

## Evaluación de la deformación del suelo y la sismicidad en dos áreas de intensa producción de hidrocarburos en la Patagonia argentina. *Versión adaptada.*

Guillermo Tamburini-Beliveau, Javier A. Grosso-Heredia

Adaptación no académica y simplificada del texto científico publicado en la revista *Scientific Reports*:

Assessment of ground deformation and seismicity in two areas of intense hydrocarbon production in the Argentinian Patagonia – Tamburini-Beliveau et al. *Scientific Reports* (2022) 12:19198 | <https://doi.org/10.1038/s41598-022-23160-6>.

Para mayores detalles o aclaraciones consultar la versión original on-line o contactar con los autores.

### Resumen

La explotación de hidrocarburos, tanto convencionales como no convencionales, puede tener consecuencias ambientales aún poco conocidas, como la deformación del suelo y la sismicidad inducida o aquella conocida como desencadenada o gatillada. Identificar y caracterizar estos efectos es fundamental para fines de prevención o mitigación de riesgos, especialmente cuando impactan en áreas pobladas. En este trabajo se presentan dos casos de estudio de dichos efectos en cuencas productoras de hidrocarburos en Argentina, la cuenca Neuquina y la del Golfo de San Jorge. Se evalúa la intensa actividad de producción de hidrocarburos en los últimos años y su potencial vínculo con la ocurrencia de dos sismos de magnitud 4.9 y 5 cerca de los campos de pozos en operación. Un análisis conjunto de interferometría de radar satelital (técnica que se sirve de datos satelitales para observar deformaciones ocurridas en la superficie terrestre) y registros de inyección y extracción de fluidos (hidrocarburos y otros líquidos o gases utilizados por la industria) en el subsuelo, demuestra que entre 2017 y 2020 se produjeron desplazamientos verticales (levantamiento o hundimiento) del suelo en ambas áreas de estudio sobre campos de pozos en actividad, pudiendo indicar esto una relación entre las deformaciones del suelo en superficie y las actividades de producción de hidrocarburos. Los modelos matemáticos de deformación cosísmica (es decir, modelos que permiten interpretar la deformación de la superficie consecuente a la ocurrencia del sismo) de los dos terremotos estudiados, restringen las profundidades de los hipocentros (el origen subterráneo del sismo) a menos de 2 km de profundidad. La ausencia de sismicidad antes del inicio de las actividades hidrocarburíferas en ambas áreas, y la ocurrencia de dos importantes y poco profundos sismos en las cercanías de los campos de pozos activos justo después de los períodos de intensa producción, apuntan hacia la posible asociación entre ambos fenómenos (sismicidad e industria hidrocarburífera).

## Glosario

---

### Convencionales/no convencionales. Fracturación hidráulica/fracking:

Se refiere al uso de técnicas habituales y clásicas para el desarrollo de una acción (convencionales), o por el contrario el uso de técnicas modernas, inusuales o más complejas (no convencionales). En el caso de los hidrocarburos se refiere al uso de técnicas de extracción de hidrocarburos mucho más invasivas y activas (más costosas económica y energéticamente) que tienen como objetivo explotar aquellos yacimientos que por técnicas tradicionales (convencionales) son inviables. No convencional se refiere al uso de la técnica de fracturación hidráulica, que consiste en la inyección de fluidos a muy alta presión en el subsuelo para fracturar la roca donde se encuentra atrapado el hidrocarburo y así permitir su extracción. No convencional, fracturación hidráulica y fracking son sinónimos en este contexto. Por oposición tenemos la explotación convencional que se refiere a los métodos clásicos e históricos de extracción petrolera.

### Cosmismo

Es el desplazamiento superficial asociado a la ocurrencia de un sismo.

