

Persiguiendo al fantasma del fracking en la formación Vaca Muerta: Sismicidad inducida en la Cuenca Neuquina, Argentina

Ryan Schultz¹, Guillermo Tamburini-Beliveau², Sebastián Correa Otto³, Javier A. Grosso Heredia^{4,5}

¹Servicio Sismológico Suizo, ETH Zürich, Zürich, Suiza, ²Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas – Centro de Investigaciones y Transferencia de Santa Cruz, Río Gallegos, Argentina, ³Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Buenos Aires, Argentina, ⁴Departamento de Geografía, Universidad del Comahue, Neuquén, Argentina, ⁵Instituto de Formación Docente Fiske Menuco, General Roca. Río Negro

Contribuciones del autor: *Conceptualización:* R. Schultz. *Curación de datos:* R. Schultz, G. Tamburini-Beliveau, S. Correa-Otto. *Análisis formal:* R. Schultz. *Adquisición de fondos:* R. Schultz. *Investigación:* R. Schultz. *Metodología:* R. Schultz. *Administración de proyectos:* R. Schultz. *Recursos:* R. Schultz. *Software:* R. Schultz. *Supervisión:* R. Schultz. *Validación:* R. Schultz, G. Tamburini-Beliveau, S. Correa-Otto. *Visualización:* R. Schultz. *Redacción – borrador original:* R. Schultz, G. Tamburini-Beliveau, S. Correa-Otto. *Redacción – revisión y edición:* R. Schultz, G. Tamburini-Beliveau, S. Correa-Otto, JA Grosso-Heredia.

Resumen Se sabe que los terremotos son inducidos por una variedad de causas antropogénicas, como la fracturación hidráulica. En la Cuenca Neuquina de Argentina, la fracturación hidráulica se ha utilizado para producir hidrocarburos atrapados en las lutitas de la Formación Vaca Muerta. En consecuencia, la incidencia de sismicidad allí ha aumentado. Recopilamos información sobre estimulaciones de pozos y terremotos para realizar un análisis estadístico que vincule estos dos conjuntos de datos. Los filtros de asociación espaciotemporal sugieren que el catálogo de eventos está sesgado hacia las operaciones de fracturación hidráulica. Después de tener en cuenta los falsos positivos, estimamos que ~0,5% de las operaciones están asociadas con terremotos. Estos pares de *eventos asociados-operaciones* muestran señales temporales altamente correlacionadas (>99,99% de confianza) entre las tasas de sismicidad/inyección. Con base en esta evidencia, argumentamos que muchos de estos terremotos (hasta M4) son inducidos. Respalamos este argumento comparando el entorno geológico de la Cuenca Neuquina con las condiciones necesarias para la reactivación de fallas en otras cuencas susceptibles/sismogénicas. Este reconocimiento se suma a la creciente lista de sismicidad inducida por (fracturación hidráulica).

Resumen no técnico En la Cuenca Neuquina de Argentina, una región que anteriormente no registraba actividad sísmica, se han detectado cada vez más terremotos. Al mismo tiempo, las operaciones de fracturación hidráulica se han centrado en las *arcillas* de la Formación Vaca Muerta. La fracturación hidráulica inyecta fluidos subterráneos a una presión lo suficientemente alta como para partir las rocas, lo que permite acceder a los hidrocarburos que se encuentran en su interior. Se sabe que este tipo de operación provoca terremotos en otros lugares. Para determinar si estos terremotos fueron causados por la fracturación hidráulica, realizamos pruebas estadísticas. Con un alto grado de confianza, descubrimos que muchos eventos tienden a agruparse alrededor de pozos de fracturación hidráulica en el tiempo y el espacio. Las pruebas de sensibilidad sugieren que estas correlaciones casi con certeza no ocurrieron por accidente. Las fallas, la información sobre las tensiones y otros factores en la Cuenca Neuquina son comparables con los de otras cuencas que ya han inducido terremotos. Concluimos que muchos de los eventos aquí fueron inducidos. Discutimos cómo la investigación futura podría responder mejor algunas de nuestras preguntas sin resolver.

1 Introducción

La sismicidad inducida causada por operaciones de inyección subterránea, como la eliminación de aguas residuales, ha sido bien documentada desde la década de 1960 (Healy y otros.,1968; Raleigh y otros.,1976). Desde 2010, los terremotos en América del Norte han proliferado, tras la llegada de la fracturación hidráulica para el gas de esquisto (Foulger y otros.,2018). En los Estados Unidos, estos terremotos fueron causados predominantemente por el aumento de la eliminación de agua producida por el fracking (Ellsworth,2013). Sin embargo, también se han inducido terremotos directamente mediante operaciones de fracturación hidráulica en todo el mundo (Schultz y otros.,2020; Atkinson y otros.,2020). Por ejemplo, la sismicidad en la cuenca del río Horn (Farahbod y otros.,2015), Formación Duvernay

(Bao y Eaton,2016;Schultz y otros.,2017), Formación Montney (Mahani y otros.,2017;Peña Castro et al.,2020), esquisto de Bowland (Clarke y otros.,2019;Kettlety y otros.,2020), Cuenca de los Apalaches (Skoumal y otros.,2015;Brudzinski y Kozłowska, 2019), Cuenca de Delaware (Skoumal y otros.,2020) y la cuenca de Sichuan (Lei y otros.,2017,2019) se ha relacionado con la fracturación hidráulica.

Por lo general, estos terremotos ocurren cuando el crecimiento de fracturas estimuladas intersecta fallas preexistentes (Galloway y otros.,2018), reactivando las partes susceptibles de la falla a través de una reducción en la tensión normal efectiva (Moein y otros.,2023). Uno de los casos más grandes documentados (M_y5.7) ocurrió en la cuenca de Sichuan, China, causando daños y heridos importantes (Lei y otros., 2019). En muchos casos se han sentido temblores de tierra o eventos tan grandes como M4 (Bao y Eaton,2016);

Editor de producción:
Yen Joe Tan
Editor de manejo:
Giuseppe Petrillo
Editor de copia y diseño:
Hannah F. Mark

Recibió:
26 de agosto de 2024
Aceptado:
12 de noviembre de 2024
Publicado:
27 de noviembre de 2024

* Autor de correspondencia: Ryan.Schultz@sed.ethz.ch

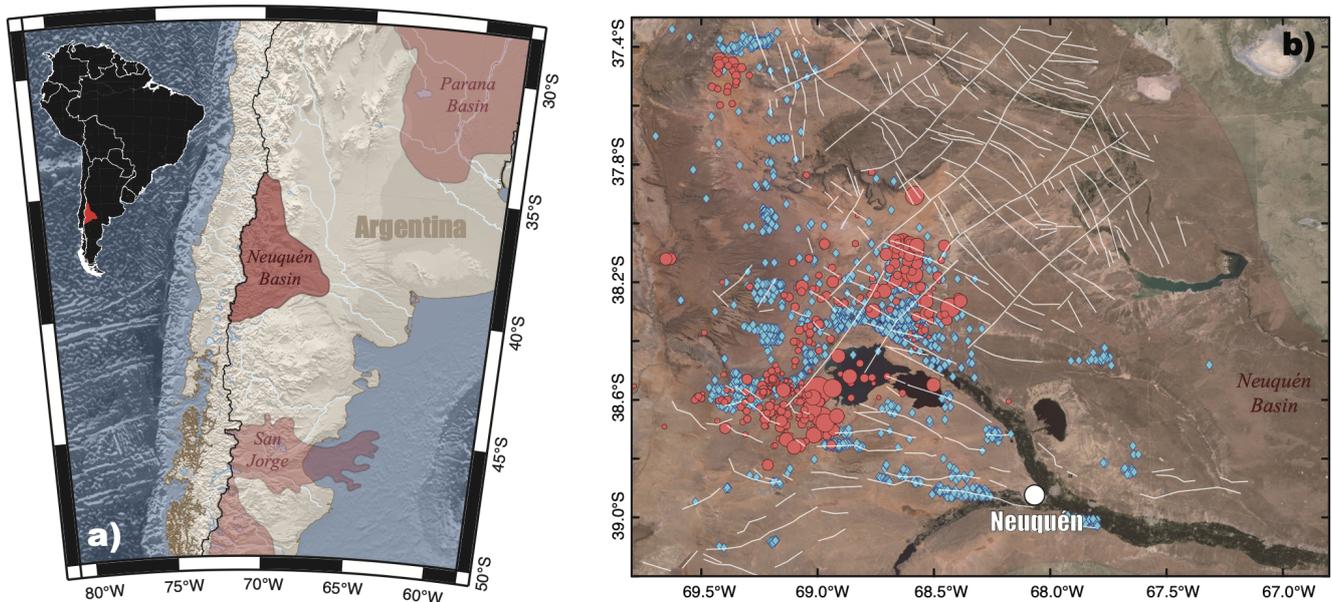


Figura 1 Comparación entre el entorno sismotectónico y las operaciones de fracturamiento hidráulico.(a) Mapa que muestra parte de Argentina, junto con los límites de las cuencas de esquisto cercanas (polígonos rojos). El polígono insertado muestra la ubicación de la Cuenca Neuquina dentro de América del Sur. (b) El mapa del área de estudio muestra terremotos (círculos rojos) y operaciones de fracturación hidráulica (rombos azules), junto con la ciudad de Neuquén (círculo blanco, con texto). Fallas de estudios anteriores (Silvestro y Zubiri,2008; Cristallini y otros.,2009) también se muestran (líneas blancas).

Schultz y otros.,2017;Mahani y otros.,2017). En respuesta, algunas jurisdicciones han impuesto moratorias al desarrollo de recursos debido a preocupaciones por terremotos inducidos (Kettlety y otros.,2020). Por lo general, estos riesgos se gestionan mediante un protocolo de semáforo (Bommer y otros.,2006; Häring y col.,2008;Ader y otros.,2019), que designa umbrales para que las operaciones comiencen a mitigar los efectos (luz amarilla) y para que se realicen intervenciones regulatorias (luz roja). En todo el mundo se han implementado protocolos de semáforo para gestionar los terremotos inducidos por fracturación hidráulica, utilizando varios umbrales de luz roja. Se han comenzado a definir nuevos enfoques para estos umbrales de luz roja utilizando principios basados en el riesgo (Schultz y otros., 2021a,b,2023a).

En Argentina existen varias cuencas que han sido evaluadas o que han sido objeto de fracturación hidráulica (Figura1), la más productiva de las cuales ha sido la Cuenca Neuquina (EE.UU.-EIA,2015). La Cuenca Neuquina (~160.000 km²) está situada en el centro-este de Argentina y limitada por los Andes al oeste (Urien y Zambrano,1994;Marchal y otros.,2020). A modo de comparación, la Formación Duvernay cubre un área de ~130.000 km² (EE.UU.-EIA,2013). La Cuenca Neuquina contiene estratos del Triásico Tardío al Cenozoico Temprano que se depositaron en un entorno tectónico de trasarco, incluyendo depósitos acumulados de siliciclásticos, carbonatos y evaporitas (Howell y otros.,2005). Las formaciones más relevantes para el desarrollo de la fracturación hidráulica han sido la Formación Vaca Muerta y la Formación Los Molles (Kugler,1985;Ramos y col., 2020). La Formación Vaca Muerta es una lutita de edad del Jurásico Tardío - Cretácico Temprano que consiste en margas, lutitas orgánicas y lutitas calcáreas; en algunas regiones, los espesores pueden alcanzar hasta 520 m y profundidades de 3.150 m (Badessich y otros.,2016;Legarreta y Villar,2015).

