras que otros son incapaces de resistir la severidad del disturbio, el cual transforma las características de los ecosistemas, cambiando su composición, estructura y función drásticamente [16].

Por otro lado, la vulnerabilidad desde la dimensión física se relaciona con la ubicación y capacidad de resistencia o de absorción del impacto de los elementos expuestos a una amenaza [15], donde los ecosistemas degradados se ven cada vez más afectados por las amenazas al perder su capacidad de resistencia o absorción del impacto.

Los planteamientos anteriores llevan a identificar la relación con uno o varios escenarios de riesgo, los cuales pueden generar impactos negativos en la biodiversidad y sus servicios ecosistémicos convirtiéndola en un conjunto vulnerable, lo que repercute en la disminución y pérdida de su capacidad de contribuir al bienestar humano.

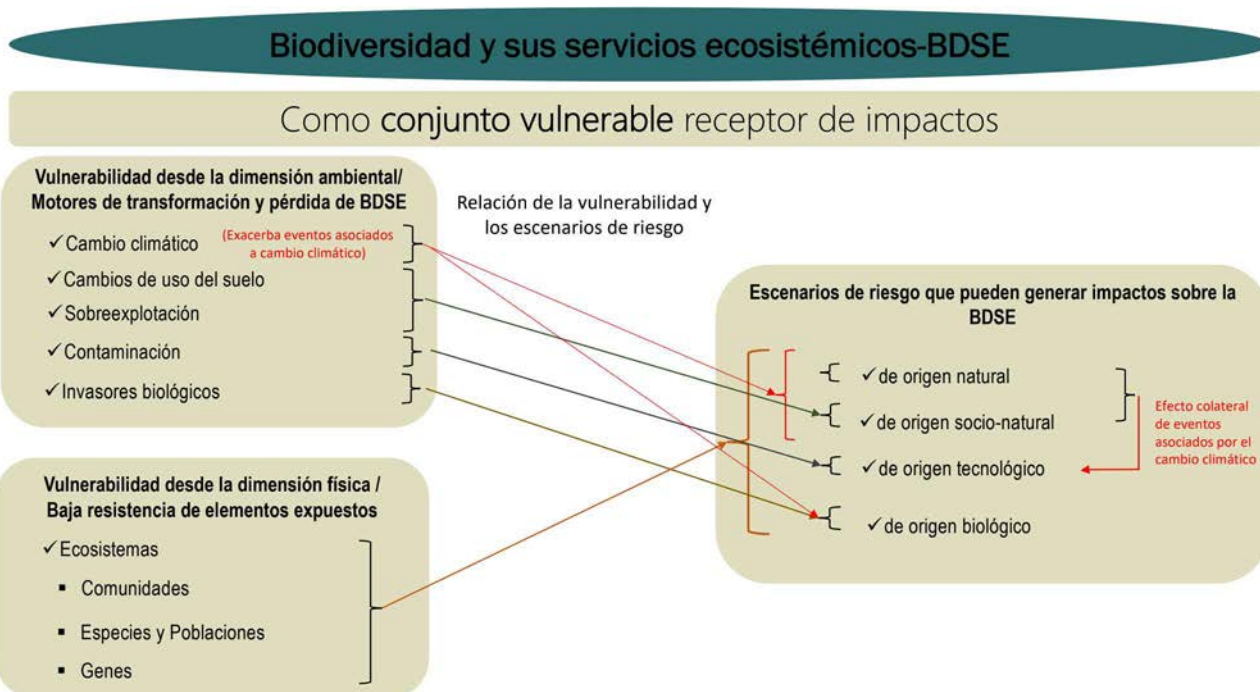


Figura 3. Relaciones de los escenarios de riesgo y la vulnerabilidad desde las dimensiones ambiental y física. Fuente: Elaboración propia.

Las acciones que se proponen desde esta ruta buscan primero evitar los motores de transformación y pérdida de la biodiversidad y con ello disminuir la vulnerabilidad ambiental, y segundo, establecer estrategias para recuperar la BDSE desde las SbN en caso de presentarse un desastre que impacte los sociosistemas vulnerables físicamente.

Las siguientes secciones describen dos estudios de caso que refieren resultados del estado de la BDSE tras un desastre y que permiten identificar elementos a tener en cuenta para intervenirlos de manera efectiva y así reducir escenarios de riesgo.

2.1.1 Estudios de caso de la biodiversidad y sus servicios ecosistémicos como conjunto vulnerable

La BDSE como conjunto vulnerable se configura a partir de la posible ocurrencia de un evento intenso, grave y extendido que altera las capacidades de recuperación natural de los ecosistemas y las poblaciones humanas que se benefician de sus servicios.

A continuación, se relacionan dos estudios de este caso donde el reconocimiento del estado de la BDSE tras el desastre, evidencian puntos de partida para la recuperación de la BDSE y prepararse para mejorar la resiliencia frente a determinados eventos.

Ecosistemas isleños: Biodiversidad de la Isla de Providencia tras el paso del huracán Iota. El pasado 16 de noviembre de 2020, la isla de Providencia sufrió los impactos del huracán Iota de categoría 5 que pasó a menos de 12 kilómetros de la isla y levantó olas de hasta 6 metros de altura, afectando hasta el 90% de los bosques secos, los manglares, y con ellos, grupos bióticos de importancia de la isla. Los fuertes vientos del huracán desprendieron la vegetación y el follaje, además de propiciar una posible salinización del suelo [17], lo que redundó en el daño de los servicios ecosistémicos que proveían a la población isleña.

Si bien se contó con la evaluación de daños y necesidades ambientales (EDANA) como herramienta de análisis inicial para la priorización de áreas con mayor impacto ambiental por el evento, para abordar acciones desde la gestión integral de la BDSE se hizo necesario mayor detalle sobre ecosistemas, grupos biológicos claves y reconocimiento de relaciones sociales con la biodiversidad a nivel local. Esta gestión integral de la BDSE permitió identificar el grado de afectación, especies resistentes y resilientes, y así definir las líneas estratégicas para la restauración ecológica de la isla con la articulación de saberes tradicionales [17].

Las exploraciones de la “Expedición Cangrejo Negro” tras los primeros 60 días después del huracán, arrojaron los siguientes panoramas de cambio de diferentes grupos bióticos:

- Este tipo de eventos afectan la estructura de las comunidades (distribución y la colonización de especies en sus hábitats).
- Se disminuye la abundancia y riqueza de las especies, especialmente en grupos de aves.
- Se hace necesaria la recuperación ecológica asistida para proveer de alimento a especies polinizadoras y dispersoras de semillas que puedan promover la sostenibilidad de la restauración.
- La identificación de especies vegetales resistentes y resilientes es clave para la recuperación del sistema natural.

- El reconocimiento activo de los saberes tradicionales y empoderamiento cultural es de vital importancia para la sostenibilidad de las estrategias de restauración.

Con estos resultados, se definió la ruta de trabajo para planificar la estrategia de restauración ecológica en la isla mediante el reconocimiento de las fortalezas y debilidades de determinados grupos biológicos frente a huracanes, implementando acciones más efectivas desde las SbN para mejorar la resiliencia de la isla frente al cambio climático y reducir los riesgos desde la adaptación de los ecosistemas.

Humedales costeros: Perturbaciones causadas por el terremoto de Chile. En este estudio de caso, Vásquez et al. [18] concluyen la existencia de cambios drásticos en ecosistemas de humedal tras el terremoto de magnitud de momento (Mw) 8.8 ocurrido el 27 de febrero de 2010 a las 03:34 (hora local) en Cauquenes zona central de Chile.

Éste ocasionó el levantamiento de 1.6 metros sobre el nivel de mar del humedal costero de Tubul-Raqui (costa chilena central) lo que generó desecación parcial y con ello modificación en su estructura hídrica alterando además la composición biológica y funcional [18].

Los daños ambientales ocasionados por el terremoto se definieron a partir de un referente previo al evento, con el fin de comparar estructura del hábitat, calidad del agua y composición de la biota acuática del humedal. Con noticias de prensa, les fue posible determinar los daños ocurridos durante el evento y momentos posteriores, donde no se podía acceder a la zona de impacto, obteniendo registros preliminares sobre los cambios del ecosistema. Los trastornos no sólo se debieron a la alteración de la plataforma del humedal, sino también a la incursión del agua salubre del mar tras el tsunami generado por el movimiento telúrico [18].

El deterioro de la biodiversidad fue incrementando tras la desecación del humedal; sin embargo, ciertas aves tanto residentes como migratorias, continuaron usando el humedal como refugio y lugar de anidación, lo que confirmó que, a pesar del disturbio severo, algunos grupos biológicos resisten los cambios y logran adaptarse a las nuevas condiciones post disturbio [18].

En este escenario, de transformación del ecosistema, la intervención sobre las amenazas por terremoto y tsunami son nulas, igual que disminuir la vulnerabilidad física del ecosistema de humedal costero, por lo que sólo queda reconocer la adaptación post evento de ciertos grupos bióticos para planificar la restauración ecológica, acorde a las nuevas condiciones.

En ambos casos, las investigaciones tienen en cuenta elementos bióticos claves, evidentes desde el reconocimiento de la vulnerabilidad ambiental y física de los ecosistemas, que facilitan la toma de decisiones para definir las estrategias de planificación que permitan el restablecimiento de los servicios ecosistémicos.

2.2. Biodiversidad y sus servicios ecosistémicos como atenuador de riesgos e impactos

Renaud et al. [19] refieren el papel de la biodiversidad y sus servicios ecosistémicos en los escenarios de riesgo y cambio climático ha tomado fuerza y reconocimiento a nivel mundial. La reducción del riesgo de desastres basada en ecosistemas y adaptación frente al cambio climático (Eco-RRD/ACC) ha promovido la generación de políticas, investigaciones e intervenciones específicas en escenarios que relacionan el riesgo de desastres y la adaptación frente al cambio climático.

Caja 5. Mitigación y adaptación frente al cambio climático

Mitigación del cambio climático: se refiere a las acciones que buscan reducir las emisiones de gases efecto invernadero en la atmósfera [20].

Adaptación frente al cambio climático: relaciona los cambios en los procesos, prácticas y estructuras para moderar los daños potenciales o para beneficiarse de las oportunidades asociadas con el cambio climático en los sistemas ecológicos, sociales o económicos [21].

No obstante, los conceptos de reducción del riesgo de desastres basada en ecosistemas (EcoRRD) y adaptación basada en ecosistemas (AbE) se desarrollan de manera independiente para cada uno de sus objetivos. El primero frente al riesgo de desastres y el segundo frente a los impactos del cambio climático, pero se articulan en la búsqueda de soluciones desde gestión, conservación y restauración de los ecosistemas.

Si bien la EcoRRD retomó la definición de la AbE, la primera desarrolla su accionar en el amplio panorama de los escenarios de riesgo de desastres y no sólo para aquellos detonados por el cambio climático. Por otro lado, la adaptación no sólo se promueve en escenarios de riesgo, sino que potencializa las ventajas del cambio del clima evidenciando oportunidades de desarrollo [19].

Los escenarios de riesgo como las inundaciones, los deslizamientos o las sequías pueden abordarse desde las acciones propuestas por la EcoRRD y por las medidas AbE ya que ambas hacen parte del enfoque de las SbN y pueden cambiar las condiciones de vulnerabilidad física y ambiental desde la protección y recuperación de los servicios ecosistémicos, y con ello disminuir los escenarios de riesgo de desastres y los impactos por cambio climático, además de aumentar la resiliencia del territorio [22].

Caja 6. Servicios ecosistémicos de regulación

Se relacionan con aquellas contribuciones indirectas al bienestar humano provenientes del funcionamiento de los ecosistemas [23], a las cuales rara vez en la sociedad se les reconoce un valor económico [24]. Los autores [25] consideran que los SE de regulación disminuyen con el aumento de la intensidad de uso, debido al agotamiento de los ecosistemas que los proveen. Los SE de regulación relacionados son:

- Regulación de la calidad del aire
- Regulación climática (incluyendo la captura de carbono)
- Regulación de riesgos naturales
- Regulación de los flujos de agua
- Tratamiento de desechos
- Prevención de la erosión
- Mantenimiento de la fertilidad del suelo
- Polinización
- Control biológico

De los servicios ecosistémicos, se resalta el de regulación ya que actúan como controles estratégicos para reducir los escenarios de riesgo e impactos exacerbados por el cambio climático, incluidos los efectos colaterales que pueden consolidar riesgos de origen tecnológico. Esta relación se muestra en la **Figura 4**.



Figura 4. Relaciones de la biodiversidad y sus servicios ecosistémicos de regulación como conjunto para atenuar riesgos de desastre e impactos por el cambio climático. Fuente: Elaboración propia.

2.2.1. Estudios de caso de la biodiversidad y sus servicios ecosistémicos como atenuador de riesgos e impactos

Los desastres asociados a fenómenos hidrometeorológicos exacerbados por el cambio climático continúan cobrando miles de vidas y cuantiosas pérdidas económicas, evidenciando una vulnerabilidad cada vez mayor y cambiante, incrementando los niveles de inequidad, pobreza y degradación de los ecosistemas [26].

Sin embargo, los ecosistemas saludables se revelan como soluciones para reducir los escenarios de riesgo incrementados por el cambio climático. A continuación, se relacionan dos casos internacionales donde la biodiversidad y sus servicios ecosistémicos actúan como atenuador de riesgos de desastres y cambio climático:

Los ecosistemas costeros: manglares en el caso Jamaica. Jamaica es una isla con un nivel alto de riesgo asociado a amenazas de origen natural y socio natural como aumento del nivel mar, tormentas tropicales y degradación de ecosistemas, entre otros.

Los estudios del Banco Mundial [27] sobre la valoración y evaluación económica de los servicios ecosistémicos de los manglares en Jamaica establecieron los daños y pérdidas asociadas a eventos hidrometeorológicos extremos como el Huracán Iván en 2004, que costó 0.5 billones de dólares, cerca del 6 % del producto interno bruto (PIB) de ese país.

Por esto, para proteger la isla y sus pobladores, el gobierno desarrolló programas de conservación, restauración y protección de los ecosistemas de manglar, dado que estos ecosistemas proveen servicios de provisión de suelos y alimento, de regulación climática a través de la captura de carbono, de prevención de la erosión costera, entre otros, destacando su aporte a la reducción de la vulnerabilidad costera frente al cambio climático [27].

Específicamente, Old Harbour Bay ha sido beneficiada por los manglares que prestan servicios ecosistémicos de regulación de inundaciones durante la temporada de ciclones tropicales. En esta zona el ecosistema de manglar representa una inversión 2,500 dólares por hectárea al año con lo que se reduce

el nivel del agua entre 0.3 y 0.6 metros, que de no tenerlos, la inundación alcanzaría hasta 1 metro. En época de inundaciones estos manglares protegen 177,000 personas y 2.4 millones de dólares valorados en bienes, lo que se traduce en 186 millones dólares en bienes protegidos por hectárea de manglar, sin contar los co-beneficios de la provisión de alimentos y suelo, la fijación de carbono, entre otros [27].

Desde la adaptación basada en ecosistemas se redujo el riesgo a inundaciones, mediante la restauración ecológica como acción de las SbN que permitieron disminuir la vulnerabilidad física (aumento de la resistencia a inundaciones de la costa) y ambiental (protección y mejora de la salud del ecosistema de manglar). Si bien la amenaza puede continuar presentándose cada vez con más fuerza por efecto del cambio climático, los ecosistemas costeros regularán el riesgo a inundaciones y proveerán beneficios extras a las comunidades.

Socioecosistemas urbanos: ciudades y naturaleza, caso México. Los socioecosistemas de Xalapa y áreas circundantes han sufrido gran deterioro por la rápida y poco planificada expansión de la urbe, incrementando los escenarios de riesgo en muchos casos exacerbados por el cambio climático.

Con el fin de identificar las posibles medidas de adaptación basada en ecosistemas, el presente estudio de caso partió de la identificación de escenarios de riesgo relacionados con el clima como los deslizamientos, la erosión y la inundación en las zonas urbanas y rurales de Xalapa y San Andrés Tlalnahuayocan. Se identificó la vulnerabilidad de los sistemas productivos y ecosistemas más expuestos a la acumulación de estas amenazas, resaltando que pueden ser los más sensibles y con mayor probabilidad de impacto negativo en caso de presentarse el desastre [28].

Teniendo en cuenta el contexto, la vulnerabilidad frente al cambio climático está en función del Índice de la Sensibilidad y la Capacidad adaptativa ($V = S/CA$), donde la sensibilidad referencia las características propias del territorio, mientras que la capacidad adaptativa relaciona las fortalezas o capacidades adquiridas que permiten que el territorio sea menos sensible o que, en caso de verse afectado, pueda afrontar y recuperarse ante un evento [14].

El estudio evaluó la capacidad adaptativa mediante la estimación de los aportes de los servicios ecosistémicos (SE) y con conectividad tanto dentro de la ciudad como el área circundante, donde se incluyeron las áreas protegidas y los parques urbanos. Los servicios ecosistémicos identificados fueron: i) provisión de agua superficial, ii) retención de sedimentos y iii) almacenamiento de carbono. Estos SE identificaron áreas para la implementación de medidas AbE con el fin de mitigar los efectos negativos del cambio climático y la variabilidad climática [28].

Una vez identificadas las amenazas, vulnerabilidades y áreas que prestaban en mayor proporción los servicios ecosistémicos para reducir los riesgos exacerbados por cambio climático, se definieron las medidas de AbE agrupándolas en los tres niveles general, de adaptación, y económicos, resaltando de ellos los siguientes:

- Conservación y restauración de ecosistemas
- Pago de servicios ambientales
- Enriquecimiento de bosques y restauración
- Manejo agrosilvopastoril
- Conectividad entre parques y jardines

Aunque el presente caso aún hace parte de los procesos de planificación, el análisis de riesgos incorpora la biodiversidad y sus servicios ecosistémicos como pilar para la reducción del riesgo de

desastres y aumento de la resiliencia frente al cambio climático mediante la propuesta de integración de áreas específicas a los planes de ordenamiento territorial, ordenamiento de cuencas hidrográficas, nuevos modelos de desarrollo socioeconómico más sostenible y mejor adaptados al cambio climático.

Teniendo en cuenta los anteriores casos, la biodiversidad y sus servicios ecosistémicos como conjunto atenuador de riesgos de desastres e impactos por cambio climático se destaca como una medida eficiente y sostenible en el tiempo brindando otros beneficios de la naturaleza. El análisis desde la naturaleza va más allá de intervenciones puntuales para remediar un escenario de riesgo, precisa acciones que integran el territorio desde la visión de paisaje y consolida las intervenciones en el largo plazo al hacerlas parte de la planificación y ordenamiento del territorio.

3. LA BIODIVERSIDAD Y SUS SERVICIOS ECOSISTÉMICOS EN LOS PROCESOS DE GESTIÓN DEL RIESGO

Una vez desarrolladas las rutas bajo las cuales la BDSE abordan los conflictos socioecológicos relacionados con el riesgo de desastres y el cambio climático, entonces se adaptan los tres procesos para la gestión del riesgo de desastres planteados en la PNGRD [3] de la siguiente manera:

- Conocimiento de la biodiversidad y sus servicios ecosistémicos para la gestión del riesgo.
- Reducción del riesgo desde la gestión de la biodiversidad y sus servicios ecosistémicos.
- Manejo de desastres de y desde la biodiversidad y sus servicios ecosistémicos.

El conocimiento de la biodiversidad y sus servicios ecosistémicos para la gestión del riesgo es la base para definir las estrategias de gestión, y para estudiar y valorar las particularidades del territorio. Sólo mediante el reconocimiento de la biodiversidad y sus servicios ecosistémicos y el rol de estos en las dinámicas propias se plantearán soluciones apropiadas a las condiciones ambientales y sociales tanto para reducir el riesgo, como para mejorar la resiliencia frente al cambio climático y restaurar un ecosistema tras un desastre.

La reducción del riesgo desde la gestión de la BDSE busca con base en los insumos generados en el proceso de conocimiento de la BDSE, establecer las medidas de intervención sobre el territorio para modificar o disminuir las condiciones de riesgo existentes mediante acciones basadas en la naturaleza de tipo prospectivo (prevención) o correctivo (mitigación del riesgo) para garantizar que no surjan nuevas situaciones de riesgo.

Finalmente, y visto desde el proceso de manejo de desastres, la BDSE pueden afectarse por el desastre y por otro lado puede hacer parte de las estrategias de recuperación de áreas degradadas para evitar que nuevos escenarios de riesgo se consoliden. Este proceso se compone por una etapa de planeación para enfrentar el desastre (i.e., preparación para la respuesta a emergencias y preparación para la recuperación post desastre), y otra etapa de ejecución de lo planeado en la atención del desastre.

Estas etapas se desarrollan en múltiples escalas y bajo el enfoque de SbN para aumentar la resiliencia frente al cambio climático y la variabilidad climática, asegurando así la sostenibilidad y el bienestar humano, todo ello para alcanzar un modelo territorial sostenible.

Las SbN se entienden como las funciones de los ecosistemas para resolver los problemas ambientales, en lugar de depender solamente de soluciones convencionales [5]. Estas representan soluciones sencillas, de fácil implementación, sistémicas, más costo-efectivas y sostenibles que las medidas tradicionales, generando además beneficios relacionados con garantizar una perdurabilidad en el tiempo de las

contribuciones de la biodiversidad [29], la reducción del riesgo de desastres, y el aumento de la resiliencia frente al cambio climático [30].

Una de las estrategias desde las SbN a resaltar es la restauración ecológica, considerada como una estrategia práctica de manejo que restablece los procesos ecológicos para mantener la composición, estructura y función del ecosistema.

La cual permite su aplicación en distintas escalas y unidades de paisaje, mediante el desarrollo de estrategias participativas a través de sus tres objetivos: restauración, rehabilitación, y recuperación [31].

Esta estrategia permite reducir escenarios de riesgo y evitar la reproducción de las condiciones de riesgo preexistentes de áreas afectadas por el desastre.

A continuación, la **Figura 5** muestra una aproximación conceptual desde la gestión integral de la biodiversidad y sus servicios ecosistémicos para la gestión del riesgo de desastres y el cambio climático.

Socioecosistema

Conflictos socioecológicos
en el marco del riesgo de desastres y el cambio climático



Figura 5. Aproximación conceptual desde la gestión integral de la biodiversidad y sus servicios ecosistémicos para la gestión del riesgo de desastres y el cambio climático en el alcance de un modelo territorial sostenible. Fuente: Elaboración propia.

4. CONCLUSIONES

Las políticas de biodiversidad y servicios ecosistémicos, de riesgo de desastres, y de cambio climático coinciden en buscar a través de su gestión la sostenibilidad del territorio, el bienestar del ser humano y el aumento de la resiliencia, a la vez que responden a compromisos internacionales y precisan su articulación desde la base natural a través de las SbN.

La biodiversidad y sus servicios ecosistémicos aportan a la gestión del riesgo de desastres y el cambio climático a través de dos rutas: i) mediante la identificación de la BDSE como conjunto vulnerable susceptible de ser impactado negativamente, y ii) mediante el reconocimiento de la naturaleza como atenuador de riesgos e impactos.

La biodiversidad y sus servicios ecosistémicos han sido afectados por desastres de distinta índole. Algunos promovidos por la relación que tienen los motores indirectos de transformación de la biodiversidad con las amenazas, lo que permite identificar escenarios de riesgo sobre la biodiversidad y sus servicios ecosistémicos como conjunto vulnerable, lo que repercute en la disminución y pérdida de su capacidad de prestar bienestar a la humanidad.

En la actualidad la gestión del riesgo se centra en el restablecimiento de las condiciones normales para la población humana; sin embargo, la recuperación de las comunidades bióticas de importancia para mantener los sistemas naturales y su sostenibilidad para el bienestar de la población humana afectada, se hace cada vez más relevante.

La identificación de la biodiversidad y sus servicios ecosistémicos como atenuador de riesgos e impactos propone reducir el riesgo de desastres desde las acciones prospectivas (evitar la generación de escenarios de riesgo) y correctivas (restauración ecológica para la recuperación de servicios ecosistémicos de regulación de riesgos).

PUNTOS CLAVE

- La restauración ecológica se configura como una estrategia práctica de reducción del riesgo y de manejo de desastres con la cual se busca reducir la vulnerabilidad y restablecer los procesos ecológicos garantizando la sostenibilidad de la intervención post evento, además de evitar la reproducción de las condiciones de riesgo preexistentes del área afectada.
- La promoción de ecosistemas saludables es una estrategia para reducir la exposición y vulnerabilidad a través de la mitigación de amenazas o la regulación, así como la mejora de las capacidades de subsistencia y resiliencia.
- Desde el enfoque de SbN el análisis de riesgos incorpora la biodiversidad y sus servicios ecosistémicos como pilar para la reducción del riesgo de desastres y aumento de la resiliencia frente al cambio climático mediante la propuesta de integración de áreas específicas a los planes de ordenamiento territorial, al ordenamiento de cuencas hidrográficas, y en los modelos de desarrollo socioeconómico sostenible mejor adaptados al cambio climático y los ecosistemas.

RECOMENDACIONES PARA TOMAR DECISIONES

Desarrollar estrategias bajo el enfoque de SbN ya que estas acciones articulan propósitos en torno a la gestión del riesgo, el cambio climático, y la protección de la biodiversidad, las cuales al incorporarse en los instrumentos de planificación y ordenamiento ambiental del territorio, facilitan a los entes territoriales y regionales el alcance indicadores mínimos de obligatorio cumplimiento desde una misma acción.

5. MATERIALES Y MÉTODOS

Se revisaron sesenta y nueve documentos relacionados con: marcos internacionales, políticas públicas colombianas, estudios de caso, publicaciones científicas relacionadas con los temas de biodiversidad y servicios ecosistémicos, gestión del riesgo de desastres y cambio climático.

La estrategia de búsqueda se realizó mediante la consulta de palabras clave relacionadas con los temas objeto de estudio, en los motores de búsqueda de Google, Google Académico, Redalyc, Elsevier, Springer, y documentos físicos.

Se seleccionaron veintisiete fuentes que brindaron conceptos para desarrollar las rutas planteadas para determinar: la BDSE como conjunto vulnerable, o como un conjunto atenuador de riesgos de desastres e impactos y para identificar los elementos comunes que permitieran la articulación.

Para el análisis de información se estructuraron las sinergias de los temas y con base en ellos identificaron los elementos de enlace que permitían incorporar la biodiversidad y sus servicios ecosistémicos en los procesos de la gestión del riesgo (conocimiento del riesgo, reducción del riesgo y manejo de desastres) en escenarios exacerbados por cambio climático a partir del reconocimiento de resultados de los estudios de caso.

CONFLICTO DE INTERESES

La autora no declara conflicto de intereses.

AGRADECIMIENTOS

Agradecimiento a Paola Morales, Carolina Osorio, Elkin Noguera, Wilson Ramírez (del Instituto Humboldt), Lizardo Narváz (Banco Mundial) y Gustavo Aristizábal (PNUD) por sus revisiones y sugerencias para consolidar este capítulo.

IDENTIFICACIÓN DE AUTORES

Dorotea Cardona Hernández [CvLAC](#)

BIBLIOGRAFÍA

1. MADS (Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible). (2012). *Política Nacional para la Gestión Integral de la Biodiversidad y sus Servicios Ecosistémicos*. <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/10/Poli%CC%81tica-Nacional-de-Gestio%CC%81n-Integral-de-la-Biodiver.pdf>
2. IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático). (2021). *Comunicado de prensa del IPCC: El cambio climático es generalizado, rápido y se está intensificando*. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2021/08/IPCC_WGI-AR6-Press-Release-Final_es.pdf
3. Ley 1523 de 2012. Por la cual se adopta la política nacional de gestión del riesgo de desastres y se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y se dictan otras disposiciones. Congreso de Colombia. Abril 24 de 2012. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=47141>
4. IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales). (2021). *¿Qué es el Cambio Climático?*. <http://www.ideam.gov.co/web/atencion-y-participacion-ciudadana/cambio-climatico>
5. IUCN (Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza). (2020). *¿Qué son las Soluciones Basadas en la Naturaleza?*. <https://www.iucn.org/node/28778>
6. CDB (Convenio de Diversidad Biológica). (2004). *Decenio de las Naciones Unidas sobre la biodiversidad*. <https://www.cbd.int/undb/media/factsheets/undb-factsheets-es-web.pdf>
8. ONU (Organización para las Naciones Unidas). (2015). *Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres 2015-2030*. Japón. https://www.unisdr.org/files/43291_spanishsendaiframeworkfordisasterri.pdf
9. ONU (Organización para las Naciones Unidas). (1992). *Convenio marco de las naciones unidas sobre el cambio climático*. Brasil. <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/convsp.pdf>
10. *Ley 1931 de 2018*. Por la cual se establecen directrices para la gestión del cambio climático. Congreso de Colombia. Julio 27 de 2018. https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma_pdf.php?i=87765
11. Cohen-Shacham, E., Walters, G., Janzen, C. & Maginnins, S. (2016). *Nature-based solutions to address societal challenges*. Gland, Switzerland. <https://doi.org/10.2305/IUCN.CH.2016.13.en>
12. Villa, C. M. & Didier, G. (2020). *Plan Institucional Cuatrienal de Investigación Ambiental 2019-2022. Conocimiento para un cambio transformativo*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. Bogotá D.C., Colombia. <http://repository.humboldt.org.co/bitstream/handle/20.500.11761/35461/picia-2019-2022%20%281%29.pdf?sequence=4&isAllowed=y>
13. Lozano, O., Cardona, D., Pineda, R. y D. Rivera. (2018). *Guía para la integración de la variabilidad climática con la gestión del riesgo de desastres a nivel territorial*. UNGRD. Bogotá. <https://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/handle/20.500.11762/26433>
14. OMM & PNUMA. (2014). *Cambio climático 2014. Impactos, Adaptación y Vulnerabilidad*. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/WGIIAR5-IntegrationBrochure_es-1.pdf
15. IDEAM, PNUD, MADS, DNP, CANCELLERÍA. (2017). *Tercera Comunicación Nacional De Colombia a La Convención Marco De Las Naciones Unidas Sobre Cambio Climático (CMNUCC)*. http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023731/TCNCC_COLOMBIA_CMNUCC_2017_2.pdf
16. Cardona, O.D. (2005) *Gestión integral de riesgos y desastres*. Universidad Nacional de Colombia Manizales, Colombia.
17. Canyon, D.V., Burkle, F.M. & Speare, R. (2015). *Managing Community Resilience to Climate Extremes, Rapid Unsustainable Urbanization, Emergencies of Scarcity, and Biodiversity Crises by Use of a Disaster Risk Reduction Bank*. <https://doi.org/10.1017/dmp.2015.124>

18. Instituto Humboldt (Instituto de investigación de recursos biológicos Alexander von Humboldt). (2021). *Expedición Cangrejo negro*. <http://intranet.humboldt.org.co/documentos/informeprovidencia.pdf>
19. Vásquez, D., Olmos, V., Sandoval, N., Muñoz, M.D., Valdovinos, C. (2010). Desastres naturales y biodiversidad: El caso del humedal costero Tubul-Raqui. *Sociedad Hoy*, (19), 33-51. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=90223044004>
20. Renaud, F., Sudmeier-Rieux, K., Estrella, M. & Nehren, U. (2016). *Ecosystem-Based Disaster Risk Reduction and Adaptation in Practice-Advances in Natural and Technological Hazards Research*. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-43633-3>
21. MADS (Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible). (2017). *Política Nacional de cambio climático*. <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2022/01/9.-Politica-Nacional-de-Cambio-Climatico.pdf>
22. UNFCCC. (2021). *United Nations Climate Change*. <https://unfccc.int/es/topics/adaptation-and-resilience/the-big-picture/que-significa-adaptacion-al-cambio-climatico-y-resiliencia-al-clima>
23. Munang, R., Thiaw, I., Alverson, K., Liu, J. & Han, Z. (2013). *The role of ecosystem services in climate change adaptation and disaster risk reduction*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1877343513000080?via%3Dihub>
24. Peña, L. (2012). *Evaluación de los ecosistemas del milenio y geodiversidad*. Obtenido de II Jornada sobre geodiversidad del país Vasco, Bilbao: http://catalog.ipbes.net/system/assessment/6/references/files/725/original/n_9.pdf?1424262265
25. Morales, M., Rodríguez, N., Ramos, L., Rozo, C., Cardona, D., Cruz, S. & Gómez, C. (2012). *Proceso metodológico y aplicación para la definición de la Estructura Ecológica Nacional: Énfasis en servicios ecosistémicos - Escala 1:500.000*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales –IDEAM-. https://www.siac.gov.co/documentos/EstructuraEcologica500_informeIDEAM_ago2012-2.pdf
26. De Groot, R. S., Alkemade, R., Braat, L., Hein, L. & Willemen, L. (2010). *Ecological complexity*. <https://www.elsevier.com/locate/ecocom>
27. UNDRR. (2019). *Informe de Evaluación Global sobre la Reducción del Riesgo de desastres-GAR19*. <https://www.eird.org/americas/docs/gar-sintesis-2019.pdf>
28. World Bank. (2019). *Forces of Nature: Assessment and Economic Valuation of Coastal Protection Services Provided by Mangroves in Jamaica*. <https://documents1.worldbank.org/curated/en/357921613108097096/pdf/Forces-of-Nature-Assessment-and-Economic-Valuation-of-Coastal-Protection-Services-Provided-by-Mangroves-in-Jamaica.pdf>
29. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Xalapa H. Ayuntamiento, Fondo Golfo de México, Wageningen University & Research, ONU Medio Ambiente & GEF. (2020). *Construcción de la resiliencia climática en sistemas urbanos mediante la adaptación basada en ecosistemas AbE, en América Latina y El Caribe*. México. <https://cityadapt.com/wp-content/uploads/2020/04/191027-Ana%CC%81lisis-de-Vulnerabilidad-Xalapa.pdf>
30. Baptiste, B. & Rinaudo, M.E. (2018). *Soluciones basadas en la naturaleza- Herramientas para fortalecer las TSS. Biodiversidad: Ficha 407*. <http://reporte.humboldt.org.co/assets/docs/2019/4/407/biodiversidad-2019-407-ficha.pdf>
31. Faivre, N., Sgobbi, A., Happaerts, S., Raynal, J. & Schmidt, I. (2018.). *Translating the Sendai Framework into action: The EU approach to ecosystem based disaster risk reduction, international journal of risk reduction*. Sendai, Japón. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2017.12.015>
32. Ospina-Arango, O.L., Vanegas-Pinzón, S., Escobar-Niño, G. A., Ramírez, W. & Sánchez, J.J. (2015). *Plan Nacional de Restauración: Restauración ecológica, rehabilitación y recuperación de áreas disturbadas*. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Bogotá, D.C. Colombia.

CAPÍTULO
12

Retos para incorporar las soluciones basadas en la naturaleza y la reducción del riesgo de desastres con enfoque ecosistémico en la planificación territorial de Colombia

Carolina García Londoño^{1*}, María Angela Echeverry-Galvis², Lina Ospina-Ostios³, Constanza Ricaurte-Villota⁴, & Mauricio Romero-Torres⁵

¹Sociedad Colombiana de Geología - SCG, Capítulo Antioquia, Medellín, Colombia

²Facultad de Estudios Ambientales y Rurales, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia

³Escuela de Ingeniería Civil y Geomática (EICG), Universidad del Valle, Calí, Colombia

⁴Programa de Geociencias Marinas y Costeras (GEO). Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras "José Benito Vives de Andrés" INVEMAR, Santa Marta, Colombia

⁵Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres, Subdirección para el Conocimiento del Riesgo, Bogotá, Colombia

*Autor de correspondencia: Carolina García Londoño, Sociedad Colombiana de Geología, Correo-e: cargalon@gmail.com

Resumen

Dentro de las soluciones basadas en la naturaleza (SbN) se incluyen las acciones con enfoque de reducción del riesgo basado en ecosistemas Eco-DRR. Dichas acciones buscan reducir los riesgos de desastres mediante la gestión de los ecosistemas y el aprovechamiento de sus servicios ecosistémicos, con el objetivo de lograr un desarrollo sostenible y resiliente que aborde los retos sociales existentes. Sin embargo, la implementación en la planificación del territorio de las SbN a nivel general, y en

particular de las acciones con enfoque Eco-DRR, conlleva múltiples retos normativos, de gestión, organizacionales y culturales que deben superarse. Aquí analizamos algunos de estos retos, planteamos recomendaciones para abordarlos y ejemplos para superarlos. Estos retos incluyen desde la mejora del conocimiento, la necesidad de indicadores, la toma de decisiones, la articulación de la normativa, hasta generar procesos de gobernanza inclusivos. Se espera que estos retos se resuelvan por equipos multidisciplinares para fomentar la implementación de acciones Eco-DRR y SbN en el ordenamiento territorial de Colombia y en situaciones de riesgo, teniendo en cuenta además el contexto de cambio climático.