### Interferograma

Gráfico en escala de colores (comúnmente en grises o en arcoíris) que muestra los resultados de la aplicación de la técnica InSAR. En el caso que nos interesa, suele ser un mapa donde la escala de color muestra la deformación sufrida por la superficie terrestre en un lapso de tiempo. Se obtiene tras el procesado computerizado de datos obtenidos por un radar instalado en un satélite artificial. Tras un procesado completo, el área deformada se observa como una mancha de color distinto al color predominante de la imagen que corresponde a zonas estables sin movimiento. Con las salvedades correspondientes puede interpretarse como una radiografía de la tierra tomada desde un satélite.

### Sismicidad disparada

El sismo disparado es aquel en el que la actividad industrial ha favorecido su ocurrencia en una zona en la que las estructuras geológicas ya se encontraban en un estado de fuerzas favorables al mismo y que, por lo tanto, podría haberse dado por causas naturales (dentro de una escala temporal geológica, es decir, tras cientos, miles o incluso millones de años). Dadas estas características, el sismo disparado tiene más oportunidades de ser catastrófico que el inducido ya que expresa magnitudes de sismos naturales que pueden ser elevadas, mientras que el sismo inducido tiende a ser de magnitudes menores por responder estrictamente a los cambios físicos introducidos por la acción humana, que difícilmente tomarán la magnitud que tienen los de orden geológico. En palabras de Mulargia, el efecto antrópico (humano) disparador de un sismo debe entenderse como el de la ligera fuerza de un dedo accionando el gatillo de un arma que provoca una detonación con una fuerza miles de veces superior a la ejercida por el dedo.

### Sismicidad inducida

El sismo inducido es aquel provocado por completo debido a la actividad industrial, ya que no hubiera sido posible por procesos naturales.

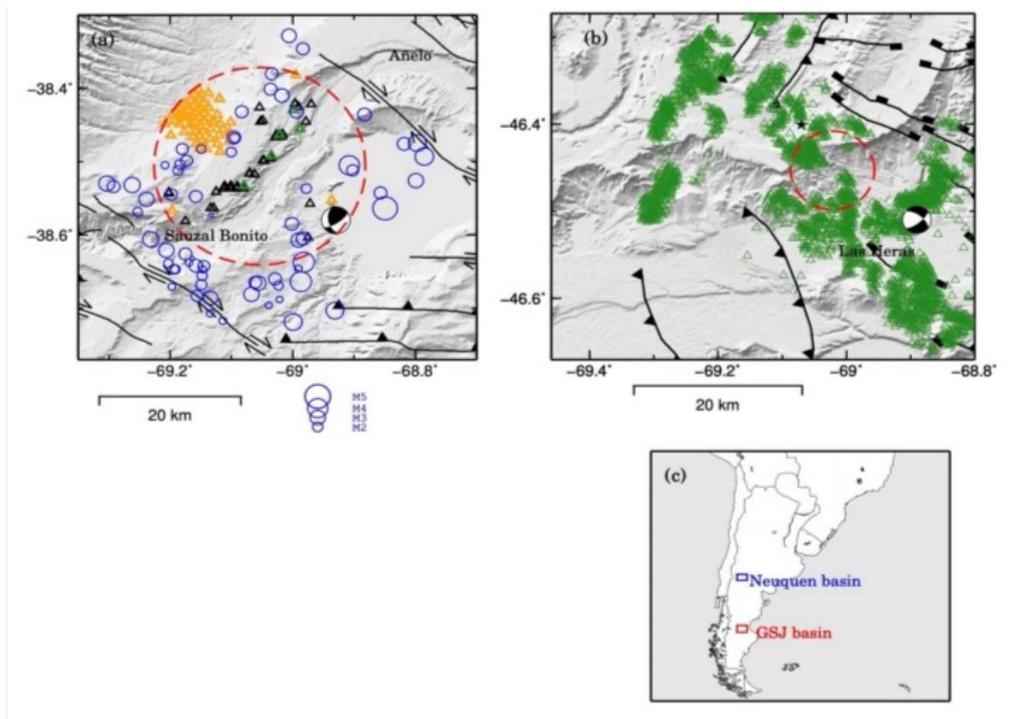
**Terremoto, sismo o séismo son sinónimos.**