La Formación más profunda de Los Molles es una lutita del Jurásico Medio que consta de lutitas orgánicas y lutitas de caliza (Martínez et al.,2008). El basamento cristalino está constituido por rocas ígneas-metamórficas del Silúrico-Devónico, intruidas por granitoides de arco magmático (Cingolani y col., 2011). Las estimaciones iniciales de gas natural técnicamente recuperable fueron 308 Tcf y 275 Tcf para la Formación Vaca Muerta y la Formación Los Molles, respectivamente (EE.UU.-EIA,2013). Las estimaciones iniciales de petróleo técnicamente recuperable fueron de 16,2x10⁹barril y 3,7x10⁹bbl para la Formación Vaca Muerta y la Formación Los Molles, respectivamente (EE.UU.-EIA, 2013). La Cuenca Neuquina alberga una de las fuentes más importantes de hidrocarburos no convencionales del mundo y es una fuente importante de energía para Argentina (Minisini y otros.,2020). Actualmente, la empresa estatal de petróleo y gas YPF posee la mayor participación de las inversiones no convencionales en la Cuenca Neuquina (Lu y otros.,2024).

Al igual que muchas cuencas de fracturación hidráulica, la historia sísmica de la Cuenca Neuquina es tranquila y escasamente registrada. Los estudios anteriores se han centrado comprensiblemente en limitar la sismicidad peligrosa de la subducción de la placa de Nazca (Bilek,2010). En algunos casos, los estudios temporales/periféricos pueden haber captado sismicidad cercana (Bohm y otros.,2002). Las inferencias de la geología estructural sugieren una historia compleja, que incluye períodos de extensión y compresión (Marchal y otros.,2020). El tectonismo reciente (Cenozoico) está relacionado principalmente con la compresión de la deformación andina (Cobbold y Rosselló, 2003)Se cree que el tectonismo y las estructuras falladas han jugado un papel en la migración de hidrocarburos a través de la historia geológica de la Cuenca Neuquina (Mosquera et al.,2008). Debido a las preocupaciones por la sismicidad inducida (Cunningham,2022;

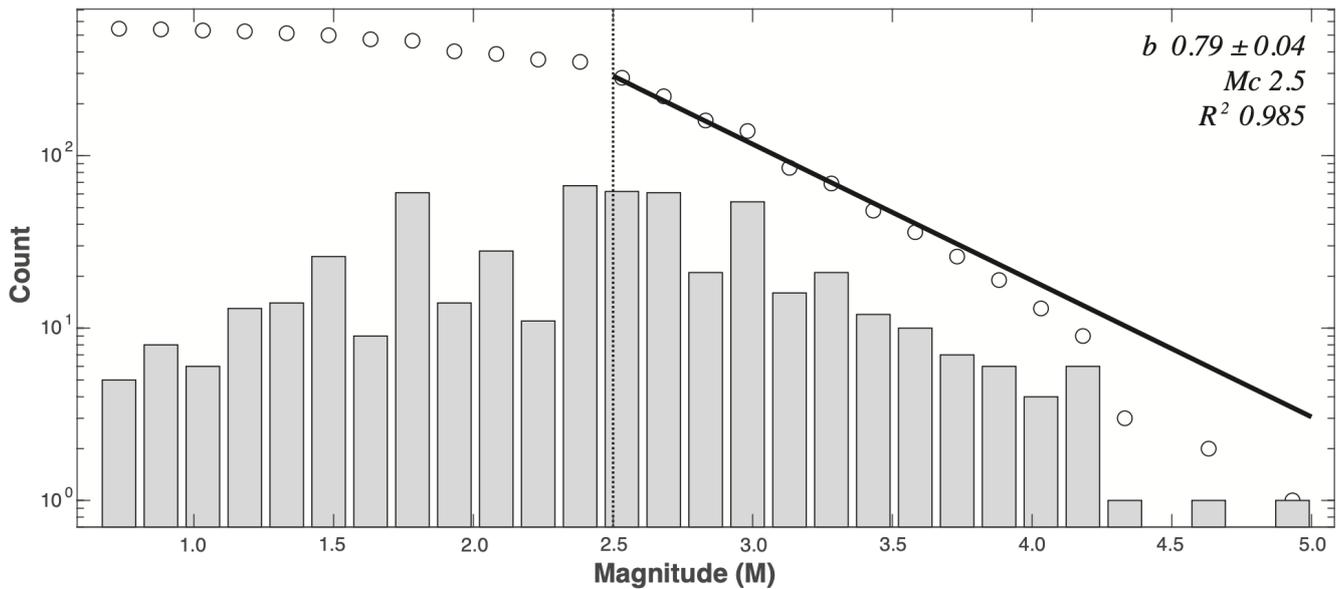


Figura 2 Estadísticas de magnitud del terremoto. Distribución de magnitud-frecuencia de eventos en el catálogo regional: los recuentos de datos se representan como distribuciones acumulativas (círculos) y no acumulativas (barras), junto con el mejor ajuste a los datos (línea continua) y la magnitud de completitud (líneas discontinuas). Los parámetros relevantes se informan como texto.

Surma,2024), trabajos recientes han comenzado a limitar la sismicidad regional de la Cuenca Neuquina (Curia y otros., 2018; Correa-Otto et al.,2018; Correa Otto,2021; Correa-Otto et al.,2024). De hecho, se ha sugerido que la sismicidad en la Cuenca Neuquina es inducida (Tamburini-Beliveau y otros., 2022).

Profundizando en los aspectos socioambientales, estos recientes sismos han impactado a la región de diversas maneras. En la comunidad rural de Sauzal Bonito, los movimientos telúricos se sienten con regularidad y las viviendas han sufrido daños (Surma,2024). En consecuencia, en 2022, el Estado se comprometió a la construcción de 56 nuevas viviendas básicas sismorresistentes (12 entregadas hasta la fecha) que fueron financiadas en un 50% por una de las empresas operadoras (LM Neuquén,2024). Además, los acantilados de la región han sufrido múltiples deslizamientos de tierra, lo que ha provocado víctimas mortales y heridos (Álvarez Mullally,2021; Nación,2022). Las operaciones industriales no han sido inmunes a la actividad sísmica; algunos operadores han suspendido temporalmente las actividades de fracturación hidráulica debido a los riesgos asociados a la sismicidad inducida (Beascochea,2020). Si bien esta información socioambiental es limitada (y se basa principalmente en testimonios e informes periodísticos), proporciona motivación para futuras investigaciones científicas.

En este estudio comenzamos a discernir los factores causales de la sismicidad en la Cuenca Neuquina. Para ello, recopilamos información sobre las estimulaciones de fracturamiento hidráulico y los catálogos regionales de terremotos. Luego, utilizamos filtros de asociación espaciotemporal para vincular las operaciones candidatas con las secuencias de terremotos. Además, utilizamos pruebas de reorganización de correlación cruzada para determinar la confianza estadística de las asociaciones pozo-terremoto. Encontramos evidencia significativa (>99,99% de confianza) de una correlación entre las operaciones de fracturamiento hidráulico y muchos de los terremotos fuertemente asociados. Luego destacamos

los factores geológicos y operativos relevantes que provocan terremotos inducidos, en comparación con otros casos conocidos. Por último, también se discuten las limitaciones de este análisis/conjunto de datos, para destacar futuras líneas de investigación para comprender mejor estos terremotos y desentrañar aún más sus causas.

2 conjuntos de datos de entrada

2.1 Catálogo de terremotos

La información del catálogo de terremotos se compila a partir de múltiples fuentes. Principalmente, estas fuentes incluyen el Instituto Nacional de Prevención Sísmica de Argentina (INPRES), un proyecto de doctorado que cataloga los terremotos en la cuenca (Correa Otto,2021; Correa-Otto et al.,2024), y diversos estudios previos (Vásquez et al.,2020; Tamburini-Beliveau y otros.,2022). El catálogo del INPRES abarca desde 2015 en adelante (predominantemente a partir de 2019), mientras que el catálogo de proyectos de doctorado abarca predominantemente desde 2014 hasta 2020.

Este último catálogo (PhD) fue obtenido por una red sísmológica local de banda ancha que se estableció en la región centro-norte de la provincia de Neuquén (Figura S1). Comprendía 11 estaciones que cubrían un área de aproximadamente 70x70 km.2, que recopiló datos de manera consistente desde noviembre de 2014 hasta julio de 2016. Desde julio de 2016 hasta junio de 2020, el número de estaciones operativas en la red se redujo a 5. Cada estación estaba equipada con un sismómetro de banda ancha Trillium 120PA y un registrador digital Taurus (Correa Otto,2021). Este catálogo comprende predominantemente el segmento anterior de nuestro período de estudio.

El catálogo INPRES abarca desde 2015 en adelante y constituye solicitudes de datos de INPRES. La disponibilidad limitada de estaciones dificultó la detección de eventos (~10 eventos de

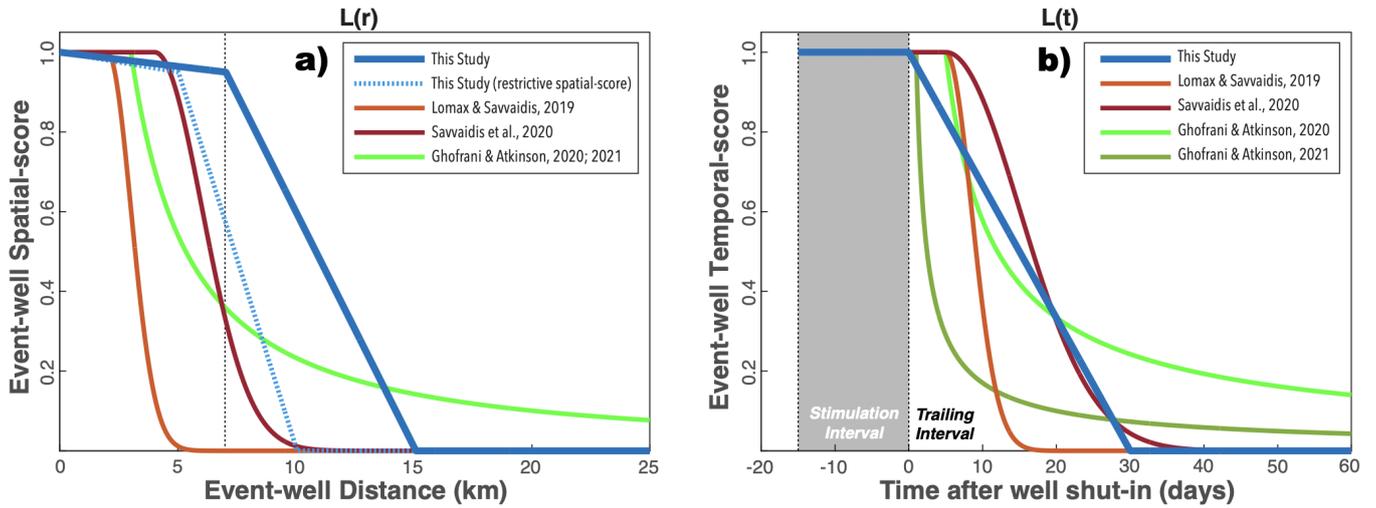


Figura 3 Diagrama esquemático que define las puntuaciones espaciales/temporales del SAF. (a) La puntuación espacial de un par de pozos de eventos único que decae en función de la distancia (líneas, véase la leyenda). (b) La puntuación temporal de un par de pozos de eventos único que decae en función del tiempo (líneas, véase la leyenda). Los intervalos que separan las piezas bilineales se indican mediante líneas discontinuas verticales.

2015-2019). En parte debido a la expansión de la red en 2019 (Figura S1), este catálogo comienza a detectar eventos de manera más rutinaria (~360 eventos a partir de 2019). Este catálogo comprende predominantemente el segmento posterior de nuestro período de estudio.