Palabras clave: gestión del riesgo de desastres, ecosistemas, ordenamiento territorial, Eco-DRR, soluciones basadas en la naturaleza.

Challenges to incorporate nature-based solutions and disaster risk reduction with an ecosystem approach in territorial planning in Colombia

Abstract

Eco-DRR ecosystem-based risk reduction actions are included in the Nature-based solutions (NbS) framework. These Eco-DRR actions seek to reduce disaster risks by managing ecosystems and utilizing their ecosystem services to achieve sustainable and resilient development that addresses existing social challenges. However, in Colombian, the application in the territorial planning of NbS in general and Eco-DRR in particular, entails multiple regulatory, management, organizational and cultural challenges that must be overcome. Here we analyze some of these challenges, propose recommendations to address them, and examples of overcoming them. These challenges range from improving knowledge, the need for indicators, decision-making, and articulating regulations to generating inclusive governance processes. It is expected that multidisciplinary teams will resolve these challenges to promote Eco-DRR and other NbS in the land use planning of Colombia.

Keywords: Disaster risk management, ecosystems, territorial planning, Eco-DRR, nature-based solutions.

1. INTRODUCCIÓN

Los desastres no son naturales y sus causas son cada vez más complejas, inciertas y dinámicas. Para reducir el riesgo de desastres, la sociedad necesita generar soluciones integrales a los problemas que causan la degradación de los ecosistemas, el cambio climático, y la pérdida de biodiversidad, problemas que

impactan la seguridad alimentaria, la salud humana, y el desarrollo socioeconómico [1]. Una de estas respuestas son las soluciones basadas en la naturaleza (SbN), un concepto sombrilla que surgió hace más de una década con el Banco Mundial [2] y la UICN [3], que ha evolucionado a partir de principios y enfoques como la restauración ecológica, la restauración forestal, la ingeniería ecológica, la conservación de la biodiversidad y de las áreas protegidas, los servicios de adaptación climática, la adaptación basada en ecosistemas (AbE), la mitigación basada en ecosistemas (MbE), la reducción del riesgo de desastres basada en ecosistemas (Eco-DRR), la infraestructura natural y la infraestructura verde (ver definición en **Caja 1**) [4].

Caja 1. Glosario

Adaptación basada en ecosistemas (AbE): es el uso de la biodiversidad y servicios ecosistémicos como parte de una estrategia para ayudar a las personas a adaptarse a los efectos adversos del cambio climático [5].

Reducción del riesgo de desastres basada en ecosistemas (Eco-DRR, del término en inglés Ecosystem Disaster Risk Reduction): se refiere a la gestión sostenible, conservación y restauración de ecosistemas para reducir el riesgo de desastres, con el objetivo de lograr un desarrollo resiliente [6].

Retos: metas ambiciosas, motivadoras, alcanzables y casi siempre multidisciplinarias que conllevan avances en la práctica pública y profesional.

Servicios culturales: se relacionan con procesos de recreación, de contemplación e inspiración, así como religiosos.

Servicios de aprovisionamiento: como el agua, la comida, la madera, aquellos que se pueden tomar directamente de los ecosistemas.

Servicios de regulación: donde el sistema natural aporta en la regulación de condiciones climáticas, de inundaciones, de calidad del agua, de la dispersión y movilidad de enfermedades.

Servicios de soporte: como la generación y mantenimiento de suelos, proceso de fotosíntesis, ciclaje de nutrientes.

Servicios ecosistémicos: constituyen los beneficios que las personas obtienen a partir de los ecosistemas, basado en la interacción y proceso entre los elementos naturales, y que contribuyen a la percepción de bienestar [7].

Soluciones basadas en la naturaleza: acciones para proteger, gestionar de forma sostenible, y restaurar los ecosistemas naturales o modificados, que abordan los desafíos sociales de manera efectiva y adaptativa, proporcionando simultáneamente beneficios para el bienestar humano y la biodiversidad [8].

Los enfoques antes mencionados asociados a las SbN, en especial las de Eco-DRR, AbE y MbE, son complementarios, siendo las SbN un concepto más amplio y ambicioso que ampara los desafíos sociales y económicos, actuando como un marco de las políticas y prácticas ambientales para el desarrollo sostenible —más allá de aportar a la conservación de la biodiversidad. Los beneficios de los enfoques

Eco-DRR, AbE y MbE sobrepasan la reducción de riesgos y la adaptación y mitigación al cambio climático, especialmente cuando se compara con el enfoque gris o estructural (**Fig. 1**) [9].

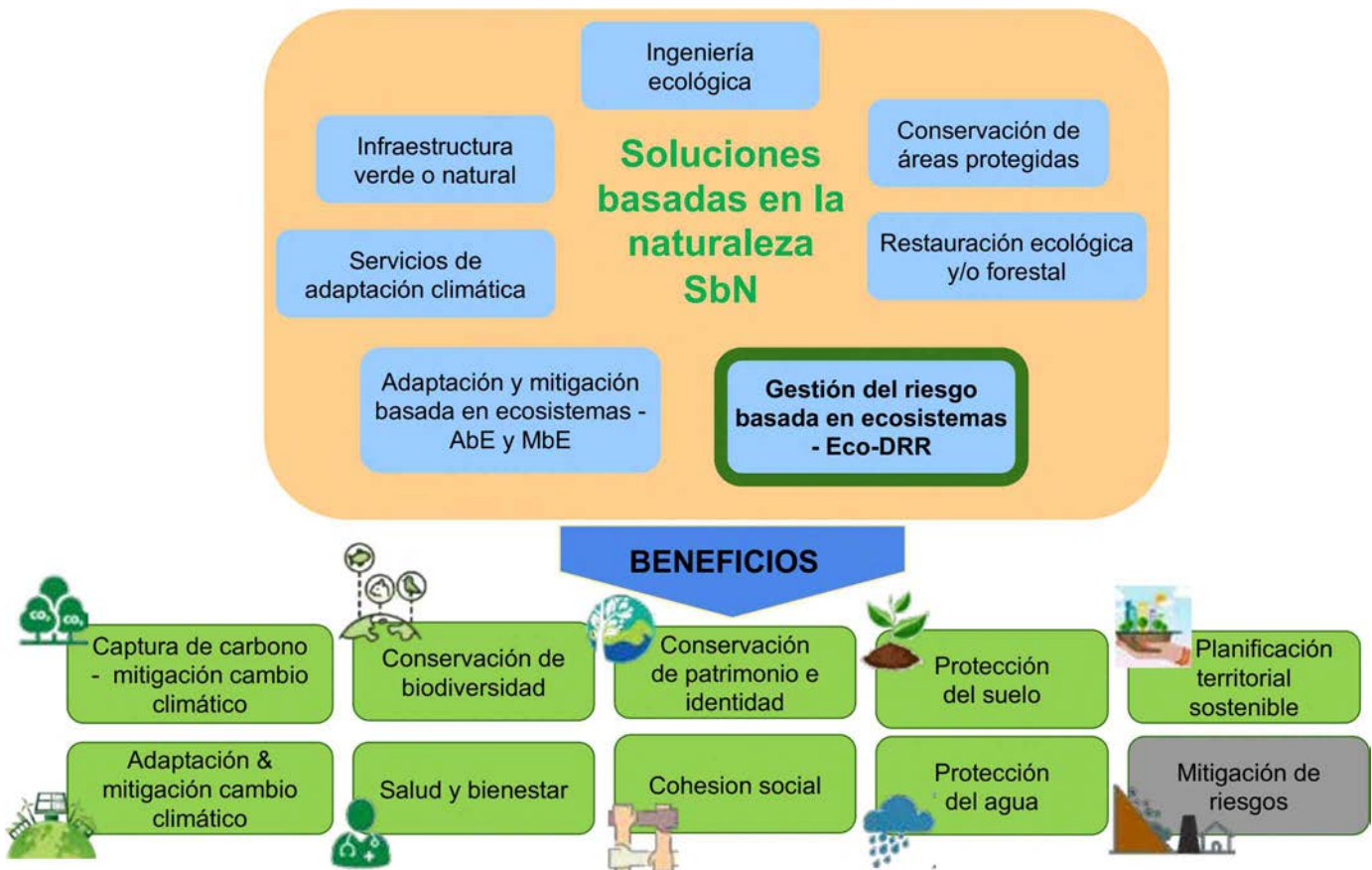


Figura 1. Múltiples beneficios de la SbN, en particular de las Eco-DRR. Estos enfoques generan múltiples beneficios (todos en verde), mientras que el único beneficio de la infraestructura gris o tradicional es la mitigación de riesgos (gris) (adaptado de [9]).

Uno de los aspectos más destacados de las SbN es su potencial de proporcionar más de un tercio de la adaptación y mitigación climática necesaria para cumplir los objetivos climáticos mundiales a 2030 asociados a amenazas como inundaciones, sequías y calor extremo [10]. En la COP26 en Glasgow se enfatizó el rol de las SbN, la naturaleza y la biodiversidad para proteger, gestionar de manera sostenible y restaurar los ecosistemas naturales y así contribuir a los resultados de desarrollo y objetivos climáticos. Poco después, la UNDDR lanzó una guía para implementar SbN con enfoque en reducción de riesgos y adaptación al cambio climático [11].

Para enfrentar los riesgos climáticos locales y globales es necesario trabajar de la mano de la naturaleza, lo cual requiere del entendimiento y cuidado de los ecosistemas que enfrentan múltiples amenazas [12]. Globalmente, la principal amenaza sobre la biodiversidad es la pérdida y transformación de ecosistemas causada por modificaciones antrópicas [13]. En Latinoamérica, la pérdida y transformación de ecosistemas se acentúa con una pérdida del 94% del hábitat de la fauna y flora, donde cerca del 50% es atribuible a cambios en los ecosistemas [14], como consecuencia, los ecosistemas pierden resiliencia, y capacidad para responder y regular su estabilidad ecológica [15].

Colombia, no es ajeno a este panorama. En la evaluación de riesgo de extinción de ecosistemas, de 81 ecosistemas terrestres, 22 están en Peligro Crítico (CR), y 14 ecosistemas En Peligro (EN), principalmente por la reducción en su extensión y distribución geográfica [16]. Según estos autores, las causas de degradación de estos ecosistemas incluyen incendios de cobertura vegetal, el avance de proyectos de conurbanización y la degradación del suelo por erosión. Esto incide en el bienestar humano ya que se genera pérdida de funcionalidad de los ecosistemas en su capacidad de reducir el riesgo de desastres y en sus aportes a la adaptación y mitigación del cambio climático, entre otros [12].

Incorporar los enfoques de Eco-DRR, AbE y SbN en los procesos de ordenamiento territorial trae múltiples beneficios. Además de reducir las presiones sobre los ecosistemas, contribuye a reducir los conflictos sociales y económicos. Sin embargo, incorporar este enfoque en la planificación territorial de Colombia tiene múltiples retos, como los que señalamos a continuación, agregando algunas recomendaciones para abordar cada reto y en algunos casos incluyendo ejemplos dónde se ha incorporado con éxito este enfoque.

Los retos se inspiran en la charla *Soluciones basadas en la Naturaleza para la Reducción del Riesgo*, presentada por Carolina Garcia (autora del capítulo) en la serie *El Planeta pide la Palabra* [17]. En la charla se presentaron 30 retos para la incorporación del enfoque de Eco-DRR en la planificación del territorio, los cuales se identificaron en conjunto con representantes de diversas entidades públicas con experiencia en Eco-DRR. En este capítulo se desarrollan y priorizan 11 de los 32 retos reconocidos. Adicionalmente se mencionan 5 retos más que se esperan desarrollar en publicaciones futuras. Buscamos que el capítulo motive al lector, no sólo a conocer más sobre las Eco-DRR, sino a identificar otros retos a superar para su incorporación al ordenamiento territorial en Colombia.

2. RETOS

Reto 1. Aumentar el conocimiento sobre los servicios ecosistémicos para la reducción del riesgo de desastres, visibilizando que las propuestas EcoDRR van más allá de acciones de restauración ambiental

Desde la primera Evaluación de los Ecosistemas del Milenio [7], los servicios ecosistémicos se resaltan como un elemento clave en el entendimiento de la interacción entre humanos y naturaleza. Sin embargo, el conocimiento en Colombia y en toda la región sobre los servicios ecosistémicos, especialmente de aquellos relacionados con la reducción del riesgo es limitado y afectado por condicionantes de desarrollo socioeconómico como la regulación normativa, económica y capacidades de investigación. Además, estos servicios se ven afectados por la degradación ambiental y la reducción de la capacidad adaptativa de las sociedades para hacer frente al riesgo de desastres y al cambio climático [9].

Por otra parte, acorde con nuestra experiencia, muchos tomadores de decisiones suelen confundir las acciones de Eco-DRR con acciones enfocadas en restauración ambiental, limitando el potencial de las Eco-DRR. También los ajustados recursos financieros y técnicos limitan la generación de conocimiento sobre servicios ecosistémicos en los municipios, los cuales a su vez presentan fuertes diferencias de desarrollo. Por esto se origina el reto de generar conocimiento sobre la multifuncionalidad de los ecosistemas más allá de la dimensión paisajística [18], para incorporarlo con una mejora en la calidad ambiental, la salud y bienestar humano, y la capacidad de regeneración ecosistémica [19].

Este conocimiento requiere estudios detallados y multidisciplinarios que empleen profesionales especializados en diferentes ecosistemas y temáticas desde las sociales, hasta las ambientales (ver Caja 6).

Desde el Panel intergubernamental de biodiversidad y servicios ecosistémicos (IPBES, por su nombre en inglés), se sugiere modificar el esquema de organización de los servicios ecosistémicos a la Contribución de la Naturaleza a las Personas [20], los cuales reagrupan los bienes y servicios desde una visión local que resalta las condiciones territoriales de las relaciones hombre-naturaleza, incluyendo la idea de contribuciones negativas.

Otra opción para aumentar el conocimiento es involucrar a la comunidad en la generación y monitoreo de información (i.e. ciencia ciudadana) lo que ofrece una oportunidad para resolver los vacíos de datos y ayudar a tomadores de decisiones a dimensionar la amplia gama de incertidumbres socio-ecológicas [1,21]. Sin embargo, lograr cambios en las políticas y prácticas que aseguren los servicios de los ecosistemas se obstaculiza por la complejidad de éstos y su gestión. La producción participativa y el intercambio de conocimientos ofrecen una forma de navegar esta complejidad [21].

Existen varias herramientas y metodologías disponibles para mostrar las utilidades de los ecosistemas, tales como la valoración integral de la biodiversidad y los servicios ecosistémicos [22]. Debido al reconocimiento de las ventajas de las SbN, especialmente de las acciones Eco-DRR, entidades nacionales como MinAmbiente y donantes como el Banco Mundial y el BID, realizan convocatorias para financiar proyectos integrales (ver Reto 11).

Tomar mejores decisiones requiere evidencia sólida que muestre cómo la incorporación de la comprensión del capital natural conduce a resultados que mejoren el bienestar humano a corto y largo plazo (ver Reto 5) [23]. Por esto se propone crear bases de datos públicas con información de casos exitosos que resalten las ventajas de las alternativas SbN, con su buen balance costo-beneficio, empleando estrategias de comunicación efectiva para permear a los tomadores de decisiones y a la comunidad en general. Por ejemplo, el Proyecto IGNITION [24] presenta de manera visualmente atractiva y clara los valores cuantitativos de los beneficios de las SbN.

Existen ejemplos que ilustran cómo los aspectos físicos de los ecosistemas actúan como una barrera que absorbe la fuerza del impacto y retarda el flujo de grandes olas de tormenta y tsunamis [25], o que sirven para mitigar el riesgo de movimientos en masa [26]. Así mismo, se han hecho esfuerzos internacionales para recopilar medidas Eco-DRR basadas en la comunidad en países como Brasil, Guatemala, México, Holanda, Indonesia, Nigeria y Estados Unidos [9] y en otros países de Europa [27], mostrando que la adaptación y la reducción de riesgos se pueden lograr de manera rentable mientras se proporcionan importantes beneficios colaterales.

Reto 2. Generar indicadores para medir los avances y aportes de las medidas Eco-DRR incluyendo análisis costo-beneficio, especialmente en el sector público

Para aumentar proyectos con enfoque Eco-DRR y demás SbN se requiere mostrar sus ventajas integrales implementando indicadores de amplio espectro que integren atributos cualitativos, cuantitativos y monetarios. Sin embargo, medir los costos y beneficios de las Eco-DRR tiene alguna dificultad por la incertidumbre de los impactos climáticos futuros y sus efectos sobre los bienes y servicios de los ecosistemas, así como por el desarrollo socioeconómico que generen.

La academia y entidades internacionales han avanzado en propuestas de metodologías e indicadores para medir los avances y aportes de las medidas Eco-DRR y de otras SbN (Caja 2). Se destaca el estándar

global de la Unión Internacional de Conservación de la Naturaleza para SbN que presenta indicadores y criterios para clasificar un proyecto con enfoque SbN [1], los indicadores para AbE [29], y el sistema de contabilidad ambiental-económica de las Naciones Unidas (SEEA, <https://seea.un.org>) que es una herramienta de gestión de datos para guiar la integración de datos económicos, ambientales y sociales. Otras propuestas para medir los aportes de las SbN para la adaptación al cambio climático del sector público y privado incluyen la de la Convención Marco sobre el Cambio Climático [29], así como la propuesta de GIZ, EURAC & UNU-EHS [30] quienes sugieren implementar métodos de monitoreo y evaluación que muestren explícitamente la probabilidad de fenómenos climáticos amenazantes y su incertidumbre asociada, para lo cual crearon una guía para planificadores. Estos procesos de monitoreo y evaluación pueden verse beneficiados desde la visión participativa, donde las comunidades apoyan la escogencia y generación de indicadores. En Colombia se destaca el trabajo de Figueroa-Arango [18] donde compilan propuestas de evaluación y monitoreo de las SbN para sectores urbanos.

Caja 2. Indicadores de biodiversidad y servicios ecosistémicos

En un esfuerzo por mejorar el conocimiento mundial de la biodiversidad se han creado estrategias como:

Asociación de Indicadores de Biodiversidad (BIP): iniciativa global para promover el desarrollo y divulgación de indicadores de biodiversidad (<https://www.bipindicators.net/>).

Convenio sobre la Diversidad Biológica (CBD): compila indicadores de consulta libre (<https://www.cbd.int/indicators/>).

Guía de la UNEP-WCMC de 2014 con directrices para apoyar el desarrollo de indicadores de los servicios de los ecosistemas a nivel nacional y regional (<https://bit.ly/3fDxSzY>).

GIZ ValuES: guía realizada entre GIZ, UNEP-WCMC y FEBA en el año 2020 que brinda orientación para buscar información que respalde la integración de los servicios de los ecosistemas en las políticas y la gestión pública (<http://www.aboutvalues.net/>).

Cada proyecto de Eco-DRR y demás SbN debe incluir un análisis costo-beneficio de las medidas ecosistémicas, preferiblemente comparativo, donde se muestren los beneficios directos e indirectos de utilizarlas y los costos de no utilizarlas. Existen buenos ejemplos como el de Baig et al. [31], quienes comparan los costos entre SbN y soluciones tradicionales en Filipinas, mostrando como la protección del manglar tiene un balance positivo con el doble de beneficio que la construcción de un dique o un rompeolas. Otro ejemplo se desarrolló en el área urbana de Lami, Fiji [32], con un análisis comparativo de costo-beneficio entre medidas de soluciones ecosistémicas, mostró que el costo de las medidas SbN fue drásticamente menor que las de ingeniería tradicional, con beneficios equivalentes cuando se plantaron manglares y replantar amortiguadores naturales de quebradas con medidas de ingeniería tradicionales como la construcción de malecones y aumentar el sistema de alcantarillado [12].

Reto 3. Transformar el ordenamiento territorial hacia una visión integral e incluyente

El ordenamiento territorial es la asignación planificada y regulada de determinados usos del suelo, ya sea urbano, rural o área natural, considerando el uso actual y futuro del suelo, así como el interés colectivo para asignar sus diferentes usos [33]. En Colombia la definición del ordenamiento territorial se consigna en el Artículo 2 de la Ley 1454 de 2011 (**Caja 3**). Dentro del ordenamiento se destacan los Determinantes Ambientales, los cuales son normas de superior jerarquía que buscan garantizar la inclusión de los aspectos ambientales y la reglamentación de uso y ocupación del territorio dentro los instrumentos de Ordenamiento Municipal. Los Determinantes Ambientales incluyen, entre otros, las normas “relacionadas con la conservación y protección del medio ambiente, los recursos naturales, la prevención de amenazas y riesgos naturales”, Artículo 10 de la Ley 388 de 1997.

Caja 3. Definición del ordenamiento territorial. Definición acorde con el artículo 2 de la Ley 1454 de 2011.

El ordenamiento territorial es “un instrumento de planificación y de gestión de las entidades territoriales y un proceso de construcción colectiva de país, que se da de manera progresiva, gradual y flexible, con responsabilidad fiscal, tendiente a lograr una adecuada organización político administrativa del Estado en el territorio, para facilitar el desarrollo institucional, el fortalecimiento de la identidad cultural y el desarrollo territorial, entendido este como desarrollo económicamente competitivo, socialmente justo, ambientalmente y fiscalmente sostenible, regionalmente armónico, culturalmente pertinente, atendiendo a la diversidad cultural y físico-geográfica de Colombia.”

Los conceptos de territorio y riesgo tienen una connotación social y presentan un carácter complejo en constante evolución por acción antrópica. Más aún, en Colombia, para organizar el territorio se debe reconocer el problema base de que muchos territorios del país se ocuparon bajo lógicas distintas a la del ordenamiento territorial. En parte porque se hicieron antes de la ley, o simplemente porque responden a una falta de presencia y control del Estado.

Desafortunadamente, la existencia de la ley no garantiza el ordenamiento del territorio, ya que más del 50% del crecimiento de ciudades y municipios del país es informal [34]. Esto genera condiciones de desarrollo incompleto e inadecuado, con territorios habitados usualmente por población en situación de pobreza, vulnerabilidad, e informalidad [35]. Este desarrollo informal puede generar el asentamiento en zonas con condiciones de amenaza o riesgos, incluyendo el riesgo no mitigable. Por otra parte, una evaluación de 103 Planes de Ordenamiento territorial (POT) mostró que sólo el 3% de los municipios incorporaba algún plan concreto para atender el área rural [36], señalando la exclusión de las zonas rurales en los POT por vacíos jurídicos de normatividad, por conflictos del uso del suelo, por inseguridad en la propiedad rural, o por una visión limitada del campo.

Además de cumplir con los determinantes ambientales, los nuevos planes de ordenamiento deben garantizar la participación real y efectiva de todos los actores en su diseño e implementación, ya que son estas quienes conocen su potencial y funcionamiento para atender las necesidades en el

territorio (ver Reto 9). Para esto se debe partir de reconocer la pluralidad de los territorios, buscando que los pobladores, independientemente de su identificación, incrementen su sentido de apropiación y pertenencia hacia los espacios socio-naturales, adaptando sus formas de actuar y necesidades específicas [37]. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que al año 2020 más del 90% de los municipios colombianos eran de categoría 5 y 6, según la Ley 126 de 1994. Esto implica ausencia de recursos económicos suficientes para elaborar sus POT, lo cual se ve reflejado en el hecho que a 2020 más del 88% de los municipios tenían los POT desactualizados, en gran parte por la falta de estudios básicos de riesgo [38]. Por lo anterior, el Departamento Nacional de Planeación (DNP) contrató expertos para la elaboración de diagnósticos y formulaciones de POT como estrategia de apoyo, pero a pesar de tener varios productos, no se han avanzado en la aprobación de los instrumentos de ordenamiento [39].

Reto 4. Cambiar el paradigma que la única opción es la obtención de resultados a corto plazo, aceptando que la eficacia de las Eco-DRR no es inmediata

Por presiones políticas y sociales, los alcaldes y gobernadores priorizan las obras de mitigación del riesgo a corto plazo (menos de 4 años) que tengan alta visibilidad y que presenten resultados de mitigación inmediatos. De ahí que muchos gobernantes y tomadores de decisiones desestiman las SbN, y en particular las Eco-DRR porque sus beneficios tienden a no ser inmediatos, aun cuando sean más integrales que las medidas tradicionales.

Las medidas de mitigación tradicional tienen el potencial de generar beneficios inmediatos. Sin embargo, estas medidas en algunos casos no funcionan en el país por fallas en los términos de referencia, diseños, materiales deficientes, o atrasos en las obras que generan sobrecostos. Incluso, estas medidas pueden aumentar los riesgos que se pretendieron mitigar. Algunas de las causas de esto se asocian con deficiencias durante la negociación y mediación con la comunidad, con inconvenientes judiciales en la adquisición de predios, con problemas en la negociación entre entidades, o con problemas internos en las empresas contratistas [40], aspectos y dificultades no necesariamente inherentes al tipo de acciones de mitigación, sino a la estructura organizativa y de gobernanza de las instituciones contratantes y empresas ejecutoras. También se asocia con deficiencias en la planeación de las obras, diferencias entre el ciclo de vida de los proyectos y los ciclos políticos y, finalmente a la corrupción [41]. Uno de los tantos ejemplos de lo anterior es el dique de contención del río Putumayo entregado en 2014, que quedó inservible tras su entrega, por lo cual la Contraloría determinó un presunto detrimento patrimonial por más de 5,700 millones de pesos [42].

La eficacia de las obras con enfoque ecosistémico o infraestructura verde tiene diferente temporalidad de acuerdo al estado mismo del ecosistema, bien sea inmediato si todos los componentes y funciones ecológicas están presentes, o de más tiempo si la integridad está severamente alterada. Se requiere tiempo para que los elementos naturales se desarrollen y puedan aportar los beneficios derivados. Para ello, se empieza trabajando con los remanentes de sistemas naturales para potenciar y facilitar su funcionamiento, pero conscientes de la temporalidad de sus beneficios, a la par de realizar intervenciones integrales en su recuperación para que a largo plazo se auto regulen y se mantengan funcionales [13].

Una alternativa es integrar pequeñas y medianas SbN, incluyendo algunas Eco-DRR, en sistemas de infraestructura tradicionales, tales como presas, carreteras o sistemas de energía, a menudo denominados infraestructura verde-gris o soluciones híbridas. Esto puede hacer que estas estructuras sean más resistentes y menos costosas, de beneficios más rápido y bajo mantenimiento [43]. Adicionalmente, estos beneficios se extienden más allá de la vida útil de la infraestructura, al aportar a mejorar los medios de vida locales.

Reto 5. Fomentar la toma de decisiones basadas en evidencia

Otra barrera para los proyectos Eco-DRR es la estructura vertical de toma de decisiones donde no siempre priman los argumentos técnicos y ambientales. Lo anterior sucede a pesar que el país posee una alta capacidad técnica en temas de ingeniería y ambiente (77 grupos en ingeniería ambiental reconocidos en MinCiencias, 66 en gestión ambiental, 2 en estructuras verdes, y 27 en ecología). Sin embargo, los procesos denominados como Eco-DRR y demás acciones de SbN muchas veces no se soportan en evidencia científica, sino que emplean la información económica y de ingeniería civil existente [44]. Hay incluso una gran carencia de información básica sobre los riesgos presentes en cada municipio (ver Reto 3). La ausencia de evidencia de soporte representa una dificultad para que lo técnico permee lo político, y para que la participación ciudadana se refleje y se atienda [45].

En Colombia hay experiencias locales basadas en evidencia científica y participación ciudadana en línea con las Eco-DRR y demás SbN que requieren visibilizarse y tener un seguimiento nacional [18]. También existen casos en donde a falta de seguir una evidencia específica, las obras pueden no brindar soluciones y llevar a detrimentos patrimoniales, sociales y ambientales.

Un caso donde la información técnica no determinó por completo un proceso de ingeniería gris, lo constituye la vía sustitutiva de San Vicente a Bucaramanga. Desde mediados de los noventa se señalaron dificultades por la condición geomorfológica de las fallas de San Vicente y aledañas, así como por la conformación específica de las rocas [46]. Al realizarse el llenado de Hidrosogamoso, se alertaba sobre la posible sobre-hidratación de los planos rocosos con deslizamiento de las formaciones geológicas, aunado a su alto grado de sismicidad, lo que inevitablemente generaría malformaciones y deslizamientos en la vía. Acompañado a esto, la falta de integración de procesos ecosistémicos como reforestación en los taludes implementados, hacía previsible los movimientos en masa.

A menor escala, observamos la situación en la Sabana de Bogotá, la cual presenta crecientes súbitas del río Bogotá, especialmente durante los eventos climáticos de La Niña. A pesar de tener amplia información sobre el rol de los humedales como amortiguadores [47], se continuó con la transformación de estos ecosistemas, recurriendo a obras de infraestructura gris, sin contemplar el impacto, la durabilidad y costos de mantenimiento [48].

Reto 6. Reducir el desarrollo de asentamientos urbanos altamente vulnerables en zonas con mayor amenaza

Las ciudades son territorios especialmente vulnerables a la triple crisis planetaria por el cambio climático, la pérdida de biodiversidad, y el aumento de contaminación y residuos [49]. Las amenazas asociadas a fenómenos naturales en las ciudades son potencialmente las mismas. Lo que las diferencia es la alta vulnerabilidad de algunos de los habitantes de la infraestructura expuesta [44]. En parte esto es consecuencia de una alta densidad poblacional de las ciudades que tiende a marginalizar la presencia de grupos poblacionales menos privilegiados que se ubican en zonas con mayor amenaza originando altos niveles de riesgo. En 2017, el DANE en su análisis sobre crecimiento urbano en Colombia, resaltó que entre 1997–2017 la población en las cabeceras municipales aumentó en 37.2%. De acuerdo con Minvivienda [35], más del 50% del crecimiento de las ciudades y municipios del país es de origen informal con alta vulnerabilidad.

No podemos evitar que las ciudades sigan creciendo. La diferencia está en cómo lo van a hacer. Es necesario asumir un enfoque preventivo basado en el conocimiento de los riesgos, trabajando con la naturaleza y no en contra de ella [49]. Para esto debemos incluir los ecosistemas dentro de la planificación

territorial de las ciudades. Por ello los planes de ordenamiento de nueva generación deben priorizar la creación de zonas verdes en espacio público, la restauración de drenajes urbanos, y el revestimiento de calles y techos con árboles para controlar las islas de calor y proteger contra las inundaciones y deslizamientos; también reducir los materiales impermeables en suelos. Sin embargo, realizar cualquier tipo de ordenamiento territorial en zonas de origen informal presenta dificultades adicionales asociadas a la complejidad social de estas zonas, su alta densidad poblacional y ausencia de zonas para generar espacio público.

Dos ejemplos de SbN realizadas en zonas de alto riesgo incluyen la recuperación del Cerro de Moravia en Medellín. Este “cerro” se constituyó antrópicamente por la acumulación de residuos y fue habitado progresivamente por población desplazada. El proceso incluyó el reasentamiento de la población en riesgo y trabajos de recuperación ambiental para reducir el riesgo asociado a los gases y lixiviados [50]. Otro es el trabajo de recuperación de laderas con alta amenaza por deslizamiento en algunas favelas de Río de Janeiro [51]. Si bien ambos ejemplos fueron exitosos, faltó el apoyo constante de los actores locales y una gobernanza inclusiva lo que ha reducido su eficacia.

Reto 7. Incluir proyectos Eco-DRR dentro de los pliegos para contratación estatal y garantizar su continuidad aún en cambios de gobierno

El desconocimiento sobre Eco-DRR en algunas instituciones públicas hace que no se incluyan como una opción dentro de los pliegos de contratación. Esto se debe en parte a que los funcionarios y gestores que trabajan en las administraciones municipales no tienen claridad de la relación costo-beneficio positiva en función del tiempo de estas opciones. Según nuestra experiencia, en muchos casos donde los funcionarios de instituciones públicas sí conocen las opciones Eco-DRR, buscan incluirlos como alternativas de reducción del riesgo, pero encuentran como obstáculo los tiempos de planificación de corto plazo.

Se deben realizar capacitaciones regulares sobre Eco-DRR y SbN a funcionarios y contratistas de entidades públicas como alcaldías, CARs, institutos del SINA, UNGRD, entre otros, para que las conozcan, valoren e incluyan en licitaciones y propuestas de gestión de riesgos de desastres o de ordenamiento territorial. Adicionalmente, los pliegos de contratación deben incluir acciones de mantenimiento frecuente y constante para asegurar que los ecosistemas se desarrollen asegurando su eficacia, ya que sin esto se podría caer en detrimento patrimonial con una visión a largo plazo. Esta visión cortoplacista se asocia en gran medida al principio de anualidad del presupuesto público que dificulta la continuidad de las contrataciones. Principio establecido en el Estatuto Orgánico del Presupuesto (Decreto 111 de 1996, artículo 14). La anualidad presupuestal, establece determina el año fiscal entre 1 de enero y 31 de diciembre de cada año, por lo que después del 31 de diciembre no se pueden asumir compromisos con cargo a las apropiaciones del año fiscal que se cierra.

El Artículo 23 del Estatuto Orgánico del Presupuesto establece que se podrá “autorizar la asunción de obligaciones que afecten presupuestos de vigencias futuras” (**Caja 4**). Según Rodríguez-Tobo [51], las vigencias futuras son una herramienta financiera que permite a entidades públicas adquirir compromisos con cargo al presupuesto de vigencias fiscales de los años subsiguientes. Es decir, permite apropiar recursos para financiar un gasto en vigencias posteriores a la vigencia en la que se asume el compromiso, siempre y cuando su ejecución se inicie con el presupuesto de la vigencia en que se aprueben dichas autorizaciones. Estas vigencias futuras sólo podrán aprobarse para proyectos de inversión que existan en el Plan de Desarrollo Territorial y no superen el cupo de endeudamiento.

Caja 4. Anualidad de presupuestos y vigencias futuras

- Las vigencias futuras facilitan la contratación y hace eficiente la gestión pública, especialmente para proyectos de operación de mediano y largo plazo.
- Existe poco uso de las vigencias futuras ya que algunas entidades públicas creen perder poder al autorizarlas porque determinan la capacidad de endeudamiento de los municipios [52].
- Tradicionalmente el uso de vigencias futuras ha ocurrido en grandes proyectos de infraestructura, y usualmente no se aprueban para proyectos con enfoque ambiental o social. Se requiere que los tomadores de decisiones entiendan los beneficios de las Eco-DRR y SbN y destinen vigencias futuras para estas.

La necesidad de aplicar estrategias administrativas que aseguren la continuidad de proyectos de Eco-DRR y demás SbN se reconoce por las entidades nacionales e internacionales encargadas de estos temas. Por esto existen sistemas para monitorear el financiamiento y asegurar continuidad. Por ejemplo, con el Sistema MRV de Financiamiento Climático se monitorean (M), reportan (R) y verifican (V) los recursos destinados a financiar acciones de mitigación y adaptación al cambio climático, creada como compromiso de Colombia ante la CMNUCC. El sistema es una herramienta del Comité de Gestión Financiera (CGF) del Sistema Nacional de Cambio Climático (SISCLIMA), cuyo objetivo es generar recomendaciones de políticas para asegurar una provisión sostenible y escalable de financiamiento climático, para aumentar la eficacia del financiamiento climático a través de una herramienta de información de tres componentes. Primero, mejorar la comprensión de los flujos de financiamiento dirigidos a la mitigación y adaptación del cambio climático provenientes de fuentes públicas, privadas, nacionales e internacionales. Segundo, ayudar a gestionar las finanzas climáticas, y tercero, ayudar a identificar brechas de inversión para abordar el problema del cambio climático [53].