## Introducción

Los hidrocarburos son una materia prima muy demandada y la explotación de yacimientos subterráneos para la producción de hidrocarburos es una actividad industrial fundamental. Sin embargo, los beneficios económicos y sociales de su extracción suelen ir acompañados de consecuencias indeseables, como impactos ambientales y malestar o conflicto social. La anticipación a estos efectos colaterales es clave para asegurar el buen desempeño de las actividades de producción de hidrocarburos.

La literatura ilustra varios ejemplos de riesgos geológicos desencadenados por la industria de hidrocarburos en todo el mundo, como los desplazamientos del suelo asociados con la inyección y extracción de fluidos; la sismicidad inducida por la extracción de fluidos y la deformación superficial asociada (p. ej., el campo gasífero de Lacq en Francia<sup>4</sup> o Groningen en los Países Bajos<sup>5</sup>); sismicidad correlacionada con la inyección de aguas residuales y de retorno de la industria (flowback) y la recuperación asistida de petróleo<sup>6</sup>, con la fracturación hidráulica de gas de lutita (fracking)<sup>7, 8, 9</sup>, y con la estimulación hidráulica para sistemas geotérmicos mejorados, que opera de manera similar a la producción no convencional de hidrocarburos<sup>10</sup>. Las magnitudes máximas de los sismos desencadenados por estas actividades pueden alcanzar magnitudes significativas, como ocurrió en Oklahoma en noviembre de 2011, con un sismo de 5,7 Mw relacionado con la inyección de aguas residuales<sup>11</sup> o en México en 2011, con un sismo de 7,2 Mw relacionado con la extracción de fluidos en un campo geotérmico.

Tres de las cinco cuencas productoras de hidrocarburos de Argentina están ubicadas en Patagonia. La cuenca Neuquina en la Patagonia Norte fue una de las primeras explotaciones petroleras en Argentina. Las operaciones comenzaron a principios del siglo XX continuando hasta la fecha actual. Las explotaciones no convencionales<sup>13,20</sup> de formaciones geológicas de tight y shale en la cuenca comenzaron en 2011. Las reservas no convencionales estimadas de la cuenca Neuquina<sup>1, 2, 3</sup> son 9000 billones de m<sup>3</sup> de gas natural y 2.5 billones de m<sup>3</sup> de petróleo. Según la Administración de Energía de EE. UU., estas formaciones son las segundas más grandes de gas y la cuarta de petróleo no convencionales a escala mundial<sup>14</sup>. El inicio de la fracturación hidráulica en la formación Vaca Muerta, una formación de lutitas bien conocida en la cuenca Neuquina, ha sido seguido por un aumento significativo de la actividad sísmica, ver Fig. 1a.



**Figura 1** Áreas de estudio en la Patagonia argentina. (a) Área de la cuenca Neuquina. Los círculos azules representan epicentros de eventos sísmicos escalados por magnitud local (ML) ocurridos en el período noviembre 2015 a noviembre 2020, del catálogo del Instituto Nacional de Prevención Sísmica (INPRES). El círculo rojo discontinuo indica el área de 15 km de radio analizada en la Fig. 3a. Los triángulos negros indican la ubicación de los pozos de fracking (donde se extraen hidrocarburos no convencionales después de la inyección de agua tratada con aditivos), los triángulos naranjas indican la ubicación de los pozos convencionales y los triángulos verdes indican la ubicación de los pozos sumideros de inyección de aguas residuales (ubicaciones de la Secretaría de Energía de Argentina). (b) Área del Golfo de San Jorge. Los triángulos verdes representan pozos de producción. El círculo rojo discontinuo indica el área de 5 km de radio analizada en la Fig. 7a. (c) Mapa que muestra la región de América del Sur con las dos áreas de estudio delineadas en azul (cuenca Neuquina) y rojo (cuenca GSJ).