Recopilamos estos catálogos en un único catálogo combinado para este estudio. Para garantizar la singularidad de los eventos, identificamos aquellos que son contemporáneos y luego los fusionamos. El origen preferido se selecciona como el del catálogo del proyecto de doctorado. La superposición limitada entre catálogos significa que muy pocos eventos se marcan como idénticos. Nuestro catálogo combinado comienza en noviembre de 2014 y se extiende hasta marzo de 2024 (Figura S2). Hay 545 eventos en este catálogo. Las profundidades de los eventos varían desde la superficie hasta los 66 km; con un valor medio de ~7 km y una desviación estándar de ~6 km. El evento más grande en nuestra compilación de catálogos es M 5.0 y ocurrió el 7 de marzo de 2019. Se han documentado más de 10 eventos M4+ durante el intervalo de registro. Un ajuste simple a la distribución de frecuencia de magnitud indica una b -valor de $0,79 \pm 0,04$ (Figura 2). La magnitud de completitud aparece en M ~2,5, que es el valor afirmado por INPRES.

2.2 Información sobre fracturación hidráulica

Los datos de ubicación de pozos, inyección y otras características fueron descargados en formato de texto simple de las bases de datos públicas oficiales de la Secretaría de Energía de Argentina y del Ministerio de Energía y Recursos Naturales de la provincia de Neuquén. Las bases de datos fueron combinadas y depuradas para evitar registros duplicados y otras inconsistencias (Figura S3). Los datos sobre fracturamiento hidráulico incluyen ubicaciones de pozos de superficie, tiempos de inicio/fin de estimulación, fluido total inyectado, número de etapas y otra información menos relevante para este estudio. Lamentablemente, los tiempos de inicio/fin del 16% de los pozos de fracturamiento hidráulico (Figura S4) faltan en los archivos fuente originales. No podemos afirmar si faltan pozos en esta base de datos ni cuántos. Estos casos faltantes se incluirán en el informe.

evadir el escrutinio en nuestro análisis posterior, ya que se necesita información tanto espacial como temporal.

El potencial económico de la Formación Vaca Muerta, como objetivo de fracturación hidráulica, fue reconocido por primera vez en 2010 por Repsol-YPF. Durante esta fase temprana (2010-2012), los pozos tendían a inyectar cantidades modestas de fluido durante los programas de estimulación (10^1 - 10^3 m³). Sin embargo, al igual que en otras cuencas de fracturación hidráulica, la escala, la complejidad y la frecuencia de las operaciones aumentaron con el tiempo. Para 2019, la gran mayoría de las operaciones están inyectando 10^4 - 10^5 m³, por pozo. A la fecha, se han estimulado más de 4.000 pozos no convencionales en la Cuenca Neuquina.

3 Métodos y resultados

3.1 Detección de pozos mediante un filtro de asociación espaciotemporal (SAF)

El primer paso para determinar la propensión a los terremotos inducidos es buscar eventos que estén cerca de las operaciones en el tiempo y el espacio. Esta lógica se basa en criterios estándar para identificar una relación causal de sismicidad inducida, que prioriza el examen de las relaciones en el tiempo y el espacio (Davis y Frohlich, 1993; Verdon y otros., 2019; Foulger y otros., 2023). En este estudio, utilizamos un filtro de asociación espaciotemporal (SAF) para detectar eventos inducidos. Se han utilizado enfoques comparables para identificar la sismicidad inducida causada por fracturación hidráulica (a escala de cuenca) en el pasado (Atkinson y otros., 2016; Schultz y otros., 2018; Lomax y Savvaidis, 2019; Savvaidis y otros., 2020; Ghofrani y Atkinson, 2020, 2021).

Para cuantificar el vínculo entre terremotos y operaciones, comenzamos definiendo una función de decaimiento bilineal simple:

$L(\mathbf{X}; X_1, X_2, P_1)$. Durante el intervalo $0-X_1$ las puntuaciones de función disminuyen de 1 a P_1 , y durante el intervalo X_1-X_2 Las puntuaciones de función disminuyen desde P_1 a 0.

Para cualquier par de pozos de eventos candidatos (i, j), la puntuación espacial $L_{ij}(\mathbf{r}; r_1, r_2, P_1)$ y una partitura temporal

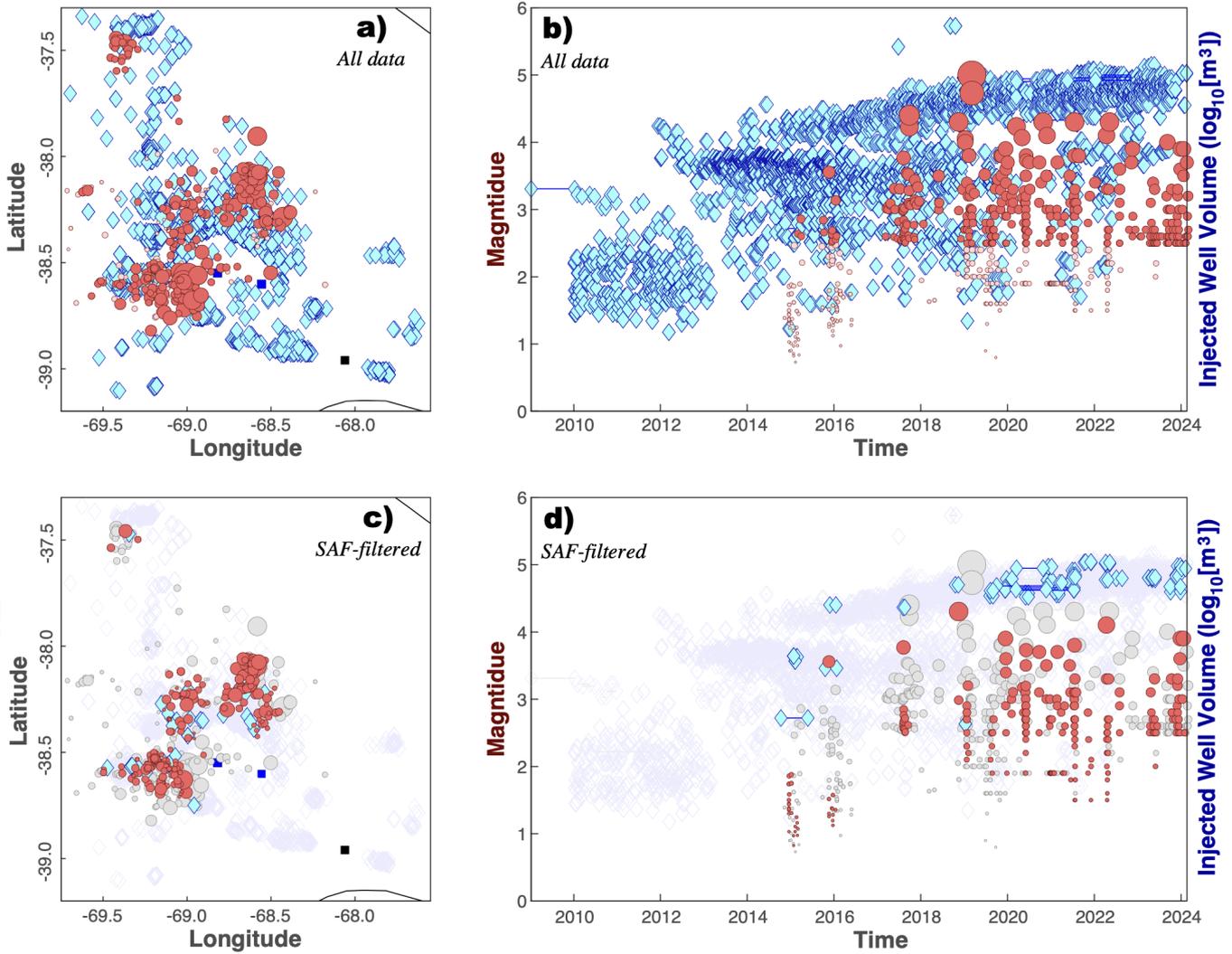


Figura 4 Filtrado de asociación espaciotemporal.(a y c) Mapas con ubicaciones de terremotos (círculos) y operaciones de fracturación hidráulica (rombos). (b y d) Cronogramas temporales de operaciones de fracturación hidráulica (dos rombos unidos por una línea azul) y magnitudes de terremotos (círculos). Se realizan comparaciones entre los conjuntos de datos completos (fila superior) y filtrados (fila inferior). Las operaciones/terremotos no asociados tienen colores difuminados.

$L_{i,j}(t; t_1, t_2, P_1)$ se asignan utilizando esta función bilineal, con intervalos de ventana únicos (r_1-r_2, t_1-t_2) el punto de corte de puntuación (P_1). A continuación, los componentes de la puntuación temporal y espacial se combinan en una única puntuación SAF de pozo de eventos mediante multiplicación: *es decir*, $L_{i,j} = L_{i,j}(r) \times L_{i,j}(t)$ Para una operación dada j las puntuaciones SAF se calculan para todos los eventos y la puntuación SAF total es el sumatorio de todas las puntuaciones de los eventos únicos $SAF_j = \sum_i L_{i,j}$. Nótese que también aplicamos una condición de unicidad, de modo que cualquier evento individual sólo se puede asociar con una única operación (la de mayor puntuación) y, para evitar eventos de doble contabilización.

Para aplicar este enfoque a la Cuenca Neuquina, utilizamos nuestro catálogo compilado de terremotos y la base de datos de fracturamiento hidráulico (Sección 2). Para el componente espacial de los puntajes SAF $L_{i,j}(r)$, los terremotos que se producen a 7 km de una operación se puntúan entre 1,00 y 0,95, y los terremotos entre 7 y 15 km se puntúan entre 0,95 y 0,00. Creemos que la elección del intervalo de 7 a 15 km para la puntuación espacial está justificada, en función de la resolución espacial informada de los terremotos catalogados. En casos de resolución espacial más pobre, los intervalos espaciales SAF (r_1-r_2) debe coincidir con esta resolución, para evitar dis-

Esta variación impide la identificación de asociaciones verdaderas. Si en cambio se dispusiera de un catálogo de alta resolución, los intervalos de 1 a 3 km serían más apropiados, ya que el caso más lejano documentado de sismicidad inducida a partir de un pozo de fracturación hidráulica fue de aproximadamente 1,5 km (Schultz y Wang, 2020) – aunque esto requeriría también tener información sobre la trayectoria horizontal de los pozos, de la que tampoco disponemos. Para las puntuaciones temporales $L_{i,j}(t)$ a cualquier terremoto que ocurra durante el período de estimulación del pozo se le asigna una puntuación de 1,0; todo lo que ocurra después de la finalización decae linealmente a 0,0 30 días después. Este intervalo de 30 días está justificado, en función de las desintegraciones de la sismicidad posterior que normalmente sigue a la fracturación hidráulica en otras cuencas (Schultz y otros.,2022,2023b). Para mayor claridad, también proporcionamos una definición visual de cómo asignamos puntajes espaciales individualmente $L_{i,j}(r)$ y puntuaciones temporales $L_{i,j}(t)$ (Fig. 3). Nuestras opciones de procesamiento de SAF son comparables a las utilizadas en estudios anteriores (Lomax y Savvaidis,2019;Savvaidis y otros.,2020;Ghofrani y Atkinson,2020,2021).

La aplicación del SAF comienza a identificar posibles casos de sismicidad inducida (Figura4). Consideramos

Solo pozos con puntajes SAF sumados mayores a 1.0, lo que identifica 46 casos potenciales para mayor consideración. El caso con el puntaje SAF más alto es ~12. Los dos terremotos más grandes asociados con una operación son el evento M 4.3 del 16 de noviembre de 2018 y el evento M 4.1 del 13 de abril de 2022. Los casos asociados ocurren predominantemente después de 2019, en la región que rodea el Complejo Cerros Colorados (*es decir*, los embalses Los Barreales y Mari Menuco). Aunque sí notamos casos asociados desde finales de 2014. Es probable que este sesgo temporal haya sido influenciado por mejoras en el monitoreo junto con aumentos en la intensidad del fracking. De la base de datos total de pozos no convencionales, ~1,6% de las operaciones estaban asociadas con terremotos y ~42% de los terremotos estaban asociados con operaciones de fracturación hidráulica. Sin embargo, este análisis tiene el potencial de falsos positivos: asociaciones espurias entre terremotos y operaciones.