Los SUDS (Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible) son elementos que buscan reducir el caudal producido por la lluvia y disminuir los contaminantes arrastrados por la escorrentía por lo que constituyen un buen ejemplo de infraestructura verde o híbrida correspondiente a un Eco-DRR. Una iniciativa de reglamentar un tipo de Eco-DRR en las contrataciones públicas se ha dado desde hace años en Bogotá con los SUDS, mediante el Decreto 597 de 2018 cuyo aporte es el artículo 153 en la Resolución Nacional 330 de 2017 de la RAS (Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico). Lo anterior se logró gracias a un proceso de cooperación gobierno-academia con productos no sólo normativos, sino también guías técnicas de alta calidad [54].

Un caso exitoso con un enfoque integral de riesgos extensible a Eco-DRR es el programa de “Guardianes de la Ladera” en Manizales [55]. Este programa vincula y capacita entre 80 a 100 madres cabeza de familia que realizan el mantenimiento básico de obras de infraestructura para mitigación de riesgos, capacitan sus comunidades en gestión de riesgos, y se encargan de censar las viviendas ubicadas en zonas de alto riesgo. Este programa se ha enfrentado con dificultades para asegurar su continuidad. Inicialmente fue ejecutado por Corpocaldas (CDC), quien obtenía los recursos mediante el cobro de la sobretasa ambiental, y actualmente se financia con recursos propios de la Alcaldía de Manizales [56]. Pero recientemente por primera vez desde su inicio hace 18 años, el programa se detuvo por problemas administrativos entre las entidades. Tras la presión ejercida por la comunidad consciente de los grandes aportes de este programa a la reducción de riesgos en Manizales se logró reiniciar [56].

Reto 8. Evitar otorgar licencias a proyectos que deterioren los ecosistemas mejor conservados

En las licencias ambientales es importante realizar evaluaciones de impacto ambiental que consideren tanto las acciones a compensar, como los costos económicos y ambientales esperados de la afectación de bienes y servicios, partiendo de análisis independientes y con verificación objetiva. La Autoridad Nacional de Licencias (ANLA) es el actor clave para controlar y vigilar la toma de decisiones. Idealmente la ANLA debe velar por el cumplimiento del manejo del ambiente en línea con el bienestar humano a corto, mediano y largo plazo, manteniendo las dinámicas ecológicas que proveen soluciones para mitigar o evitar el riesgo a futuro.

Ejemplos de la relevancia de incorporar la visión ecosistémica en las licencias ambientales son la avenida torrencial de Mocoa-Putumayo en 2017, y los efectos de la erosión costera. En el caso de Mocoa, un bosque maduro y en buen estado de conservación cuya comunidad cercana evitó que se talara, tuvo la capacidad de retener y regular parte de la avalancha e inundación, salvaguardando algunos barrios de la ciudad [57], mientras que aquellos puntos de mayor impacto coinciden donde el bosque se taló para construir infraestructura [58]. Por otro lado, se observa una constante construcción en la línea de costa Caribe con avales institucionales que no consideran la creciente erosión costera y aumentan la vulnerabilidad de las personas [59] a pesar que está documentado el proceso de erosión costera de tiempo atrás y se cuenta con un plan de investigación a cargo de INVEMAR [60].

Es rescatable la iniciativa del ANLA “Eureka” (<https://www.anla.gov.co/eureka/>), que recopila en una plataforma documentos jurídicos y técnicos. Sin embargo, esta iniciativa requiere incluir información sobre especies y ecosistemas en riesgo. En estos ejemplos, la información técnica y local integrada puede ofrecer SbN que aportaran al bienestar humano y conservación. En el marco de este reto, es necesario la inclusión y análisis de fuentes y variables confiables, inclusión que no se logra a partir de estructuras verticales en la toma de decisiones, sino de procesos participativos y en red [61].

Reto 9. Generar procesos de gobernanza inclusivos, participativos, transparentes y empoderadores que aseguren el éxito de las Eco-DRR

Entendemos la gobernanza como el conjunto de interacciones entre estructuras, procesos, tradiciones y reglas que determinan cómo se ejerce el poder y las responsabilidades, cómo se toman las decisiones y cómo intervienen los ciudadanos u otros actores. Los procesos de gobernanza participativos son esenciales en los procesos de Eco-DRR porque aumentan las posibilidades de sostenibilidad de una intervención, y mejoran la licencia social para operar [1]. La gobernanza participativa incluye a ciudadanos, organizaciones de la sociedad civil, academia, sector privado y demás actores de la gestión del riesgo de desastres y cambio climático. Colombia tiene un marco legal extenso que promueve la participación ciudadana, consignado desde la Constitución Política de 1991. A pesar de estas oportunidades, las experiencias de planeación participativa han tenido un enfoque centralizado en expertos y técnicos institucionales que definen los planes y proyectos, para posteriormente abrirlos a procesos de consulta y opinión ciudadana, previo a la adopción de los planes o ejecución de proyectos [62].

También la gobernanza participativa se enfrenta a la apatía de participar en los procesos de planeación y toma de decisiones. Reflejo de esto es el alto nivel de abstencionismo en las votaciones que promedia un 65%, aunque la participación es algo mayor cuando involucra decisiones de temas ambientales [63]. En los temas ambientales también se asocia a la falta de garantías de participación, lo cual se evidencia en el hecho que Colombia es el país con mayor cantidad de líderes ambientales asesinados en los últimos años.

Un aspecto clave para la gobernanza participativa es reconocer las condiciones socio-económicas, productividad, orden público, estructuras sociales y formas de organización ciudadana de cada comunidad o territorio, para que la población se vea debidamente reflejada en los planes y proyectos a implementar [64]. A nivel general, la gobernanza integral se logra con procesos accesibles, pertinentes, sostenibles, con igualdad de género, y equidad social [65]. Para generar procesos de gobernanza, no solo participativos, sino inclusivos, transparentes y empoderadores, el Estado en sus diferentes niveles territoriales, la academia y las ONGs han generado instrumentos y propuestas para fomentar y fortalecer la participación ciudadana (**Caja 5**).

Caja 5. Instrumentos y propuestas para fomentar y fortalecer la participación ciudadana.

Existen instrumentos contruidos desde el gobierno, ONGs y academia [62,63,64,66], de los cuales se resaltan las siguientes propuestas para fomentar y fortalecer la participación ciudadana:

- Definir y priorizar temas de interés o problemas que tendrán participación de los ciudadanos.
- Definir los objetivos del proceso participativo.
- Realizar ejercicios de monitoreo y evaluación institucional y social.
- Comunicar constantemente el proceso participativo y registrar y divulgar los casos exitosos y buenas prácticas.
- Conformar una organización interna para facilitar la participación y elaborar un mapa de actores (no incluir únicamente a líderes comunitarios, e incluir ONGs, academia, sector privado, y población en general – participación más difícil de lograr).

Un ejemplo de buenas prácticas de participación y relacionamiento es la “Construcción participativa del Pilar Indígena Visión Amazonia (PIVA)” [66] donde se establece la participación directa de los pueblos indígenas en la definición e implementación de la estrategia para la deforestación cero, aspecto clave en la reducción de la erosión, inundación y movimientos en masa. Este proceso implica la realización de talleres con grupos indígenas y talleres técnicos de retroalimentación desarrollados con recursos de cooperación internacional. Como resultado de este proceso, las comunidades indígenas de la Amazonia presentaron propuestas de proyectos, algunas elegidas para ejecutarse con participación de los pueblos indígenas. Estos procesos no requieren coordinarse siempre desde el Estado. Figueroa-Arango [18] describe cómo la comunidad de Gran Chicó en Bogotá, a través de procesos de ciencia ciudadana liderado por el Grupo Ecomunitario ha visibilizado la biodiversidad local y propone mejores prácticas de manejo para las áreas verdes.

Finalmente, es necesario aceptar que la gobernanza participativa no siempre genera la selección de opción más coherente con los componentes ecosistémicos debido a la incidencia de los factores sociales locales. Por ejemplo, en Stanford (EE.UU), zona afectada por inundaciones recurrentes, el gobierno contrató a una firma para que identificara alternativas para mitigar las inundaciones, incluyendo opciones verdes, híbridas y completamente duras o grises. La propuesta técnica más adecuada a nivel de costo-beneficio era una propuesta híbrida de mediano costo, pero la comunidad eligió la más costosa, dado que valoró más mantener la visibilidad hacia un lago cercano, a pesar de incorporar un mayor componente gris [9].

Reto 10. Promover la innovación en EcoDRR, incluyendo la implementación de soluciones híbridas

Existe una necesidad de una mayor aplicación de la ciencia, la tecnología y la innovación (CTeI) para generar mejores y nuevos métodos de reducción de riesgos [68]. Estos nuevos enfoques incluyen la implementación de soluciones híbridas entre naturales y grises (Fig. 2). Particularmente en contextos urbanos, el enfoque híbrido combina las ventajas y desventajas de mezclar estructuras naturales y artificiales [69], siendo necesaria la vinculación de grupos interdisciplinarios los cuales tienen en muchos casos mejores oportunidades de obtener financiación como recomiendan recientemente las Convocatorias de Asignación Ambiental, las convocatorias de CTeI del Sistema General de Regalías, así como las de innovación a través de Innova Colombia (ver Reto 11 y Caja S1 en Material Suplementario).

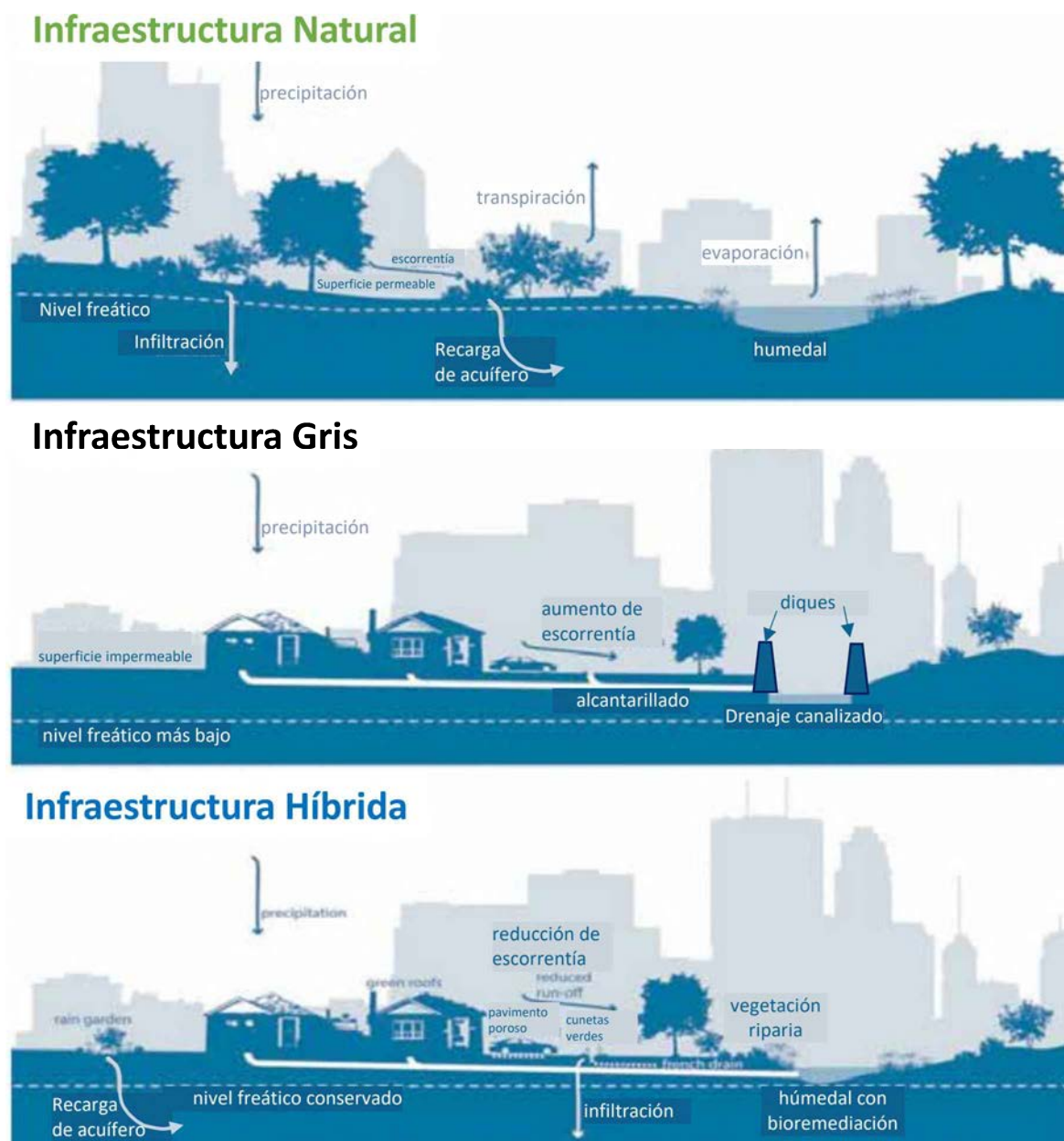


Figura 2. Comparativo de las infraestructuras naturales, grises e híbridas. Ilustra cómo al combinar la infraestructura natural y gris en una híbrida se obtienen múltiples beneficios (adaptado de [69]).

El avance en el conocimiento y las aplicaciones de SbN depende de las capacidades y limitaciones de los equipos de investigación e innovación, en las demandas de la industria y el Estado, y en las restricciones presupuestales de las instituciones, incorporando la opción de soluciones híbridas en las licitaciones públicas y privadas de las instituciones que las emplean. Un ejemplo de una solución híbrida son los sistemas urbanos de drenaje sostenible [70]. Estos sistemas tienen alta viabilidad en contextos urbanos, alta confiabilidad, durabilidad media-alta, relación costo beneficio media-alta, conservación de la biodiversidad media, entre otros beneficios.

En Colombia existen crecientes capacidades físicas, humanas y financieras para innovar tales como los laboratorios de investigación e innovación, y los parques de innovación. Sin embargo, la innovación en SbN debe ser formal o explícita en las estructuras organizacionales para emplear estos ecosistemas de innovación e integrar infraestructura, personas y entrenamiento. Además, los equipos de innovación necesitan habilidades y capacidades para incorporar SbN en proyectos de soluciones híbridas para infraestructura [71]. Las innovaciones no son solo productos de alta tecnología, sino que puede ser innovación social que incorpore enfoques, ideas tradicionales y conocimientos que ofrecen opciones sin grandes presupuestos o tecnología avanzada [72]. Cada región debe identificar las SbN más adecuadas en las cuales aplicar procesos de CTeI acorde a sus amenazas, condiciones geográficas, recursos financieros, recursos humanos, y disponibilidad de tecnología.

Reto 11. Fomentar la financiación de los proyectos EcoDRR

Generar y promover acceso a financiación para proyectos en Eco-DRR incluyendo fondos públicos, privados, y de cooperación internacional es un componente clave. Sin embargo, las restricciones de financiación para los municipios son evidentes porque la gran mayoría (88%) de los municipios son de categoría 6 (según la Ley 126 de 1994). Esto implica que dichos municipios tienen menos de 10,000 habitantes e Ingresos Corrientes de Libre Destinación (ICLD) menores a 15 salarios mínimos mensuales.

Los proyectos de Eco-DRR y demás SbN se enmarcan en la financiación destinada principalmente a la adaptación y mitigación al cambio climático, a la reducción del riesgo de desastres, a la conservación y uso sostenible de la biodiversidad, a la planificación y ordenamiento territorial, a la gestión integral del recurso hídrico, a la ciencia, tecnología e innovación, y a la apropiación social del conocimiento. Además de consultar al Sistema MRV de Financiamiento Climático del DNP, los municipios y organizaciones pueden emplear el proceso de gestión de proyectos existente en la Estrategia Nacional de Financiamiento Climático (ENFC) [53], que identifica rutas adecuadas de financiación pública, privada, nacional e internacional.

La ENFC ha compilado una amplia lista de agencias financiadoras que apoyan proyectos Eco-DRR (Caja S1). Sin embargo, el cuello de botella podría no ser la falta de oportunidades de financiación, sino la falta de capacidad de navegar a través de los complejos sistemas para estructurar proyectos que demuestren impactos y cumplan los requisitos de los financiadores. Las agencias financiadoras están a la espera de proyectos técnicamente sólidos, financieramente viables, novedosos y que se alineen con las agendas mundiales, de país, o de territorio. Además, las agencias solicitan requisitos que muchas veces sólo pueden cumplir entidades de alta complejidad y con un vasto capital de base dejando por fuera a numerosas ONGs y entidades gubernamentales como alcaldías de municipios de categorías 4 a 6.

Cumplir los requisitos de las agencias financiadoras y utilizar sus instrumentos de financiación puede implicar desde el generar proyectos piloto (e.g., con financiación de subvenciones o donaciones para CTeI), hasta estructurar proyectos escalables de alto potencial de transformación, y de alcance

nacional para competir por financiamiento de mayor tamaño (e.g. Fondo Verde para el Clima). Incluso en el corto plazo se espera que las SbN cumplan con estándares globales para que se les considere como una solución válida [1].

Las fuentes de financiación nacional para acciones en Eco-DRR son principalmente públicas. Recientemente se ha incrementado la financiación disponible a través del Sistema General de Regalías, opción viable para generar proyectos de CTeI que resuelven demandas territoriales específicas en los departamentos, así como proyectos de inversión alineados con el Plan Nacional de Desarrollo (Caja S1).

Por otra parte, el acceso a financiación internacional (Caja S1) es un proceso que requiere canales formales –incluso diplomáticos, y personas con formación especializada como gestores de proyectos internacionales bilingües para interactuar con los donantes [73]. Existe consenso en que la información sobre las fuentes de financiamiento climático está dispersa, cómo también en que debe reducirse el tiempo para rastrear, preparar y postular los proyectos [74]. Además, respecto a los avances de la COP26, es fundamental, no solo aumentar las fuentes de financiación, sino simplificar los procesos de postulación a los recursos para que los recursos económicos sean más accesibles para entidades, grupos sociales y comunitarios [75].

Para que los proyectos de SbN en general, y en particular las Eco-DRR, logren una inversión a mayor escala, deben considerarse como una estrategia nacional de desarrollo sostenible. Considerando que las SbN pueden proteger la infraestructura de los impactos climáticos, y mejorar el rendimiento de la infraestructura; por ejemplo, mejorando la calidad del agua potable y reduciendo la presión sobre las instalaciones de tratamiento de agua, una estrategia que puede atraer inversiones de financiación privada e internacional es incluir las SbN como un componente dentro de los grandes proyectos de infraestructura [43].

El Banco Interamericano de Desarrollo y el Instituto de Recursos Mundiales (WRI), a través de la Iniciativa Cities4Forests, desarrollaron una serie de informes sobre las oportunidades que ofrecen las SbN para América Latina y el Caribe. Dichas entidades identificaron tres prioridades para la región que deben abordarse para reducir la brecha de inversión: i) aumentar el compromiso de los inversores para impulsar la innovación financiera para SbN; ii) supervisión y evaluación sólidas para inspirar la confianza de los inversores en las SbN y iii) incorporar consideraciones de capital natural en la planificación de infraestructura [43]. El Banco Mundial promueve la integración de la infraestructura verde y gris para fomentar la economía, las comunidades y el ambiente. Entre 2012 y 2017, el banco financió 81 proyectos de este tipo. Esto también se ejemplifica en los recientes llamados de iniciativas como lo es “CityAdapt”, una plataforma explícitamente para la integración de ciudades en el marco de las SbN que integra múltiples disciplinas (<https://cityadapt.com/metodologia/>). Figueroa-Arango [18] sintetiza las herramientas y opciones para potenciar las SBN en los mecanismos territoriales y financieros.

El BID está tomando medidas para continuar invirtiendo en SbN. Recientemente lideró el desarrollo de una declaración conjunta entre 10 bancos multilaterales de desarrollo (BMD) que describe compromisos para incorporar aún más a la naturaleza en sus políticas, inversiones y operaciones. Durante COP26, los BMD anunciaron su compromiso de aumentar las inversiones “positivas en naturaleza”, para detener y revertir la pérdida de la naturaleza mediante el enriquecimiento de la biodiversidad y la captura de carbono [10].

Caja 6. Otros retos a considerar

Estos retos se asocian con la incorporación de las SbN y la reducción del riesgo de desastres con enfoque ecosistémico en la planificación territorial de Colombia. Aunque no se desarrollan aquí por extenso, creemos importante mencionarlos.

Impulsar la multidisciplinariedad y multisectorialidad en las EcoDRR. Las EcoDRR integran en múltiples vías a diferentes sectores y actores [76]. Esta articulación es cada vez más evidente en procesos de prospectiva, como en los ODS, donde la articulación se fomenta a través del proceso de planificación e inversión para la integración territorial a partir de participación público-privada.

Reducir la inequidad para facilitar el reordenamiento con enfoque de EcoDRR. Las SbN pueden generar inequidad ya que el beneficio de unos impacta a quienes deben reubicarse para desarrollar espacios verdes, fenómeno conocido como gentrificación verde [77].

Integrar los discursos y la normatividad ambiental de Colombia. Una década atrás se hablaba por separado de conservación de la biodiversidad, de planificación del territorio, de reducción del riesgo de desastres y de cambio climático [73]. Integrar estos discursos es una necesidad para generar soluciones conjuntas y holísticas, como las propuestas en las SbN. Para esto, la próxima generación de instrumentos de planificación y la normativa debe ser integrada desde su concepción [78].

Incorporar el capital humano local en la elaboración y ejecución de instrumentos de planificación. Por sus altos costos el Estado ayuda a los municipios a financiar los estudios asociados a los POT. Estos estudios deben involucrar profesionales o técnicos locales que conocen la realidad socio-ambiental del territorio. Debe mejorarse la capacidad técnica de los profesionales para favorecer la participación en la elaboración de los POT y asegurar que sus aportes se incorporen para que el instrumento sea cercano a la realidad [39]. Propuestas como un “Geólogo por Municipio” de la Sociedad Colombiana de Geología y la Asociación Colombiana de Geólogos y Geofísicos del Petróleo aportan a resolver este reto.

Conectar los ámbitos urbano y rural a través de proyectos de Eco-DRR y de ordenamiento territorial con visión regional. La mayor parte de las ciudades obtienen sus servicios ecosistémicos de aprovisionamiento de las zonas rurales (e.g., agua y alimentos) [79]. A pesar de esta dependencia, las medidas de gestión de riesgo tienden a enfocarse en entornos urbanos y no en los rurales lo que dificulta la aplicación de SbN. El ordenamiento territorial requiere de una visión más regional (e.g., escala de cuenca, bioma o deltas) y no por cada municipio, con análisis espaciales de las relaciones territoriales entre las zonas urbanas y rurales. Si bien el POMCA se aproxima a este regional, la integración con los municipios es difícil por la falta de integración en los instrumentos espacio-temporales.

CONCLUSIONES

La academia, el Estado y los organismos de cooperación internacional han realizado aportes que resaltan la importancia y múltiples beneficios de las ECO-DRR y demás tipos de SbN. En Colombia, los limitantes para este enfoque se centran en aspectos administrativos, culturales y de formación de los funcionarios, desde los técnicos que elaboran los pliegos contractuales, hasta quienes toman las decisiones de enfoque institucional. Aunado a esto, la mayoría de los municipios carecen de capacidades institucionales para incorporar de manera integral y prospectiva la gestión de riesgos de desastres y del cambio climático. Si bien no hay soluciones perfectas, las SbN son una alternativa multipropósito, con soporte académico, técnico y conceptual sólido.

Es importante reconocer que las presiones sobre los ecosistemas son múltiples y van en aumento, lo que inevitablemente afecta el bienestar humano. De ahí que en el marco de los procesos de gobernanza participativa se debe potenciar la planeación integral, donde se reduzcan las relaciones de verticalidad institucional y financiera, limitada a periodos de gobierno cortoplacistas, desconociendo la temporalidad necesaria para generar proyectos efectivos para la reducción de desastres en donde el trabajo con la naturaleza es una opción costo eficiente a largo plazo.

Si bien son múltiples los retos para incorporar las Eco-DRR y demás SbN en el ordenamiento territorial de Colombia, hay múltiples ejemplos que ilustran que es posible superar exitosamente cada obstáculo que se presente. Los retos acá expuestos no son los únicos que enfrentan las administraciones públicas y demás actores, quedan muchos retos por describir y resolver.

A pesar de que las SbN requieren muchas veces un tiempo mayor para mostrar sus resultados respecto a las soluciones grises clásicas, se hipotetiza que son sostenibles a largo plazo y proporcionan beneficios ecosistémicos (agua, turismo, soberanía alimentaria, salud, aire limpio) a las comunidades directamente involucradas. Se requiere por lo tanto trabajar en el cambio de paradigma y dejar de ver las soluciones basadas en proyectos puramente estructurales (la visión de corto plazo con resultados inmediatos) para comenzar a integrar las SbN, incluyendo las Eco-DRR, como una alternativa real, económicamente rentable y sostenible.

PUNTOS CLAVE

1. Proteger a los ecosistemas no beneficia "únicamente a la naturaleza sin seres humanos". Existe un impacto positivo directo sobre las sociedades al mejorar su calidad de vida.
2. Los planificadores desconocen los servicios ecosistémicos como alternativa para la reducción del riesgo.
3. Hay una ausencia de indicadores para medir los aportes de las medidas Eco-DRR, especialmente en el sector público. Se requiere demostrar sus ventajas integrales con indicadores de amplio espectro que integren atributos cualitativos, cuantitativos y monetarios que incorporen la relación costos-beneficios.
4. El ordenamiento territorial debe realizarse con los actores locales, reconociendo las características, dinámicas, recursos económicos y técnicos de cada territorio.

5. En Colombia se priorizan las obras de mitigación del riesgo tradicionales porque pueden ejecutarse a corto plazo. Sin embargo, las medidas de SbN y Eco-DRR tienen mayores beneficios y menores costos, aunque requieren tiempos de ejecución mayores.
6. La estructura vertical de toma de decisiones es una barrera para los proyectos Eco-DRR y SbN.
7. Debido a la complejidad territorial de los asentamientos de origen informal, las SbN planteadas allí deben integrarse al territorio físico, social, ojalá con una participación comunitaria mayor que en los asentamientos formales.
8. Los procesos de gobernanza participativos, inclusivos, transparentes y empoderadores son esenciales en los procesos de Eco-DRR porque aumentan las posibilidades de sostenibilidad de una intervención, y mejoran la licencia social para operar.
9. Es urgente una mayor aplicación de la ciencia, la tecnología y la innovación para generar mejores y nuevos métodos más allá de los enfoques tradicionales de reducción de riesgos, incluyendo la implementación de soluciones híbridas. Esto debe incluirse en los procesos de licencias ambientales.
10. Para que los proyectos SbN logren inversiones y proyectos de mayor escala, debe considerarse que la mayoría de los municipios de Colombia tienen escasos recursos propios y carecen de capacidades para navegar a través de los complejos sistemas de financiación.
11. Las EcoDRR deben ser multidisciplinarias, interdisciplinarias, transdisciplinarias y multisectoriales para generar beneficios integrales.
12. La normativa de ordenamiento territorial, de gestión de riesgos de desastres y de gestión ambiental, es extensa y desintegrada, lo que dificulta la implementación de medidas como Eco-DRR y SbN.

RECOMENDACIONES PARA TOMAR DECISIONES

1. Se propone como estrategia la comunicación de experiencias exitosas con las cuales se permee a los tomadores de decisiones y comunidad en general.
2. Los proyectos de SbN, incluidos los de EcoDRR, deberán cumplir con estándares globales para que se les considere como una solución válida y deben adaptarse a cada realidad local-territorial (no copiando la misma SbN una y otra vez).
3. Una opción para fomentar el desarrollo de acciones Eco-DRR y demás SbN es plantearlos como acciones adicionales en proyectos de infraestructura tradicionales.
4. Las SbN deben verse de manera integral en el proceso de desarrollo y conservación de los sistemas sociales y naturales en todas las escalas desde el ciudadano hasta los gobernantes.
5. La capacitación constante, directa y clara es vital para los funcionarios públicos, que generen memoria institucional en las entidades para la incorporación de aprendizajes.

IDENTIFICACIÓN DE AUTORES

Carolina García Londoño	https://orcid.org/0000-0001-6488-5969
María Ángela Echeverry-Galvis	https://orcid.org/0000-0002-5273-8694
Lina Ospina Ostios	https://orcid.org/0000-0002-9587-9921
Constanza Ricaurte-Villota	https://orcid.org/0000-0003-1554-4994
Mauricio Romero-Torres	https://orcid.org/0000-0003-3282-0372

MATERIAL SUPLEMENTARIO

<https://doi.org/10.5281/zenodo.5889520>

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores no declaran conflicto de intereses

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a todas las personas que contribuyeron a la generación de este capítulo. Mauricio Romero-Torres agradece al FNGRD PPAL001-637-2021. María Ángela Echeverry-Galvis agradece a Karen Sudmeier UN Eco-DRR.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA CRediT

Conceptualización: CG, MR-T, LOO. Curación de datos: MAEG. Metodología: CG. Escritura, revisión y edición: CG, MR-T, LOO, MAEG, CR-V. Figuras, y tablas: CG, MR-T. Administración de proyecto: CG, MR-T. Búsqueda de evidencia: CG, MR-T, LOO, MAEG, CR-V.

BIBLIOGRAFÍA

1. UICN (2020). *Estándar Global de la UICN para soluciones basadas en la naturaleza. Un marco sencillo para la verificación, el diseño y la extensión de Sbn*. Primera edición. Gland, Suiza: UICN. <https://doi.org/10.2305/IUCN.CH.2020.08.es>
2. MacKinnon K, Sobrevila C, Hickey V et al. (2008) Biodiversity, climate change and adaptation: nature-based solutions from the World Bank portfolio. World Bank, Washington, DC. <https://openknowledge.worldbank.org/bitstream/handle/10986/6216/467260WP0REPLA1sity1Sept020081final.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
3. IUCN. (2009). No time to lose—Make full use of nature-based solutions in the post-2012 climate change regime. In *Position Paper on the Fifteenth Session of the Conference of the Parties to the United Nations Framework Convention on Climate Change (COP 15)* (pp. 1-5). Gland, Switzerland: International Union for Conservation of Nature.
4. Kabisch, N., Korn, H., Stadler, J. & Bonn, A. (Eds.) (2017). *Nature based Solutions to Climate Change Adaptation in Urban Areas, Theory and Practice of Urban Sustainability Transitions*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-56091-5>
5. CBD (2009). *Connecting Biodiversity and Climate Change Mitigation and Adaptation: Report of the Second Ad Hoc Technical Expert Group on Biodiversity and Climate Change*. Technical Series No. 41, Montreal: Secretariat of the Convention on Biological Diversity. <https://www.cbd.int/doc/publications/cbd-ts-41-en.pdf>
6. Estrella, M. & Saalismaa, N. (2013). Ecosystem-based disaster risk reduction (Eco-DRR): an overview. En F.G. Renaud, K. Sudmeier-Rieux & M. Estrella (Eds), *The role of ecosystems in disaster risk reduction*. Tokyo: United Nations University Press.
7. MEA (Millennium Ecosystem Assessment), 2005. *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*. Island Press, Washington, D.C.
8. Cohen-Shacham, E., Walters, G., Janzen, C. and Maginnis, S. (Eds.) (2016). Nature-based Solutions to address global societal challenges. Gland, Switzerland: IUCN. xiii + 97pp, <https://doi.org/10.2305/IUCN.CH.2016.13.en>
9. Nehren, U., Sudmeier-Rieux, K., Sandholz, S., Estrella, M., Lomarda, M. & T. Guillén. (Eds.) (2014). *The Ecosystem-Based Disaster Risk Reduction Case Study and Exercise Source Book*. Partnership for Environment and Disaster Risk Reduction and Center for Natural Resources and Development.
10. Griscom, B. et al. (2017) Natural climate solutions. *Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences*. Octubre 16, 2017: 114 (44) 11645-11650. <https://doi.org/10.1073/pnas.1710465114>
11. UNDRR (United Nations Office for Disaster Risk Reduction) (2021). *Words into action: Nature-based solutions for disaster risk reduction*. <https://bit.ly/352X7cU>
12. Sudmeier-Rieux, K., Nehren, U., Sandholz, S. & Doswald, N. (2019). *Disasters and Ecosystems: Resilience in a Changing Climate - Source Book*. Geneva: United Nations Environment Programme.
13. IPBES (2019). *Global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services*. E. S. Brondizio, J. Settele, S. Díaz, and H. T. Ngo (Eds.). IPBES secretariat, Bonn, Germany. 1148 pages. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3831673>
14. WWF. 2020. *Informe Planeta Vivo 2020: Revertir la curva de la pérdida de biodiversidad*. Resumen. Almond, R.E.A., Grooten M. & Petersen, T. (Eds.). WWF, Gland, Suiza. https://wwfar.awsassets.panda.org/downloads/informe_planeta_vivo_2020_resumen_ejecutivo.pdf

15. Tilman, D., Isbell, F., & Cowles, J. M. 2014. Biodiversity and Ecosystem Functioning. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 45(1), 471–493. <https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-120213-091917>
16. Etter, A., Andrade, A., Saavedra, K. & Cortés, J. (2018). Actualización de la Lista Roja de los Ecosistemas Terrestres de Colombia: Herramienta para la gestión de los ecosistemas. En L.A. Moreno, C. Rueda & G.I. Andrade (Eds.). *Biodiversidad 2017. Estado y tendencias de la biodiversidad continental de Colombia*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. Bogotá, D. C., Colombia. <https://doi.org/10.21068/B001.2015.206>
17. El Planeta Pide la Palabra. Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (2020, 9 de septiembre). *Soluciones basadas en la naturaleza para la reducción del riesgo de desastres* [Video]. YouTube. <https://youtu.be/IehWtv7m5rw>
18. Figueroa-Arango C. (2020). *Guía para la integración de las Soluciones Basadas en la Naturaleza en la planificación urbana. Primera aproximación para Colombia*. Berlín: Alexander von Humboldt Stiftung, Ecologic Institute, Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
19. Pandeya B., Buytaert W. & Potter C. (2021). Designing citizen science for water and ecosystem services management in data-poor regions: Challenges and opportunities. *Current Research in Environmental Sustainability*, 3, 100059, <https://doi.org/10.1016/j.crsust.2021.100059>
20. Diaz, Sandra & Pascual, Unai & Stenseke, Marie & Martín-López, Berta & Watson, Robert & Molnár, Zsolt & Hill, Rosemary & Chan, Kai & Baste, Ivar & Brauman, Kate & Polasky, Stephen & Church, Andrew & Lonsdale, Mark & Larigauderie, Anne & Leadley, Paul & van Oudenhoven, Alexander & Plaat, Felice & Schröter, Matthias & Lavorel, Sandra & Shirayama, Yoshihisa. (2018) Assessing nature's contributions to people: Recognizing culture, and diverse sources of knowledge, can improve assessments. *Science*, 359. 270-272. 10.1126/science.aap8826.
21. Reyers, B., Nel, J.L., O'Farrell, P.J., Sitas N., & Nel D.C. (2015). Navigating complexity through knowledge coproduction: Mainstreaming ecosystem services into disaster risk reduction. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(24): 7362–7368, <https://doi.org/10.1073/pnas.1414374112>
22. Rincón-Ruíz, A., Echeverry-Duque, M., Piñeros, A. M., Tapia, C. H., ... Zuluaga, P. A. (2014). Valoración integral de la biodiversidad y los servicios ecosistémicos: Aspectos conceptuales y metodológicos. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt (IAvH). Bogotá, D. C. Colombia, 151 pp, <https://doi.org/10.21068/B001.2014.311>
23. Guerry A.D., Polasky S., Lubchenco J., Chaplin-Kramer R., ... Vira B. (2015). Natural capital and ecosystem services informing decisions: From promise to practice. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(24): 7348–7355. <https://doi.org/10.1073/pnas.1503751112>
24. The IGNITION Project. (2020, 27 de agosto). *Nature-based solutions for the climate emergency: The benefits to business and society*. <https://bit.ly/3rIjMTo>
25. Forbes, K. & Broadhead, J. (2007). *The role of coastal forests in the mitigation of tsunami impacts*. FAO, Regional Office for Asia and the Pacific, Bangkok, 39p.
26. Rawat, A., Vasistha, H. B., Soni, P. (2012). Ecological Approach to Landslide Risk Remediation. En A.K. Gupta & S.S. Nair, *Ecosystem Approach to Disaster Risk Reduction* (pp. 96-101). National Institute of Disaster Management, New Delhi.
27. McVittie, A., Cole LJ., Wreford A., Sgobbi A. & Yordi, B. (2017). Ecosystem-based solutions for disaster risk reduction: lessons from European applications of ecosystem-based adaptation measures. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 32, 42–54. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2017.12.014>