En la Patagonia Sur, la cuenca del Golfo de San Jorge (GSJ) es también una cuenca histórica productora de hidrocarburos donde se han perforado más de cuarenta mil pozos desde que comenzaron las primeras perforaciones en busca de agua en esta árida región. A diferencia de la cuenca Neuquina, aquí solo se explotan recursos convencionales<sup>13</sup> (Fig. 1 b).

A pesar de la intensa actividad hidrocarburífera que se lleva a cabo en estas cuencas, es evidente la falta de un análisis sobre los posibles riesgos geológicos asociados a ésta, tales como la deformación del suelo y la sismicidad inducida. Solo dos publicaciones abordaron el tema en la cuenca Neuquina y ninguna en la cuenca GSJ. La reciente ocurrencia de dos sismos significativos dentro de los campos de producción de hidrocarburos en estas dos cuencas, el sismo  $M_L$  5 2019 del 17 de octubre, cerca del la población de Las Heras en la cuenca GSJ, y el evento  $M_L$  4.9 2019 del 7 de marzo, cerca del pueblo de Sauzal Bonito en la cuenca Neuquina (Fig. 1), han provocado malestar social entre la población. Cabe señalar que estas áreas están ubicadas en la región extraandina de baja sismicidad<sup>17</sup>, y que no se habían reportado sismos previos al inicio de las actividades de producción de hidrocarburos.

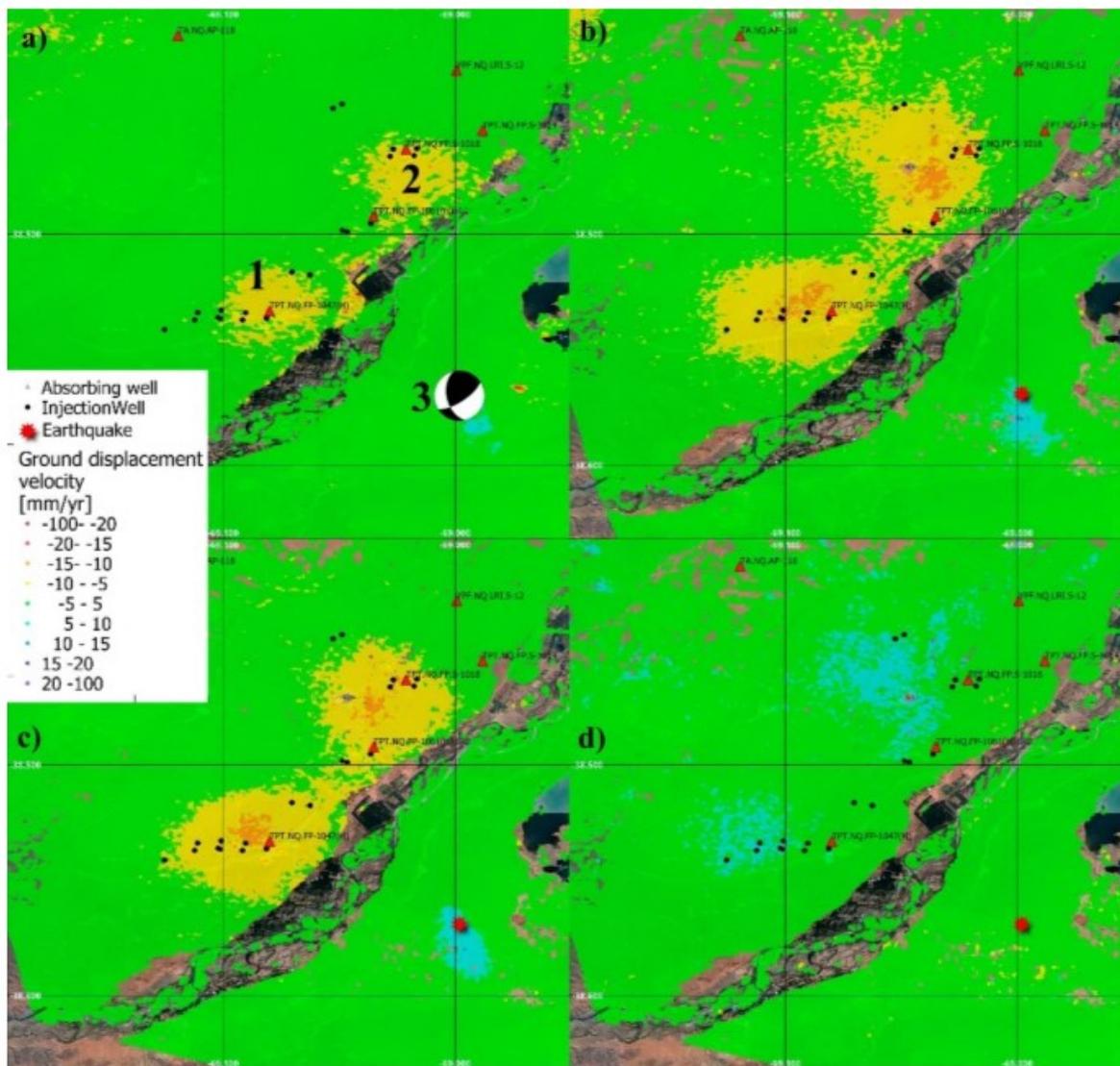
Este estudio tiene como objetivo analizar la relación entre las actividades hidrocarburíferas y los desplazamientos del suelo y el inicio de eventos sísmicos en dos zonas de la Patagonia argentina. Para ello se analizan conjuntamente los registros de inyección y extracción de fluidos en el subsuelo, el número de etapas de fractura hidráulica y la sismicidad y movimientos del suelo medidos con datos de Interferometría de Radar de Apertura Sintética Satelital (DInSAR) para el período enero 2017 a diciembre 2020.