Aseguramos la solidez de nuestros resultados mediante un remuestreo bootstrap. Para ello, tomamos el catálogo de eventos y reorganizamos aleatoriamente sus tiempos de origen. Este proceso destruye cualquier correlación significativa entre terremoto y operación. Dicho de otra manera, el proceso de reorganización se utiliza para estimar la tasa de falsos positivos, dadas nuestras opciones de diseño de SAF. Considerar el potencial de falsos positivos es especialmente importante aquí, dadas las incógnitas/incertidumbres descritas anteriormente de nuestros conjuntos de datos de entrada (Sección 2). Luego tomamos este catálogo reorganizado aleatoriamente y realizamos exactamente el mismo procesamiento de SAF. Esto se repite 500 veces, para consultar la variabilidad de las puntuaciones de SAF (falsos positivos) como una distribución estadística (Figura5). Después de la reorganización, el procesamiento SAF ya no puede producir porcentajes igualmente altos de asociación, lo que sugiere una asociación promedio de falsos positivos de ~1,1 % (Figura5a). Esto significa que solo hay una probabilidad de 1/500 de producir una asociación tan alta como el valor "normal" por accidente. Si examinamos a continuación la distribución de las puntuaciones SAF (Figura5b) vemos que las dos variantes son visualmente distintas. Calculamos que el valor máximo (falso positivo) de la escala SAF es de ~5,5 en promedio, lo que es mucho menor que el valor observado regularmente. Además, realizamos la prueba de Kolmogorov-Smirnov (Berger y Zhou,2014) para cuantificar estadísticamente las diferencias entre las distribuciones regulares/reorganizadas de las puntuaciones SAF (Figuras5b y S5). Con un grado de confianza de aproximadamente el 99,8 %, la distribución de estas dos variantes de la puntuación SAF es significativamente diferente.

Evaluamos además la solidez de nuestros resultados a través de un análisis de perturbaciones. En esta prueba, modificamos los parámetros y la forma funcional de las llagas espaciales/temporales durante el procesamiento SAF, para examinar la influencia que estas elecciones subjetivas tienen en nuestros resultados. Aquí, consideramos cinco enfoques alternativos de procesamiento SAF. En la primera alternativa, el mismo $L_{i,j}(r)$ y $L_{i,j}(t)$ se utilizan funciones bilineales, sólo que con puntos de corte de puntuación espacial más restrictivos (*es decir*, 5-10 km para r_1-r_2). En las cuatro alternativas restantes, consideramos puntuaciones espaciales/temporales y funciones/parámetros utilizados previamente para identificar la sismicidad inducida por fracturamiento hidráulico (Lomax y Savvaidis,2019;Savvaidis y otros.,2020;Ghofrani y Atkinson,2020,2021). Luego, se repite el procesamiento y el arranque de SAF.

para todas estas formulaciones alternativas (Tabla1& Figuras S6-S15). A pesar de las diferencias entre las alternativas de SAF, los resultados sugieren consistentemente una asociación estadísticamente significativa entre fracturamiento hidráulico y terremotos. En general, los resultados de esta sección son indicativos de algún proceso físico que influye en el desencadenamiento de terremotos en la Cuenca Neuquina.

3.2 Cuantificación de la fuerza de las asociaciones mediante la prueba de reorganización de correlación cruzada

Para investigar más a fondo la fuente de este sesgo en el desencadenamiento de terremotos, a continuación consideramos la prueba de reorganización de correlación cruzada (Opsal y Eisner, 2014; Schultz y Telesca,2018). En esta prueba, las tasas de sismicidad se comparan con las tasas de inyección de fracturación hidráulica mediante correlaciones cruzadas. La correlación cruzada cuantifica la fuerza de las correlaciones con retraso temporal entre estas dos señales. La significación estadística de esta correlación con retraso temporal se puede discernir mediante una reorganización de la información de fase espectral de la serie temporal de entrada (Schultz y Telesca,2018).

Al aplicar este enfoque a la Cuenca Neuquina, primero filtramos nuestro catálogo de terremotos por encima de la magnitud de completitud (Figura2) para tener en cuenta los umbrales de detección que cambian temporalmente. Consideramos la correlación entre las diez operaciones principales examinadas por SAF (Sección 3.1) y sus terremotos asociados (Figura6a), para garantizar que solo se consideren los casos adecuadamente identificados. Debido a la disponibilidad limitada de datos, simplemente consideramos una serie temporal de tasa de inyección efectiva, que es la cantidad total de volumen inyectado en un pozo dividida por la duración total de los tiempos de inicio/parada de la estimulación. La información del catálogo se agrupa en una serie temporal de tasas de terremotos diarios. Las pruebas de correlación cruzada reorganizadas otorgan una confianza muy alta (>99,99 %) en que estas dos series temporales estén asociadas entre sí (Figura6b) De manera similar, las pruebas realizadas en las operaciones con mayor puntuación SAF como secuencias individuales también muestran fuertes indicios (hasta ~99,7 %) de una asociación (Figuras S26-S31). Desafortunadamente, estas pruebas no pueden discernir de manera significativa los tiempos de retraso entre el inicio de las operaciones y la respuesta sísmica, debido a la baja resolución temporal de la base de datos de pozos. Se necesitarían tiempos discretos de estimulaciones de etapas individuales (y mejores detecciones de catálogo) para mejorar los resultados en este caso. Estos resultados sugieren además que la fracturación hidráulica desempeña un papel en el desencadenamiento de algunos de los eventos en la Cuenca Neuquina.

4 Discusión

4.1 Comparación con casos conocidos de sismicidad inducida por fracturación hidráulica

Gran parte de la sismicidad de la Cuenca Neuquina es probablemente inducida, y la fracturación hidráulica es un fuerte candidato para la fuente antropogénica. Esto se basa en pruebas estadísticas que indicaron asociaciones espaciotemporales sesgadas (Sección 3.1; Figuras4&5) y correlaciones estadísticamente significativas (Sección 3.2; Figura6) con ongo-

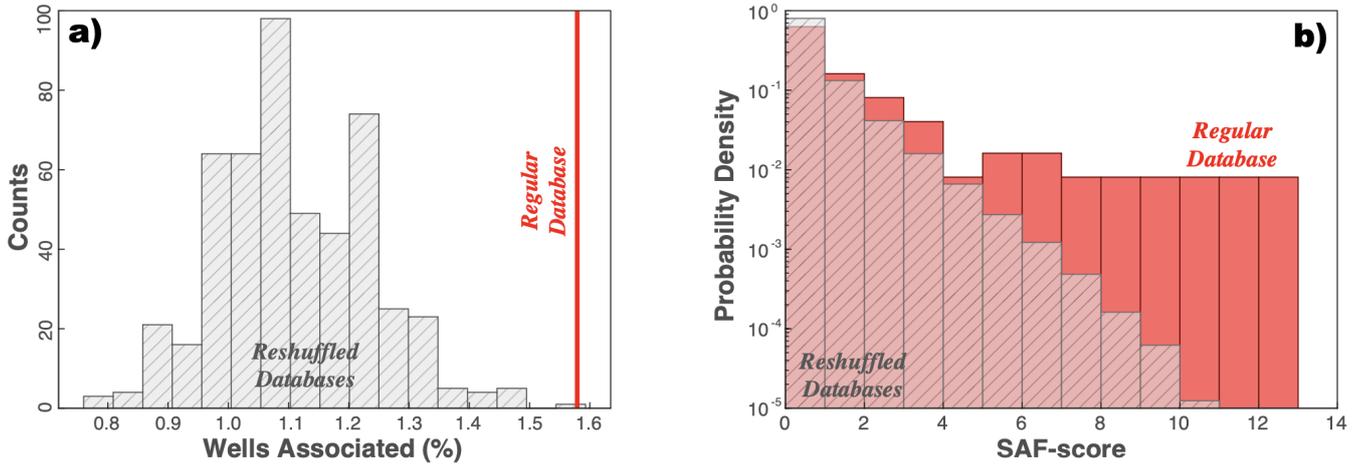


Figura 5 Resultados SAF remuestreados. (a) El porcentaje a escala de cuenca de pozos asociados con terremotos a través de SAF (línea roja), en comparación con los porcentajes de asociación al reorganizar los catálogos (barras grises). (b) La distribución de las puntuaciones SAF para el conjunto de datos regular (barras rojas), en comparación con los datos reorganizados (barras grises).

Estudiar	% Asociación	(Punto de vista)	Asociación		(Punto de vista)	Prueba KS
		% Asociado	oportunidad	Fuerza aérea máxima	Fuerza aérea máxima	
Este estudio	1.58	1,11 ±0,13	~1/500	12.40	5,47 ±1,22	99,79%
Este estudio (con puntuación espacial restrictiva)	1.13	0,55 ±0,10	1/500	12.02	3,69 ±0,93	99,98%
Lomax y Savvaidis(2019)	0,65	0,11 ±0,05	1/500	9.09	2,08 ±0,61	97,89%
Savvaidis y otros.(2020)	1.03	0,50 ±0,10	<1/500	12.36	3,43 ±0,87	99,96%
Ghofrani y Atkinson(2020)	1.20	0,72 ±0,10	1/500	10.42	3,85 ±0,80	99,25%
Ghofrani y Atkinson(2021)	1.13	0,66 ±0,09	1/500	9.21	3,78 ±0,75	95,39%

Tabla1 Resumen del procesamiento alternativo de SAF. Los resultados de las puntuaciones SAF y los resultados de bootstrap se resumen para cinco alternativas de procesamiento de SAF. Ver la Figura 3 para una visualización de funciones de puntuación espacial/temporal. FP es una abreviatura de falso positivo aquí.

operaciones de inducción. Estos indicadores espaciotemporales son criterios clave para declarar una secuencia de eventos como inducida (Davis y Frohlich,1993;Verdon y otros.,2019;Foulger y otros.,2023).

Para continuar construyendo un caso de causalidad, también consideramos una comparación con casos conocidos de sismicidad inducida por fracturación hidráulica. Por lo general, estos terremotos inducidos se observan cerca de sus operaciones causales (Eaton y otros.,2018;Fasola y otros.,2019; Wang y otros.,2020), que ocurre predominantemente durante la estimulación (Schultz y otros.,2017,2022;Clarke y otros.,2019), y se asocia preferentemente con la estimulación de lutitas profundas/basales (Skoumal y otros.,2018). De los casos mejor identificados, vemos una correspondencia similar (Figuras S16-S25): todos los terremotos se agrupan cerca de sus operaciones y ocurren con frecuencia durante los intervalos de estimulación y menos eventos de seguimiento.

A menudo, esta proximidad se interpreta como relacionada con los mecanismos causales: las fracturas estimuladas necesitan encontrar fallas preexistentes que permitan la comunicación hidráulica con partes susceptibles de la falla (Galloway y otros.,2018). En este sentido, las fallas cercanas con raíz en el basamento que atraviesan la pizarra objetivo son un indicador importante para las operaciones sismogénicas (Corlett y otros.,2018). Dentro de la Cuenca Neuquina, la compleja historia tectónica ha dejado una serie de fallas de este tipo, entre ellas:

ing estructuras florales transtensionales y transpresionales (Marchal y otros.,2020), que a menudo se asocian con terremotos inducidos en otras cuencas. Además, estas estructuras con fallas han estado implicadas en eventos de flujo de fluidos del pasado geológico (Mosquera et al.,2008), lo que proporciona un medio plausible para la comunicación de la presión de poro del basamento del yacimiento. Curiosamente, la maduración de los hidrocarburos ha contribuido a las condiciones de sobrepresión del yacimiento en gran parte de la Formación Vaca Muerta (Varela y col.,2020). En otras cuencas, la sobrepresión ha sido otro indicador de regiones susceptibles a terremotos (Eaton y Schultz, 2018). En general, las condiciones geológicas necesarias para enfrentar la sismicidad inducida por fracturamiento hidráulico parecen estar íntactas para la Cuenca Neuquina (y ser consistentes con otros casos).