28. Raza Rizvi, A., van Riel, K. & Zakowski, E. Ecosystem based adaptation monitoring & evaluation – indicators: A compilation and review of literature. IUCN EbA Knowledge Series–Working Paper. https://www.iucn.org/sites/dev/files/eba_me_indicators.pdf
29. CMCC (Convención Marco sobre el Cambio Climático). (2017). *Planificación, ejecución y evaluación de las medidas de adaptación que se ocupan de los ecosistemas y de esferas como los recursos hídricos - Informe de síntesis de la secretaría*. FCCC/SBSTA/2017/3
30. GIZ, Eurac Research & UNU-EHS (United Nations University – Institute for Environment and Human Security). (2020). *Adaptation – A guidebook for planners and practitioners*. Bonn: GIZ. 120 p.
31. Baig, S.P., Rizvi, A., Josella, M. & Palanca-Tan, R. (2015). *Cost and Benefits of Ecosystem Based Adaptation: The Case of the Philippines*. Gland, Switzerland: IUCN. viii + 32pp.
32. Rao, N.S., Carruthers, T.J.B., Anderson, P., Sivo, L., Saxby, T., Durbin, T., Jungblut, V., Hills, T. & Chape, S. (2013). *An economic analysis of ecosystem-based adaptation and engineering options for climate change adaptation in Lami Town, Republic of the Fiji Islands. A technical report by the Secretariat of the Pacific Regional Environment Programme*. – Apia, Samoa: SPREP 2013. <https://www.eldis.org/document/A64826>
33. Zucchetti, A., Ramos, V., Alegre, M., Aguilar, Z., Arroyo, R., & Tribut, E. (2008). *Guía metodológica para el ordenamiento territorial y la gestión de riesgos*. PNUD-UN-Habitat, Perú.
34. Ministerio de Vivienda y Desarrollo Sostenible. (2018, 12 de enero). *En los últimos 30 años ciudades y municipios de Colombia han crecido de manera informal*. <https://bit.ly/3ItoQll>
35. ISVIMED (Instituto Social de Vivienda y Hábitat de Medellín). (2011). *Plan estratégico habitacional de Medellín, PEHMED 2020*.
36. RIMISP (Centro Latinoamericano para el Desarrollo Rural). (2016, 30 de septiembre). *Un ordenamiento territorial incluyente con las zonas rurales en Colombia*. <https://bit.ly/3GPO11p>
37. CEPAL (Comisión Económica para América Latina y el Caribe). (2019). *Planificación para el desarrollo territorial sostenible en América Latina y el Caribe* (LC/CRP.17/3), Santiago.
38. IEU (Instituto de Estudios Urbanos, Universidad Nacional de Colombia). (2020, 6 de septiembre) *El 88% de los municipios de Colombia tienen el POT desactualizado: Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio*. Disponible en: <https://bit.ly/3FIFQCA>
39. Urbano Montilla, J.F., Trigueros Sabogal, D. & Grijalba Ibarra, V. (2019) *¿Por qué las obras en Colombia tardan más de lo que son planeadas?*, EIEI ACOFI, ago. 2019. <https://bit.ly/3IpOiZg>
40. Caicedo Ferrer, J.M. (2021, 17 de septiembre) *¿Obras inconclusas!* Cámara Colombiana de la Infraestructura. <https://infraestructura.org.co/obras-inconclusas>
41. Revista Semana. (2017, 15 de septiembre). *La obra de la UNGRD que costó 6.000 millones y no sirve para nada*. <https://bit.ly/3fRcFT6>
42. Ozment, S., Watson, G., Marsters L. & Oliver, E. (2021, 12 de octubre). *3 Ways to Scale Up Nature-Based Solutions in Latin America and the Caribbean*. Insights - World Resources Institute. <https://bit.ly/3rEvpeb>
43. CNRD-PEDRR. (2019). *Disasters, Environment and Risk Reduction – Eco-DRR Master’s Module, Instructor’s Manual*. Cologne and Geneva: Center for Natural Resources and Development, Partnership on Environment and Disaster Risk Reduction.
44. Iriin, R., & Stansbury, J. (2004). Citizen Participation in Decision Making: Is It Worth the Effort? *Public Administration Review*, 64, 55–65 <https://doi.org/10.1111/j.1540-6210.2004.00346.x>
45. Gómez, E. y Castillo, L. A. (2003). Actividad de la falla la saliana a partir de instrumentación sismológica. *Geofísica Colombiana*, 7, 5–12. <https://bit.ly/3qRsJe5>

46. Dobbs, C., Escobedo, F., Clerici, N., de la Barrera, F., ... Hernández, J., (2019). Urban ecosystem Services in Latin America: mismatch between global concepts and regional realities?. *Urban Ecosystems*, 22, 173–187. <http://doi.org/10.1007/s11252-018-0805-3>
47. Revista Semana (2011, abril 24). *Ruptura de jarillón inunda U. de la Sabana*. <https://bit.ly/3qRgQF8>
48. Andersen, I. (2021, junio 30). *Nature in our cities*. UNEP. <https://bit.ly/3GXUGqo>
49. Montoya Restrepo, J.I., Cuesta Gómez, O, Flecha Quintanilla, O., Viadé Andavert, D., Gallegos, A. & Morató Ferreras, J. (2011). Moravia como ejemplo de transformación de áreas urbanas degradadas: tecnologías apropiadas para la restauración integral de cuencas hidrográficas. *NOVA - Publicación científica en ciencias biomédicas*, 9(15), 41–52. <https://doi.org/10.22490/24629448.488>
50. Sandholz, S., Lange, W. & Nehren, U. (2018). Governing green change: Ecosystem-based measures for reducing landslide risk in Rio de Janeiro. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 32, 75-86. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2018.01.020>
51. Rodríguez Tobo, P.A. (2008). *Presupuesto Público: Programa Administración Pública Territorial*. Escuela Superior de Administración Pública – ESAP. 119 p. <https://bit.ly/3qPUfsw>
52. DNP (Departamento Nacional de Planeación). (2021, 15 de noviembre). *Estrategia Nacional de Financiamiento Climático*. <https://finanzasdelclima.dnp.gov.co>
53. CDC (Corporación para el Desarrollo de Caldas) (2006). *Guardianas de la Ladera: un programa de cultura ciudadana en la prevención del riesgo*. <https://bit.ly/3nJv4WE>
54. Universidad de los Andes & Alcaldía Mayor de Bogotá (2016). Investigación de las tipologías y/o tecnologías de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) que más se adapten a las condiciones de la ciudad de Bogotá D.C. Producto 3 – Guía técnica de diseño y construcción de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS). <https://ambientebogota.gov.co/sistemas-urbanos-de-drenaje-sostenible>
55. UGR (Unidad de Gestión del Riesgo). (2021, 9 de marzo). *Guardianas de la Ladera continúa labores de prevención en este 2021, el programa ya no se cobra a los manizaleños*. <https://bit.ly/33WWbX0>
56. La Patria (2020, 6 de diciembre). *La ciudad reclama las Guardianas de la Ladera para Manizales*. <https://bit.ly/3GW8dyv>
57. Méndez, C. (2017, 6 de abril). Chiparo, el árbol que salvó a un barrio de la tragedia en Mocoa. *Mongabay Latam*. <https://bit.ly/3AmwStE>
58. El Espectador (2017, 1 de abril). *Causas y recomendaciones tras la avalancha en Mocoa*. <https://bit.ly/3fOb4gU>
59. Ospina Zapata, G. (2021). Millonarios proyectos para frenar erosión costera incluyen a Urabá. *El Colombiano*. Abril 30 de 2021. <https://bit.ly/3nLGNUq>
60. Guzman, W., Posada, B., Guzman, G. y Morales, D. 2008. *Programa nacional de investigación para la prevención, mitigación y control de la erosión costera en Colombia - PNIEC: Plan de Acción 2009-2019*. INVEMAR 72p.
61. Baudoin, M.A., Henly-Shepard, S., Fernando, N., Sitat, A.i & Zommers, A. (2016). From Top-Down to “Community-Centric” Approaches to Early Warning Systems: Exploring Pathways to Improve Disaster Risk Reduction Through Community Participation. *International Journal of Disaster Risk Science*, 7, 163–174. <https://doi.org/10.1007/s13753-016-0085-6>
62. Departamento Administrativo de la Función Pública. (2018). *Orientaciones para promover la participación ciudadana en los procesos de diagnóstico y planeación de la gestión pública*. Bogotá. 89 p. <https://bit.ly/3Ilz7A6>

63. Lerma Carreño, C.A. (2017, 11 de julio) La participación: ¿Entre la apatía política y la conciencia ambiental y social?. *Revista Sur*. <https://bit.ly/3nOeUuT>
64. Suarez Rubio, J.R. (2021). *La participación ciudadana, en la formulación de planes de gestión del riesgo y desastres en Colombia*. Tesis de Maestría en Planeación para el desarrollo. Universidad Santo Tomás. <http://hdl.handle.net/11634/34009>
65. Milano, Flavia (2019). *Gobiernos y sociedad civil avanzando agendas climáticas*. I. Irazábal Briceño (Ed). Monografía del BID. 663 p.
66. Corporación PBA. (2014). *Gestión del riesgo con participación ciudadana*. Primera edición, Bogotá.
67. UNGRD (Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres). (2017). *Guía para la Participación Comunitaria en la gestión del riesgo de desastres*. 21 p. <http://hdl.handle.net/20.500.11762/20793>
68. Izumi, T., Shaw, R., Djalante, R., Ishiwatari, M., & Komino, T. (2019). Disaster risk reduction and innovations. *Progress in Disaster Science*, 2, 100033. <https://doi.org/10.1016/j.pdisas.2019.100033>
69. Depietri Y., McPhearson T. (2017) Integrating the Grey, Green, and Blue in Cities: Nature-Based Solutions for Climate Change Adaptation and Risk Reduction. En N. Kabisch, H. Korn, J. Stadler & A. Bonn (Eds) *Nature-Based Solutions to Climate Change Adaptation in Urban Areas. Theory and Practice of Urban Sustainability Transitions*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-56091-5_6
70. World Bank (2019, 21 de marzo). *Putting Nature to Work: Integrating Green and Gray Infrastructure for Water Security and Climate Resilience*. <https://bit.ly/3fLbeWn>
71. Watkins, G.G., Silva Zuniga, M.C., Rycerz, A., Dawkins, K. ... Amal-Lee, A. (2019) *Nature-based Solutions: Scaling Private Sector Uptake for Climate Resilient Infrastructure in Latin America and the Caribbean*. Inter-American Development Bank. <http://dx.doi.org/10.18235/0002049>
72. Romero-Torres, M.; Navas Calixto, A. & Mideros, M. (2021). ¿Dónde está el dinero? *Estrategias de búsqueda de financiación internacional para proyectos de investigación*. Red colombiana de gestores de investigación. Documento de trabajo No.1. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4711459>
73. Karremans, J., Brugger, S., Castillo, A., Argüello, C., & Dascal, G. (2017). *Financiamiento climático y NDCs en América Latina: guía para facilitar el acceso a fuentes internacionales*. Serie de Estudios Temáticos No 10. Programa EUROCLIMA. Dirección General de Desarrollo y Cooperación – EuropeAid, Comisión Europea. Bruselas, Bélgica. 174 p.
74. El Hilo (2021, noviembre). COP26: ¿Puede una cumbre ayudar a resolver la crisis climática?. <https://spoti.fi/3tLjpdT>
75. Ramírez-González, A. (2016). Inter y transdisciplinariedad en investigaciones ambientales. Una sinopsis. *Gestión y Ambiente*, 19(2), 318–331. <https://doi.org/10.15446/ga.v19n2.57291>
76. Público. (2016, julio 24). *Las ciudades más verdes se vuelven más injustas*. <https://bit.ly/35dPEIc>
77. Suárez, D.C. & Cardona, O.D. (2016). *Mejora y protección de ecosistemas para la gestión del riesgo de desastres y el fortalecimiento de la resiliencia de las comunidades: el caso de estudio de la región de La Mojana, Colombia*. INGENIAR CAD/CAE <https://bit.ly/3AjZh3m>
78. Echeverry-Galvis, M.A., Unda, M., Bravo, M.P., García, N., Rubiano-Pinzón, G., & Palomino, J.V. (2019). Plan de Acción en Biodiversidad de la PNGIBSE, Metas Aichi y los Objetivos de Desarrollo Sostenible en Colombia: análisis y concordancia en el discurso entre metas propuestas para 2020. *Gestión y Ambiente*, 22(2), 207-234. <https://doi.org/10.15446/ga.v22n2.82227>
79. Inostroza, L., Garay Sarasti, H. & Andrade Pérez, G. (2020). *Servicios ecosistémicos urbanos en Latinoamérica. Oportunidades para el desarrollo urbano sostenible, la acción climática y la gestión de la biodiversidad urbana*. CODS. No. 4. <https://bit.ly/33XhMhU>

CAPÍTULO
13

Biomineralización como herramienta en la recuperación de las propiedades de un suelo residual compactado sometido a quema

Yamile Valencia-González^{1*}, José Camapum de Carvalho² & Luis Augusto Lara-Valencia³

¹Doctora en Geotecnia, Profesora Asociada, Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, Colombia.

²Doctor en Geotecnia, Profesor Titular, Universidad de Brasilia, Brasil.

³Doctor en Estructuras, Profesor Asociado, Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, Colombia.

*Autor para correspondencia: Yamile Valencia- González, yvalenc0@unal.edu.co, Cra. 80 #65-223, Bloque M1. + (57) 60425 51 87.

Resumen

Los suelos de la región del trópico, al experimentar una variabilidad climática marcada, se exponen a periodos fuertes de sequía que los tornan altamente susceptibles a la ocurrencia de incendios forestales. Sumado a ello, las intervenciones antrópicas, ya sea por renovación de cultivos, quemas controladas, o incendios accidentales, los afecta fuertemente. Colombia no es ajena a dicha problemática, y una amplia porción del territorio presenta un grado importante de susceptibilidad a incendios forestales. Las variaciones extremas de temperatura ocasionan cambios en algunas de las propiedades geotécnicas, pero la gran mayoría de las investigaciones no centran sus esfuerzos en el estudio del efecto de dichos cambios en el comportamiento hidromecánico, y mucho menos en la aplicación de tratamientos regenerativos para la recuperación de estos suelos de una forma ambientalmente amigable. Es por ello que, en el actual capítulo, se propone una metodología que permita analizar y determinar en laboratorio, mediante la adición de un medio B4 a las bacterias nativas, el efecto de dicho tratamiento sobre las propiedades geotécnicas de un suelo compactado, sometido a la máxima temperatura que puede registrar un suelo en un incendio. La

mejoría en propiedades tales como la agregación, deformabilidad y estabilidad del suelo quemado se originaron como producto del efecto químico de la adición del medio y de la aparición de pequeños filamentos precipitados; contribuyendo así, a dar los primeros pasos hacia una posible técnica de remediación de zonas afectadas por quemas.

Palabras clave: biotecnología, suelos degradados, recuperación de suelos.

Biomining as an instrument for the recovery of properties of a compacted residual soil subjected to burning

Abstract

By experiencing significant climatic variability, tropical soils are exposed to severe drought periods, making them highly susceptible to the occurrence of forest fires. Besides, anthropic interventions, whether for crop renovation, controlled burnings, or accidental fires strongly affect them. Colombia is not exempt from this problem; most of the territory is vulnerable to forest fires. Extreme temperature variations produce changes in some of the geotechnical properties. However, most researchers do not focus on studying the effect of these hydromechanics behavior changes, and much less on applying regenerative treatments to recover these soils in an environmentally friendly way. It is for this reason that this work proposes a methodology that allows to analyze and determine in the laboratory, by adding a B4 medium to the native bacteria, the effect of the treatment over the geotechnical properties of a compacted soil subjected to temperatures that simulate the conditions of a fire. The improvement in properties like aggregation, deformability, and stability of the burned soils was due to the chemical effect of the medium addition and the formation of small precipitate filaments, thus contributing to propose a first remediation technique for areas affected by burns.

Keywords: Biotechnology, degraded soils, soil recovery.

1. INTRODUCCIÓN

En las regiones tropicales, los incendios forestales son un tema que gana relevancia debido a las fuertes temporadas cálidas que se han experimentado en los últimos años, que perjudican la diversidad y estabilidad de los ecosistemas forestales [1]. Colombia no es ajena a ello, pues las temporadas cálidas que se presentan de forma intensa a lo largo del año han aumentado la probabilidad de ocurrencia de este tipo de fenómenos, tanto que aproximadamente el 29% de las tierras del país son altamente susceptibles a incendios forestales [2]. Los suelos como componente fundamental de los ecosistemas

terrestres, al exponerse a altas temperaturas pueden llegar a sufrir variaciones importantes en sus propiedades químicas, mineralógicas y físicas, y finalmente afectar el comportamiento hidromecánico [3]. La gran mayoría de los estudios relacionados con el tema, abordan principalmente las alteraciones que presenta la cobertura vegetal, pero son escasas las investigaciones orientadas a analizar la influencia de los incendios forestales sobre las propiedades y comportamiento geotécnico de las capas de suelo, y en especial sobre la posibilidad de reducir los riesgos asociados a la degradación del material, a partir del uso de biotecnología como técnica de recuperación o estabilización de los materiales [4].

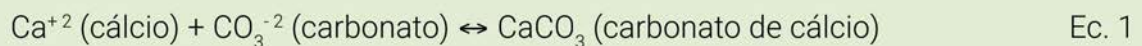
La biotecnología se torna entonces en una alternativa menos invasiva con el medio ambiente [5], y mucho más si se emplean las bacterias nativas del suelo [6] bajo la técnica de “biomineralización”, en la cual los microorganismos generan productos metabólicos que reaccionan con iones o compuestos del medio, propiciando la floculación y/o aglomeración de las partículas de suelo [7]. Dichas floculaciones y/o aglomeración podrían disminuir los efectos negativos causados por las quemadas en las propiedades físicas, químicas y estructurales de los suelos [8, 9].

El actual capítulo tiene como objetivo presentar una propuesta para restablecer la estabilidad de los agregados después de un incendio forestal, al aplicar un medio que induce en las bacterias nativas del suelo la precipitación de carbonato de calcio. Si bien, esta técnica se ha empleado comúnmente en la restauración de monumentos [10], su uso es incipiente en la regeneración de suelos afectados por altas temperaturas.

Caja 1. Biom mineralización

La biom mineralización es un proceso común en la naturaleza, mediante el cual los organismos vivos forman precipitados minerales cristalinos o amorfos. Dicho proceso ocurre por reacciones químicas entre iones específicos o compuestos como resultado de las actividades metabólicas de un organismo en ciertas condiciones ambientales.

La carbonatogénesis es un ejemplo de biom mineralización en el cual se produce la precipitación de carbonatos como se presenta en la ecuación 1:



2. MÉTODOS

Para el caso de estudio, la extracción del material se efectuó en la ciudad de Medellín-Antioquia (Colombia), en el Cerro el Volador con coordenadas 6°16'6.62" N y 75°34' 51.19" O, con 1,598 m de elevación, a una profundidad de 0.5 m de la superficie de un talud. La geología de la zona se compone de rocas metamórficas, tipo anfíbolitas de la margen occidental del río Medellín, las cuales se constituyen esencialmente por hornblenda y plagioclasa [11]. Se tomaron aproximadamente 10 kg de suelo alterado y se distribuyeron en igual proporción en dos bolsas plásticas, las cuales se sellaron bien para posteriormente determinar en laboratorio el contenido de humedad de las muestras [12] y realizar pruebas de compactación Proctor estándar [13]. Éstos ensayos se ejecutaron tres veces para garantizar la repetibilidad de los mismos.

Las pruebas de Proctor estándar arrojaron como resultado una densidad seca máxima aproximada de 13 kN/m^3 y una humedad óptima del 33 %. La idea de trabajar con muestras compactadas, se basa en lograr una disminución del efecto por variación en la estructura, que se puede presentar en el suelo en su condición natural de un punto para otro. De esta forma, los cuerpos de prueba se compactaron en un cilindro con el martillo de Proctor estándar, agregando la cantidad de suelo necesaria para conseguir especímenes con 5 cm de diámetro y 2 cm de altura, a la densidad seca máxima de 13 kN/m^3 , bajo la humedad óptima de 33%.

A continuación, las muestras se llevaron al horno a una temperatura equivalente a la máxima experimentada por un suelo ubicado debajo de un incendio forestal de plantas bajas, según experimentos de simulación de incendios en campo realizados por Ortega [14]. En dicha investigación, el suelo de un talud se sometió en superficie a un incendio controlado, con toma de temperatura desde 0.2 m a 1.2 m por debajo de la capa vegetal, registrando valores máximos de temperatura de 60°C . Las muestras se dejaron en el horno a esta temperatura por 3 h (asumiendo este tiempo como el tiempo de duración de un incendio). Según Madigan et al. [15] las bacterias pueden presentar crecimiento microbiano hasta los 95°C ; por consiguiente, a 60°C no se tiene muerte total o muerte excesiva en la población bacteriana encargada del proceso de biotratamiento en el suelo [16].

Posteriormente, la mitad de las muestras llevadas al horno, se sometieron a tratamiento por goteo con un medio denominado B4 (**Fig. 1**). Según investigaciones previas realizadas en suelos de origen tropical, el medio B4 mejora algunas propiedades y comportamiento geotécnico de los materiales [6,17,18].



Figura 1. Proceso de adición del medio B4 en la mitad de las muestras de suelo llevadas al horno.

El medio B4 contiene una dosificación de 15 g de Acetato de Calcio, 4 g de extracto de levadura, 5 g de glucosa por 1 l de agua destilada, manteniendo la solución con un pH cercano a 8, valor apropiado para la actividad microbiana. Este medio debe dejarse actuar por 15 días en el suelo, tiempo en el que se presenta la máxima precipitación microbiana según Lee [10]. Adicionalmente, para cada cuerpo de prueba se llenó el 80% de los vacíos sin agua (Va) con el B4. Lo anterior permitió una adecuada absorción del medio, sin generar deformación de las muestras, y sin exponer a condiciones anaeróbicas las bacterias aeróbicas presentes en el suelo.

Todos los cuerpos de prueba llevados al horno, tanto aquellos sin adición del medio B4, como aquellos con su incorporación, se envolvieron en papel vinipel transparente y se colocaron dentro de una nevera de icopor para evitar pérdidas o ganancias de humedad.

En el suelo denominado “quemado” que corresponde a aquel expuesto únicamente a quema en el horno, y en el denominado “quemado-tratado” como el expuesto a quema en el horno y posterior tratamiento con el medio B4, se realizaron ensayos de caracterización física, química y mecánica. Para ello, se determinaron el contenido de humedad [12], la gravedad específica de los sólidos [19], los límites de Atterberg [20], la granulometría por láser (apoyados en [21] sin el uso de defloculante (SD), con defloculante (CD), sin ultrason (SU) y con ultrason (CU)), la clasificación según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (S.U.C.S.) [22], y la clasificación Miniatura Compactada Tropical-Expedita (MCT) [23]. De igual forma, se obtuvieron el pH en H₂O y KCl [24], y la mineralogía por difracción de rayos X (DRX). Adicionalmente, se tomaron imágenes con lupa electrónica de luz natural y se ejecutaron ensayos de corte directo consolidado drenado [25], *pinhole test* [26], desagregación (basados en *Crumb test*, [27]) y consolidación duplo-edométrica [28]. Cada experimento se replicó mínimo tres veces tanto para las muestras quemadas, como para muestras quemadas-tratadas, para un total de 102 ensayos, permitiendo una adecuada evaluación de las propiedades y comportamiento geotécnico de los materiales.

3. DISCUSIÓN

A continuación, se presentan los resultados y análisis referentes a las caracterizaciones físicas, mineralógicas, químicas y mecánicas de las muestras quemadas y quemadas-tratadas, haciendo en algunos casos, una comparación con el suelo en estado natural (suelo compactado sin ser sometido a quema y a tratamiento) [29]. Los resultados se estudian en conjunto para verificar si hubo cambios significativos en el comportamiento del material producto del tratamiento.

3.1 Caracterización física

En la **Tabla 1** se presentan los valores promedio de algunas propiedades físicas del suelo quemado y del suelo quemado-tratado, y se comparan con los resultados de Díaz et al. [29], donde el material estaba compactado en estado natural. Se aclara que el límite líquido y el límite plástico se relacionan con el comportamiento hidromecánico del suelo, en especial con la succión osmótica y las fuerzas de adsorción.

Se observa entonces que la plasticidad disminuye para el suelo quemado y quemado tratado, debido probablemente a intercambios catiónicos producto de la presencia de la Albita detectada en el DRX, afectando así la succión osmótica y las fuerzas de adsorción. El intercambio de sodio por el calcio hace que se genere una menor o mayor adsorción de agua por las partículas de suelo, afectando propiedades

como los límites de Atterberg al depender de la mineralogía [5, 30]. Santos [31] presenta ejemplos de reducción en la plasticidad, cuando el intercambio catiónico envuelve calcio. En el presente estudio, estas disminuciones provocan que la clasificación MCT pase en el estado natural de una arcilla laterítica (LG') para una arcilla no laterítica con la quema (NG') y para una arena no laterítica (NA') con el tratamiento.

Tales resultados indican desde el punto de vista mecánico, que la quema del suelo tiende a empeorarlo [3] y el tratamiento al propiciar su agregación como se analizará más adelante, transforma el material en textura arena, modificando su capacidad de drenaje. En el caso de los suelos lateríticos, estos presentan un mejor comportamiento mecánico que los suelos no lateríticos; por lo cual, los resultados de clasificación MCT contrastan con los resultados obtenidos para los límites de Atterberg, pues comúnmente el comportamiento mecánico tiende a mejorar con la disminución de la plasticidad del suelo. No obstante, si se considera el estado saturado del suelo, o sea sin la intervención de la succión matricial, es posible orientar el entendimiento en lo referente a la resistencia; donde, la resistencia a la compresión aumenta con el aumento del límite líquido, pues en el límite líquido el suelo presenta la misma resistencia cuando aumenta la humedad. Bajo esta misma perspectiva, y considerando que en el límite de plasticidad la resistencia a la tracción aumenta con el aumento de este parámetro, pues para la misma resistencia se tiene un suelo con mayor humedad, es posible concluir que los resultados obtenidos por las dos técnicas de valoración son convergentes.

Tabla 1. Resumen de algunas características físicas de los suelos trabajados.

Propiedad	Suelo en estado natural	Suelo quemado	Suelo quemado-tratado
Humedad inicial (%)	33 $w_{\text{óptima}}$	14 Después de la quema	26 Después del tratamiento
Índice de vacíos inicial (e)	1.15	1.11	1.13
Peso específico de los sólidos (Gs)	2.79	2.79	2.78
Saturación (%)	80	28	63
Límite líquido (%)	84	75	65
Índice de plasticidad (%)	28	26	22
Clasificación Unificada de los Suelos (S.U.S.C)	MH	MH	MH
Clasificación MCT	LG'	NG'	NA'

Con relación al índice de vacíos y la gravedad específica de los sólidos, los valores son similares entre sí, corroborando que no se dio precipitación de minerales de carbonato de calcio en los vacíos de la muestra. Si la precipitación ocurrió, esta se presentó a un nivel reducido, imperceptible inclusive en el ensayo DRX.

En la curva granulométrica (**Fig. 2**) para los suelos quemado y quemado-tratado, sin el uso de ultrason (SU) y/o sin el uso del defloculante (SD) se puede evaluar la estabilidad de las agregaciones en presencia de agua. Al utilizar el ultrason (CU) se válida la estabilidad de estas formaciones frente a una sollicitación mecánica, y cuando se usa defloculante (CD) se válida la estabilidad frente a un agente

químico (hexametáfosfato de sodio). El uso de ambos (CD-CU) muestra la respuesta ante los dos medios (mecánico y químico).

Adicionalmente, para los suelos sin uso de ultrason (SU) o defloculante (SD), el tratamiento aumentó el tamaño de los granos (agregaciones y/o floculaciones), el cual tendió a disminuir con la utilización, bien sea de ultrason (CU), de defloculante (CD) o de ambos (CD-CU), exhibiendo así la baja estabilidad de las formaciones generadas para el tiempo de cura considerado, como lo reportó Valencia en su investigación [6].

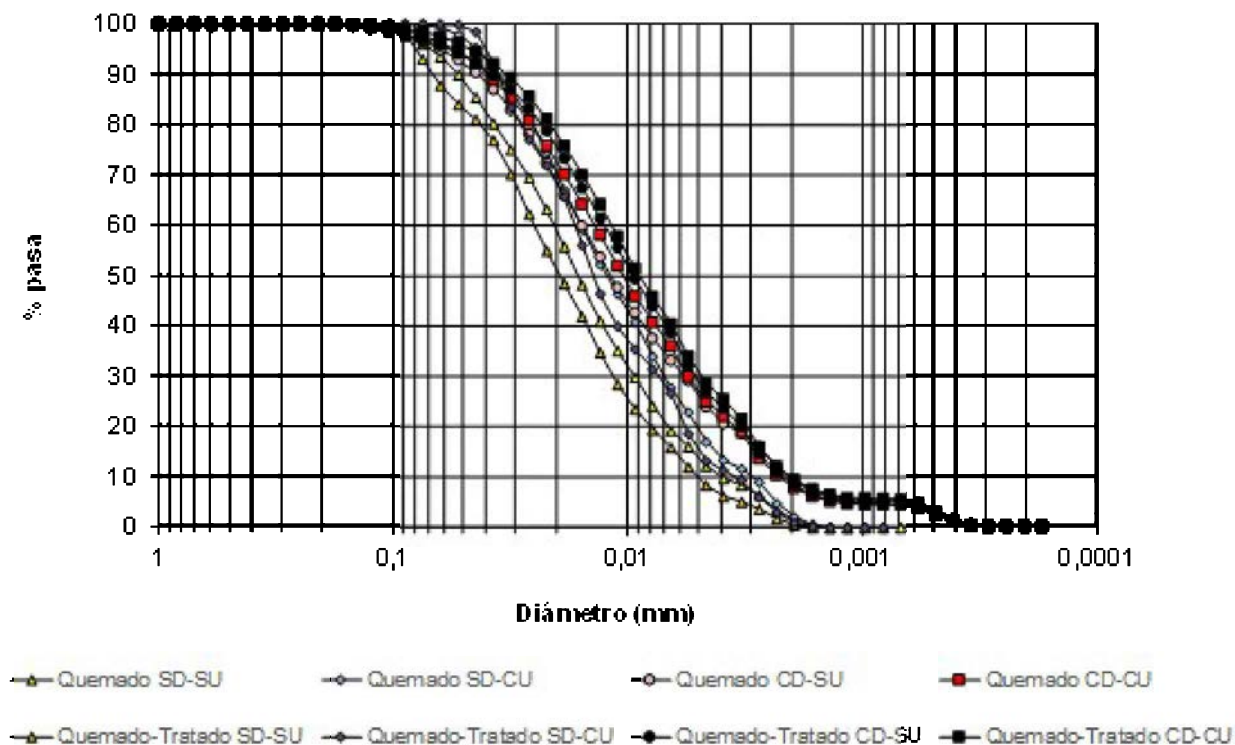


Figura 2. Curvas granulométricas por difracción láser para el suelo quemado y quemado-tratado, sin uso de defloculante (SD), con defloculante (CD), sin ultrason (SU) y con ultrason (CU).

La **Figura 3** presenta un comparativo entre las curvas granulométricas obtenidas sin el uso de ultrason (SU) y sin el uso de defloculante (SD) tanto para la muestra quemada y quemada-tratada, como para el suelo natural, datos que se tomaron de Muñoz para el mismo material sin quemarse y sin tratarse [32]. Se observa en la figura que la quema del suelo facilita su degradación como lo mostraron Alcañiz et al. [5] y Roseno y Camapum de Carvalho [9]. Ya el tratamiento biotecnológico favoreció su reagregación o el fortalecimiento de las agregaciones o floculaciones presentes [6].

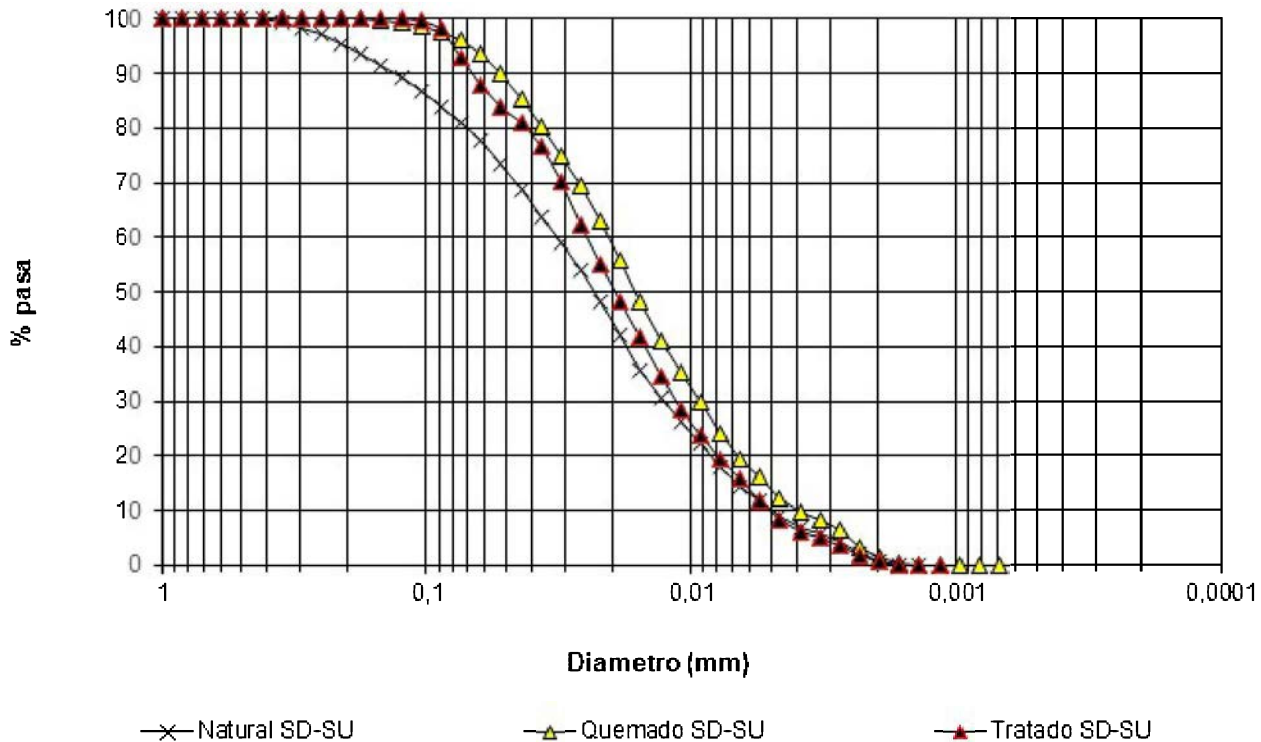


Figura 3. Curvas granulométricas del suelo natural, quemado y quemado-tratado sin uso de ultrason (SU) y sin defloculante (SD).

3.2 Análisis del pH y el punto de carga cero (PZC)

Según Camapum de Carvalho et al. [33], si bien existen diferentes definiciones para el punto de carga cero (PZC) que es la más común y adoptada por los autores, se indica que el PZC representa el pH del suelo en el cual la carga eléctrica líquida del conjunto de las partículas es nula (igualándose las cargas negativas y las positivas). Esta propiedad no solo influencia los fenómenos electroquímicos que ocurren en el suelo, sino también el grado de floculación de los mismos [34]. Como los valores del pH en agua están por encima de los valores de PZC, sin pasar por éste al tratar el material, en principio el suelo no sufre desagregación por efecto del tratamiento (**Tabla 2**). Cuando se alcanza el PZC de determinados compuestos, eventualmente presentes en el suelo, como los óxidos e hidróxidos de hierro y aluminio, los mismos pueden solubilizarse inestabilizando la estructura del suelo como un todo [34].