## Resultados

---

### La cuenca neuquina

El conjunto de datos disponibles analizados en la cuenca de Neuquén incluye: mediciones de desplazamiento (deformación de la superficie terrestre a lo largo del tiempo) obtenidas con una técnica que se nutre de datos de satélite (interferometría diferencial de radar de apertura, DInSAR), datos sísmicos (fecha, hora y lugar de ocurrencia de los terremotos) y volumen de producción mensual de pozos convencionales y no convencionales, incluídos también los volúmenes de inyección (agua y aditivos, gas, petróleo). Enfocamos el análisis en una región alrededor del epicentro del terremoto principal (7 de marzo de 2019), que en el período analizado ha experimentado una intensa producción de hidrocarburos, una alta concentración de eventos sísmicos y desplazamientos de suelo en diferentes áreas.

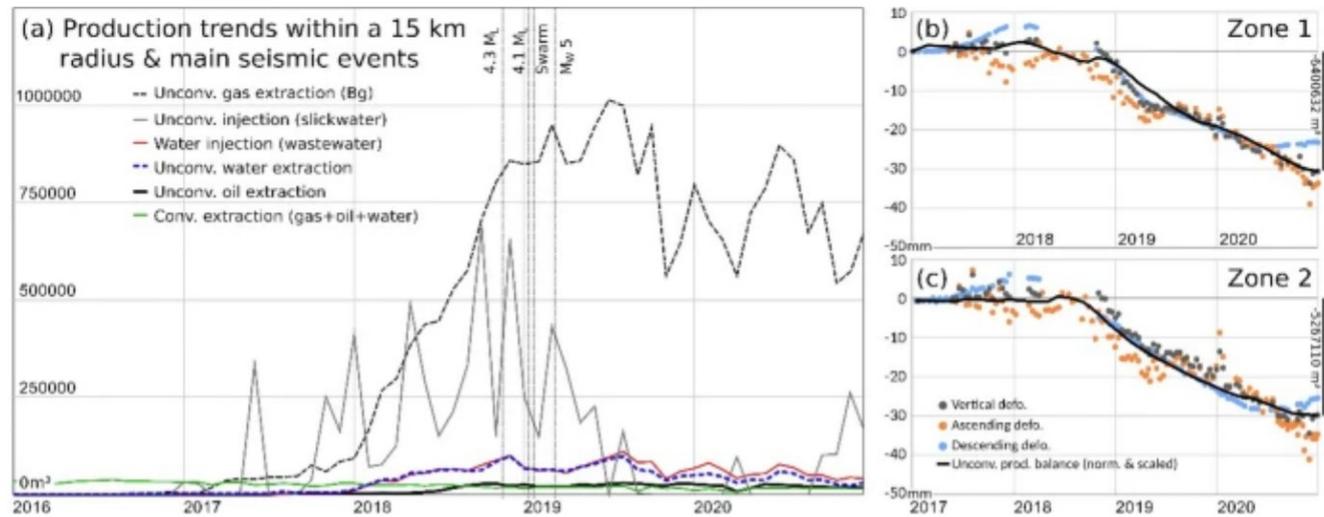


**Figura 2** (a) y (b) Mapas de deformación del suelo acumulada de enero de 2017 a diciembre de 2020 obtenidos por satélite. Distintas mediciones según la posición del satélite. (c) y (d) Muestran el desplazamiento vertical del suelo y el componente Oeste-Este respectivamente. Las principales zonas de deformación marcadas con 1 y 2 corresponden a áreas con alta concentración de pozos, 33 y 25 respectivamente. Los triángulos rojos indican la ubicación de pozos sumideros de eliminación de agua de retorno. La estrella roja indica el epicentro del terremoto ML 4.9 del 7 de marzo de 2019.

La Figura 2 muestra los mapas de velocidad de desplazamiento (magnitud de deformación del suelo para el periodo de estudio) obtenidos con los datos de los satélites Sentinel-1 de la Agencia Espacial Europea, distintas perspectivas y mediciones según la órbita del satélite. Los tonos azules representan puntos que sufren levantamiento, mientras que los rojos muestran puntos con hundimiento.

Los resultados presentados en la Fig. 2 permitieron identificar dos regiones de desplazamiento del suelo con forma elipsoidal, con un radio aproximado de 2,3 km. En estas áreas, identificadas con los números 1 y 2 en la Fig. 2, se han perforado un gran número de nuevos pozos de fracking. El análisis de estas regiones se proporciona en la sección “Producción de hidrocarburos y desplazamientos del suelo en la cuenca Neuquina”. El análisis satelital permitió la identificación de una tercera zona de afectación, etiquetada con el número 3 en la Fig. 2, que está relacionada con la deformación causada por el terremoto del 7 de marzo de 2019, que se analiza en la sección “Producción de hidrocarburos y sismicidad en la cuenca Neuquina”. Los resultados se refieren al período de enero de 2017 a diciembre de 2020.

La Figura 3a muestra los datos de producción de hidrocarburos en el área de estudio de la cuenca Neuquina durante el período 2015-2020: extracción mensual (convencional y no convencional), inyección en pozos sumideros (flowback) e inyección en pozos de fracking. Los principales eventos sísmicos se han representado en el gráfico como líneas verticales. En la Figura 3b y c se muestran las series temporales de deformación del suelo obtenidas a partir de los datos de satélite en las zonas 1 y 2 respectivamente y junto con la curva de balance (inyección menos extracción) total de fluidos no convencionales acumulados para cada zona. Este último parámetro ha sido adaptado (escalado) para mostrar mejor la correlación entre ambos procesos. Es decir, la escala de la curva de balance de fluidos (en m<sup>3</sup>) se ha ajustado para que su amplitud coincida con la del desplazamiento del suelo (en mm).