En regiones de subcuencas altamente susceptibles, la tasa de activación de las operaciones puede ser grande (hasta decenas de por ciento) (Schultz y otros.,2018); sin embargo, esto puede variar considerablemente en unos pocos kilómetros, y sólo hay una escasez de pozos que induzcan eventos a escala de cuenca (Atkinson y otros., 2016; Brudzinski y Kozłowska,2019). Esto se interpreta a menudo como debido a la rareza de encontrar todas las condiciones de susceptibilidad simultáneamente, debido a las heterogeneidades del subsuelo (Pawley y otros.,2018;Hicks y otros.,2021). Estos factores probablemente sean relevantes para la Cuenca Neuquina, dada la fuerte agrupación de casos dentro de la operación.

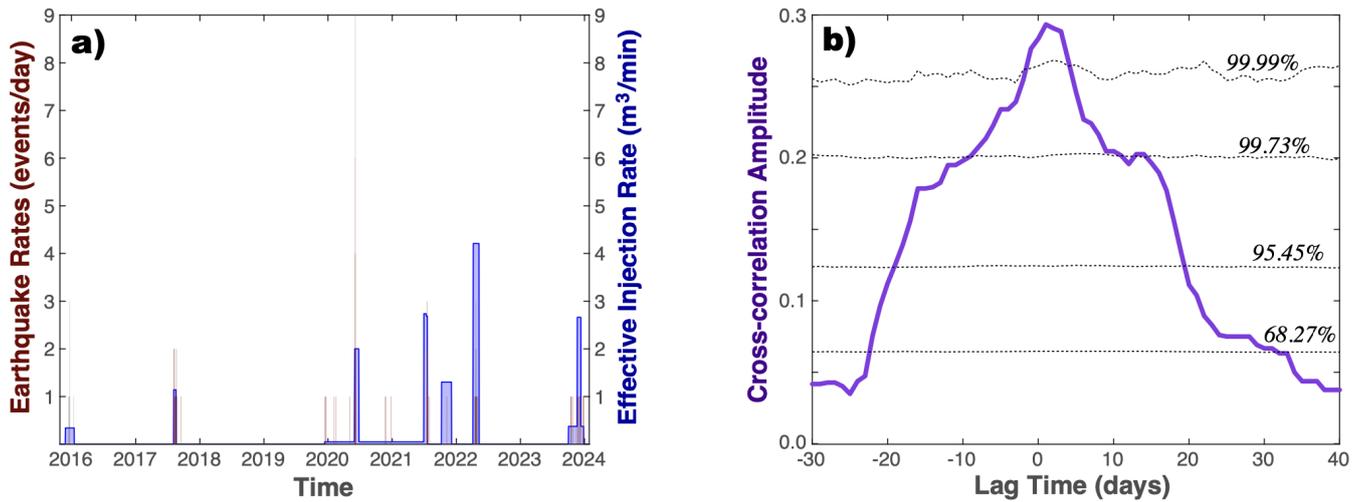


Figura 6 Pruebas de reorganización de correlación cruzada. (a) Datos de series temporales de tasas de terremotos por encima de la magnitud de completitud (barras rojas), tasas de terremotos para el catálogo completo (barras grises) y tasas de inyección efectiva (líneas azules), para las diez operaciones con mayor puntuación SAF. (b) Correlación cruzada de datos de series temporales (línea violeta) junto con intervalos de confianza (líneas negras) de pruebas de reorganización.

huella nacional (Figura 4). A pesar de estas complejidades, limitar esta tasa de activación puede ser importante para el análisis de riesgos (Ghofrani y Atkinson, 2020, 2021; Verdon y Bommer, 2021). Nuestra tasa bruta de activación en la Cuenca Neuquina (es decir, $\sim 1,6\%$) probablemente sobrestima la tasa real, debido al potencial de falsos positivos durante el procesamiento SAF (Sección 3.1). Si simplemente restamos las tasas de falsos positivos, todos nuestros procesamientos alternativos SAF coinciden en una tasa corregida de $\sim 0,5\% \pm 0,1\%$. Observamos que este valor está en el mismo orden de magnitud que otras cuencas en todo el mundo (Schultz y otros., 2020). Por otra parte, nuestro análisis no ha tenido en cuenta los posibles falsos negativos (casos reales de sismicidad inducida por fracturación hidráulica que fueron identificados erróneamente por el procesamiento SAF). La consideración de este tipo de errores es nebulosa, por lo que nuestra estimación debe considerarse como un límite inferior. Sin duda, las mejoras en el monitoreo pueden influir de manera demostrable en la estimación de este parámetro (Ghofrani y Atkinson, 2020). Se necesitarían bases de datos de mayor resolución para proporcionar una mejor interpretación.

4.2 Limitaciones de nuestro análisis

Si bien parece claro que algunos de los terremotos en la Cuenca Neuquina son inducidos por fracturamiento hidráulico, aún quedan eventos ambiguos: por ejemplo, el terremoto más grande dentro de nuestro catálogo, el evento M5 del 7 de marzo de 2019. De manera similar, la mayoría de los eventos M4 no estuvieron asociados con una operación (Figura 4). De hecho, sólo el 42% de los terremotos catalogados estaban vinculados con operaciones a través de nuestro SAF. Teniendo en cuenta estas observaciones, analizamos las posibles deficiencias y limitaciones de nuestro análisis.

Parte de esto se puede aliviar ligeramente mediante la optimización de SAF. Por ejemplo, el evento M 4.2 del 25 de septiembre de 2017 ocurrió justo fuera del rango de nuestra ventana temporal (Figura S16). Sin embargo, sospechamos que este es un factor relativamente menor, dada la relativa concordancia entre todas las alternativas de procesamiento de SAF.

Un problema que confunde nuestro análisis (y que potencialmente causa un subregistro de casos) es la falta de integridad de los conjuntos de datos de entrada (Figura S4). De las ~ 4000 ubicaciones de pozos informadas, aproximadamente el 16 % son datos faltantes que son críticos para nuestro análisis. De manera similar, el evento M5 (7 de marzo de 2019) ocurre un día antes de la hora de inicio informada de un pozo cercano (es decir, $\sim 2,5$ km al suroeste de 'YPF.Nq.LLLO.x-2(h)'). Es posible que muchos eventos aún puedan estar asociados con operaciones de fracturación hidráulica que fueron documentadas de manera deficiente o burda.

Por otra parte, existe la posibilidad de que estos eventos residuales también puedan estar asociados a otras operaciones antropogénicas. A nivel mundial, se ha observado sismicidad inducida en correspondencia con numerosos tipos de operaciones (Foulger y otros., 2018). Las operaciones relevantes para la Cuenca Neuquina incluyen el embalse de yacimientos (Gupta, 2002), producción de hidrocarburos (Muntendam-Bos y otros., 2022), o eliminación de aguas residuales (Ellsworth, 2013). Incluso algún componente de sismicidad natural/de base podría jugar un papel aquí, dada la propensión de regiones de actividad sísmica fuera de la Cuenca Neuquina (Correa-Otto et al., 2018, 2024). La observación de múltiples fuentes antropogénicas puede complicar la identificación del verdadero mecanismo desencadenante (Zhai y otros., 2021).

Respecto al embalse El Complejo Cerros Colorados es una serie de cuatro presas de terraplén y una instalación hidroeléctrica con una capacidad de 462 MW (Dalmati y otros., 2018), relacionados con los embalses Los Barreales y Mari Menuco a lo largo del río Neuquén (Figuras 1 & 4). Estos dos embalses tienen profundidades medias de ~ 67 m y ~ 80 m, respectivamente, y constituyen un gran cuerpo de agua que cubre más de 587 km². Estas instalaciones han estado en funcionamiento durante décadas; comenzaron a funcionar en 1972 y su construcción se completó oficialmente el 31 de octubre de 1980. Hasta donde sabemos, no se han producido informes de sismicidad inducida relacionados con el embalse de estos embalses (ni de ninguno de los otros).

embalses argentinos cercanos).

Respecto a la producción de hidrocarburos La producción no convencional en la Cuenca Neuquina es la principal fuente de hidrocarburos para Argentina. Desde el inicio de la explotación no convencional en la Cuenca Neuquina, las tasas de producción de petróleo y gas han aumentado de manera constante. Para 2017, las tasas de producción de petróleo y gas fueron de $\sim 2 \times 10^6$ metros³/año y $\sim 3 \times 10^9$ metros³/año, respectivamente; las cantidades acumuladas fueron $\sim 8 \times 10^6$ metros³ y $\sim 7 \times 10^{12}$ metros³, respectivamente (Rosa y D'Odorico, 2019). Hasta la fecha, ningún estudio ha vinculado la sismicidad inducida con la producción de hidrocarburos después de la fracturación hidráulica en ningún lugar del mundo; aunque esto podría cambiar con el tiempo dado que la sismicidad inducida se ha asociado con la producción convencional de hidrocarburos (Molinillo húmedo, 1986; Jacquemond y otros., 2024; Muntendam-Bos y otros., 2022).

Respecto a la eliminación de aguas residuales En general, la gestión adecuada del agua es una preocupación importante para la Cuenca Neuquina (Forni y otros., 2018, 2021). Durante la producción de petróleo no convencional, aproximadamente un tercio del fluido producido es agua residual, que luego se elimina mediante inyección subterránea (solo se informa una fracción de reciclaje del 5%) (Rosa y D'Odorico, 2019). Las tasas de eliminación a escala de cuenca son insignificantes antes de 2012, pero aumentan rápidamente a $\sim 10^6$ metros³/año para 2014 (Rosa y D'Odorico, 2019); a finales de 2020, había habido $\sim 5 \times 10^6$ metros³ de aguas residuales vertidas en la Cuenca Neuquina (Tamburini-Beliveau y otros., 2022). Probablemente será importante comprender mejor el potencial de los terremotos de eliminación, especialmente si se considera la prevalencia de terremotos causados por la eliminación de aguas residuales comparables en otros lugares (Hortón, 2012; Ellsworth, 2013; Frohlich y otros., 2016; Zhai y otros., 2021; Schultz y otros., 2023c).

En última instancia, la mejor manera de abordar este tipo de limitaciones es mejorando la calidad de los conjuntos de datos de entrada, centrándose en la detectabilidad, la integridad y una resolución más fina. En primer lugar, se debe aumentar la densificación del monitoreo en la zona de influencia de las regiones sísmicamente activas (Correa-Otto et al., 2018) será fundamental para la mejora del catálogo. En muchos casos, los eventos en la Cuenca Neuquina solo fueron registrados por un puñado de estaciones, lo que afectó la integridad de la detección y la resolución espacial del catálogo de entrada. También se pueden lograr mejoras sustanciales mediante la implementación de metodologías de procesamiento avanzadas, como la selección de fases mediante aprendizaje automático (Mousavi y Beroza, 2022) o coincidencia de plantillas (Skoumal y otros., 2014). Ambas técnicas han demostrado ser muy prometedoras para mejorar el tamaño de los catálogos hasta en un orden de magnitud. Los catálogos más profundos permitirán el uso de métodos avanzados que puedan desentrañar los factores causales en competencia (Petrillo y otros., 2024; Grigoratos y otros., 2022). Dicho esto, garantizar que estos conjuntos de datos sean abiertos, transparentes y completos será una consideración clave (Schultz y otros., 2020). En general, mejorar la calidad de los conjuntos de datos será importante para el futuro de la gestión del riesgo sísmico en la Cuenca Neuquina (Zhou y otros., 2024).