Tabla 2. pH en H₂O y en KCl y determinación del punto de carga cero (PZC) para las muestras analizadas.

	Suelo quemado	Suelo quemado-tratado
Medida de pH en KCl	4.03	4.33
Medida de pH en H ₂ O	4.63	4.82
PZC	3.43	3.84

3.3 Caracterización mineralógica

Con relación a la mineralogía a partir de la difracción de rayos X (DRX), se encontraron minerales de hematita, caolinita, cuarzo y albita en proporciones similares tanto para el suelo quemado, como para el suelo quemado-tratado (**Fig. 4**), indicando que no se presentaron precipitaciones de nuevos minerales por la acción del tratamiento, o que son trazos imperceptibles en el ensayo, y que por tanto las variaciones han sido más de carácter químico [6].

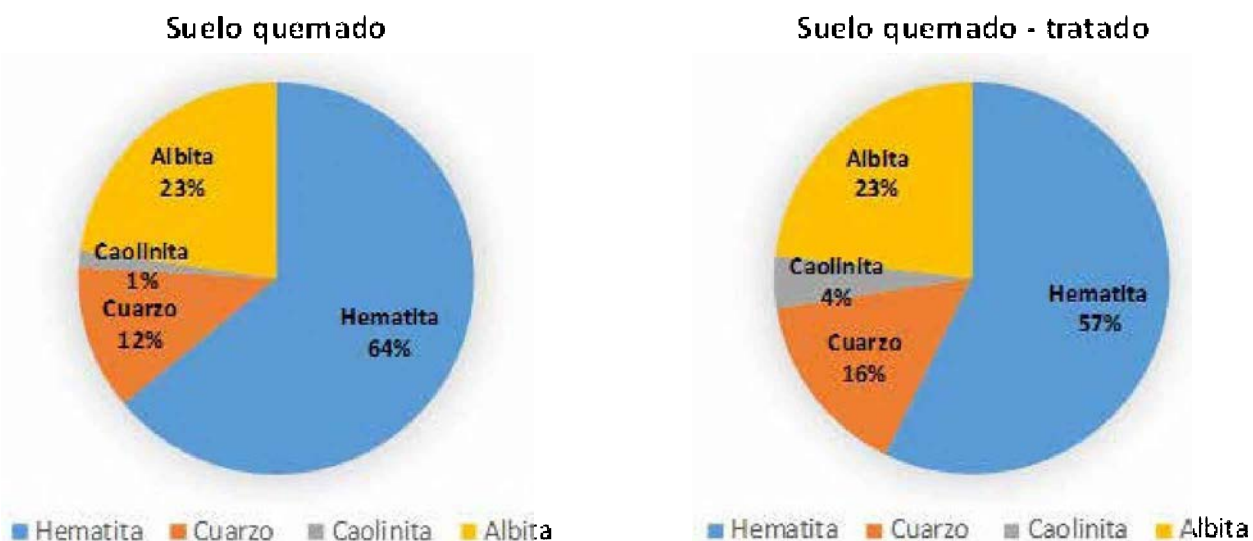


Figura 4. Porcentaje cualitativo de minerales presentes en la muestra de suelo quemado y quemado-tratado a partir de los difractogramas obtenidos en el ensayo DRX.

De igual forma, en la **Figura 5** se aprecia que al tratar las muestras aparecen pequeños filamentos en el exterior e interior de los cuerpos (**Fig. 5B**). Si bien, estos filamentos no son un mineral producto de la precipitación, su generación influye en el incremento de la resistencia a la tracción del suelo y en la disminución de las grietas que se forman en el material producto de la quema (**Fig. 5A**).



Figura 5. Fotografía del estado de las muestras trabajadas. (A) Suelo después de quemado al horno. (B) Suelo quemado-tratado pasados 15 días del tratamiento y zoom de filamentos.

3.4 Curva característica de retención de agua

La **Figura 6** presenta las curvas características de retención de agua para el suelo quemado y para el suelo quemado-tratado en términos de succión matricial y porcentaje de saturación (S_r). En esta figura se observa que las curvas son relativamente similares; sin embargo, la menor presión de entrada de aire registrada en el suelo quemado-tratado (24 kPa), comparada con la presión de entrada de aire en el suelo quemado (41 kPa), apunta a un cierto aumento en la macroporosidad del suelo quemado-tratado. Dicho aumento se daría como resultado de la agregación que le confiere a las muestras el tratamiento, tal como ocurrió en la investigación de Muñoz en un suelo natural tratado con B4 [32].

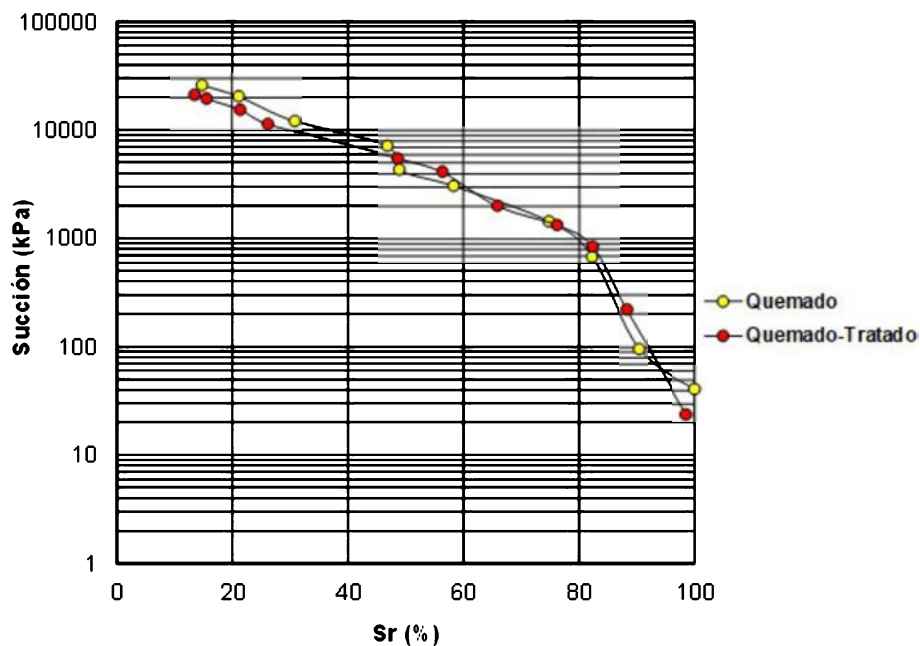


Figura 6. Curva característica de retención de agua del suelo quemado y del suelo quemado-tratado.

3.5 Propiedades mecánicas

A continuación, se presenta el análisis de algunas propiedades mecánicas del suelo quemado y quemado tratado.

3.5.1 Corte directo consolidado-drenado

Los parámetros de resistencia obtenidos a partir del ensayo de corte directo en condiciones saturadas drenadas son presentados en la Tabla 3. Las variaciones observadas en las cohesiones se explicarían por el apareamiento de los filamentos identificados en la Figura 5B.

Si se comparan las curvas de fluidez del suelo quemado y quemado-tratado (**Fig. 7**) desde el punto de vista químico se observa que cuando intervienen la succión osmótica y las fuerzas de adsorción para la misma humedad, la cohesión tendería a ser menor en el suelo quemado-tratado, conforme se deduce de las curvas de fluidez (menor índice de fluidez 0.4101), apuntando así para la efectiva contribución de

los filamentos en el aumento de la cohesión cuando se trata el material (Tabla 3). Estas curvas de fluidez explican la reducción del ángulo de fricción con el tratamiento, no obstante, la resistencia al corte se evalúa apenas en función de las tensiones externas aplicadas al suelo, las fuerzas de la naturaleza electroquímica también interfieren en el comportamiento, ya que, para una humedad igual, el tratamiento disminuye la resistencia del suelo en el ensayo de límite líquido. Este mismo comportamiento ocurre en el ensayo de corte directo, solo que interfiriendo directamente en las fuerzas de contacto interpartículas y por tanto en la fricción.

Tabla 3. Parámetros de cohesión y fricción para el suelo quemado y quemado-tratado.

	Cohesión [kPa]	Fricción [°]
Suelo quemado	36	40
Suelo quemado-tratado	40	36

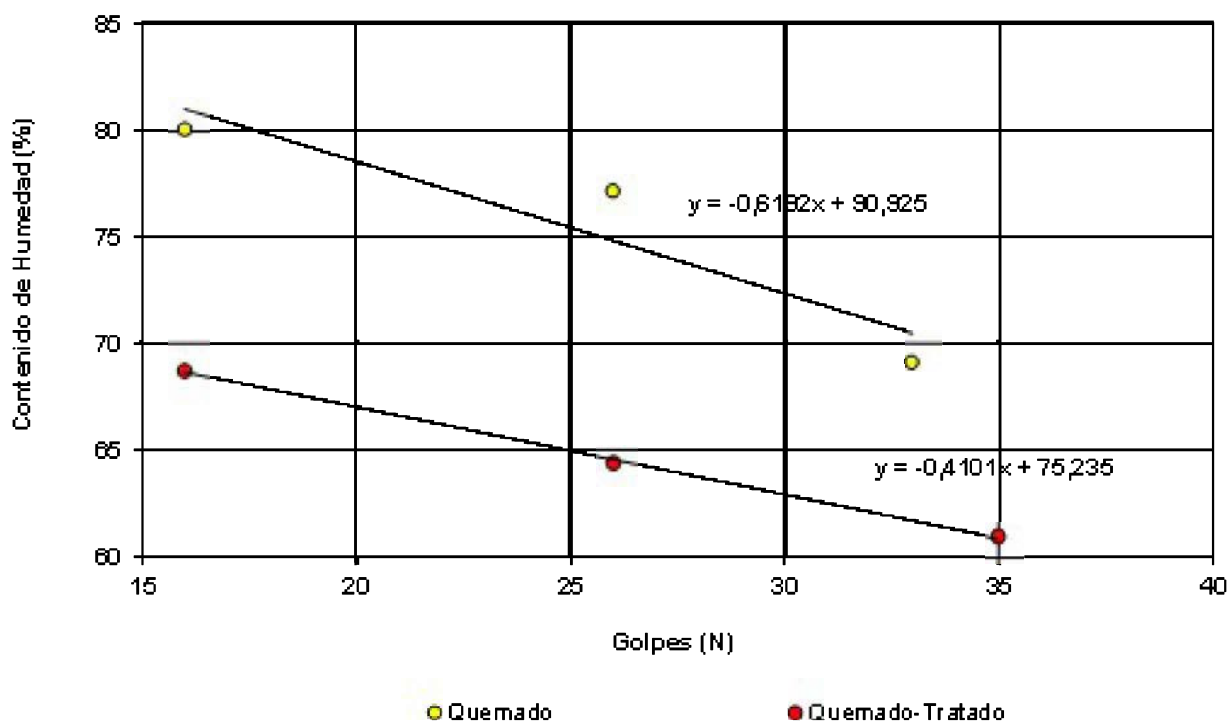


Figura 7. Curvas de fluidez del suelo quemado y del suelo quemado-tratado.

3.5.2 Consolidación duplo-edométrica

En la **Figura 8** se muestran los resultados del ensayo de consolidación con las muestras en su humedad inicial o estado no saturado (NSAT) y con inundación de la cámara o estado saturado (SAT). Los índices de vacíos (e) se dividieron por el índice de vacíos inicial (e_0) presente al momento de comenzar el ensayo para un mejor efecto comparativo de las curvas. En la figura se observa que el tratamiento le confiere una mayor estabilidad estructural a la muestra al presentar menores deformaciones que en el suelo quemado.

Adicionalmente, en la **Tabla 4** se muestra que el tratamiento al conferir al suelo mayor estabilidad estructural, lo lleva a presentar menores índices de colapso (I). Estos resultados corroboran los análisis de resistencia en los cuales se atribuía la mejoría en la cohesión actuante en el suelo a los pequeños filamentos originados por el tratamiento, filamentos que dificultan el movimiento de las partículas, haciendo que el suelo se torne menos compresible, como lo registra Valencia et al. [35].

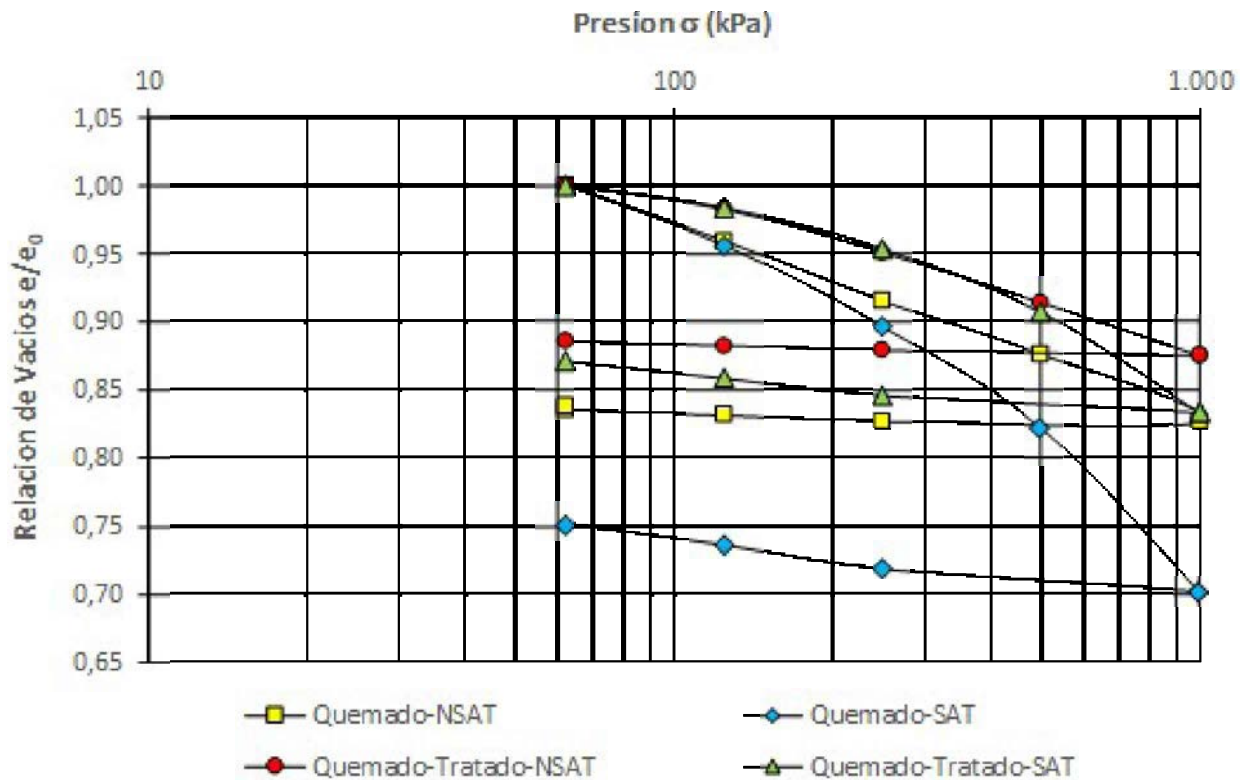


Figura 8. Curva de consolidación normaliza (e/e_0) suelo quemado y suelo quemado-tratado.

Tabla 4. Índice de colapso (I) en porcentaje según metodología de Jennings & Knight, [36].

Carga (kPa)	I (%)	
	Suelo quemado	Suelo quemado-tratado
62.3	0.0	0.0
124.6	0.2	0.0
249.2	1.0	0.0
498.3	2.9	0.4
996.6	6.9	2.2

3.6 Pinhole Test

Si bien en la **Figura 9** la proximidad de las curvas de carga y descarga apuntan a una estabilización estructural del suelo durante el flujo, los caudales menores para el suelo quemado-tratado indican un cerramiento de los poros y estabilización del canal de flujo principal que fue hecho en el cuerpo de prueba antes del ensayo, tal como lo reporta Valencia et al. [35] para un suelo tratado a 5 m de profundidad.

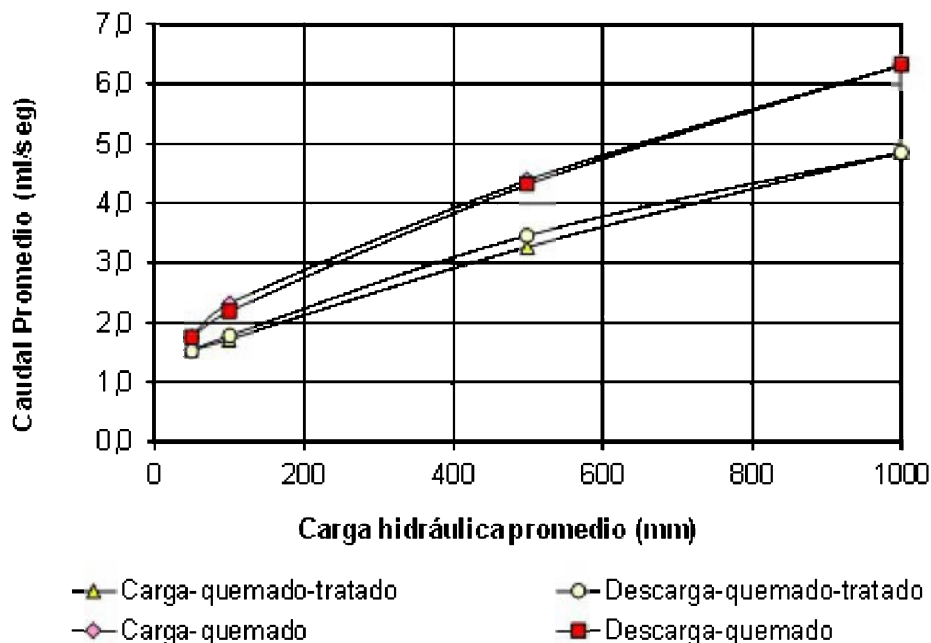


Figura 9. Curva Carga hidráulica promedio vs Caudal promedio para el suelo quemado y quemado-tratado.

3.7 Desagregación

Con relación al ensayo de desagregación, se observa en la **Figura 10** que el suelo quemado se desagrega totalmente al sumergir las muestras durante 24 h. Por el contrario, el suelo quemado-tratado muestra claramente que hubo una mejoría en la estabilidad del suelo, semejante a lo ocurrido en la investigación de Valencia et al. [35].



Figura 10. Ensayo de desagregación en muestra de suelo quemado y quemado-tratado: tiempo cero (izquierda), después de 24 horas sumergidas en agua (derecha).

4. CONCLUSIONES

En el presente estudio se observó el efecto físico-químico de adicionar un medio inductor de biomineralización sobre las propiedades geotécnicas de suelos quemados por incendios forestales, brindándole a los granos estabilidad estructural, principalmente en los casos en que se desee reducir la entrada de agua y la deformabilidad del suelo expuesto a altas temperaturas. Para la muestra quemada-tratada se presentó agregación de las partículas y una mayor estabilidad del material al sumergirlo en agua, así como una reducción del 13% en los límites de consistencia, una disminución hasta en un 8% en la defloculación y/o desagregación por granulometría, la reducción en un 86% en el índice de colapso y la disminución en un 22% en el caudal por actuación de la carga hidráulica registrada en el *pinhole test*. Adicionalmente, se debe considerar la formación de los filamentos como una contribución para la mejoría de las propiedades y comportamiento del suelo tratado.

En conclusión, la técnica de biomineralización, se muestra como una herramienta promisoría en el tratamiento de suelos quemados, específicamente en la mejoría de sus propiedades y comportamiento geotécnico, de una forma ambientalmente amigable.

PUNTOS CLAVE

1. La carbonatogénesis como técnica de biomineralización enfocada en el tratamiento de suelos, brinda una estabilidad estructural a las partículas, estabilidad propicia para los casos en que se desee reducir la entrada de agua. En áreas planas una mayor infiltración es deseable, pero en laderas puede favorecer los deslizamientos debido a la disminución de la succión actuante en el macizo.
2. El uso de bacterias nativas del suelo y la no adición de microorganismos externos al medio, tal y como se ha implementado en la gran mayoría de las investigaciones sobre biomineralización, disminuye la posibilidad de impacto ambiental.

RECOMENDACIONES PARA TOMAR DECISIONES

1. Se recomienda realizar una mayor cantidad de ensayos en diferentes tipos de suelos, que estadísticamente permita generalizar la metodología para cualquier tipo de material o mostrar posibles restricciones que puedan surgir según las características del mismo.
2. La gran mayoría de las investigaciones actuales se asocian al estudio de los cambios en la cobertura vegetal, pero poco se ha avanzado en saberes dirigidos a analizar el impacto que pueden tener las diferentes coberturas vegetales y las diferentes intensidades de los incendios en las propiedades geotécnicas de las capas de suelo. Se aconseja profundizar en estos aspectos, buscando la reducción de los riesgos asociados a los cambios que sufre el material expuesto.

3. Frente al desarrollo de una técnica a escala de laboratorio, se sugieren estudios que permitan a futuro reproducir a escala de campo las mismas condiciones de actuación del medio precipitador sobre el suelo afectado por incendios forestales, identificando las posibles alternativas biotecnológicas para su recuperación y mejoría de las propiedades geotécnicas del material.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores no declaran conflicto de intereses

AGRADECIMIENTOS

Los Autores agradecen a la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín y a la Universidad de Brasilia, Brasil.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA CRediT

Conceptualización: YVG. Metodología: YVG. Redacción de primera versión: YVG, JCC, LAL. Revisión y edición de segunda versión: YVG, JCC, LAL. Figuras y tablas: YVG, JCC. Administración de proyecto: YVG. Búsqueda de evidencia: YVG, JCC, LAL.

IDENTIFICACIÓN DE AUTORES

Yamile Valencia González <https://orcid.org/0000-0002-5389-2212>
José Camapum de Carvalho <http://lattes.cnpq.br/2245433059787601>
Luis Augusto Lara Valencia <https://orcid.org/0000-0002-2718-6234>

BIBLIOGRAFÍA

1. Wright, H. A.; Bailey, A. W. (1982). *Fire ecology*. United States and southern Canada. New York: John Wiley and Sons.
2. IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales). (2015). *Estudio nacional de la degradación de suelos en Colombia*. Bogotá. <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023648/Sintesis.pdf>
3. Valencia, Y., Patiño J., Álvarez, M., Ortega, D., Echeverri, O. (2018). Cambio en las propiedades geotécnicas de un suelo sometido a ignición en laboratorio. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 17(32), 85–107. <https://doi.org/10.22395/rium.v17n32a5>
4. UNGRD (Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres). (2017). *Terminología sobre Gestión del Riesgo de Desastres y Fenómenos Amenazantes*. Comité Nacional para el Conocimiento del Riesgo. <https://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/bitstream/handle/20.500.11762/20761/Terminologia-GRD-2017.pdf>
5. Karol, R. H. (2003). *Revised and Expanded (Civil and Environmental Engineering)* (2a ed). Marcel Dekker, New York.
6. Valencia, Y. (2009). *Influência da biomineralização nas propriedades físico - mecânicas de um perfil de solo tropical afetado por processos erosivos*. [Tese de Doutorado, Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia, Departamento de engenharia civil e ambiental, Brasília, DF]
7. Achal, V. (2015). Production of bacteria for structural concrete. En F. Pacheco Torgal, J. A. Labrincha, M. V. Diamanti, C. P. Yu, & Lee, H. K. (Eds.). *Biotechnologies and biomimetics for civil engineering*. Dordrecht: Springer, pp. 309–324. https://doi.org/10.1007/978-3-319-09287-4_14
8. Alcañiz, M., Outeiro, L., Francos, M., Úbeda, X. (2018). Effects of prescribed fires on soil properties: A review. *Science of the Total Environment*, 613–614, 944–957. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.144>
9. Roseno, J. L., Camapum de Carvalho, J. (2007). *Avaliação granulométrica de um perfil de solo tropical usando o granulômetro a laser*. III Simpósio sobre Solos Tropicais e Processos Erosivos no Centro-Oeste, Cuiabá. KCM Editora & Distribuidora, v. 1, pp. 1-11.
10. Lee, Y. (2003). Calcite Production by *Bacillus amyloliquefaciens* CMB01. *Journal of Microbiology*, 41(4), 345–348
11. Herrera, M. A., Gil, V. R., Hincapié, J. E., Cáceres, R. A., Vásquez, J. L., y Castaño, R. A. (2011). *Plan de manejo del parque natural regional metropolitano Cerro el Volador*. Reporte técnico, Área Metropolitana del Valle de Aburrá
12. ASTM (American Society for Testing and Materials). (2010). *Standard Test Method for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass*. ASTM Work Item D2216
13. ASTM (American Society for Testing and Materials). (2021). *Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12,400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³))*. ASTM Work Item D698
14. Ortega, D. (2018). *Efectos de las altas temperaturas producto de los incendios en los procesos erosivos superficiales de un suelo residual*. [Tesis de Maestría en geotecnia. Universidad Nacional de Colombia]
15. Madigan, M.T., Martinko, J. M., Dunlap, P.V. & Clark, D.P. (2009). *Brock Biología de los microorganismos* (12a ed.). Pearson Addison Wesley, Madrid.
16. Hammes, F., Verstraete, W. (2002). Key roles and calcium metabolism in microbial carbonate precipitation. *Environmental Science & Bio/Technology*, n. 1, pp. 3–7. <https://doi.org/10.1023/A:1015135629155>
17. Arrieta, M., Valencia, Y., Echeverri, O. (2012). Aplicación de la biomineralización en suelos de la ciudad de Medellín para mitigar procesos erosivos. *Revista boletín ciencias de la tierra*, 32, 35–46.

18. Gómez, C. (2013). *Avaliação geotécnica de um perfil de solo tratado biotecnologicamente para fins de pavimentação*. [Tese de Doutorado, Universidade de Brasília, Brasil]
19. ASTM. (2010). *Standard test methods for specific gravity of soil solids by water pycnometer*. (The American Society for Testing and Materials). ASTM Work Item D854
20. ASTM. (2017). *Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils*. (The American Society for Testing and Materials). ASTM Work Item D4318
21. ASTM (American Society for Testing and Materials). (2007). *Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils*. ASTM Work Item D422
22. ASTM (American Society for Testing and Materials). (2017). *Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes*. ASTM Work Item D2487
23. Nogami, J., Villibor, D. (1995). *Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos*. Sao Paulo, Brasil: Ed. Villibor.
24. ASTM (American Society for Testing and Materials). (2019). *Standard Test Methods for pH of Soils*. ASTM Work Item D4972
25. ASTM (American Society for Testing and Materials). (2011). *Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions*. ASTM Work Item D3080
26. ASTM (American Society for Testing and Materials). (2006). *Standard Test Method for Identification and Classification of Dispersive Clay Soils by the Pinhole Test*. ASTM Work Item D4647
27. ASTM (American Society for Testing and Materials). (2013). *Standard Test Methods for Determining Dispersive Characteristics of Clayey Soils by the Crumb Test*. ASTM Work Item 6572
28. ASTM (American Society for Testing and Materials). (2010). *Standard test method for measurement of soil potential (Suction) using filter paper*. ASTM Work Item D5298
29. Diaz, J., Valencia, Y. Camapum de carvalho, J. (2021). Validación de una metodología para obtener la envolvente de ruptura al esfuerzo cortante en suelos no saturados compactados. *Entramado*, 17(1), 290–301. <https://doi.org/10.18041/1900-3803/entramado.1.7303>
30. Grim, R. E. (1962). *Applied Clay Mineralogy*. McGraw Hill, New York. <https://doi.org/10.1080/11035896209447314>
31. Santos, P. (1975). *Tecnologia de argilas aplicada às argilas brasileiras, v. 1 Fundamentos*. Edgard Blucher Ltda, Universidade de São Paulo.
32. Muñoz, J. (2019). *Estudio de la variación de los parámetros mecánicos de un talud de suelo residual tropical a través de la aplicación en laboratorio de un nutriente precipitador de carbonato de calcio sobre sus bacterias nativas*. [Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Colombia]
33. Camapum de Carvalho, J., Rezende, L., Cardoso, F., Lêda C. de F.L., Renato C. Guimarães, Valencia, Y. (2015). Tropical Soils for Highway Construction: Peculiarities and Considerations. *Transportation Geotechnics*, 5, 3–19. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2015.10.004>
34. Lavorenti, A., & Alves, M. (2005). Point of zero salt effect: Relationships with Clay Mineralogy of representative Soils of the Sao Paulo State, Brazil. *Pedosphere*, 15 (5), 545–553.
35. Valencia, Y., Camapum de Carvalho, J., Lara, L. (2015). Influence of biomíneralization on a profile of a tropical soil affected by erosive processes. *DYNA*, 82(192), 221–229. <https://doi.org/10.15446/dyna.v82n192.42942>
36. Jennings, J. E. & Knight, K. (1975). *A guide to construction on or with materials exhibiting additional settlement due to "collapse of grain structure"*. Regional Conference for African on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Durban, pp. 99-105.

CAPÍTULO
14

Gestión del riesgo en salud en situación de desastres. Lecciones aprendidas en Armenia

Olga Alicia Nieto Cárdenas¹

¹Programa de Medicina. Facultad de Ciencias de la Salud. Universidad del Quindío. Carrera 15 calle 12 Norte. Armenia, Quindío, Colombia. Correo-e: oanieto@uniquindio.edu.co

Resumen

El 25 de enero de 1999 ocurrió un terremoto de magnitud 6.2 que generó un desastre en el Quindío y eje cafetero que afectó el Municipio de Armenia Quindío, con gran mortalidad y daños en la salud y la infraestructura. En este capítulo se resume cómo fue el manejo de la salud pública durante este desastre. Se encontró que la Secretaría de Salud del Municipio de Armenia tenía un plan orientado hacia las cinco áreas de la promoción de la salud, reorientar los servicios de salud, desarrollar ambientes saludables, propiciar estilos de vida saludables, propiciar la participación social y políticas públicas saludables. Para enfrentar la situación generada por el terremoto la Secretaría adoptó el modelo de Atención Primaria en Salud al cual denominó Gestión del Riesgo con los componentes de atención a las personas, atención al ambiente, vigilancia en salud pública y educación básica en situación de desastre en el contexto de ciudad educadora definida por el municipio. El municipio de Armenia y la Secretaría de Salud habían enfrentado el año anterior (1998) una epidemia de dengue y tenían una línea base de información y un equipo de salud pública. Durante el desastre, las diferentes instituciones atendieron a las víctimas apoyados por la Red Nacional de Urgencias Emergencias y Desastres, se atendieron unas 6,500 personas en urgencias y rescataron 1,109 cadáveres, el 83% de Armenia. El proceso de reconstrucción estuvo liderado desde el Gobierno Nacional por el FOREC (Fondo para la reconstrucción del eje cafetero) y hubo ONG ejecutoras en 15 gerencias zonales en el municipio de Armenia. Se concluye que el municipio de Armenia tenía un plan enfocado hacia la promoción de la salud y asumió el concepto de gestión de riesgo en salud durante el manejo del desastre. Se recomienda fortalecer los planes de gestión del riesgo de desastres.

Palabras clave: desastres, efecto de desastres en la salud, gestión del riesgo, salud pública.

Health risk management in disaster situations. Lessons learned in Armenia

Abstract

On January 25, 1999, an earthquake of magnitude 6.2 occurred that generated a disaster in Quindío and the coffee region that affected the Municipality of Armenia Quindío, with significant mortality and damage to health and infrastructure. This chapter summarizes the management of public health during this disaster. It was found that the Secretary of Health of the Municipality of Armenia had a plan oriented toward the five areas of health promotion, reorienting health services, developing healthy environments, promoting healthy lifestyles, promoting social participation, and healthy public policies. To face the situation generated by the earthquake, the Secretary adopted the Primary Health Care model, which is called Risk Management with the components of care for people, care for the environment, public health surveillance, and primary education in disaster situations in the context of an educating city defined by the municipality. The municipality of Armenia and the health secretary had faced a dengue epidemic the previous year (1998) and had a baseline of information and a public health team. During the disaster, the different institutions attended to the victims supported by the National Network of Emergencies and Disasters, attended to some 6,500 people in the emergency room, and rescued 1,109 bodies, 83% from Armenia. The National Government led the reconstruction process by FOREC (Fund for the Reconstruction of the Coffee Axis), and there were executing NGOs in 15 zonal administrations in the municipality of Armenia. The conclusion is that the municipality of Armenia had a plan focused on health promotion and assumed the concept of health risk management during disaster management. The recommendation is to strengthen disaster risk management plans.

Keywords: Disasters, health effects of disasters, risk management, public health.

1. MARCO CONCEPTUAL SOBRE LA GESTIÓN DEL RIESGO EN SALUD

1.1 La gestión del riesgo en salud, varias aproximaciones

El riesgo en salud. El interés por los riesgos en salud ha existido siempre pero cada vez más incluye nuevas perspectivas para el análisis de riesgos y tiene como punto de partida la definición, identificación, cuantificación y caracterización de amenazas para la salud humana y el medio ambiente. Desde esta perspectiva el concepto de riesgo puede denotar una adversidad o amenaza potencial, una consecuencia o un factor que puede aumentar el efecto adverso; en este sentido el concepto de riesgo en salud se ha transformado en distintos contextos, tales como [1]:

- Prevalencia del riesgo o proporción de la población que está expuesta a un riesgo.
- Riesgo relativo o la probabilidad de obtener un efecto adverso en personas expuestas en comparación con personas no expuestas.

- Peligro o la propiedad inherente a una sustancia, cosa, suceso, que encierra un potencial de nocividad.
- Riesgo atribuible poblacional o la proporción de una enfermedad existente en una población que puede atribuirse a un riesgo particular.
- Carga atribuible o la proporción de la carga actual de morbilidad debida a una exposición anterior.
- Carga evitable o la proporción de la carga futura de enfermedad que puede evitarse si se reducen los niveles de exposición [1].

A continuación, se precisa el concepto de riesgo desde la epidemiología, una ciencia que ha aportado notoriamente en esta construcción.

El riesgo en epidemiología. El concepto de riesgo en epidemiología equivale al efecto, probabilidad de ocurrencia de una patología en una población determinada y se expresa a través del indicador conocido como Incidencia. Este concepto reposa sobre tres supuestos epidemiológicos: la identidad entre lo posible y lo probable, el concepto de homogeneidad en la naturaleza de la morbilidad, y el supuesto de recurrencia de los eventos. Este último justifica la aplicación del concepto de riesgo en modelos de prevención, conociendo sus determinantes para intervenir en su proceso [2].

El concepto de riesgo relativo permite la construcción del concepto denominado *Factor de riesgo* y surge así una red de riesgos en la cual los comportamientos, señales, síntomas y enfermedades, pueden convertirse en factores de riesgo para otras afecciones. Por ejemplo, la hipertensión para la enfermedad cardiaca con lo cual surge un discurso biomédico, una condición medicalizable, el “estado de salud bajo riesgo” que permite una intervención [2].

Es decir, el riesgo es un concepto que requiere permanente actualización y el futuro del concepto depende de la capacidad de articularse con nuevos desarrollos conceptuales y metodológicos [2]. Desde la perspectiva epidemiológica del factor de riesgo que se puede identificar y permite una intervención se avanza hacia el concepto de gestión del riesgo. Según el Centro de Conocimiento en Salud Pública y Desastres [3] la gestión del riesgo en el sector salud sigue los siguientes pasos: El análisis de amenaza y vulnerabilidad, la reducción del riesgo y la evaluación del impacto potencial.

El concepto y la gestión del riesgo en el sistema general de seguridad social en Colombia. El concepto de riesgo entendido como la probabilidad que ocurra un efecto adverso que afecte nuestra salud y vida orienta la posibilidad de prevenir en salud y la idea de trabajar en la detección del riesgo como una opción de prevención en salud, es una constante en la historia de la salud pública.

Es así como el concepto de gestión de riesgo llega al Sistema General de Seguridad en Salud en Colombia (SGSSS) y empieza a permear distintos ámbitos tales como la gestión del riesgo colectivo, la gestión del riesgo en los aseguradores de salud y más recientemente la gestión del riesgo en las rutas de atención integral en salud (RIAS).

En el desarrollo del SGSSS en Colombia se precisa la importancia de los conceptos de detección temprana del riesgo e inducción a la demanda [4] y posteriormente se llega al concepto de gestión del riesgo. El Plan Decenal de Salud Pública 2012-2021 (PDSP) concibe el riesgo en salud como “la probabilidad de ocurrencia de un evento no deseado, evitable y negativo para la salud del individuo, que puede ser también el empeoramiento de una condición previa o la necesidad de requerir más consumo de bienes y servicios que hubiera podido evitarse” [5,6].

En el aseguramiento en salud se define el sistema de administración de riesgos y el riesgo desde la perspectiva epidemiológica se relaciona con el riesgo desde la perspectiva empresarial, como la

probabilidad de generación de pérdidas económicas por la ocurrencia de un evento adverso derivado de las actividades propias del negocio [7].

Más recientemente el SGSSS llega al concepto de rutas integrales de atención en salud con el objetivo de integrar a todos los actores del sistema para una adecuada gestión del riesgo en salud [8], en desarrollo de la Política de Atención Integral en Salud (PAIS) y de modelos de atención integral (MIAS) [9,10].

1.2. Marco conceptual sobre la gestión del riesgo en salud en situación de desastres

Según la Ley 1523 de 2012 la Gestión del Riesgo de Desastre “es un proceso social orientado a la formulación, ejecución, seguimiento y evaluación de políticas, estrategias, planes, programas e instrumentos, medidas y acciones para el conocimiento y reducción del riesgo y para el manejo de desastres con el propósito explícito de contribuir a la seguridad y el bienestar de las personas, la calidad de vida y al desarrollo sostenible” [11]. La Ley 1523 de 2012 generó un marco conceptual y normativo que ha permitido el desarrollo de una política de Gestión del Riesgo de Desastres en Colombia, en la cual todos los actores son partícipes y juegan roles complementarios en diferentes momentos, situación especialmente relevante para el sector salud.

1.3 El marco normativo

El marco normativo vigente en Colombia. Al mirar retrospectivamente se puede pensar que Ley 1523 de 2012 es el único marco normativo en Colombia sobre este tema; sin embargo, la gestión del riesgo en el sector Salud tiene unas especificidades importantes a partir de la Constitución Política de 1991 [12], como puede verse en la Caja 1 [13].

Caja 1. Evolución del marco normativo en Gestión del Riesgo en Salud [13].

Todos estos desarrollos relacionados con la gestión del riesgo convergen actualmente al interior del Sistema General de Seguridad Social en Salud y de las entidades públicas y privadas que lo conforman.

- Sistema General de Seguridad Social en Salud, Decretos 1485 de 1994 y 723 de 1997.
- Acuerdo 117 de 1998 y las Resoluciones 412 y 3384 de 2000.
- En el tema de riesgos profesionales se adoptó el Decreto 1295 de 1994.
- Decreto 1537 de 2001, sobre la organización y administración del sistema general de riesgos profesionales.
- Ley 46 de 1998, Sistema Nacional de Prevención y Atención de Desastres.
- Decreto 093 de 1998, el Plan Nacional para la Prevención y Atención de Desastres.
- Decreto 4110 del Icontec, adopta para Colombia la norma técnica dar AS/NZ 4360:1999 como pauta internacional de gestión del riesgo en salud.

- Decreto 1599 del 2005, el Modelo Estándar de Control Interno, impacta la cultura organizacional de las entidades públicas del nivel nacional y territorial.
- Decretos 574 y 1698 de 2007 y la Resolución 1740 de 2008 que plantean la gestión del riesgo en salud en el marco de la habilitación financiera de las EPS.
- La Ley 1122 de 2007, adopta la gestión del riesgo en salud como función indelegable del aseguramiento en Salud.
- Decreto 3039 de 2007, define la prevención de riesgos como una de las cinco líneas de política del Plan Nacional de Salud Pública 2007–2010.
- La NTC ISO 31000 del 2011 contiene principios, marco de referencia y proceso de gestión del riesgo traducidos de la norma ISO 31000:2009.
- El Plan Decenal de Salud Pública 2012–2021, incluye una línea operativa que aporta elementos para el desarrollo de la gestión del riesgo en salud.

El marco internacional. Desarrollos internacionales posteriores a la Ley 1523 hacen aportes significativos al desarrollo conceptual y operativo de la gestión del riesgo de desastres algunos de los cuales se mencionan en la **Caja 2**.

Caja 2. Aportes del marco internacional

Los objetivos de desarrollo sostenible, la conferencia de las Naciones Unidas sobre vivienda y desarrollo urbano sostenible Hábitat III, el Acuerdo internacional de París COP21 y la convención marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático, el plan estratégico para la reducción del riesgo de desastres 2013–2018 de la Organización Panamericana de la Salud y la Organización Mundial de la Salud (OPS-OMS), el protocolo de Sendai y más recientemente el Informe RAR 2015–2030.

El marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres 2015–2030 retoma el concepto de resiliencia como la capacidad y necesidad de adaptarse y gestionar el riesgo en situaciones de desastre y propone cuatro prioridades de acción: comprender el riesgo de desastres, fortalecer la gobernanza, invertir en la reducción del riesgo de desastres para la resiliencia, y aumentar la preparación a fin de dar una respuesta eficaz [14].

1.4 Las prioridades en salud pública en situación de desastre

Según Noji [16], los desastres se pueden considerar un problema de salud pública por varias razones (ver **Caja 3**). El concepto de gestión de riesgo en situación de desastre puede parecer en principio contradictorio porque frente a una situación de una magnitud tal que supera los mecanismos de prevención y control, lo primero que se hace es atender la fase de emergencia: rescatar a los lesionados, atender a los heridos, recoger los cadáveres.

Caja 3. Los desastres son un problema de salud pública porque:

- Pueden causar un número inesperado de muertes, lesiones o enfermedades, en la comunidad afectada que exceden las capacidades de los servicios locales de salud y requerir ayuda externa.
- Pueden destruir infraestructura local de salud lo cual limita la capacidad de respuesta ante la emergencia.
- Pueden tener efectos adversos sobre el medio ambiente y la población al aumentar el riesgo potencial de enfermedades transmisibles.
- Pueden afectar el comportamiento psicológico y social de las personas y las comunidades afectadas.
- Pueden generar escasez de alimentos lo cual trae consecuencias nutricionales.
- Pueden generar grandes movimientos de población.

Sin embargo, es necesario que tempranamente se identifiquen y controlen las amenazas y se atienda la vulnerabilidad, justamente para prevenir un desastre mayor. Es decir, la gestión del riesgo cotidiano es la clave en la atención misma del desastre, en todas sus fases, desde la fase de emergencia, hasta el análisis y evaluación del riesgo.

Las prioridades en salud pública en situación de desastres tienen que ver con agua potable, disposición de excretas, manejo de alimentos, control de vectores y zoonosis, control de enfermedades transmisibles y salud mental entre otros, las cuales se revisarán a continuación.

Agua potable. Según la OPS/OMS en una situación de emergencia son muchas las carencias, pero ninguna es tan importante como la necesidad de agua segura y en condiciones básicas de saneamiento, pues la falta de condiciones sanitarias después del desastre a menudo acarrea consecuencias sumamente graves para la población y causa aún más sufrimiento que el propio siniestro. Por lo tanto, agua y saneamiento deben figurar entre las prioridades de las autoridades locales y cuanto más rápidas y efectivas las medidas, menor será el daño [17].

El agua es uno de los principales medios de transmisión de enfermedades y por consiguiente al proveer la cantidad adecuada de agua a las poblaciones afectadas, las autoridades deben asegurar su potabilidad [18].

Manejo de alimentos. Después del agua son los alimentos los mejores vehículos para transportar gérmenes que puedan generar infecciones, especialmente en una situación de desastre, lo cual aumenta el riesgo de las enfermedades transmitidas por alimentos (ETA), que se producen por consumo de alimentos o agua contaminados con bacterias, virus, hongos, parásitos o sustancias químicas que afectan la salud; las más frecuentes en situaciones de emergencia son: Hepatitis A, cólera, fiebre tifoidea y paratifoidea, cuyos síntomas más comunes son vómito, diarrea, fiebre, dolor de estómago o de cabeza y deshidratación, entre otros [18].

Manejo de residuos. Según el Ministerio de Salud en condiciones de emergencia el sitio de almacenamiento de residuos debe estar debidamente señalizado, distante de dormitorios, cocinas y alacenas. Debe mostrar con claridad las rutas y horas de recolección y contar con personas responsables

del manejo de residuos sólidos. Debe permitir las actividades de aseo, desinfección y la recolección; debe disponer de recipientes impermeables de un tamaño que permita almacenar varias bolsas, y tener tapa que impida la entrada de agua, insectos o roedores [18]. Para la disposición final de residuos, cuando no haya un sistema de recolección y disposición por parte de las autoridades sanitarias, se sugiere que se adopte el método de trinchera [16,18].

Disposición de excretas humanas. El manejo inapropiado de los desechos humanos, aun en períodos sin desastres, afecta la salud pública [16]. Las enfermedades que se pueden transmitir a través del contacto con excrementos humanos incluyen la fiebre tifoidea, el cólera, la disentería, la hepatitis, la poliomiелitis, la esquistosomiasis y la gastroenteritis, entre otras [18].

Control de zoonosis y enfermedades transmitidas por vectores. Los desastres agravan o generan condiciones que facilitan el criadero de los agentes que transmiten enfermedades, los cuales se conocen como vectores. Una zoonosis es una enfermedad que puede transmitirse de los animales a los seres humanos; existen muchos tipos de zoonosis y en situación de desastre hay que identificar su riesgo y reportar a la secretaría de salud en los siguientes casos: mordedura de animales como perros y gatos pueden transmitir rabia, mordedura de ratas y murciélagos pueden transmitir rabia silvestre; contacto con roedores o sus excrementos, puede transmitir leptospirosis; contacto con animales domésticos y silvestres expone al riesgo de pulgas, piojos, ácaros y al contagio de la fiebre por garrapatas [18].

Albergues y alojamientos temporales. Por lo general los asentamientos temporales son áreas con una densidad de población sumamente alta y se ubican en lugares que originalmente no estaban destinados a alojar tantas personas. Es probable que no existan servicios apropiados de salvamento y la falta de agua y de servicios higiénicos básicos puede aumentar el riesgo de enfermedades transmisibles, principalmente las endémicas en las áreas de origen, tránsito y asentamiento [16,17].

La salud mental en situación de desastre. Según la Organización Panamericana de Salud en situaciones de desastres y emergencias complejas se produce un deterioro del tejido social, una pérdida de la estructura de la vida familiar y un incremento de los signos de sufrimiento psicológico, como la aflicción y el miedo, que pueden aumentar la morbilidad psiquiátrica y otros problemas sociales. Según sea la magnitud del evento y demás factores, se estima que entre la tercera parte y la mitad de la población expuesta sufre alguna manifestación psicológica; aunque no todas pueden calificarse como patológicas, la mayoría deben entenderse como reacciones normales ante situaciones de gran significación o impacto. Después de una emergencia o desastre, los problemas de salud mental en los sobrevivientes requieren atención durante un periodo prolongado en el que tienen que enfrentar la tarea de reconstruir sus vidas [19,20].

Los principios para la atención de las personas con condiciones mentales, neurológicas y por uso de sustancias son comunicación, evaluación clínica, manejo y gestión, reducción de estrés y fortalecimiento del apoyo social, protección de los derechos humanos y atención al bienestar general [21].

2. EL MANEJO EN SALUD PÚBLICA EN ARMENIA DURANTE EL TERREMOTO DE 1999

A continuación, se describe la situación y manejo de salud pública durante el terremoto del eje cafetero en el año 1999 con base en tres informes de la Secretaría de Salud del Municipio de Armenia: la atención de la emergencia durante el mes de enero, la estrategia de Atención Primaria en Salud en los seis primeros meses y el resumen de la gestión en el año 1999.



Figura 1. Fotografía de Armenia post terremoto en 1999 (izquierda) y en pandemia Covid 2021 (derecha). La figura muestra dos desastres diferentes, el posterremoto y la pandemia Covid. El impacto de los desastres del Siglo 21 afecta profundamente a los seres humanos, en su vida, salud y bienestar a pesar que la infraestructura física se conserve o mejore.

2.1 Perfil epidemiológico de la emergencia de enero de 1999

La Secretaría de Salud elaboró un informe sobre las personas atendidas el 25 y 26 de enero de 1999 según el cual se atendieron 6,407 personas, 42.8% hombres y 57.2% mujeres y el grupo etáreo más afectado fue 15–44 años. Se obtuvo información detallada de 4,667 afectados y se identificaron como causas de atención: otros traumatismos, otra herida en la cabeza, herida del codo, antebrazo y muñeca, contusión, fractura de húmero, herida de varios dedos de la mano, traumatismo intracraneal, herida de rodilla, pierna y tobillo y fractura de clavícula [22].

Se registraron 1,109 muertes, 921 en el municipio de Armenia (83%), 51.3% hombres y 48.7% mujeres, con predominio en el grupo 15–44 años y sus causas de muerte fueron: trauma craneoencefálico, politraumatismo, aplastamiento, sofocación, shock hipovolémico, trauma cerrado, insuficiencia respiratoria, shock traumático, anoxia e infarto agudo de miocardio [22].

El manejo de los cadáveres se llevó a cabo por el Cuerpo Técnico de la Fiscalía (CTI) en el coliseo de la Universidad del Quindío, donde se identificaban los cadáveres y se entregaban a los familiares.

La Secretaría de Salud manifestó que la principal causa de morbilidad y mortalidad fueron los traumas craneoencefálicos y politraumatismos, que afectaron principalmente a la población económicamente activa, lo que significa una importante pérdida en años de vida potencialmente perdidos (AVPP) y considera que se requiere mejorar la preparación institucional organizada para dar respuesta a ese tipo de traumas porque hace falta una red de urgencias en el municipio de Armenia como elemento integrador en el manejo de la fase post-desastre. La Secretaría contó con la red nacional de urgencias para el traslado y manejo de pacientes y se organizó una red de apoyo por parte de instituciones externas al municipio [22].

2.2 La estrategia de Atención Primaria en Salud (APS)

Según este informe con el fin de responder a las necesidades de la población damnificada en el municipio de Armenia ante el terremoto del 25 de enero de 1999, la Secretaría de Salud determinó la adopción de un modelo de Atención Primaria en Salud que se denominó Gestión del Riesgo, la cual tuvo los siguientes componentes: atención a las personas, atención al ambiente, vigilancia en salud pública y educación básica en situación de desastre en el contexto de ciudad educadora [23].

Vigilancia en salud pública. Se identificaron 25,649 personas de las cuales 24,135 se ubicaban en el área urbana y 1,434 en área rural. Se sectorizó la población a riesgo en 15 zonas con asignación de coordinadora y técnico en saneamiento para cada zona y también en los asentamientos espontáneos. A cada promotora de salud se le asignaron entre 100 a 150 familias con una programación de visita domiciliaria diaria promedio de 7–10 visitas y la organización de grupos homogéneos para el proceso educativo. La ubicación del personal se adaptó luego a la sectorización del municipio por gerencias zonales realizada por el Forec [23].

Se puso en marcha el sistema alerta-acción incluyendo enfermedades como la diarrea, la infección respiratoria aguda, la hepatitis A y la leptospirosis, lo cual permitió controlar los brotes de diarrea con una respuesta casi inmediata por los técnicos en saneamiento con el montaje de las pruebas en asociación con el Ministerio de Salud, el Instituto Nacional de Salud y el Instituto Seccional de salud del Quindío [23].

Se identificó la presencia del mosquito *Anopheles punctimacula* en varios sitios urbanos y rurales. Ante la presencia de personas procedentes de zonas endémicas se declaró la alerta amarilla y se capacitó a las promotoras para realizar búsqueda activa y toma de gota gruesa a las personas con fiebre procedentes de zonas maláricas [23]. El dengue había presentado una epidemia en el Municipio el año 1988 y estuvo controlado en el post-desastre (1999). Después del desastre aumentó la incidencia de diarrea, infección respiratoria, hepatitis A y varicela, sin presentar ninguna epidemia [23].

Atención a las personas. Se identificó la población a riesgo mediante un censo en los diferentes asentamientos y alojamientos, se priorizaron grupos vulnerables (niños, gestantes, ancianos, personas discapacitadas física o mentalmente) y se canalizó a las personas para la protección específica a la IPS según su seguridad social [23].

En cuanto a la salud mental se diseñó un proyecto para la recuperación psicosocial para el personal de salud y la Alcaldía que estaba enfrentando la crisis emocional inmediata al terremoto, con una cobertura de 548 personas, con el apoyo de las ONG y universidades [23].

Con respecto a la participación comunitaria se identificaron los diferentes líderes en alojamientos y barrios para la conformación de los comités de salud y se impulsó su participación en el proceso de restauración del tejido social, primeros auxilios y deberes y derechos en las instituciones de salud [23].

Atención primaria en salud ambiental. La gestión cotidiana del riesgo en los asentamientos y alojamientos se enfocó en unas prioridades de salud pública que se describen a continuación.

Abastecimiento de agua. Monitoreo de la calidad en la red, verificación diaria de la calidad en los asentamientos (pH, turbidez y coli fecal). Se hizo distribución de agua para los asentamientos sin conexión al acueducto con dos carrotanques aportados por el Ministerio de Salud [23].

Higiene e inocuidad de alimentos. Capacitación y desparasitación a manipuladores de alimentos de cocinas colectivas y comunitarias, monitoreo de ollas, cocinas y comederos colectivos y comunitarios, inspección de bodegas y centros de acopio [23].

Saneamiento del medio. Adecuación e instalación de unidades sanitarias en asentamientos temporales invasivos y permanentes, control, manejo y educación sanitaria para la disposición de excretas, educación e implementación para la correcta disposición de residuos sólidos [23].

Higiene y seguridad en alojamientos. Identificación del riesgo y orientación a la autogestión para prevención de accidentalidad; acciones de vigilancia y control de restaurantes, fábricas de alimentos, establecimientos comerciales, centros de acopio; control de vectores; monitoreo de recursos aire, agua, suelo y ambientes laborales. Esta labor fue efectuada por 22 técnicos en saneamiento y cinco auxiliares [23].

Control de vectores. Se hizo seguimiento de los índices aélicos, desinsectación química, fumigación peridomiliar, identificación y control de criaderos de anopheles con control biológico con bacillus thurigiensis [23].

Control de zoonosis. Se identificó aumento de las mascotas en los asentamientos y alojamientos, se hizo seguimiento a los accidentes rábicos en 24 barrios, 17 asentamientos y 4 alojamientos. Se hizo control de roedores atendiendo 2,092 viviendas con roenticidas, pellets y cebos parafinados [23].

En informe remitido al Ministerio de Salud el 8 de junio de 1999 la Secretaría de Salud precisa que ha trabajado con la estrategia es la gestión cotidiana del riesgo; es decir, que identifico los riesgos tanto en atención a las personas, como en atención al ambiente, se analizó y se buscaron alternativas de solución diariamente. Sobre los asentamientos informa que existen 35 alojamientos temporales y persisten asentamientos espontáneos; existen también asentamientos invasivos que aparecieron al siguiente mes post terremoto por personas procedentes de fuera de Armenia como Urabá, Valle o Chocó. Estos sitios permanecían como de alto riesgo sanitario porque no era posible para el municipio instalar servicios de agua potable y saneamiento básico, lo cual estaría avalando la invasión de esos lotes. La Secretaría de salud facilitó la instalación de baños portátiles (al principio) y luego coordinó con algunas ONG la instalación de agua y baños en los límites de los asentamientos, pero persistía el problema de aguas servidas [23].

2.3 Informe de gestión y resultados 1999

Según el informe de gestión y resultados de la Secretaría de Salud de Armenia durante el año 1999 se llevó a cabo el Plan Local de Salud “Armenia Municipio Saludable por la Paz” cuyas cinco áreas se ajustaron en el contexto post-desastre como se describe en cada una de ellas [24].

Reorientar los servicios de salud. Se realizó vigilancia permanente en salud pública con funcionamiento del sistema alerta-acción, lo cual permitió hacer seguimiento a eventos y tendencias en morbilidad y factores de riesgo. Se realizó el diagnóstico de asentamientos temporales identificando grupos prioritarios tales como embarazadas, menores de 5 años y personas de la tercera edad, iniciando con ellos complementación nutricional.

El sistema general de seguridad social en salud avanzó en el aseguramiento y aumentó de 31,188 a 81,188 afiliados al régimen subsidiado, pasando de 11% a 37% de la población afiliada. Esos 50,000 cupos fueron financiados por el Fondo para la Reconstrucción del Eje Cafetero (Forec) por 2 años y se asignaron recursos por más de \$10,435 millones de pesos para cubrir a estos afiliados con la participación de 10 administradoras del régimen subsidiado.

El desarrollo de la red de servicios avanzó en la articulación entre la red pública y privada con base en un análisis de mercado que facilitó la firma de convenios con las Empresas Sociales del Estado (ESE) del primer y tercer nivel de atención.

Se gestionaron los recursos para la reconstrucción de la Red pública de atención con el Ministerio de Salud, que financió los centros de salud Nueva Libertad y Piloto. El Forec financió la relocalización de la Unidad Intermedia del Sur y de los centros de salud Santander, Correa Grillo, La Milagrosa y La Clarita, la reconstrucción del centro de salud El Paraiso y el reforzamiento de Miraflores, Los Quindos, El Caimo y La Patria. Se asignaron recursos por 7,935 millones para la relocalización y reconstrucción [24].

Desarrollar ambientes saludables. El desarrollo de ambientes favorables se enfocó en unas prioridades que se describen a continuación.

Agua potable y saneamiento básico. Se aplicaron 43 toneladas de cal para neutralización de ácidos orgánicos sobre los escombros y para el manejo de excretas en zanjas y trincheras, durante las primeras semanas post desastre.

En los asentamientos temporales se registraron inicialmente 20,362 habitantes y a diciembre de 1999 esta población se redujo en 48%, quedando 13,704 personas. El 92% tenían abastecimiento de agua potable, el 65% tenían conexión a la red de alcantarillado y el 79% tenían recolección de aguas inadecuada con zanjas. El 100% de los alojamientos recogían los residuos sólidos en bolsas plásticas, existían 14 contenedores para la recolección de residuos 7 botaderos a cielo abierto, la recolección se hacía 3 veces por semana.

Se realizaron acciones permanentes en 49 asentamientos y 45 alojamientos temporales. El 100% de los alojamientos temporales tenían abastecimiento de agua potable por la Empresa de servicios Públicos de Armenia (EPA), 58% tanques de almacenamiento y dos se abastecían de pozos profundos (Cenexpo y talleres del Departamento). El 100% de los alojamientos tenía adecuada recolección de vertimientos líquidos hacia la red de alcantarillado.

Se instalaron 507 baterías sanitarias con el apoyo de Unicef, Oxfam y Fundaps-Memisa y se redujo la presencia de baños individuales, en diciembre de 1999 persistían 51 letrinas húmedas y 19 baños móviles [24].

Vigilancia y control de alimentos. Se atendieron 1,879 establecimientos públicos dedicados al expendio de alimentos; es decir, el 32% de los 5,888 establecimientos que se identificaron post-desastre. Se hizo control de carne, leche y panela, al igual que de los vehículos transportadores de alimentos.

Control de vectores y zoonosis. El dengue había presentado una epidemia en el Municipio de Armenia el año anterior (1998) y se mantuvo bajo control en el año 1999; se atendieron 48,727 viviendas en 257 sectores razón por la cual disminuyó la presencia de criaderos de larvas en los tanques de agua y se disminuyó el índice aéxico promedio de 11.3 en 1998 a 8.8 en 1999 y en algunos barrios los índices aéxicos bajaron a cero.

Control de la malaria. Se identificaron 31 criaderos de anopheles (*puntimacula* y *argyritarsis*) en área urbana y rural y se encontraron 28 casos, uno autóctono.

Control de zoonosis. Se vacunaron 11,478 caninos y felinos en 80 barrios, 50 asentamientos y 45 alojamientos temporales. En los alojamientos y asentamientos se calculó la presencia de un perro por cada cuatro personas, lo cual aumentó el riesgo de accidentes rábicos que llegaron a ser 357. Se hizo control de roedores plaga en 244 sectores.

Salud ocupacional. Se visitaron 395 establecimientos públicos para identificar los riesgos y la accidentalidad laboral con la información de seis administradoras de riesgos profesionales (ARP), lo cual mostró el que 98% de los establecimientos no estaban afiliados a una ARP.

Se visitaron 28 sitios de trabajadores independientes con 2,814 personas ubicadas en 1,385 locales, de los cuales 41.5% estaban en el régimen subsidiado. Las actividades económicas predominantes fueron venta de cacharro y lotería.

Se identificaron en la economía informal 5,880 establecimientos, de los cuales se tomó un muestreo del 7% para identificar los riesgos ocupacionales. Se visitaron 205 predios rurales de los cuales 83% estaban en producción agrícola y 17% pecuaria y se hizo en ellos un análisis de riesgos. Se elaboró el mapa de intensidad sonora identificando como áreas más ruidosas la avenida Bolívar, la avenida 14 de octubre y la vía jardines a bosques de pinares” [24].

Propiciar estilos de vida saludable. La estrategia de Atención Primaria en Salud tuvo una cobertura de 45 alojamientos y 49 asentamientos temporales, llegando a 9,290 familias con 33,444 personas. Participaron 50 promotoras de salud, 40 técnicos en saneamiento y 10 coordinadores en las gerencias zonales, cuyas funciones fueron identificar el riesgo, canalizar a la atención médica y hacer seguimiento a las familias que vivían en esos alojamientos y asentamientos.

Se llegó a 5,000 familias en estos alojamientos con educación básica en situación de desastres con los componentes de convivencia social y elaboración del duelo, autocuidado y cuidado del ambiente, organización comunitaria y convivencia social; se entregaron insumos básicos para el autocuidado tales como hidratación oral, purgantes, condones, cepillos de dientes, entre otros. Se realizaron talleres de gestión cotidiana del riesgo en las cañadas urbanas.

Se logró la estrategia de pares en adolescentes escolarizados y líderes de alojamientos y asentamientos. Se desarrolló una estrategia para segunda y tercera edad con afiliación al régimen subsidiado de 17,602 personas, atención para la discapacidad de 560 adultos mayores de alojamientos en salud visual y se inició la formación de líderes cuidadores de tercera edad [24].

Propiciar la participación social. Se constituyó el Consejo territorial de seguridad social en salud y se puso en funcionamiento el servicio de atención al usuario en la Secretaría de Salud [24]. La gestión del riesgo en salud se llevó a cabo como un proceso de participación social cotidiano que involucró diferentes grupos focales entre los cuales es importante mencionar el sistema alerta – acción con líderes de los asentamientos y los barrios, adolescentes y personas de la tercera edad, para la gestión del riesgo epidemiológico; la gestión del riesgo en las cañadas urbanas con habitantes de estas áreas y ONGs ambientalistas; el trabajo con las ONG de las 15 gerencias zonales para concertar las prioridades de salud pública cuando se constituyó el Forec. Así mismo hubo un grupo focal entre Secretaría Departamental y Secretaría Municipal de Salud.

Políticas públicas saludables. Se desarrolló la coordinación interinstitucional y la intersectorialidad con mesas de trabajo para nutrición y seguridad alimentaria, violencia y trauma y el Consejo Físico Ambiental. También se asumieron las competencias entregadas por el Instituto Seccional de Salud del Quindío (ISSQ) en cuanto a vigilancia y control de IPS [24].

3. CONCLUSIONES

La Secretaría de Salud del Municipio de Armenia ante el terremoto del 25 de enero de 1999 adoptó un modelo de Atención Primaria en Salud al cual denominó Gestión del Riesgo que tenía los componentes de atención a las personas, atención al ambiente, vigilancia en salud pública y educación básica en situación de desastre en el contexto de ciudad educadora. El enfoque de la estrategia fue la gestión cotidiana del riesgo; es decir, el riesgo se identificó tanto en atención a las personas como en atención al ambiente, para analizarlo y buscar alternativas de solución diariamente. Se puede afirmar que al revisar los informes se hacía un análisis de las amenazas y se buscaban alternativas de solución de manera cotidiana, y que se atendieron prioridades en salud pública en cuanto a la salud física y mental de las personas y su convivencia social, así como las prioridades en el ambiente, en agua potable y saneamiento básico.

La fecha del terremoto del eje cafetero antecede a los marcos de referencia vigentes y es posible que los aprendizajes de ese desastre hayan aportado a la actual construcción conceptual y normativa, confirmando que el desastre es siempre una dolorosa oportunidad de aprendizaje y que ese aprendizaje es casi una obligación social para la gestión del riesgo; es por esto que en la conclusión se revisan las lecciones aprendidas en Armenia en el contexto de las prioridades del Protocolo de Sendai.

Prioridad 1: Comprender el riesgo de desastres. En Armenia se trabajó cotidianamente sobre la gestión del riesgo en salud después del desastre.

Prioridad 2: Fortalecer la gobernanza del riesgo de desastres para gestionar dicho riesgo. La estrategia de Atención primaria en Salud permitió que los diferentes actores (instituciones públicas, privadas y ONG de carácter local y nacional) participaran en las áreas de la estrategia tales como atención a las personas, atención al ambiente, vigilancia en salud pública y educación básica en situación de desastre en el contexto de ciudad educadora.

Prioridad 3: Invertir en la reducción del riesgo de desastres para la resiliencia. La Secretaría de Salud y el municipio reorganizaron sus prioridades para la atención del desastre con su personal inicialmente y con coordinación interinstitucional, intersectorial y tempranamente con ayuda de organizaciones nacionales e internacionales. Y posteriormente el nivel nacional organizó el fondo para la reconstrucción con quien se continuó la coordinación.

Prioridad 4: Aumentar la preparación para casos de desastre a fin de dar una respuesta eficaz y para reconstruir mejor en los ámbitos de la recuperación, la rehabilitación y la reconstrucción. El nivel nacional lideró y reorganizó el marco normativo, la política y el sistema de gestión de riesgo de desastres en Colombia.

Si bien el presente trabajo se llevó a cabo para identificar las lecciones aprendidas en Armenia a raíz del terremoto hace 20 años es necesario, ahora que se prepara esta publicación, reconocer a la pandemia por Covid como el mayor desastre registrado hasta ahora por la humanidad, el cual ha puesto en evidencia que el riesgo sigue en ascenso y los patrones de riesgo y desastre son cada vez más complejos, tal como plantea el Informe de evaluación regional sobre el riesgo de desastres en América Latina y el Caribe [25]. Así mismo, como puede verse en la figura el presente desastre ha afectado profundamente a los seres humanos, su salud física y mental, su calidad de vida y su supervivencia a pesar que la infraestructura física continúa en crecimiento.

PUNTOS CLAVE

1. Cuál es el concepto de gestión del riesgo en salud.
2. Cuáles son las prioridades en gestión del riesgo en salud.
3. Cuál es el marco conceptual y normativo sobre gestión del riesgo en salud en situación de desastres.
4. Cómo fue el manejo del riesgo en salud durante el desastre generado por el terremoto de 1999 en el Municipio de Armenia Quindío.

PREGUNTAS A RESOLVER

En este espacio es importante preguntarse si los aprendizajes que dejó el terremoto del eje cafetero con respecto a la gestión del riesgo en salud pública tienen vigencia frente a los desastres actuales como la pandemia Covid o los patrones de riesgo y desastre son cada vez más complejos que están por venir.

4. MATERIALES Y MÉTODOS

Estudio descriptivo de corte, con base en la información generada por la Secretaría de Salud del Municipio de Armenia durante el desastre generado por el terremoto de 1999.

CONFLICTO DE INTERESES

La autora manifiesta no tener conflicto de intereses

AGRADECIMIENTOS

A la Secretaría de Salud de Armenia, que permitió la revisión de los informes generados durante el Desastre posterior al terremoto de 1999. A la Organización Panamericana de la Salud (OPS), por su autorización para citar el material de la OPS en el presente documento.

IDENTIFICACIÓN DE AUTOR

Olga Alicia Nieto-Cárdenas <http://orcid.org/0000-0002-0909-3528>

BIBLIOGRAFÍA

1. Organización Mundial de la Salud. (2002). *Riesgos para la salud. Informe de la salud en el mundo*. OMS Ginebra.
2. De Almeida, N. Catiel, L.D. & Ayes, J.R. (2009). Riesgo: concepto básico en epidemiología. *Salud colectiva*, 5, 323-344. <https://doi.org/10.18294/sc.2009.238>
3. OPS/OMS (Organización Panamericana de la Salud. Organización Mundial de la Salud). (2019, 11 de octubre). *Centro de conocimiento en salud pública y desastres*. <http://saludydesastres.info>
4. Resolución 412 de 2000. Ministerio de Salud y Protección Social. Febrero 25 de 2000. Bogotá, D.C.
5. Resolución 1841 de 2013. Plan Decenal de Salud 2012-2021. Ministerio de Salud y Protección Social. Mayo 28 de 2013. Bogotá, D.C.
6. Ministerio de Salud y Protección Social. (2015). *Gestión integral del riesgo en salud*. Comité Ampliado. Bogotá, D.C.
7. Ministerio de Salud y Protección Social. (2008). *Sistema de administración de riesgos*. Resolución 1740 de 2008. Bogotá, D.C.
8. Ministerio de Salud y Protección Social (2018). *Ruta integral de atención para la promoción y mantenimiento de la salud*. Resolución 3280 de 2018. Bogotá, D.C.
9. Ministerio de Salud y Protección Social. (2019, 4 de noviembre). *Rutas integrales de atención en salud (RIAS)*. <https://www.minsalud.gov.co>
10. Ministerio de Salud y Protección Social. (2015). *Presentación Rutas Integrales de Atención en Salud (RIAS)*. Bogotá, D.C.
11. Ley 1523 de 2012. Por la cual se adopta la política nacional de gestión del riesgo de desastres y se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y se dictan otras disposiciones. Congreso de Colombia. Abril 24 de 2012. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=47141>
12. Constitución Política de Colombia. Congreso de la República. 1991. Bogotá, D.C.
13. Gómez, A. (2014). Marco conceptual y legal sobre la gestión del riesgo en Colombia. *Revista Monitor Estratégico*, 5,4-11.
14. UNDRR (United Nations Office for Disaster Risk Reduction). (2015). *Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres 2015-2030*. <https://www.unisdr.org/files/43291spanishsendaiframeworkfordisasterri.pdf>
15. Organización Mundial de la Salud. (2016). *Reglamento Sanitario Internacional*. 3ed. OMS. Ginebra.
16. Organización panamericana de la salud. OPS. (2000). *El impacto de los desastres en la salud pública*. Ed. Noji, E.K. Bogotá, D.C.
17. Organización Panamericana de la Salud. Organización Mundial de la Salud. OPS/OMS. (s.f.). *El Agua en situaciones de emergencia*. División de Salud Ambiente. Washington D.C.
18. Ministerio de Salud. (2012). *Cartilla ola invernal*. Bogotá, D.C.
19. Organización Panamericana de la Salud. (2006). *Guía práctica en situación de desastres. Series manuales y guías sobre desastres No. 7*. J. Rodríguez, M. Zaccarelli & D. Ricardo Pérez (Eds). OPS. Washington D.C.
20. Organización Panamericana de la Salud (OPS/OMS). (2002). *Protección de la salud mental en situaciones de desastres y emergencias*. Serie de manuales y guías sobre desastres. Washington, D.C.

21. OPS-OMS (Organización Panamericana de la Salud. Organización Mundial de la Salud). (2010). *Guía técnica de salud mental en situaciones de desastres y emergencias*. Washington D.C.
22. Secretaría de Salud de Armenia. (1999). *Perfil de las urgencias atendidas durante el desastre de enero de 1999*. Bedoya, H. Gutiérrez, J.G. Armenia Quindío.
23. Secretaría de Salud de Armenia. (1999). *Operatividad de la Estrategia de Atención Primaria en Salud*. Armenia.
24. Secretaría de Salud de Armenia. (1999). *Informe de gestión y resultados 1999*. Armenia Quindío.
25. Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres (UNDRR). (2021). *Informe de evaluación regional sobre el riesgo de desastres en América Latina y el Caribe*.