5 Conclusiones

En conclusión, concluimos que muchos de los terremotos registrados en la Cuenca Neuquina probablemente son inducidos por fracturación hidráulica. Esta afirmación se basa en evidencia estadística sólida (>99,99% de confianza) que vincula los tiempos y lugares de los terremotos con las operaciones. La estimación del límite inferior de pozos que indujeron terremotos es $\sim 0,5\%$, con magnitudes máximas que alcanzan M4. Además, inferimos la causalidad en función de una comparación de similitud con casos conocidos de fracturación hidráulica en todo el mundo. Si bien estos análisis indican eventos que fueron inducidos ($\sim 42\%$), quedan otros sin asociaciones claras. No está claro si estos eventos son realmente inducidos por fracturación hidráulica (pero carecen de una asociación debido a datos incompletos), inducidos por otras operaciones antropogénicas o parte de la sismicidad natural/tectónica de fondo. Esta falta de claridad podría resolverse con datos adicionales (y luego estudios más profundos).

Expresiones de gratitud

Nos gustaría agradecer a los revisores anónimos cuyos comentarios ayudaron a mejorar este trabajo. Este trabajo se realizó sin apoyo financiero.

Disponibilidad de datos y códigos

Los datos y códigos utilizados para producir los resultados y las cifras de este estudio están disponibles en línea para su descarga en GitHub (<https://github.es/RyanJamesSchultz/VM-ID>). Estos recursos también están disponibles en línea en Zenodo (<https://doi.org/10.5281/zenodo.14065345>). El catálogo de terremotos también se puede encontrar en línea en http://contenidos.inpres.trozo.ar/buscar_sismo. La información del pozo se obtuvo de la Secretaría de Energía de Argentina (https://datos.trozo.ar/dataset/energia-produccion-petroleo-gas-por-pozocapitulo-iv/archivo/energia_0abd7bf1-c184-4940-b8cf-5f37961a2ba8) y el Ministerio de Energía y Recursos Naturales de la Provincia del Neuquén (<http://hidrocarburos.Energianeiquen.gobierno.ar/sig>).

Intereses en competencia

Los autores declaran no tener intereses en conflicto.

Referencias

- Ader, T., Chendorain, M., Free, M., Saarno, T., Heikkinen, P., Malin, PE, Leary, P., Kwiatek, G., Dresen, G., Bluemle, F. y Vuorinen, T. Diseño e implementación de un sistema de semáforo para la estimulación de pozos geotérmicos profundos en Finlandia. *Revista de sismología*, 24(5):991-1014, agosto de 2019. doi:10.1007/s10950-019-09853-y.
- Atkinson, gerente general, Eaton, DW, Ghofrani, H., Walker, D., Cheadle, B., Schultz, R., Shcherbakov, R., Tiampo, K., Gu, J., Harrington, RM, Liu, Y., van der Baan, M. y Kao, H. Fracturación hidráulica y sismicidad en la cuenca sedimentaria del oeste de Canadá. *Cartas de investigación sismológica*, 87(3):631-647, marzo de 2016. doi: 10.1785/0220150263.

- Atkinson, GM, Eaton, DW, e Igonin, N. Desarrollos en un- Comprender la sismicidad provocada por la fracturación hidráulica. *Reseñas de la naturaleza Tierra y medio ambiente*, 1(5):264-277, mayo de 2020. doi: 10.1038/s43017-020-0049-7.
- Badessich, M., Hryb, D., Suárez, M., Mosse, L., Palermo, N., Pichon, S., y Reynolds, L. Esquisto de Vaca Muerta: Domando a un gigante. *Reseña de yacimientos petrolíferos*, 28(1):26-39, 2016. <https://www.slb.com/-/media/files/oilfield-review/04-vaca-muerta-shale-english>.
- Bao, X. y Eaton, DW Activación de fallas por fracturación hidráulica en Oeste de Canadá. *Ciencia*, 354(6318):1406-1409, diciembre de 2016. doi: 10.1126/ciencia.aag2583.
- Beascochea, H. Shell retomó sus trabajos en Vaca Muerta. *Vacaciones Noticias Muerta*, 2020. <https://vacamuertanews.com/actualidad/20200609232301.htm>.
- Berger, VW y Zhou, Y. Prueba de Kolmogorov-Smirnov: descripción general, Septiembre de 2014. doi:10.1002/9781118445112.stat06558.
- Bilek, SL Artículo de revisión invitado: Sismicidad a lo largo de América del Sur Zona de subducción de Canadá: revisión de grandes terremotos, tsunamis y complejidad de la zona de subducción. *Tectonofísica*, 495(1-2): 2-14, noviembre de 2010. doi:10.1016/j.tecto.2009.02.037.
- Bohm, M., Lüth, S., Echtler, H., Asch, G., Bataille, K., Bruhn, C., Riethbrock, A., y Wigger, P. Los Andes del Sur entre los 36° y 40°S de latitud: sismicidad y velocidades sísmicas promedio. *Tectonofísica*, 356(4):275-289, octubre de 2002. doi:10.1016/s0040-1951(02)00399-2.
- Bommer, JJ, Oates, S., Cepeda, JM, Lindholm, C., Bird, J., Torres, R., Marroquín, G., y Rivas, J. Control del peligro por sismicidad inducida por un proyecto geotérmico de roca fracturada caliente. *Ingeniería Geológica*, 83(4):287-306, marzo de 2006. doi: 10.1016/j.enggeo.2005.11.002.
- Brudzinski, MR y Kozłowska, M. Sismicidad inducida por hy-Fracturación hidráulica y eliminación de aguas residuales en la cuenca de los Apalaches, EE.UU.: una revisión. *Acta Geofísica*, 67(1):351-364, enero de 2019. doi:10.1007/s11600-019-00249-7.
- Cingolani, C., Zanettini, J. y Leanza, H. El basamento ígneo y metamórfico. En Leanza, H., Arregui, C., Carbone, O., Danieli, J. y Vallés, J., editores, *Geología y Recursos Naturales de la Provincia del Neuquén: Relatorio del 18° Congreso Geológico Argentino*, páginas 37-47. Neuquén, Argentina, 2011.
- Clarke, H., Verdon, JP, Kettlety, T., Baird, AF y Kendall, Imágenes en tiempo real, pronóstico y gestión de la sismicidad inducida por el hombre en Preston New Road, Lancashire, Inglaterra. *Cartas de investigación sismológica*, julio de 2019. doi: 10.1785/0220190110.
- Cobbold, P. y Rossello, E. Aptiense a compresional reciente Deformación, estribaciones de la Cuenca Neuquina, Argentina. *Geología del petróleo y del mar*, 20(5):429-443, mayo de 2003. doi: 10.1016/s0264-8172(03)00077-1.
- Corlett, H., Schultz, R., Branscombe, P., Hauck, T., Haug, K., Mac-Cormack, K., y Shipman, T. Fallas del subsuelo inferidas a partir de relaciones sísmicas de reflexión, terremotos y sedimentológicas: implicaciones para la sismicidad inducida en Alberta, Canadá. *Geología marina y petrolera*, 93:135-144, mayo de 2018. doi: 10.1016/j.marpetgeo.2018.03.008.
- Correa-Otto, S. *Experimento sismológico en la cuenca neuquina, la región de mayor explotación de hidrocarburos por métodos no convencionales de la Argentina*. Tesis doctoral, Universidad Nacional de San Juan, 2021. <https://www.fundaciongarciasineriz.es/2023/11/20/experimento-sismologico-en-la-cuenca-neuquina-la-region-de-mayor-explotacion-de-hidrocarburos-por-metodos-noconvencionales-de-la-argentina/>.
- Correa-Otto, S., Nacif, S., Pesce, A., Nacif, A., Gianni, G., Furlani, R., Giménez, M., y Francisco, R. Sismicidad intraplaca registrada por una red local en la Cuenca Neuquina, Argentina. *Revista de Ciencias de la Tierra de Sudamérica*, 87:211-220, noviembre de 2018. doi: 10.1016/j.jsames.2017.12.007.
- Correa-Otto, S., Gianni, G., Giménez, M., Spagnotto, S. y Godoy, L. Análisis sismotectónico y gravimétrico de la Cuenca Neuquina central. *Revista de Ciencias de la Tierra de Sudamérica*, 144: 105036, septiembre de 2024. doi:10.1016/j.jsames.2024.105036.
- Cristallini, E., Tomezzoli, R., Pando, G., Gazzera, C., Martínez, J., Quiroga, J., y Zambrano, O. Controles precuianos en la estructura de la Cuenca Neuquina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 65(2):248-264, 2009.
- Cunningham, N. El fracking en Vaca Muerta, Argentina, conduce a terremotos, 2022. <https://gasoutlook.com/analysis/frackingin-argentinavaca-muerta-leads-to-earthquakes/>.
- Curia, D., Duncan, PM, Grealy, M., McKenna, J. y Hill, A. Micro-Monitoreo sísmico de terminaciones de Vaca Muerta en la Cuenca Neuquina, Argentina. *La vanguardia*, 37(4):262-269, abril de 2018. doi: 10.1190/tle37040262.1.
- Dalmati, R., Souto, J., Zarauz, F., Pertierra, A., Escuder-Bueno, I., y Morales-Torres, A. Implementación del análisis de riesgos para informar la seguridad de las presas desde una perspectiva regulatoria: aplicación al sistema Cerros Colorados (Neuquén, Argentina). *Vigésimo Sexto Congreso Internacional sobre Grandes Represas/Vingt-Sixième Congrès International des Grands Barrages*, página 101 166- 101 180. CRC Press, 2018.
- Davis, SD y Frohlich, C. ¿La inyección de líquido causó (o causará) ¿Terremotos? - Criterios para una evaluación racional. *Cartas de Seis-investigación molecular*, 64(3-4):207-224, julio de 1993. doi: 10.1785/gssrl.64.3-4.207.
- Eaton, DW y Schultz, R. Mayor probabilidad de inducción sismicidad en formaciones de esquisto altamente sobrepresionadas. *Geo-Revista Física Internacional*, 214(1):751-757, mayo de 2018. doi: 10.1093/gji/ggy167.
- Eaton, DW, Igonin, N., Poulin, A., Weir, R., Zhang, H., Pellegrino, S., y Rodríguez, G. Caracterización de la sismicidad inducida durante el monitoreo de fracturas hidráulicas con un conjunto de geófonos de pozos poco profundos y sensores de banda ancha. *Cartas de investigación sismológica*, 89(5):1641-1651, julio de 2018. doi: 10.1785/0220180055.
- Ellsworth, WL Terremotos inducidos por inyección. *Ciencia*, 341 (6142), julio de 2013. doi:10.1126/ciencia.1225942.
- Farahbod, AM, Kao, H., Walker, DM y Cassidy, JF Investigación Evaluación de la sismicidad regional antes y después de la fracturación hidráulica en la cuenca del río Horn, al noreste de Columbia Británica. *Revista canadiense de ciencias de la tierra*, 52(2):112-122, febrero de 2015. doi: 10.1139/cjes-2014-0162.
- Fasola, SL, Brudzinski, MR, Skoumal, RJ, Langenkamp, T., Cur-La estrategia de inyección de fractura hidráulica influye en la probabilidad de terremotos en el yacimiento de esquisto Eagle Ford del sur de Texas. *Cartas de investigación geofísica*, 46(22): 12958-12967, noviembre de 2019. doi:10.1029/2019gl085167.
- Forni, L., Escobar, M., Cello, P., Marizza, M., Nadal, G., Girardin, L., Losano, F., Bucciarelli, L., Young, C. y Purkey, D. Navegando el paisaje de gobernanza del agua y la energía y las estrategias de adaptación al cambio climático en la región de la Patagonia norte de Argentina. *Agua*, 10(6):794, junio de 2018. doi:10.3390/w10060794.
- Forni, L., Mautner, M., Lavado, A., Burke, K. y Gómez, R. *Agua- Las implicaciones de la producción de petróleo y gas de esquisto en Vaca Muerta*. Documento de trabajo del SEI, Argentina, 2021.
- Foulger, GR, Wilson, MP, Gluyas, JG, Julián, BR, y Davies, RJ Revisión global de terremotos inducidos por el hombre. *Reseñas de ciencias de la tierra*, 178:438-514, marzo de 2018. doi: 10.1016/j.earscirev.2017.07.008.