CAPÍTULO
15

Preparación de respondedores de emergencias en el Quindío: un estudio sobre los estilos de afrontamiento y factores de resiliencia en un grupo de bomberos voluntarios

Olga Liliana Pineda López^{1*}, Joan Sebastian Arbeláez Caro¹, Luz Stela Quintana Hernández¹, Laura Vanessa Corrales Brand², Valentina Ospina Poveda² & Carla María Zapata Rueda²

¹Universidad de San Buenaventura Medellín, extensión Armenia (Quindío). Dirección: Barrio Sesenta Casas, Cra. 23d #4-07, Armenia, Quindío.

²Universidad de San Buenaventura. Dirección: Carrera 56C N° 51-110 Centro – Medellín, Antioquia.

*Autor de contacto. Docente investigadora de la Universidad de San Buenaventura Medellín extensión Armenia.
Correo: olga.pineda@usbmed.edu.co

Resumen

Los respondedores de emergencias son la primera línea de apoyo para la atención de las complejidades que implica cualquier desastre. Sin embargo, los respondedores se someten a un gran estrés emocional, adversidad y riesgos laborales durante las emergencias con potenciales efectos sobre su salud mental. No solo existe un vacío institucional de la atención de la salud mental de los respondedores, sino que su salud mental debe configurarse como una condición específica de su formación. Se plantea este ejercicio como respuesta al vacío institucional de la atención de la salud mental de los respondedores de emergencias. El objetivo de este capítulo es predecir los factores de resiliencia ante eventos estresantes según los estilos de afrontamiento presentes en un grupo de bomberos voluntarios del departamento del Quindío (Colombia). Se empleó un método cuantitativo, descriptivo-correlacional con alcance predictivo. La población objeto fueron los bomberos voluntarios del departamento del Quindío, la

muestra se eligió mediante un muestreo no probabilístico de tipo intencional ($n = 35$). Se aplicó una ficha de caracterización, la escala de estrategias Coping modificada (EEC-M) y la escala de resiliencia (EA). Sentirse bien es predicho por la autonomía ($R^2 = 0.83$, $\beta = 1.030$, $p = .00$), búsqueda de apoyo social ($R^2 = 0.83$, $\beta = .979$, $p = .00$) y la reevaluación positiva ($R^2 = 0.83$, $\beta = .403$, $p = .02$). Se encontró que la búsqueda de apoyo social es influenciada por la ciudad de residencia ($F(3, 168) = 4.098$, $p = .03$), el estado civil ($F(2, 242) = 5.878$, $p = .02$), antecedentes médicos ($F(1, 376) = 9.135$, $p = .01$). Percepción de apoyo familiar ($F(2, 311) = 7.557$, $p = .01$), síntomas de ansiedad ($F(1, 378) = 9.178$, $p = .01$) y la ideación suicida ($F(1, 251) = 6.117$, $p = .03$). Se concluye que las estrategias de afrontamiento predicen en determinada proporción la resiliencia. La resiliencia es un factor fundamental en la formación integral de los bomberos voluntarios.

Palabras clave: voluntarios, bomberos, afrontamiento al estrés, resiliencia, salud mental.

Preparedness of emergency responders in Quindío: a study on coping styles and resilience factors in a group of volunteer firefighters

Abstract

Emergency responders are the first line of support in dealing with the complexities of any disaster. However, responders are subjected to great emotional stress, adversity, and occupational hazards during emergencies, potentially affecting their mental health. There is an institutional gap in mental health care for responders, so their mental health must be configured as a specific training condition. This exercise is proposed to respond to emergency responders' institutional gap in mental health care. The objective of this chapter is to predict the resilience factors to stressful events according to the coping styles present in a group of volunteer firefighters from the department of Quindío (Colombia). The methodological design was developed using a quantitative, descriptive-correlational approach that responds to a quasi-experimental design with predictive impact. The target population was volunteer firefighters from the Department of Quindío; the sample was chosen through an intentional non-probability sampling ($n = 35$). A characterization sheet, the modified Coping Strategies Scale (CSS-R), and the resilience scale (RS) were applied. It was found that the factor feeling good is predicted by the autonomy ($R^2 = 0.83$, $\beta = 1.030$, $p = .00$), by the search for social support ($R^2 = 0.83$, $\beta = .970$, $p = .00$) and for the positive reevaluation ($R^2 = 0.83$, $\beta = .403$, $p = .02$). It was found that the search for social support is influenced by the city of residence ($F(3, 168) = 4.098$, $p = .03$), marital status ($F(2, 242) = 5.878$, $p = .02$),

medical history ($F(1, 376) = 9.135, p = .01$), Perception of family support ($F(2, 311) = 7.557, p = .01$), anxiety symptoms ($F(1, 378) = 9.178, p = .01$) and suicidal ideation ($F(1, 251) = 6.117, p = .03$). It is concluded that the Coping Strategies predict resilience in a certain proportion. Resilience is a fundamental factor in the comprehensive training of volunteer firefighters.

Keywords: Volunteers, firefighters, coping, resilience, mental health.

1. INTRODUCCIÓN

La promoción integral de las personas y de las comunidades es uno de los objetivos primordiales de la gestión del riesgo de desastres. No obstante, para realizar una atención integral de las comunidades y de sus individuos, es necesario conocer las herramientas psicológicas y de salud mental con las que cuentan. Así, la psicología de la gestión del riesgo de desastres y el conocimiento del factor psicológico se ha posicionado como un novedoso campo en el interior de la psicología científica [1]. Conocer los factores psicológicos inmersos en la gestión del riesgo de desastres implica un análisis exhaustivo de las condiciones sociales macro y micro que influyen en la estructura psicológica individual y social con las que se enfrentará una emergencia [2]. Las situaciones que se desencadenan producto de los eventos que generan emergencias en las comunidades, las atienden instituciones que previamente realizan una preparación integral de frente a la atención de la emergencia y también en la mitigación de los factores de riesgo. Estas instituciones evolucionan en la medida que lo hacen los procesos sociales que están en la base de los estados de vulnerabilidad. Una de estas instituciones, son los bomberos voluntarios.

Los bomberos voluntarios, en toda su historia como institución han aportado conocimiento sobre la reacción inmediata ante eventos de desastre. La presente investigación se enfoca en el reconocimiento de las estrategias de afrontamiento y de resiliencia en los bomberos voluntarios del departamento del Quindío (Colombia), con el fin de describir los factores psicológicos en personas que constantemente actúan en los tres procesos de la gestión del riesgo de desastres: conocimiento del riesgo, reducción del riesgo, y manejo de desastres incluyendo la atención de emergencias.

2. LOS BOMBEROS VOLUNTARIOS COMO RESPONDEDORES DE EMERGENCIAS

Las instituciones voluntarias reúnen a personas cuya motivación es un factor de estudio para la psicología. La motivación que lleva a una persona a convertirse en voluntario de cualquier institución se estudia desde diversas teorías. La de mayor aceptación es la teoría de la autodeterminación [3-5]. En la teoría de la autodeterminación, la motivación a adherirse a grupos sociales responde a tres necesidades básicas: competir, ser autónomo y relacionarse.

Caja 1. Glosario

- **Bomberos voluntarios de Colombia:** Asociación de voluntarios de emergencias y desastres articulada mediante la Ley 1575 de 2012.
- **Resiliencia:** capacidad de retorno al estado previo a una situación de estrés.
- **Afrontamiento:** capacidad de enfrentar una situación estresante mediante patrones conductuales, emocionales y cognitivos.

Desde los modelos de indagación empírica se ha establecido que la motivación que lleva a la persona a convertirse en un voluntario implica cuatro necesidades que se desprenden de la establecidas en la teoría de la autodeterminación: realización como persona, altruismo (gregarismo), aceptación social y adaptación económica [6-8]. No sólo el ser voluntario responde a necesidades psicológicas, sino que también responde a cuestiones sociales de fondo como intereses económicos y políticos [9].

Sin embargo, son Latané y Darley [10] quienes proponen que la estructura psicológica que da marco a la toma de decisiones de un voluntario responde específicamente a una forma de altruismo. No obstante, el altruismo es una condición muy vaga y no ofrece una explicación acertada sobre la motivación del voluntarismo. Cabrera-Darias & Marrero-Quevedo [11] proponen que los motivos de un voluntario responden a los siguientes elementos: adquisición de aprendizajes, mejoramiento de valores, mejoramiento personal, de protección “reducir la culpa por ser más afortunado que los otros” [11] (p. 792), y de oportunidades sociales y profesionales. En función de lo anterior, se puede concluir que el voluntariado apunta en sus motivaciones a responder a necesidades personales y sociales. Dávila y Díaz [12] concluyen que el voluntariado apunta en general, a potenciar la satisfacción vital.

Caja 2. Normativa en Colombia sobre voluntarios y respondedores de emergencias

- Ley 1523 de 2021: marco general para la gestión de riesgo de desastres.
- Resolución 927 de 2017: Por la cual se reglamenta el desarrollo y operación del Sistema de Emergencias Médicas.
- Ley 1575 de 2012: Bomberos Colombia.
- Ley 852 de 2003: Cruz roja de Colombia.
- Decreto 2068 de 1984: defensa civil.

La importancia de los bomberos es imperativa en Colombia. Para el año 2019, según estadísticas de la Unidad Administrativa Especial de Bomberos [14] se atendieron 37,976 emergencias, siendo la más recurrente la atención prehospitalaria (7,677 casos), los accidentes de tránsito (5,504 casos), y la categoría “otros” (4,955 casos). Los departamentos en donde más solicitaron los bomberos voluntarios fueron Valle del Cauca (10,177 casos) y Antioquia (9,845 casos), específicamente el departamento del Quindío reportó 322 emergencias que requirieron a los bomberos. Una de las problemáticas más atendidas en Colombia desde la prevención, mitigación y atención fueron los incendios forestales. El departamento del Meta fue el que mayor requirió la asistencia de los bomberos con 241 casos.

La preparación bomberil en Colombia dispone que se realicen pruebas psicológicas junto con las físicas con el fin de realizar pruebas de ingreso y promoción según se define en la ley 1575 de 2012 [14]. Además, la resolución 661 de 2014 del Ministerio del Interior (Art. 60) dispone que la instrucción bomberil debe considerar la formación del ser, lo que implica atención psicológica, habida cuenta de los riesgos físicos y psicológicos que implican la profesión de bombero.

Algunos investigadores proponen que el acondicionamiento integral de la formación bomberil en Colombia [15,16], así como en otros lugares del mundo, no considera algunas condiciones psicológicas como la capacidad de resiliencia y las estrategias de afrontamiento de los futuros bomberos. La psicología propone que estas dos variables son fundamentales para entender cómo funciona el sujeto de frente a una emergencia o simplemente, una situación de crisis. En general, el afrontamiento y la resiliencia se entrecruzan como factores psicológicos que predisponen al sujeto a recuperarse de un evento estresante [17]. Los eventos estresantes sucederán en todas las etapas del ciclo vital, pero dejarán una huella particular dependiendo de si se fortalecieron o no las estrategias de afrontamiento, y cómo éstas operan en la resiliencia [18]. Tal como se presenta en la **Figura 1**, la relación entre ambas no es de solapamiento, en cambio, de cooperación para la reacción ante situaciones de riesgo como la implica la labor bomberil.

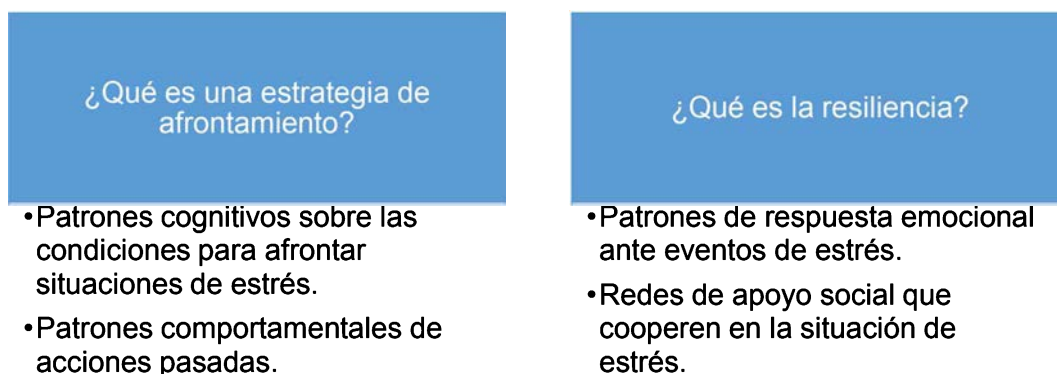


Figura 1. Definiciones de estrategias de afrontamiento y resiliencia. Nota: elaboración propia

De los dos factores citados, la resiliencia resulta ser particularmente difícil de conceptualizar y abordar como constructo de investigación. Algunos autores afirman que la resiliencia es connatural al sujeto y que fortalecerla es por tanto una tarea innecesaria. En palabras de Ribes [19], la resiliencia en el campo psicológico se aduce a “condiciones previas y posteriores a un proceso. Representan condiciones por lo tanto estables que no están en transformación, sino que son condiciones de existencia” (p. 240). Por el contrario, las estrategias de afrontamiento son disposiciones adquiridas a lo largo del ciclo vital que se reorientan de acuerdo a la capacidad de adaptación del sujeto [20]. La interdependencia de ambos factores está dada para el presente estudio bajo un valor predictivo. Es preciso entonces profundizar, aunque de manera sucinta ambos constructos.

La resiliencia como concepto ha sido siempre un tema de debate [21]. Desde su transposición como concepto de la física, la resiliencia anidó muy bien en las ciencias médicas, principalmente en las relacionadas con la salud mental [22], ya que literalmente el concepto atañe a la capacidad de un cuerpo de restablecerse después de un evento contrariamente físico, en el caso de la salud mental, un evento estresante. La resiliencia es en esencia una capacidad del sujeto, una capacidad-resultado de un grupo de procesos que le subyacen [23-25]. El constructo de resiliencia se ha perfilado como una variable de estudio en los últimos años dentro de la investigación de la psicología clínica [21], con una situación

crítica a nivel epistemológico marcada por la delimitación del constructo entre ser un proceso o una capacidad. Wagnild y Young [26], a partir de los hallazgos de la evidencia clínica, se enfocaron a estudiar la resiliencia como una capacidad a la que le subyacen tres dimensiones: capacidad de autoeficacia, capacidad de propósito y sentido de vida, y evitación cognoscitiva. A su vez, estas dimensiones se descomponen en: satisfacción personal, sentirse bien solo, confianza en sí mismo, ecuanimidad, y perseverancia.

Por otro lado, la siguiente variable de estudio son las estrategias de afrontamiento. Como se describió previamente, con estrategias de afrontamiento hacemos alusión a un conjunto de habilidades que el sujeto aprende para hacer frente a las situaciones del vivir psicológico. La condición básica de las estrategias de afrontamiento es que son altamente dinámicas. Los autores que son referencia acerca de la estrategia de afrontamiento son Lazarus y Folkman [27], quienes describen el afrontamiento (*coping*) como “aquellos esfuerzos cognitivos y conductuales constantemente cambiantes que se desarrollan para manejar las demandas específicas externas y/o internas que son evaluadas como excedentes o desbordantes de los recursos del individuo” (p. 140). La estrategia de afrontamiento dista de la capacidad de resiliencia al enfocarse en la respuesta del sujeto para restablecer el *continuum* del sujeto. Por su parte, las estrategias de afrontamiento sintetizan la forma en cómo el sujeto se enfoca en el evento.

Lazarus [28] plantea que las estrategias de afrontamiento se estudian desde la psicología positiva, y que las estrategias de afrontamiento se enfocan en tres elementos: el problema, la emoción que deviene del problema y la valoración cognitiva de la situación. Lazarus y Folkman [27] consideraron las estrategias de frente al problema y de frente a la emoción, de ellas dos se facilitan las conductas, las cogniciones y las emociones que ayudan al sujeto a gestionar la situación. La escala referencia para evaluar las estrategias de afrontamiento que desarrolla Lazarus y Folkman [27] se denomina “*Ways of Coping instrument*”, según Londoño et al. [29] se componía de los siguientes factores: “acción directa, inhibición de la acción, búsqueda de información y una categoría compleja designada como afrontamiento intrapsíquico o cognitivo” (p. 72). La evolución de dicho instrumento fue dada por Charot y Sandín [30] que definieron las siguientes estrategias de afrontamiento: “1) Focalización en la situación problema, 2) Autocontrol, 3) Reestructuración cognitiva, 4) Búsqueda de apoyo social, 5) Religión o espiritualidad, 6) Búsqueda de apoyo profesional, 7) Autofocalización negativa, 8) Expresión emocional abierta y 9) Evitación” [p. 81]. Ortega y Salanova [31], advierten sobre el viraje del constructo de estrategias de afrontamiento al campo de la psicología positiva, en cualquiera de los casos, las estrategias de afrontamiento se han estudiado también en el contexto de la psicología clínica y en campos emergentes como el de la psicología de la gestión del riesgo.

Las estrategias de afrontamiento, al igual que las condiciones o factores de resiliencia, se han abordado en el contexto de la psicología de la gestión del riesgo de desastres. Sin embargo, el afrontamiento se indaga como un factor individual antes que grupal, así han apuntado las investigaciones de García [32] en el departamento de Caldas (Colombia) y Salgado y Lería [33] en Atacama (Chile). Las dos investigaciones apuntan a que la calidad de las estrategias de afrontamiento; es decir, la forma en cómo los sujetos se relacionan con el problema y con la emoción que deriva de la situación estresante imprime una huella en la estructura psicológica y posibilita posteriormente factores de riesgo o protección para la salud mental. De lo anterior derivan las preguntas: ¿cuáles son las estrategias de afrontamiento y factores de resiliencia presentes en una muestra de bomberos voluntarios y en qué medida se relacionan? Además, ¿en qué medida, junto con otras características sociodemográficas, las estrategias de afrontamiento predicen la resiliencia como un elemento significativo de la prevención en salud mental en instituciones de respuesta a emergencias de desastres?

Los bomberos voluntarios por las características de su profesión poseen posiblemente una capacidad de resiliencia alta dadas las estrategias de afrontamiento positivas comunes a las condiciones por las que se motivaron para ser voluntarios [6, 34-36]. Por tanto, el estudio parte de la hipótesis que estrategias de afrontamiento predicen los factores de resiliencia en una muestra de bomberos voluntarios. De tal manera que conocer las estrategias de afrontamiento prevalentes y presentes en un modelo predictivo significativo, puede desarrollarse y lograrse una mejor intervención en salud mental en los respondedores de emergencia.

3. ANTECEDENTES DE ESTUDIO

Sin duda, los estudios sobre estrategias de afrontamiento de respondedores lo han analizado en independencia de los factores de resiliencia aportando al desarrollo de un marco teórico para desarrollar nuevas hipótesis. Nuestro trabajo, en contraste, conjuga dos variables para estudiar los conceptos afrontamiento y resiliencia en el contexto de los bomberos voluntarios del departamento del Quindío (Colombia). Una primera investigación, llevada a cabo por Sainz [36], se abordaron las estrategias de afrontamiento y su impacto emocional en voluntarios de emergencias, mediante un análisis ex post, de orden cualitativo, abordó las experiencias de bomberos voluntarios en situaciones estresantes, diferenció tres tipos de estrategias de frente a la salud mental: estrategias perjudiciales, operativas y defensivas.

Moreno-Jiménez et al. [37] estudiaron la relación del *burnout* con las estrategias de afrontamiento, y encontraron que hay una relación inversa entre tener pocas estrategias de afrontamiento con la aparición del *burnout*. Explican que la práctica profesional de los bomberos voluntarios implica un elevado nivel de *burnout* y no contar con estrategias de afrontamiento adecuadas, hace que el enfoque no se dé ni a la situación, ni a la emoción, generando así un alejamiento personal.

En un análisis de caso reportado por Pujadas y Pérez-Pareja [38] describieron en un sujeto las implicaciones que genera el elevado nivel de estrés al que se exponen los bomberos voluntarios y cómo este afecta al sujeto y se revierte en síntomas asociados a diferentes nosologías principalmente al estrés postraumático. Los analistas coinciden en que la regulación emocional que está implicada en una adecuada toma de decisiones, lo que para el caso de los bomberos es una habilidad vital, se ve influenciada por las estrategias de afrontamiento que este adopte. De igual manera, estrategias de afrontamiento inadecuadas como en el caso que exponen Pujadas y Pérez-Pareja [38], están implicadas en un bajo nivel de resiliencia.

En un estudio realizado por Pilatti y Martínez [39] se abordó la relación de la auto-eficacia y la resiliencia en bomberos voluntarios en Buenos Aires (Argentina). Su marco teórico se afina en el modelo de la psicología positiva, de igual manera que el presente, usaron medidas cuantitativas, los investigadores encontraron correlaciones positivas respecto a lo que denominaron como “capital psíquico”, esto es entre la autoeficacia y la resiliencia aducen esta correlación a los elementos de configuración personal de los bomberos voluntarios.

Marín et al. [40] indagaron por la relación entre las estrategias de afrontamiento y la salud mental de bomberos voluntarios y no voluntarios en Chile. Los investigadores describieron los factores que en conjunto denominan estrategias de afrontamiento, encontrando valores típicos en la población, lo que se relaciona con el adecuado nivel de salud mental.

Díaz [41] expone particularmente los riesgos psicosociales que afectan la labor de los bomberos en Colombia, específicamente en el Valle del Cauca. A partir de un análisis cualitativo, Díaz [41] encuentra que el desarrollo de la labor bomberil es altamente precario y que no cuenta con reconocimiento económico, además dentro de los factores psicológicos, encontró que hay un elevado número de bomberos de avanzada edad, además poca motivación y esto está implicado en el adecuado desarrollo de la profesión.

En suma, los bomberos voluntarios son una institución de una relevante importancia dentro de la gestión del riesgo de desastres. La ley 1575 que derivó en su organización como institución, plantea retos organizacionales como lo describe Martínez [42]. Sin embargo, como lo plantea Díaz [41] y también a las pocas investigaciones sobre esta población, se requiere un mejor conocimiento sobre las condiciones de salud mental de los bomberos voluntarios en aras de mejorar los procesos de formación integral. Por tal motivo, el objetivo de la presente investigación es predecir los factores de resiliencia ante eventos estresantes según los estilos de afrontamiento presentes en un grupo de bomberos voluntarios del departamento del Quindío (Colombia).

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1 Diseño y muestreo

El presente estudio se desarrolló siguiendo un enfoque cuantitativo (empírico-analítico), de temporalidad transversal, de tipo correlacional con valor predictivo, no experimental. Según lo sugiere Monje [43], las investigaciones que emplean el método descriptivo como enfoque principal, responde a la demarcación y explicación sistemática de las peculiaridades de una población. La población objeto de la investigación fueron los bomberos voluntarios del departamento del Quindío. Los bomberos voluntarios se establecen legalmente según la ley 1575 del año 2012 [14]. La muestra del estudio se eligió mediante un muestreo no probabilístico de tipo intencional.

Se determinaron como criterios de inclusión la firma del consentimiento informado, pertenecer a un cuerpo de bomberos voluntarios del departamento del Quindío (Colombia) y ser mayor de edad. Como criterio de exclusión se estableció la habilidad cognitiva para la respuesta de los instrumentos, para lo cual se aplicó una prueba de tamizaje cognoscitivo eligiendo como punto de corte 23 puntos (el mismo de los autores).

4.2 Consideraciones éticas

La presente investigación contó con el aval del comité de investigaciones y bioético de la Universidad de San Buenaventura Medellín, además el ejercicio de investigación se realizó siguiendo las recomendaciones dispuestas en la Ley 1090 de 2016, Capítulo VII. Se orientó a los participantes en el consentimiento informado que firmaban sobre las consideraciones éticas propias: secreto y buen manejo de la información, derecho a la no participación, derecho a la información, al acompañamiento y respeto por la intimidad.

4.3 Instrumentos

Para llevar a cabo los objetivos del presente estudio, se eligieron los siguientes instrumentos de evaluación.

Mini Mental State Examination (MMSE) siguiendo a Folstein et al. [44]. Este instrumento permite evaluar el deterioro cognitivo medido en cinco dimensiones: Orientación, Memoria inmediata, Atención y cálculo, Lenguaje y praxis constructiva. Según los propios autores, el punto de corte para indicar deterioro cognitivo es 23 puntos para población no clínica. La puntuación máxima es de 35. Este tamizaje es de hetero aplicación. Para la investigación, se eligió para satisfacer el criterio de exclusión.

Ficha de caracterización (ad hoc). Consta de 20 preguntas para aplicar mediante una entrevista individual sobre los siguientes elementos: edad (cuantitativa), género (masculino, femenino, otros), estrato socioeconómico (cuantitativa), ciudad de residencia, tiempo de vinculación a bomberos voluntarios (cuantitativa), estado civil (casado, soltero, unión libre, viudo, otro), tipo de familia (nuclear, monoparental, extensa, otro), antecedentes médicos familiares (si/no), antecedentes médicos personales (Si/No), antecedentes psicológicos familiares (Si/No), antecedentes psicológicos personales, red de apoyo (Si/No), calificación de relaciones familiares (buena, ni buena ni mala, mala), calificación de relaciones con amigos (buena, ni buena ni mala, mala), calificación de relaciones con compañeros bomberos (buena, ni buena ni mala, mala), síntomas de depresión (Si/No), síntomas de ansiedad (Si/No), síntomas de ideación suicida (Si/No), y síntomas de trastorno de estrés postraumático (Si/No).

Escala de estrategias *Coping* modificada (EEC-M) de Londoño et al. [29], con escala tipo Likert de 62 reactivos que tiene por objeto medir las principales estrategias de afrontamiento, agrupados en 12 factores: Solución de Problemas, Apoyo Social, Espera, Religión, Evitación Emocional, Búsqueda de Apoyo Profesional, Reacción Agresiva, Evitación Cognitiva, Expresión de la Dificultad de Afrontamiento, Reevaluación Positiva, Negación y Autonomía. Según su estructura, no se requiere de una puntuación total, sino por cada una de las estrategias de afrontamiento. En el estudio de Londoño et al. [29] realizado en población colombiana, la escala obtuvo un α : 0.84.

Escala de resiliencia (ER), Wagnild y Young [26], escala tipo Likert de 25 reactivos que tiene por objeto identificar el nivel de resiliencia en personas adultas en cinco dimensiones: Satisfacción personal, Ecuanimidad, Sentirse bien solo, Confianza en sí mismo, Perseverancia y satisfacción personal. En un ejercicio de adaptación de la escala a población colombiana se encontró que la escala tiene un $\alpha = 0.84$ [45]. Según su estructura, no se requiere de una puntuación total, sino por cada una de las estrategias de afrontamiento.

4.4 Procedimiento

Una vez se eligieron los modelos teóricos, se procedió a buscar antecedentes enfatizando en los instrumentos de medición. Luego, se hizo la elección y estudio piloto de cada uno de los instrumentos y de la encuesta de caracterización con el equipo de investigación. Se realizó un convenio temporal entre la Universidad de San Buenaventura Medellín, extensión Armenia y los Bomberos Voluntarios del departamento del Quindío gracias al equipo de comandantes en cabeza del capitán departamental. A continuación, se presentaron los instrumentos y convenios, así como el consentimiento informado al comité de bioética de la Universidad de San Buenaventura Medellín, con su aprobación, se gestionó un cronograma en cada una de las estaciones del departamento. La aplicación de las escalas se realizó presencial, la ficha de caracterización y entrevista de tamizaje cognitivo se realizó de manera individual, el ejercicio de recolección de la información tomaba 2 horas aproximadamente en cada estación. En total, el trabajo de campo duró 3 meses, entre mayo a julio de 2019.

4.5 Estrategia analítica

Los resultados se almacenaron en una tabla de datos de Excel que posteriormente se migró al software estadístico SPSS (versión 23). El análisis de la información usó estadística descriptiva para reconocer las medidas de tendencia central y de frecuencia de las características sociodemográficas y encuesta de salud mental realizada en la ficha de caracterización *Ad hoc*, además de los resultados arrojados por las escalas de estudio. Para el caso de los resultados de las estrategias de afrontamiento y factores de resiliencia, se aplicó un análisis de normalidad según el test de Kolmogórov-Smirnov con un nivel de significación del 95%. Posteriormente, se realizaron análisis de correlación que en coherencia con los resultados del análisis de normalidad que indicó que los datos provienen de una distribución normal, se aplicó una prueba de correlación de Pearson. Sin embargo, cuando se correlacionaron variables cuantitativas y cualitativas se usó el estadístico Rho de Spearman.

A continuación, se usó un modelo de análisis de varianza (MANOVA) para contrastar la hipótesis de influencia de los distintos niveles de los factores fijos categóricos incluidos en la ficha de caracterización (edad, género, estrato socioeconómico, estado civil, tipo de familia, trabajo alterno, antecedentes médicos y/ psicológicos, red de apoyo, calificación de relaciones familiares, con amigos y compañeros, percepción de síntomas de ansiedad, depresión y trastorno de estrés postraumático) sobre las variables dependientes que fueron las estrategias de afrontamiento. Se indican en los resultados solo aquellos factores independientes que influyen significativamente sobre las dependientes.

Por último, se realizó una regresión lineal múltiple y se probaron sus supuestos de no multicolinealidad y linealidad. Las variables criterios fueron los diferentes factores de resiliencia (satisfacción personal, ecuanimidad, sentirse bien solo, confianza en sí mismo, perseverancia y satisfacción personal) y las variables predictoras fueron las estrategias de afrontamiento (solución de problemas, apoyo social, espera, religión, evitación emocional, búsqueda de apoyo profesional, reacción agresiva, evitación cognitiva, expresión de la dificultad de afrontamiento, reevaluación positiva, negación y autonomía.). Cada uno de los factores de resiliencia fue un modelo independiente y se usó en todos como método de entrada: “introducir”. Se exponen en los resultados los modelos significativos según el ANOVA $p < .05$.

Tabla 1. Frecuencias a respuestas de entrevista de caracterización.

		N	%
¿Cuál es su género?	Hombre	28	80.0%
	Mujer	7	20.0%
¿Cuál es su ciudad de residencia?	Armenia	19	54.3%
	Montenegro	5	14.3%
	Circasia	6	17.1%
	Salento	1	2.9%
	Pijao	4	11.4%
¿Cuál es su estado civil?	Casado	8	22.9%
	Soltero	13	37.1%
	Unión libre	14	40.0%
	Viudo	0	0.0%
	Otro	0	0.0%

¿Cómo está conformada su familia?	Nuclear	29	82.9%
	Monoparental	5	14.3%
	Extensa	0	0.0%
	Otro	1	2.9%
¿Trabaja actualmente?	Si	26	74.3%
	No	9	25.7%
Antecedentes médicos familiares	Si	12	34.3%
	No	23	65.7%
Antecedentes psiquiátricos familiares	Si	3	8.6%
	No	32	91.4%
Antecedentes médicos personales	Si	7	20.0%
	No	28	80.0%
Antecedentes psicológicos personales	Si	4	11.4%
	No	31	88.6%
¿Tiene usted una red de apoyo?	Si	27	77.1%
	No	8	22.9%
¿Cómo califica las relaciones con sus familiares?	Mala	1	2.9%
	Ni buena ni mala	6	17.1%
	Buena	28	80.0%
¿Cómo califica las relaciones con sus amigos?	Mala	0	0.0%
	Ni buena ni mala	3	8.6%
	Buena	32	91.4%
¿Cómo califica las relaciones con sus compañeros bomberos?	Mala	4	11.4%
	Ni buena ni mala	3	8.6%
	Buena	28	80.0%
¿Ha tenido alguna vez síntomas de depresión?	Si	9	25.7%
	No	26	74.3%
¿Ha tenido alguna vez síntomas de ansiedad?	Si	12	34.3%
	No	23	65.7%
¿Ha tenido alguna vez ideación suicida?	Si	3	8.6%
	No	32	91.4%
¿Ha tenido alguna vez síntomas de estrés posttraumático?	Si	4	11.4%
	No	31	88.6%

En la **Tabla 2** se presentan las medidas de tendencia central acerca de los factores de la escala de estrategia de afrontamiento y factores de resiliencia.

Tabla 2. Medidas de tendencia central de las escalas de estudio.

Constructo	Factores	Media	Desviación típica
Estrategias de afrontamiento	Solución de problemas	35.60	9.11
	Búsqueda de apoyo social	23.60	9.80
	Espera	24.00	9.37
	Religión	26.09	9.15
	Evitación emocional	25.97	8.11
	Búsqueda de apoyo profesional	14.66	7.30
	Reacción agresiva	12.14	4.75
	Evitación cognitiva	16.40	5.04
	Reevaluación positiva	18.83	5.11
	Expresión de la dificultad de afrontamiento	12.43	4.24
	Negación	8.74	3.86
	Autonomía	6.60	3.00
Factores de resiliencia	Confianza en sí mismo	38.23	9.40
	Perseverancia	36.11	8.84
	Satisfacción personal	20.89	6.11
	Ecuanimidad	17.97	4.36
	Sentirse bien	13.40	4.21

Nota: elaboración propia

El siguiente grupo de análisis, partió de la comprobación del supuesto de normalidad en los resultados de las escalas y los factores fijos considerados para este estudio como las variables independientes.

El primer estudio fue el análisis de la correlación, se encontró en las estrategias de afrontamiento, que los factores que se relacionan con la solución de problemas fueron: el trabajo actual, en la cual se encontró una relación moderada ($r = 0.405$, $p = .01$) y la percepción de la relación con los compañeros de bomberos ($r = 0.421$, $p = .01$). Con la variable de búsqueda de apoyo social: el trabajo actual, en la que se encontró nuevamente una relación moderada ($r = 0.457$, $p = .01$). En la variable de búsqueda de apoyo profesional, la edad manifestó una relación baja ($r = 0.365$, $p = .03$). La variable de evitación cognitiva tuvo una relación baja con la forma en cómo percibe las relaciones con sus familiares ($r = 0.336$, $p = .04$). Por su parte, la variable de reevaluación positiva, se relacionó de manera baja con haber presentado síntomas de ansiedad ($r^2 = 0.347$, $p = .04$), esa misma relación se observó en esta variable con los síntomas de estrés postraumático ($R = 0.388$; $p = .03$). Acerca de la escala de resiliencia, se encontró que haber tenido síntomas de ansiedad se relaciona de manera moderada e inversa con la ecuanimidad ($r = -0.410$, $p = .01$).

Para la medición de la influencia, se utilizó un modelo inter-sujetos, partiendo de la modelación de las escalas como dependientes de los factores familiares y personales. A continuación, en la **Tabla 3**, se exponen los estadísticos de las variables en las que se identificó influencia significativa.

Tabla 3. Modelo de análisis de varianza (efectos inter-sujetos).

Variables fijas	Variables influencia	Gl	Media cuadrática	F	p
Búsqueda de apoyo social	Ciudad de residencia	3	168.772	4.098	.037
	Estado civil	2	242.111	5.878	.023
	Antecedentes médicos familiares	1	376.311	9.136	.014
	Percepción apoyo familiar	2	311.265	7.557	.012
	Síntomas de ansiedad	1	378.008	9.178	.014
	Ideación suicida	1	251.935	6.117	.035
Evitación emocional	Síntomas de estrés postraumático	2	446.449	7.234	.025
Ecuanimidad	Trabajo	1	43.848	4.820	.056
	Síntomas de depresión	1	76.874	8.450	.017
Sentirse bien	Antecedentes médicos personales	2	102.780	6.020	.037

F: Ratio; p: significación

Por último, se realizó un análisis de probabilidad, en el cual se trató de identificar qué factores predicen las variables de estudio, estas fueron compiladas en la **Tabla 4**.

Tabla 4. Modelo de regresión lineal múltiple (factores dependientes: Factores de afrontamiento)

Factor dependiente	Factor predictor	R²	D-W	Anova	β	p
Confianza en sí mismo	Autonomía	.71	1.83	.00	.557	.02
	Solución de problemas	.71	1.83	.00	.924	.03
Satisfacción personal	Espera	.80	1.91	.00	-1.030	.00
Sentirse bien	Autonomía	.80	1.96	.00	1.030	.00
	Búsqueda de apoyo social	.83	1.96	.00	.979	.00
	Reevaluación positiva	.83	1.96	.00	.403	.02

R²= valor de r cuadrada; D-W= Durbin-Watson; β= Índice beta; p= significación.

5. DISCUSIÓN

El objetivo del estudio fue predecir los factores de resiliencia ante eventos estresantes según los estilos de afrontamiento presentes en un grupo de bomberos voluntarios del departamento del Quindío (Colombia). La discusión versará sobre el análisis de los hallazgos acerca de las variables de estudio.

En Colombia, la resiliencia y las estrategias de afrontamiento han sido constructos ampliamente indagados [46, 47]. Principalmente, se ha asociado las estrategias de afrontamiento como variables predictoras de la resiliencia; además, dicha relación predictiva depende del grupo de estudio. En mayor grado, los modelos de investigación sobre la resiliencia y el afrontamiento pertenecen al campo organizacional de la psicología [48].

La relación entre las dos variables de estudio se dio mediante el análisis de influencia según el análisis de la varianza y según el grado de predicción en un modelo lineal múltiple. El modelo jerárquico establece en un primer momento qué factores de los indagados en la encuesta de datos sociodemográficos influyen en las estrategias de afrontamiento con el fin de indagar qué estrategias predicen los factores de resiliencia. Se encontró que la estrategia de afrontamiento en la que influyen un mayor número de factores sociodemográficos es la de búsqueda de apoyo social. Si bien, las estrategias de afrontamiento en un primer momento son descritas por Lazarus y Folkman [27], es Taylor [49] quien propone el apoyo social particularmente como el principal recurso cognitivo que ayuda en la reelaboración cognitiva y emocional de un suceso estresante. La búsqueda de apoyo social implica una evaluación cognitiva de recursos y el reconocimiento de la necesidad de satisfacción por medio de la relación emocional con otras personas e instituciones, en las que se cuenta la familia, el contexto cultural y la organización a la que se pertenece. Significativamente, la estrategia de apoyo se ha asociado como una estrategia facilitadora del bienestar psicológico y principalmente del bienestar emocional [50-52]. La búsqueda de apoyo se analizó principalmente en poblaciones con algún déficit importante o en contextos de vulnerabilidad [53,54].

Las variables que influyen sobre la búsqueda de apoyo son la ciudad, el estado civil, antecedentes médicos, la percepción de apoyo familiar y el historial de ideación suicida. Se confirma entonces que la búsqueda de apoyo como una herramienta cognitiva es una consecuencia del apoyo social que recibe el sujeto a lo largo de la historia de aprendizajes, y que la percepción de apoyo externo es una estrategia que le permite afrontar situaciones estresantes [55]. El tener antecedentes médicos y psicológicos como la ideación suicida y haber acudido a asistencia social como la familia y la comunidad desarrollaron en los bomberos voluntarios encuestados la estrategia de afrontamiento de búsqueda de apoyo social. En Colombia, gran parte del malestar psicológico consultado tiene que ver con fallos en la estrategia de búsqueda de apoyo, lo cual no permite adecuadas condiciones para el tratamiento y se relaciona con la baja adherencia y reforzamiento de las condiciones de vulnerabilidad y afectación [56].

La búsqueda de apoyo social puede ser un factor determinante sobre la labor de los bomberos voluntarios, ya que se ha descrito en otras investigaciones que el pertenecer a instituciones de voluntarios implica un grado mayor de conexión social [6]. El bombero puede gestionar un mayor número de relaciones sociales por su labor que para el contexto es altamente reconocida, además de reconocerse a sí mismo como un apoyo social al cual pueden acudir personas que se encuentren en condición de vulnerabilidad [57].

Otro de los hallazgos significativos acerca de la influencia entre los factores sociodemográficos y las estrategias de afrontamiento tiene que ver con la relación de influencia entre la evitación y el haber sufrido síntomas de estrés postraumático. La labor de bomberos voluntarios implica un alto riesgo de sufrir impacto por la atención de alguna emergencia [58], esta exposición al riesgo configura una vulnerabilidad psicológica importante. Mediante la aplicación de los instrumentos se encontró que la evitación es una estrategia que se configura gracias a la influencia de síntomas de estrés postraumático. La literatura disponible expone que la evitación es una estrategia de afrontamiento negativa que se desarrolla gracias algunas condiciones psicológicas previas y tiene como objeto la negación del apoyo social o profesional por medio de la evitación cognitiva, lo cual tiene como mayor consecuencia efectos en la regulación emocional [59, 60].

Siguiendo con los hallazgos que permitió el modelo jerárquico, se encontró que el factor de resiliencia de confianza en sí mismo se predice por la autonomía y la solución de problemas, la satisfacción personal se predice inversamente por el nivel de espera y el sentirse bien se predice por autonomía, búsqueda de apoyo social y reevaluación positiva. El sentirse bien sintetiza factores cognitivos y emocionales asociados a la capacidad de resistir y afrontar situaciones estresantes [61, 62]. El sentirse bien en la población encuestada depende del elemento externo asociado a estrategias de búsqueda de apoyo social y autonomía, además de elementos internos asociados a la reevaluación positiva confirmando la constitución cognitiva y emocional del factor mencionado [63]. Sumando al sentirse bien, la persona puede desarrollar la confianza en sí mismo, este factor de resiliencia se asocia también con bienestar psicológico [64, 65].

La evidencia apunta a que la resiliencia es un factor fundamental en el trabajo de los bomberos voluntarios [6], ya que la labor que desarrollan requiere de una preparación física y técnica para afrontar emergencias, pero también una preparación psicológica que permita mantener adecuados indicadores de calidad de vida que se refieren en el bienestar físico y mental. No obstante, si bien se pueden desarrollar modelos de preparación de las condiciones psicológicas, éstas deben considerar la resiliencia como un elemento fundamental [66]. Se ha evidenciado que fomentar la resiliencia es un tema complejo y aún en exploración en el contexto de la investigación psicológica [67]; sin embargo, se puede ayudar a promover estilos de afrontamiento resilientes como los encontrados en la presente investigación.

La principal limitante de la investigación fue el difícil acceso a la población de estudio, además no se indagaron sobre factores familiares, de personalidad y factores relacionados con la práctica de bomberos como una profesión. Se recomienda a partir de la identificación de estas limitaciones realizar posteriores estudios que incluyan el análisis de la percepción de la dinámica familiar, los factores de personalidad y laborales, los cuales se han incluido en modelos teóricos sobre la resiliencia.

6. CONCLUSIONES

Como conclusión del estudio, a partir del análisis jerárquico de la relación entre estrategias de afrontamiento y factores de resiliencia, se encontró que el apoyo social es la estrategia en la que mayoritariamente influyen factores personales del sujeto. Además, Sentirse Bien es el factor de resiliencia que mayormente se predice por las estrategias de afrontamiento. La resiliencia es un elemento fundamental en la promoción de la salud mental de los bomberos voluntarios pues el desempeño de su labor requiere de mantener adecuados indicadores de calidad y bienestar personal.

PUNTOS CLAVE

1. Los Bomberos en Colombia se distribuyen en tres grupos: voluntarios, oficiales y aeronáuticos
2. La formación para la práctica bomberil en cualquiera de las labores bomberiles no incluye la preparación psicológica.
3. La psicología orientada al riesgo de desastres incluye la formación de los voluntarios de emergencias.

4. La resiliencia y el afrontamiento son dos variables implicadas en la atención de emergencias sin alterar la salud mental del voluntario.
5. El apoyo social es la estrategia en la que mayoritariamente influyen factores personales del sujeto, además el factor de resiliencia que mayormente es predicha por las estrategias de afrontamiento es sentirse bien.
6. La formación psicológica para los bomberos debería incluir la dimensión psicológica.

RECOMENDACIONES PARA TOMAR DECISIONES

1. El desarrollo de la labor bomberil implica una exposición a situaciones de impacto emocional que pueden derivar en factores de riesgo de orden psicológico como desregulación del estado emocional individual, patrones de comportamiento desadaptativo y valoraciones cognitivas.
2. La normativa actual es muy débil en la atención de la dimensión psicológica de los bomberos.
3. La estrategia de atención psicológica puede derivar en la formulación de una tarea entre la academia y las instituciones de respondedores.

CONFLICTO DE INTERÉS

El equipo de investigación manifiesta no tener ningún conflicto de interés

AGRADECIMIENTOS

Los investigadores agradecen a los Bomberos Voluntarios del Departamento del Quindío, en cabeza del Capitán Javier Ramírez Flórez.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA CRediT

Administración del proyecto: Olga Liliana Pineda López. Supervisión: Joan Sebastián Arbeláez Caro. Conceptualización: Luz Stela Quintana Hernández. Investigación: Laura Vanessa Corrales Brand y Valentina Ospina Poveda. Redacción, revisión y edición: Carla María Zapata Rueda.

IDENTIFICACIÓN DE AUTORES

Olga Liliana Pineda López	https://orcid.org/0000-0001-8320-8154
Joan Sebastián Arbeláez Caro	https://orcid.org/0000-0001-9935-5781
Luz Stela Quintana Hernández	https://orcid.org/0000-0002-0204-5291
Laura Vanessa Corrales Brand	https://orcid.org/0000-0003-3657-536X
Valentina Ospina Poveda	https://orcid.org/0000-0003-4401-4001
Carla María Zapata Rueda	https://orcid.org/0000-0002-4781-3362

BIBLIOGRAFÍA

1. Gaviria, W., & Zambrano, L. A. (2018). Hacia una psicología social en la gestión del riesgo de desastres. *Tempus Psicológico*, 2(1), 108-128. <https://doi.org/10.30554/tempuspsi.1.2.2569.2019>
2. Páez, D., Arroyo, E., & Fernández, I. (1995). Catástrofes, situaciones de riesgo y factores psicosociales. *Mapfre seguridad*, 57, 43-55.
3. Gagné, M., & Deci, E. L. (2005). Self determination theory and work motivation. *Journal of Organizational Behavior*, 26(4), 331-362. <https://doi.org/10.1002/job.322>
4. Ryan, R. M. (1995). Psychological needs and the facilitation of intrinsic motivation, social development and well being. *American Psychologist*, 63, 397-427.
5. Ryan, R., & Deci, E. (2000). La teoría de la autodeterminación y la facilitación de la motivación intrínseca, el desarrollo social y el bienestar. *American Psychologist*, 55(1), 68-78. <https://doi.org/10.1037/0003-066X.55.1.68>
6. Piedimonte, F., & Depaula, P. D. (2018). Motivación y valores relativos al trabajo en bomberos voluntarios y remunerados argentinos. *Liberabit*, 24(2), 277-294. <https://doi.org/10.24265/liberabit.2018.v24n2.08>
7. Porto, J. B., & Pilati, R. (2010). Escala Revisada de Valores Relativos ao Trabalho: EVT-R. *Psicologia: Reflexão e Crítica*, 23(1), 73-82. <https://doi.org/10.1590/S0102-79722010000100010>
8. Yubero, S., & Larrañaga, M. E. (2002). Concepción del voluntariado desde la perspectiva motivacional: conducta de ayuda vs. altruismo. *Pedagogía Social: Revista Interuniversitaria*, 9, 27-39.
9. Fouce, J. (2009). Voluntariado Social en el Siglo XXI: ¿Movimiento Social o Instrumento Neoliberal? *Intervención psicosocial*, 18(2), 177-190. <https://doi.org/10.5093/in2009v18n2a8>
10. Latané, B., & Darley, J. M. (1970). *The unresponsive bystander: Why doesn't he help?* New York: Appleton-Crofts.
11. Cabrera-Darias, M., & Marrero-Quevedo, R. (2015). Motivos, personalidad y bienestar subjetivo en el voluntariado. *Anales de psicología*, 31(3), 791-801. <https://doi.org/10.6018/analesps.31.3.180921>
12. Dávila, M., & Díaz, J. (2005). Voluntariado y satisfacción vital. *Intervención psicosocial*, 14(1), 81-94.
13. Colombia. Ministerio del Interior (2019). *Emergencias 2019. Bogotá: Unidad Administrativa Especial*. <https://bit.ly/3ggjXir>
14. Colombia. Congreso de la República. (2012). *Ley 1575 de 2012. Por medio de la cual se establece la Ley General de Bomberos de Colombia*. Bogotá: diario oficial.
15. Betancur, C., Cardona, E., Marín, L., & Pineda, A. (2013). *Perfil epidemiológico de los bomberos estructurales de los municipios de Dosquebradas y la Virginia del departamento de Risaralda*. (Tesis de grado). Facultad de ciencias de la salud, Universidad Libre, Pereira.
16. Mora, C., & Montoya, D. (2016). *Acondicionamiento integral para bomberos. Componentes: físico, salud y psicológico*. (Tesis de grado). Facultad de Salud, Corporación Universitaria Adventista de Colombia, Medellín.
17. Mayordomo, T. (2013). *Afrontamiento, resiliencia y bienestar a lo largo del ciclo vital*. (Tesis doctoral). Facultad de psicología, Universidad de Valencia, Valencia.
18. González, M., & Artuch, R. (2014). Perfiles de Resiliencia y Estrategias de Afrontamiento en la Universidad: Variables Contextuales y Demográficas. *Electronic Journal of Research in Educational Psychology*, 12(3), 621-648. <https://doi.org/10.25115/ejrep.34.14032>

19. Ribes, E. (2007). Estados y límites del campo, medios de contacto y análisis molar del comportamiento: reflexiones teóricas. *Acta Comportamentalia*, 15(2), 229-259.
20. Barraza, A. (2007). El campo de estudio del estrés: del Programa de Investigación Estímulo-Respuesta al Programa de Investigación Persona-Entorno. *Revista Internacional de Psicología*, 8(2), 1-30. <https://doi.org/10.33670/18181023.v8i02.48>
21. Piña, J. (2015). Un análisis crítico del concepto de resiliencia en psicología. *Anales de psicología*, 31(3), 751-758. <https://doi.org/10.6018/analesps.31.3.185631>
22. Saavedra, E., & Villalta, M. (2008). Medición de las características resilientes, un estudio comparativo en personas entre 15 y 65 años. *Liberabit*, 14, 31-40.
23. Becoña, E. (2006). Resiliencia: Definición, características y utilidad del concepto. *Revista de Psicopatología y Psicología Clínica*, 11, 125-146. <https://doi.org/10.5944/rppc.vol.11.num.3.2006.4024>
24. Gaxiola, J. C., Frías, M., Hurtado, M. F., Salcido, N. L., & Figueroa, F. (2011). Validación del Inventario de Resiliencia (IRES) en una población del noroeste de México. *Enseñanza e Investigación en Psicología*, 16, 73-83.
25. Vinaccia, S., Quiceno, J. M., & Moreno-San Pedro, E. (2007). Resiliencia en adolescentes. *Revista Colombiana de Psicología*, 16, 139-146.
26. Wagnild, G., & Young, H. (1998). Development and psychometric evaluation of the Resilience Scale. *Journal of Nursing Measurement*, 1(2), 165-178.
27. Lázarus, R. & Folkman, S. (1986). *Estrés y Procesos Cognitivos*. Barcelona: Martínez Roca.
28. Lazarus, S. (2012). Stress, Health, and Coping: Synthesis, Commentary, and Future Directions. in S. Folkman (ed.), *The Oxford Handbook of Stress, Health, and Coping*. Library of Psychology. <https://doi.org/10.1093/oxfordhb/9780195375343.013.0022>
29. Londoño, N., Henao, G., Puerta, I., Posada, S., Arango, D., & Aguirre-Acevedo, D. (2006). Propiedades psicométricas y validación de la escala de estrategias de coping modificada (eec-m) en una muestra colombiana. *Universitas Psychologica*, 5(2), 327-349.
30. Charot, P., & Sandín, B. (1993). *Escala de Estrategias de Coping Revisado (EEC-R)*. Madrid: UNED.
31. Ortega, A., & Salanova, M. (2016). Evolución de los modelos sobre el afrontamiento del estrés: hacia el coping positivo. *Agora de salud*, 2, 285-293. <https://doi.org/10.6035/AgoraSalut.2016.3.30>
32. García, M. (2014). Estrategias de afrontamiento frente al estrés en población juvenil durante un evento socio-natural. *Psicoideas*, 21-30.
33. Salgado, J., & Leria, F. (2018). Estrategias de afrontamiento al estrés y síntomas patológicos en universitarios ante un desastre siconatural de aluvión de barro. *Acta colombiana de Psicología*, 21(1), 170-182. <https://doi.org/10.14718/ACP.2018.21.1.8>
34. Becerra, L., Bail, V., Depaula, P., & Azzollini, S. (2021). Entrenamiento de voluntarios en Primera Ayuda Psicológica y estrategias de afrontamiento. *Actualidades en psicología*, 35(131), 1-18. <https://doi.org/10.15517/ap.v35i131.38911>
35. Peñacoba, C., Díaz, L., Goiri, E., & Vega, R. (2000). Estrategias de afrontamiento ante situaciones de estrés: Un análisis comparativo entre bomberos con y sin experiencia. *Revista de psicología del trabajo y de las organizaciones*, 16(3), 341-356.
36. Sainz, S. (2003). *Estrategias de afrontamiento del Impacto emocional y sus efectos en Trabajadores de emergencias*. (Tesis doctoral). Facultad de Psicología, Universidad Nacional del Rosario, Rosario.

37. Moreno-Jiménez, B., Morett, N., Rodríguez, A., & Morante, M. (2008). La personalidad resistente como variable moduladora del síndrome de Burnout. *Psicothema*, 18(3), 413-418.
38. Pujadas, M., & Pérez-Pareja, J. (2013). Tratamiento de un caso por estrés postraumático. *Revista de casos clínicos en salud mental*, 1, 37-58.
39. Pilatti, N., & Martínez, R. (2015). *Estudio exploratorio de Resiliencia, y Autoeficacia en Bomberos Voluntarios de la Provincia de Buenos Aires*. (Trabajo de grado). Facultad de psicología, Universidad Nacional del Mar de Plata, Buenos Aires.
40. Marín, H., Ramos, N., Astorga, A., & Breinbauer, A. (2017). *Estrategias de afrontamiento psicológico y salud mental en bomberos*. Chile: Academia Nacional de Bomberos de Chile.
41. Díaz, I. (2018). *Los riesgos psicosociales y el desempeño en bomberos voluntarios - El Cerrito Valle Del Cauca*. (Tesis de grado). Facultad de psicología, Universidad Católica Lumen Gentium, Santiago de Cali.
42. Martínez, P. (2017). *¿Fue necesaria la creación de la ley 1575 del 2012 para los cuerpos de bomberos oficiales de Bogotá y bomberos de Colombia?* (Tesis de grado). Escuela de ciencias administrativas contable, económicas y de negocios, Universidad Nacional Abierta y a Distancia, Bogotá.
43. Monje, C. (2011). *Metodología de la investigación cualitativa y cuantitativa*. Neiva: Universidad Surcolombiana.
45. Folstein, M., Folstein, M., Mchugh, P., & Fanjiang, G. (2000). *MMSE: examen cognoscitivo MINI-MENTAL*. Madrid: TEA.
46. Crombie, P., López, M., Mesa, M., & Samper, L. (2015). *Adaptación de las escalas de resiliencia de Wagnild y Young*. Bogotá: Universidad de los Andes.
47. Hewitt Ramírez, N., Juárez, F., Parada Baños, A. J., Guerrero Luzardo, J., Romero Chávez, Y. M., Salgado Castilla, A. M., & Vargas Amaya, M. V. (2016). Afectaciones psicológicas, estrategias de afrontamiento y niveles de resiliencia de adultos expuestos al conflicto armado en Colombia. *Revista Colombiana de Psicología*, 25(1), 125-140. <https://doi.org/10.15446/rcpv25n1.49966>
48. Zambrano-Plata, G. E., Vera-Leon, S. F., & Flórez-Ortega, L. Y. (2015). Relación entre funcionalidad familiar y las estrategias de afrontamiento utilizadas por adolescentes embarazadas. *Revista Ciencia Y Cuidado*, 9(2), 9-16. Doi: <https://doi.org/10.22463/17949831.334>
49. Cedillo-Torres, A., Grijalva, M., Santaella-Hidalgo, S., Cuevas-Abad, M., & Pedraza-Avilés, A. (2015). Asociación entre ansiedad y estrategias de afrontamiento del cuidador primario de pacientes postrados. *Revista Médica del Instituto Mexicano del Seguro Social*, 53(3), 362-367.
50. Taylor, S. (1991). *Positive Illusions*. New York: Basic Books
51. Parra, Y. (2018). *Estrategias de afrontamiento en las familias colombianas desde el año 2000 al 2017: un análisis sistemático de literatura*. (Trabajo de grado). Facultad de Psicología, Universidad Cooperativa de Colombia. Barrancabermeja, Colombia.
52. Pérez, P., González, A., Mielles, I., & Uribe, A. (2017). Relación del apoyo social, las estrategias de afrontamiento y los factores clínicos y sociodemográficos en pacientes oncológicos. *Pensamiento Psicológico*, 15(2), 41-54. <https://doi.org/10.11144/Javerianacali.PPSI15-2.rase>
53. Uribe, A., Ramos, I., Villamil, I., & Palacio, J. E. (2018). La importancia de las estrategias de afrontamiento en el bienestar psicológico en una muestra escolarizada de adolescentes. *Psicogente* 21(40), 440-457. <https://doi.org/10.17081/psico.21.40.3082>
54. Amaya-Roper, M., & Carrillo, G. (2015). Apoyo social percibido y afrontamiento en personas con dolor crónico no maligno. *Aquichan*, 15(4), 461-474. <https://doi.org/10.5294/aqui.2015.15.4.2>

55. Barquín-Cuervo, R., Medina-Gómez, M., & Pérez, G. (2018). El uso de estrategias de afrontamiento del estrés en personas con discapacidad intelectual. *Psychosocial Intervention*, 27, 89-94. <https://doi.org/10.5093/pi2018a10>
56. Pascual, A., & Conejero, S. (2019). Regulación emocional y afrontamiento: Aproximación conceptual y estrategias. *Revista Mexicana de Psicología*, 36(1), 74-83.
57. Colón, T., Escobar, A., Santacoloma, A., Granados, A., Moreno, S., & Silva, L. (2019). Caracterización psicosocial y de motivos de consulta de la población asistente a 28 Centros de Atención Psicológica Universitarios en Colombia. *Universitas Psychologica*, 18(4), 1-23. <https://doi.org/10.11144/Javeriana.upsy18-4.cpmc>
58. Gastañaduy-Fiestas, K. G. (2013). *Motivación Intrínseca, Extrínseca y Bienestar Psicológico en Trabajadores Remunerados y Voluntarios*. (Tesis de grado). Facultad de psicología, Pontificia Universidad Católica del Perú. Lima, Perú.
59. Hernández, K., & Orozco, G. (2018). Estrés postraumático en personal de emergencias asociado al funcionamiento cognitivo e inteligencia emocional. *Ciencia y futuro*, 8(4), 120-136.
60. Gómez-Gutiérrez, M., Chaparro-Morillo, G., Martín-de-Francisco, C., & Crespo, M. (2018). Tratamiento cognitivo-conductual de un caso de estrés postraumático por accidente ferroviario. ¿Éxito terapéutico o evitación? *Clínica y Salud*, 29, 101-104. Doi: <https://doi.org/10.5093/clysa2018a1>
61. Miguel-Álvaro, A., & Crespo M. (2019). Reescritura de imágenes para el tratamiento del estrés postraumático: análisis y revisión. *Clínica y Salud*, 30, 137-146. Doi: <https://www.doi.org/10.5093/clysa2019a1>
62. Estévez, R., Basset, I., Flores, J., Sánchez, A., & Pérez, M. (2019). Estado resiliente de estudiantes de la licenciatura en enfermería con riesgo de deserción. *Revista Cubana De Enfermería*, 35(3).
63. Paez, M. (2020). La salud desde la perspectiva de la resiliencia. *Archivo de medicina*, 20(1), 203-216. <https://doi.org/10.30554/archmed.20.1.3600.2020>
64. Cardozo, A., Cortés, O., Cueto, L., Meza, S., & Iglesias, A. (2013). Análisis de los factores de resiliencia reportados por madres e hijos adolescentes que han experimentado el desplazamiento forzado. *Revista Iberoamericana de Psicología: Ciencia y Tecnología*, 6(2), 93-105.
65. Ibarrola, R. (2019). *Resiliencia en niños, niñas y adolescentes en situación de desamparo: un proyecto de intervención desde el Trabajo Social*. (Tesis de grado). Univeridad Comillas, Facultad de ciencias humanas. Madrid, España.
66. Ruiz- González, P., Zayas, A., Morales-Sánchez, L., Gil-Olarte, P., & Guil, R. (2019). Resiliencia como predictora de depresión en mujeres con cáncer de mama. *Revista INFAD de Psicología. International Journal of Developmental and Educational Psychology*, 4(1), 75-84. <https://doi.org/10.17060/ijodaep.2019.n1.v4.1511>
67. Castillo, K., Mata, J., & Nerio, C. (2014). *La resiliencia y la sinergia que presentan los trabajadores del Cuerpo de Bomberos de la Región Metropolitana del Ministerio de Gobernación de El Salvador*. (Tesis de grado). Universidad del Salvador, Facultad de ciencias y humanidades. El Salvador.
68. Lima, G., Souza, I., Storti, L., Silva, M., Kusumota, L., & Marques, S. (2019). Resiliencia, calidad de vida y síntomas depresivos entre ancianos en tratamiento ambulatorio. *Revista latinoamericana enfermagem*, 27, 1-11. <https://doi.org/10.1590/1518-8345.3133.321>

ÍNDICE TEMÁTICO

A

Adaptación	156
Adaptación basada en ecosistemas	275, 286
Adaptación frente al cambio climático ..	265, 275
Afrontamiento	346
estrategias de	347
Agua potable	3, 332
Aislamiento sísmico	242
Albergues y alojamientos temporales	347
Amenaza en corredores viales	
por inundación	70
por movimientos en masa.....	66
Amenaza por avenidas torrenciales.....	92
Amenaza por inundación	56, 140, 144, 157, 183
metodología de análisis.....	144
Amenaza por tsunami.....	39
Amenaza sísmica	
alta amenaza sísmica en Colombia	247
comportamiento estructural de nueva infraestructura ante sismos.....	247
visión normativa del comportamiento estructural esperado.....	247
Amenazas antrópicas.....	2,16
Análisis del riesgo por inundación	178
Apego al lugar.....	209, 216
Asentamientos urbanos vulnerables.....	293
Atención a las personas	335
Atención Primaria en Salud.....	335
Avenidas torrenciales.....	92
amenaza	100
cálculo de la amenaza	104, 111
definición.....	95
inventario en Antioquía	103
magnitud.....	100, 110
necesidades futuras	114
ordenamiento territorial.....	92
probabilidad temporal.....	101, 108
susceptibilidad	92, 98, 105

tipos.....	92
Valle de Aburrá.....	96

B

Biodiversidad y servicios ecosistémicos ..	265, 267
Biom mineralización	310
Biología.....	310
Bomberos voluntarios	343
normativa en Colombia.....	346

C

Calidad del agua	3
Campesinos	224
como concepto en la gestión del riesgo de desastres	231
Capacidad adaptativa	277
Captura de datos	56
Captura de datos en campo	80
Ciencia ciudadana	288
Ciencia, tecnología e innovación	57
Comportamiento estructural de nueva infraestructura ante sismos	
incoherencias normativas	253
Confianza en las instituciones.....	209, 217
Conflictos socioecológicos.....	267, 270
Conocimiento de la biodiversidad.....	278
Conocimientos sociales.....	211
Construcción social del riesgo	156
Corredores viales	59
elemento expuesto	59
fragilidad	59
inundación	70
movimientos en masa	66
resiliencia.....	59
vulnerabilidad	59
vulnerabilidad física.....	75
Creciente súbita	
definición.....	95
Curva de Excedencia de Pérdidas.....	157, 159

D

Deformación vertical del lecho marino ..	47
Desastre de Armero.....	191
caracterización del desastre.....	195
causas de raíz	197
condiciones inseguras	198
presiones dinámicas	197
Desastre de Mocoa	191, 199
causas raiz.....	201
evolución de la tragedia	200
presiones dinámicas	202
Deslizamientos	213
Dimensión sociocultural	215
Disposición de excretas humanas	333

E

Ecosistemas costeros.....	276
Elemento expuesto en corredores viales.....	56, 60
Encuesta de calidad de vida.....	226
Enfoque diferencial.....	224
Enfoque diferencial en la gestión del riesgo de desastres	231
Enfoque psicosocial del riesgo	211
Escenarios de riesgo en pérdida de biodiversidad.....	272
Evaluación probabilista de riesgo	140, 159
Evolución de la tragedia de Armero.....	196
Exposición en corredores viales calificación y evaluación.....	75

F

Flujo de escombros canalizado definición	95
Fragilidad en corredores viales	59
calificación y evaluación.....	76
Función de vulnerabilidad.....	153

G

Gestión del riesgo en salud.....	327
Gestión del riesgo por inundación	140
Gobernanza del riesgo de desastres.....	156
Guapi.....	40
Incendios forestales	120, 310
área quemada	120, 127
biomineralización	310
biotecnología.....	310
características físicas de los suelos	315
descarga de datos.....	133
distribución de las anomalías térmicas	127
FIRMS	125
focos de calor.....	125
Google Earth Engine	125
índice normalizado de área quemada..	129
MODIS	125
pérdida de cobertura vegetal.....	122
recuperación de suelos.....	310
Sentinel-2	125
suelos degradados.....	310
transformación de bosques	122
Indicadores de biodiversidad y servicios ecosistémicos	290
Índice normalizado de área quemada.....	129
cálculo	135
mapa	131
Índices de pobreza multidimensional.....	226
Infraestructura sismo resistente cambio de paradigma.....	250
hospital seguro	251
Infraestructura vial instrumento de recolección de datos...62	
Instrumento móvil de captura de datos .78	
Inundación de escombros definición.....	95

Inundación en corredores viales	58
Inundación lenta	157–158, 178, 182
Inundaciones.....	214
Inundaciones costeras	215
Inundaciones en ciudades.....	71
Inundaciones lentas o en la llanura	71
Inundaciones repentinas.....	71

L

Litoral Pacífico Colombiano.....	41
----------------------------------	----

M

Manglares	276
Máxima amplitud de tsunamis.....	47
Mitigación del cambio climático	265, 275
Mitigación del riesgo sísmico.....	242
búsqueda de alternativas.....	252
normativa local	243
normativa para edificaciones con aislamiento de base y disipación de energía para Colombia.....	255
Modelación hidrológica	161
Modelo de exposición	146, 166
Modelo <i>Pressure and Release</i>	191
metodología	193
Motores de transformación y pérdida de la biodiversidad	272

O

Ordenamiento territorial	92, 291
--------------------------------	---------

P

Paradigma psicométrico	211
Percepción del riesgo	176, 209, 213
apego al lugar	216
confianza en las instituciones.....	217
dimensión sociocultural	215
Pérdida Anual Esperada.....	157, 159, 180

Pérdida Máxima Probable.....	157, 159
Periodo de retorno	159
Perfil epidemiológico	334
Política Nacional de Cambio Climático	267
Prima Pura de Riesgo.....	157, 159
Prioridades en salud pública	331

R

Recuperación de suelos.....	310
Reducción del riesgo de desastres basada en ecosistemas.....	275, 286
Reforzamiento sísmico y estructural de edificaciones de edificaciones indispensables.....	250
Reglamento Colombiano de Construcciones Sismo Resistentes NSR-10	247
Relación Media de Daño	153
Remoción en masa en corredores viales .	58
Remoción en masa por inundación	56
Resiliencia.....	156, 330, 346
Resiliencia en corredores viales.....	59
calificación y evaluación.....	76
Respondedores de emergencias	343
apoyo social	356
estrés postraumático	356
resiliencia.....	347
Restauración ecológica.....	279
Retos	
definición.....	286
Riesgo en epidemiología	329
Riesgo en la calidad de agua potable.....	2, 3
amenazas.....	3,7
escenarios de análisis	3
exposición	3,6,12
metodologías	3,6
vulnerabilidad	3,9
Riesgo en sistemas de acueducto	29
Riesgo sísmico	242
amenaza sísmica	247

disipación de energía.....	242
nivel de desempeño.....	242
Rubro de contenidos	149–151, 170–172, 184
Rubro de edificaciones	150, 172

S

Salud ambiental.....	335
Salud mental en situación de desastre	334
Sequía.....	214
Servicios culturales	286
Servicios de aprovisionamiento	286
Servicios de regulación	286
Servicios de soporte.....	286
Servicios ecosistémicos	265
de regulación	275
para la reducción del riesgo de desastres	288
Sistema general de seguridad social.....	329
Sistemas de acueducto.....	2
amenaza	13
exposición	12
vulnerabilidad	18
Sistemas de control de respuesta estructural.....	242
activos, semiactivos, pasivos e híbridos.....	244
aisladores de base.....	245
aplicación	253
contexto internacional.....	246
definición.....	244
disipadores de energía o amortiguadores	245
fabricación local de dispositivos	257
finalidad	244
Sistemas de información geográfica	120
Socioecosistema	267, 270
Socioecosistemas urbanos	277
Soluciones basadas en la naturaleza	265, 267
análisis costo-beneficio.....	289

Asentamientos urbanos vulnerables ...	293
Eco-DRR	286
financiación de los proyectos	299
participación ciudadana	297
pliegos para contratación estatal.....	294
procesos de gobernanza inclusivos	296
soluciones híbridas.....	298
Toma de decisiones basadas en evidencia.....	293
Suelos degradados	310
Suelos quemados	
agregación del suelo	314
Consolidación duplo-edométrica	320
corte directo	319
curva de retención de agua	319
<i>desagregación</i>	322
mineralogía.....	318
pH y punto de carga zero del suelo	317
<i>pinhole test</i>	322
curva granulométrica para suelos quemados	315

T

Taxonomía de categorías de estructuras de drenaje y estabilización de taludes en corredores viales.....	61
Teledetección.....	120, 123
optica.....	123
Teledetección de áreas quemadas en la Orinoquía	123
Tipologías constructivas	166
Tipologías estructurales	146, 153
Tipos de inundación lenta	146
fluvial o por desbordamiento	146
inundación.....	146
pluvial o por encharcamiento.....	146
Tsunami	
altura máxima	49
altura máxima de inundación.....	42
área de inundación.....	42

distancia de inundación.....	42
dominio computacional.....	46
escenarios sísmicos fuentes.....	42
fuerza.....	42
Guapi.....	40
inundación.....	40
litoral Pacífico Colombiano.....	41
máxima profundidad.....	50
método de simulación numérica y evaluación de la amenaza.....	44
modelo.....	42
modelo de deslizamiento interplaca....	44
profundidad de inundación.....	42, 49
propagación.....	42, 48
SATREPS.....	43
simulación.....	40, 42

V

Valor económico y población expuesta ..	148
Valor expuesto.....	167
Valoración de la amenaza por inundación.....	71
Velocidad media de flujo.....	153
Vida digna.....	224
Derecho a una.....	228
Vigilancia en salud pública.....	335
Vulnerabilidad de campesinos.....	224
Vulnerabilidad psicológica.....	356
Vulnerabilidad del rubro de edificaciones.....	151
Vulnerabilidad en corredores viales.....	56, 79
Vulnerabilidad física.....	140, 142, 144, 169, 182, 184
Vulnerabilidad física en corredores viales.....	75, 149
Vulnerabilidad frente al cambio climático.....	277
Vulnerabilidad social.....	140, 142, 144, 153–156, 173–177, 182, 184

Vigilancia en salud pública.....	430
Vulnerabilidad.....	34, 75, 244
de campesinos.....	291
Vulnerabilidad del rubro de edificaciones.....	190
Vulnerabilidad en corredores viales.....	78, 79
Vulnerabilidad física.....	178, 180, 181, 188, 199, 215, 219, 233, 236
Vulnerabilidad física en corredores viales.....	97
Vulnerabilidad frente al cambio climático.....	354
Vulnerabilidad social.....	178, 180, 181, 195, 196, 198, 220, 221, 224, 225, 227, 233, 234, 237

Z

Zoonosis.....	333
---------------	-----



UNGRD

Unidad Nacional para la Gestión
del Riesgo de Desastres

Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres

UNIDAD NACIONAL PARA LA GESTIÓN DEL RIESGO DE DESASTRES

Av. Calle 26 No. 92-32, Edificio Gold 4 - Piso 2


Línea gratuita de atención: 01 8000 11 32 00

PBX: (57 1) 5529696

Bogotá D.C. - Colombia

www.gestiondelriesgo.gov.co

 GestionUNGRD

 ungrd_oficial

 @UNGRD

 UNGRD Gestión del Riesgo de Desastres