- Foulger, GR, Wilkinson, MW, Wilson, MP, Mhana, N., Tezel, T., y Gluyas, JG Terremotos inducidos por el hombre: E-PIE: una herramienta genérica para evaluar propuestas de terremotos inducidos. *Revista de sismología*, 27(1):21-44, enero de 2023. doi: 10.1007/s10950-022-10122-8.
- Frohlich, C., DeShon, H., Stump, B., Hayward, C., Hornbach, M., y Walter, JI Una revisión histórica de los terremotos inducidos en Texas. *Cartas de investigación sismológica*, 87(4):1022-1038, mayo de 2016. doi:10.1785/0220160016.
- Galloway, E., Hauck, T., Corlett, H., Paná, D. y Schultz, R. Fallas y el colapso kárstico asociado sugieren conductos para el flujo de fluidos que influyen en la sismicidad inducida por la fracturación hidráulica. *Actas de la Academia Nacional de Ciencias*, 115(43), octubre de 2018. doi: 10.1073/pnas.1807549115.
- Ghofrani, H. y Atkinson, G. Respuesta a "Comentario sobre 'Activación Tasa de sismicidad en pozos de fractura hidráulica en la cuenca sedimentaria del oeste de Canadá, por Hadi Ghofrani y Gail M. *Boletín de la Sociedad Sismológica de América*, 111(6):3475-3497, 2021. doi:10.1785/0120210059.
- Ghofrani, H. y Atkinson, GM Tasa de activación de la sismicidad para Pozos de fractura hidráulica en la cuenca sedimentaria del oeste de Canadá. *Boletín de la Sociedad Sismológica de América*, 110(5): 2252-2271, mayo de 2020. doi:10.1785/0120200002.
- Grigoratos, I., Savvaidis, A. y Rathje, E. Distinguiendo el Factores causales de la sismicidad inducida en la cuenca del Delaware: ¿fracturación hidráulica o eliminación de aguas residuales? *Sismo-Cartas de investigación lógica*, 93(5):2640-2658, junio de 2022. doi: 10.1785/0220210320.
- Gupta, HK Una revisión de estudios recientes de terremotos desencadenados por depósitos de agua artificiales, con especial énfasis en los terremotos de Koyna, India. *Reseñas de ciencias de la tierra*, 58(3-4):279-310, octubre de 2002. doi:10.1016/s0012-8252(02)00063-6.
- Healy, JH, Rubey, WW, Griggs, DT y Raleigh, CB Terremotos de Denver. *Ciencia*, 161(3848):1301-1310, septiembre de 1968. doi:10.1126/ciencia.161.3848.1301.
- Hicks, SP, Goes, S., Whittaker, AC y Stafford, PJ Multivari-Evaluación estadística de la susceptibilidad regional a la sismicidad inducida: aplicación a la cuenca pérmica, suroeste de Estados Unidos. *Revista de investigación geofísica: SolidEarth*, 126(12), diciembre de 2021. doi:10.1029/2021jb022768.
- Horton, S. Eliminación de fluidos residuales de fracturación hidráulica mediante inyección Un terremoto en los acuíferos subterráneos provoca una oleada de terremotos en el centro de Arkansas con potencial de causar daños. *Cartas de investigación sísmica*, 83(2):250-260, marzo de 2012. doi: 10.1785/gssrl.83.2.250.
- Howell, JA, Schwarz, E., Spalletti, LA y Veiga, GD La Cuenca Neuquina: una visión general. *Sociedad Geológica de Londres, Publicaciones especiales*, 252(1):1-14, enero de 2005. doi: 10.1144/gsl.sp.2005.252.01.01.
- Häring, MO, Schanz, U., Ladner, F. y Dyer, BC Carácterización del sistema geotérmico mejorado de Basilea 1. *Geotermia*, 37(5):469-495, octubre de 2008. doi:10.1016/j.geotermia.2008.06.002.
- Jacquemond, L., Letort, J., Cotton, F., Causse, M., Grasso, JR, Senechal, G., Ammirati, JB, Derode, B., Grimaud, F., Pauchet, H., Benhamed, S., y Sylvander, M. El análisis de 50 años de sismicidad inducida en Lacq (suroeste de Francia) destaca el papel de la inyección de fluidos. *Revista Geofísica Internacional*, 238(1): 214-234, marzo de 2024. doi:10.1093/gji/ggae119.
- Kettlety, T., Verdon, JP, Butcher, A., Hampson, M. y Crad-Imágenes de alta resolución del terremoto de ML del 2.9 de agosto de 2019 en Lancashire, Reino Unido, inducido por fracturación hidráulica durante las operaciones PNR-2 de Preston New Road. *Cartas de investigación sismológica*, 92(1):151-169, octubre de 2020. doi: 10.1785/0220200187.
- Kugler, RL Características de la roca madre, Los Molles y Shales de Vaca Muerta, Cuenca Neuquina, centro-oeste de Argentina. *Boletín de la AAPG*, 69, 1985. hecho en:10.1306/ad4620ce-16f7-11d7-8645000102c1865d
- Legarreta, L. y Villar, H. La Formación Vaca Muerta (finales Jurásico-Cretácico Temprano). En *Conferencia sobre tecnología de recursos no convencionales*, Cuenca Neuquina, Argentina, 2015. secuencias. doi:10.15530/urtec-2015-2170906.
- Lei, X., Huang, D., Su, J., Jiang, G., Wang, X., Wang, H., Guo, X., y Fu, H. Reactivación de fallas y terremotos con magnitudes de hasta Mw4.7 inducidos por fracturación hidráulica de gas de esquisto en la cuenca de Sichuan, China. *Informes científicos*, 7(1), agosto de 2017. doi: 10.1038/s41598-017-08557-y.
- Lei, X., Wang, Z. y Su, J. ML 5.7 de diciembre de 2018 y ML 5.7 de enero de 2018. Terremotos de magnitud ML 5.3 en enero de 2019 en la cuenca del sur de Sichuan inducidos por fracturación hidráulica de gas de esquisto. *Cartas de investigación sismológica*, 90(3):1099-1110, abril de 2019. doi:10.1785/0220190029.
- LM Neuquén. Se entregaron viviendas antisísmicas para vecinos. de Sauzal, 2024. <https://www.lmneuquen.com/neuquen/se-entregaron-viviendas-antisismicas-vecinos-sauzal-boniton1104994>
- Lomax, A. y Sawaidis, A. Mejora de la localización absoluta de terremotos en el oeste de Texas utilizando correcciones probabilísticas de estaciones de verdad de campo proxy. *Revista de investigación geofísica: Tierra sólida*, 124(11):11447-11465, noviembre de 2019. doi:10.1029/2019jb017727.
- Lu, X., Li, S., Han, R., Jia, B., Xian, C., Ding, F., Zhang, Y., Zhong, S., Xu, Q., y Zuo, X. Una visión general de los desarrollos recientes y los conocimientos sobre los no convencionales en la Formación Vaca Muerta, Argentina. *Ciencias Aplicadas*, 14(4):1366, febrero de 2024. doi: 10.3390/aplicación14041366.
- Mahani, AB, Schultz, R., Kao, H., Walker, D., Johnson, J. y Salas, C. Inyección de fluidos y actividad sísmica en el norte de Montney Play, Columbia Británica, Canadá, con especial referencia al terremoto inducido de magnitud 4,6 del 17 de agosto de 2015. *Boletín de la Sociedad Sismológica de América*, 107(2):542-552, febrero de 2017. doi: 10.1785/0120160175.
- Marchal, D., Manceda, R., Domínguez, R. y Sattler, F. Estructural Geología: Historia tectónica, macroestructuras, mapa de fallas regionales, sistemas de fallas, estructuras de segundo orden e impacto de la herencia. En Minisini, D., Fantín, M., Noguera, IL, y Leanza, HA, editores, *Geología integrada de no convencionales: el caso del play Vaca Muerta*, volumen 121, págs. 99-140. AAPG Memoir, Argentina, 2020. doi:10.1306/13682225M1203831.
- Martínez, MA, Prámparo, MB, Quattrocchio, ME y Zavala, Ambientes depositacionales y potencial de hidrocarburos de la Formación Los Molles del Jurásico Medio, Cuenca Neuquina, Argentina: palinofacies y datos geoquímicos orgánicos. *Geología Andina*, 35(2), junio de 2008. doi:10.5027/andgeov35n2-a05.
- Minisini, D., Fryklund, B., Gerali, F. y Fantín, M. El primero El juego económico no convencional fuera de Norteamérica: contexto, historia y "cooperación". En Minisini, D., Fantín, M., Noguera, IL, y Leanza, HA, editores, *Geología integrada de no convencionales: el caso del play Vaca Muerta*, volumen 121, página 1-24. AAPG Memoir, Argentina, 2020. doi: 10.1306/13682221M1203264.
- Moein, MJA, Langenbruch, C., Schultz, R., Grigoli, F., Ellsworth, WL, Wang, R., Rinaldi, AP y Shapiro, S. Los mecanismos físicos de los terremotos inducidos. *Reseñas de la naturaleza Tierra y medio ambiente*, 4(12):847-863, diciembre de 2023. doi:10.1038/s43017-023-00497-8.
- Mosquera, A., Alonso, J., Boll, A., Alarcón, M., Zavala, C., Arcuri, M., y Villar, H. Migración lateral y evidencias de hidrocarburos cuyosnos en yacimientos de la plataforma de Catriel, Cuenca

- Neuquina. En *7 Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Mardel Plata, Argentina*, pág. 5-8. IAPG, Buenos Aires, 2008.
- Mousavi, SM y Beroza, GC Sismología de aprendizaje profundo. *Ciencia-Encender*, 377(6607), agosto de 2022. doi:10.1126/ciencia.abm4470.
- Muntendam-Bos, AG, Hoedeman, G., Polychronopoulou, K., Draganov, D., Weemstra, C., van der Zee, W., Bakker, RR y Roest, H. Una descripción general de la sismicidad inducida en los Países Bajos. *Revista de geociencias de los Países Bajos*, 101, 2022. doi: 10.1017/njg.2021.14.
- Nación. Neuquén: un hombre murió aplastado en el derrumbe de un acantilado en el lago Mari Menuco, La Nación, 2022. <https://www.lanacion.com.ar/seguridad/neuquen-unhombre-murio-aplastado-en-el-derrumbe-de-un-acantilado-en-el-lago-mari-menuco-nid10022022/>.
- Oprsal, I. y Eisner, L. Correlación cruzada: una herramienta objetiva para indicar sismicidad inducida. *Revista Geofísica Internacional*, 196(3):1536-1543, enero de 2014. doi:10.1093/gji/ggt501.
- Pawley, S., Schultz, R., Playter, T., Corlett, H., Shipman, T., Lyster, S., y Hauck, T. La susceptibilidad geológica de los terremotos inducidos en el yacimiento de Duvernay. *Cartas de investigación geofísica*, 45 (4): 1786-1793, febrero de 2018. doi:10.1002/2017g1076100.
- Petrillo, G., Kumazawa, T., Napolitano, F., Capuano, P. y Zhuang, J. Secuencia de enjambre desencadenada por fluidos respaldada por una descripción de sismicidad no estacionaria similar a una epidemia. *Cartas de Seis-investigación molecular*, 95(6):3207-3220, junio de 2024. DOI: 10.1785/0220240056.
- Peña Castro, AF, Roth, MP, Verdecchia, A., Onwuemeka, J., Liu, Y., Harrington, RM, Zhang, Y., y Kao, H. Vibración por tensión a través del flujo de fluidos y deslizamiento de fallas en una secuencia de terremotos inducidos por fracturamiento hidráulico en la Formación Montney, Columbia Británica. *Cartas de investigación geofísica*, 47(14), julio de 2020. doi: 10.1029/2020gl087254.
- Raleigh, CB, Healy, JH y Bredehoeft, JD Un experimento en Control de terremotos en Rangely, Colorado. *Ciencia*, 191(4233): 1230-1237, marzo de 1976. doi:10.1126/ciencia.191.4233.1230.
- Ramos, V., Naipauer, M., Leanza, H. y Sigismondi, M. Un entorno tectónico excepcional en el margen continental andino. En Minisini, D., Fantín, M., Noguera, IL y Leanza, HA, editores, *Geología integrada de no convencionales: el caso del play Vaca Muerta*, volumen 121, páginas 25-37. AAPG Memoir, Argentina, 2020. doi:10.1306/13682222M1202855.
- Rosa, L. y D'Odorico, P. El nexa agua-energía-alimentos de la Extracción convencional de petróleo y gas en el yacimiento Vaca Muerta, Argentina. *Revista de Producción más Limpia*, 207:743-750, enero de 2019. doi:10.1016/j.jclepro.2018.10.039.
- Savvaidis, A., Lomax, A. y Breton, C. Sismicidad inducida en la cuenca del Delaware, en el oeste de Texas, es causada por la fracturación hidráulica y la eliminación de aguas residuales. *Boletín de la Sociedad Sismológica de América*, 110(5):2225-2241, agosto de 2020. doi: 10.1785/0120200087.
- Schultz, R. y Telesca, L. La correlación cruzada y la reorganización Pruebas para discernir sismicidad inducida. *Geofísica pura y aplicada*, 175(10):3395-3401, mayo de 2018. doi:10.1007/s00024-018-1890-1.
- Schultz, R. y Wang, R. Nuevos casos emergentes de hiposismicidad inducida por fracturamiento hidráulico en la cuenca de esquisto Duvernay East. *Tectonofísica*, 779:228393, marzo de 2020. DOI: 10.1016/j.tecto.2020.228393.
- Schultz, R., Wang, R., Gu, Y. J., Haug, K. y Atkinson, G. A Panorama sismológico de los terremotos inducidos en la zona de Duvernay cerca de Fox Creek, Alberta. *Revista de investigación geofísica: Tierra sólida*, 122(1):492-505, enero de 2017. doi: 10.1002/2016jb013570.
- Schultz, R., Atkinson, G., Eaton, DW, Gu, YJ y Kao, H. El volumen de fracturación hidráulica está asociado con la productividad sísmica inducida en el área de juego de Duvernay. *Ciencia*, 359(6373): 304-308, enero de 2018. doi:10.1126/ciencia.aaa0159.
- Schultz, R., Skoumal, RJ, Brudzinski, MR, Eaton, D., Baptie, B., y Ellsworth, W. Sismicidad inducida por fracturamiento hidráulico. *Reseñas de Geofísica*, 58(3), julio de 2020. DOI: 10.1029/2019rg000695.
- Schultz, R., Beroza, GC y Ellsworth, WL Un riesgo-Enfoque basado en la gestión de la sismicidad inducida por fracturación hidráulica. *Ciencia*, 372(6541):504-507, abril de 2021a. doi: 10.1126/ciencia.abg5451.
- Schultz, R., Beroza, GC y Ellsworth, WL Una estrategia para Elección de umbrales de luz roja para gestionar la sismicidad inducida por fracturación hidráulica en América del Norte. *Revista de Geo-Investigación física: Tierra sólida*, 126(12), diciembre de 2021b. doi: 10.1029/2021jb022340.
- Schultz, R., Ellsworth, WL y Beroza, GC Límites estadísticos sobre cómo se detiene la sismicidad inducida. *Informes científicos*, 12(1), enero de 2022. doi:10.1038/s41598-022-05216-9.
- Schultz, R., Baptie, B., Edwards, B. y Wiemer, S. Luz roja Umbrales de sismicidad inducida en el Reino Unido. *Sísmica*, 2(2), octubre de 2023a. doi:10.26443/sismica.v2i2.1086.
- Schultz, R., Ellsworth, WL y Beroza, GC Un conjunto Enfoque para caracterizar la sismicidad inducida por arrastre. *Cartas de investigación molecular*, 94(2A):699-707, enero de 2023b. DOI: 10.1785/0220220352.
- Schultz, R., Park, Y., Aguilar Suárez, AL, Ellsworth, WL y Beroza, GC Fallas en escalón reactivadas por la eliminación de aguas residuales cerca del lago Musreau, Alberta. *Revista Geofísica Internacional*, 235(1):417-429, mayo de 2023c. doi:10.1093/gji/ggad226.
- Silvestro, J. y Zubiri, M. Convergencia oblicua: modelo estructural alternativo para la Dorsal Neuquina (39oS)-Neuquén. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 63(1):49-64, 2008.
- Skoumal, RJ, Brudzinski, MR, Currie, BS y Levy, J. Op-cronometrar la correspondencia de plantillas de terremotos de múltiples estaciones a través del reexamen de la secuencia de Youngstown, Ohio. y *Cartas de Ciencia Planetaria*, 405:274-280, noviembre de 2014. DOI: 10.1016/j.epsl.2014.08.033.
- Skoumal, RJ, Brudzinski, MR y Currie, BS Terremotos en producido por fracturación hidráulica en el municipio de Poland, Ohio. *Boletín de la Sociedad Sismológica de América*, 105(1):189-197, enero de 2015. doi:10.1785/0120140168.
- Skoumal, RJ, Brudzinski, MR y Currie, BS Proximidad de Pre-El basamento cámbrico afecta la probabilidad de sismicidad inducida en las cuencas de los Apalaches, Illinois y Williston, en el centro y este de los Estados Unidos. *Geosfera*, 14(3):1365-1379, abril de 2018. doi: 10.1130/ges01542.1.
- Skoumal, RJ, Barbour, AJ, Brudzinski, MR, Langenkamp, T., y Kaven, JO Sismicidad inducida en la cuenca de Delaware, Texas. *Revista de investigación geofísica: Tierra sólida*, 125(1), enero de 2020. doi:10.1029/2019jb018558.
- Surma, K. Los terremotos inducidos por el fracking son una amenaza para Argentina mientras los reguladores se mantienen al margen. *Noticias sobre el clima desde dentro*, 2024. <https://insidedimateneews.org/noticias/14042024/argentina-fracking-terremotos/>.
- Tamburini-Beliveau, G., Grosso-Heredia, JA, Béjar-Pizarro, M., Pérez-López, R., Portela, J., Cismondi-Duarte, M., y Monserrat, O. Evaluación de la deformación del suelo y la sismicidad en dos áreas de intensa producción de hidrocarburos en la Patagonia argentina. *Informes científicos*, 12(1), noviembre de 2022. doi: 10.1038/s41598-022-23160-6.
- Urien, C. y Zambrano, J. Sistemas petroleros en el Neuquén

Cuenca, Argentina: Capítulo 32: Parte V Estudios de caso- Hemisferio occidental, 1994. doi:10.1306/M60585C32.

Petróleo y gas de esquisto técnicamente recuperables de EE. UU.-EIA y UIA

Recursos: Una evaluación de 137 formaciones de esquisto en 41 países fuera de los Estados Unidos. *Departamento de Energía de Estados Unidos*. 2013. <https://www.EIA.gov/analisis/estudios/worldshalegas/pdf/resumen.pdf>.

Petróleo de esquisto y gas de esquisto técnicamente recuperables de EE. UU.-EIA, UIA

Fuentes: Argentina. En *Departamento de Energía de Estados Unidos*. 2015. <https://www.EIA.gov/analisis/estudios/worldshalegas/>.

Varela, R., Marchal, D., Cuervo, S., Lombardo, E., Perl, Y., Hryb, D. y Pateti, P. Geomecánica: presión, campo de tensiones y fracturas hidráulicas. En Minisini, D., Fantín, M., Noguera, I.L y Leanza, HA, editores, *Geología integrada de no convencionales: el caso del play Vaca Muerta*, volumen 121, páginas 351–376. AAPG Memoir, Argentina, 2020. doi: 10.1306/13682233M1203836.

Verdon, JP y Bommer, JJ comentan sobre “Tasa de activación de “Sismicidad en pozos de fractura hidráulica en la cuenca sedimentaria del oeste de Canadá” por Hadi Ghofrani y Gail M. Atkinson. *Boletín de la Sociedad Sismológica de América*, 111(6):3459–3474, octubre de 2021. doi:10.1785/0120200350.

Verdon, JP, Baptie, BJ y Bommer, JJ Un marco mejorado

Trabajo para Discriminar la Sismicidad Inducida por Actividades Industriales de los Terremotos Naturales. *Cartas de investigación sismológica*, abril de 2019. doi:10.1785/0220190030.

Vásquez, J., Spagnotto, S., Mescua, J., Giambiagi, L. y Sigismondi, M. Aumento notorio de la sismicidad de la provincia del Neuquén, en el período 2015-2020. En *Boletín Brackebuschiano Geociencias y Sociedad de la Asociación Geológica Argentina*. 2020. <https://geologica.org.ar/wp-content/uploads/2020/12/boletin-octubre-noviembre-2020.pdf>.

Wang, J., Li, T., Gu, YJ, Schultz, R., Yusifbayov, J. y Zhang, M. Reactivación de fallas secuenciales y activación secundaria en el enjambre de terremotos inducido por Red Deer en marzo de 2019. *Cartas de investigación geofísica*, 47(22), noviembre de 2020. doi:10.1029/2020gl090219.

Wetmiller, RJ Terremotos cerca de Rocky Mountain House, Alabama berta, y su relación con las instalaciones de producción de gas. *Revista canadiense de ciencias de la tierra*, 23(2):172-181, febrero de 1986. doi: 10.1139/e86-020.

Zhai, G., Shirzaei, M. y Manga, M. Sismicidad profunda generalizada en La cuenca de Delaware, Texas, está impulsada principalmente por la inyección de aguas residuales poco profundas. *Actas de la Academia Nacional de Ciencias*, 118(20), mayo de 2021. doi:10.1073/pnas.2102338118.

Zhou, W., Lanza, F., Grigoratos, I., Schultz, R., Cousse, J., Trut-Nevyte, E., Muntendam-Bos, A., y Wiemer, S. Gestión de riesgos de sismicidad inducida por sistemas geotérmicos mejorados: una guía de buenas prácticas. *Reseñas de Geofísica*, 62(4), octubre de 2024. doi:10.1029/2024rg000849.

Álvarez Mullally, M. Vaca Muerta: sesenta sismos en diez días, OPSur, 2021. <https://opsur.org.ar/2021/07/27/vaca-muertasesenta-sismos-en-diez-dias/>.

El artículo *Persiguiendo el fantasma del fracking en Vaca Muerta Formación: Sismicidad inducida en la Cuenca Neuquina, Argentina* © 2024 por Ryan Schultz tiene licencia CC BY 4.0.