**Figura 3(a)** Evolución de la producción de hidrocarburos (en m<sup>3</sup>) entre 2016 y 2020 en el área delimitada por el círculo rojo discontinuo en la Fig. 1 a. Las líneas discontinuas verticales muestran los principales eventos sísmicos. Los paneles (b) y (c) muestran la serie temporal de deformación del suelo para las zonas 1 y 2 respectivamente, durante el período 2017-2020 y el balance de producción no convencional acumulado mensual (línea negra) escalado. La barra de escala vertical en el eje derecho de las Figuras (b) y (c) proporciona información sobre la cantidad volumétrica total acumulada (m<sup>3</sup>) del balance de fluidos no convencionales.

### Producción de hidrocarburos y desplazamientos de suelo en la cuenca Neuquina

Las datos satelitales revelaron desplazamiento del suelo en las zonas 1 y 2 (Fig. 2). Las series de tiempo de deformación (TS por las siglas en inglés) de estas áreas se pueden observar en la Fig. 3 b y c, respectivamente. Allí se observa la correspondencia en la evolución del proceso de deformación del suelo (hundimiento) y la actividad hidrocarburiífera predominante (extracción). Por analogía podemos decir que el suelo, la corteza terrestre, se deshincha al extraer fluidos.

La Figura 3a muestra el inicio de la actividad no convencional en enero de 2017. Un claro cambio en la tendencia ocurrió en julio de 2017 con el inicio de la intensa actividad del fracking visible en el primer pico alto de inyección (línea gris) y reflejado en el aumento posterior en la extracción de gas (línea negra discontinua, alrededor del comienzo de 2018). Las zonas 1 y 2 están afectadas por la acción acumulada de múltiples pozos trabajando simultáneamente pero en diferentes etapas de la cadena productiva (fracturación o extracción). Considerando el período enmarcado en la Fig. 3a, la actividad predominante en términos de cambios de volumen del subsuelo es la extracción de gas. Por lo tanto, los desplazamientos superficiales esperados desencadenados en este período son hundimientos <sup>4, 5, 12, 24</sup>, lo que concuerda con los desplazamientos observados.

La deformación media en la zona 1 es de aproximadamente 10 mm/año. Las velocidades máximas de deformación alcanzan los 13 mm/año en el centro de las áreas elipsoidales, aunque

ese es el dato medido con el satélite y puntualmente pueden ser mayores. Cifras similares se obtienen para la zona 2.

Para comprender la relación entre la deformación del suelo y las actividades de producción de hidrocarburos, se aplicaron también modelados matemáticos que observan la relación de los cambios de volumen que han tenido lugar en el subsuelo (como fruto de la actividad industrial en este caso), y la deformación consecuente en la superficie terrestre. Podríamos asemejarlo a observar la deformación sufrida por un globo al inyectar o extraer aire (gas y líquidos, ambos son fluidos). Este modelado matemático fue realizado en las zonas 1 y 2 utilizando un enfoque conocido como modelado de Mogi, que es usado en estudios de volcanes y las relaciones entre los flujos de magma (la lava en el interior de la corteza) y la deformación de los volcanes en superficie y cercanías. Se calculó con el modelo de Mogi el volumen necesario de fluido manipulado (inyección o extracción) para generar la deformación observada (hundimiento) con el satélite durante el período completo (enero 2017-diciembre 2021).

El modelado matemático de Mogi indica que la deformación de las zonas 1 y 2 se puede explicar con dos fuentes de extracción de fluido ubicadas a 4,5 km de profundidad (fuente sur) y 3,4 km de profundidad (fuente norte). Estas profundidades son consistentes con la profundidad promedio de los pozos que operan en ambas áreas (3,3 km de profundidad y 3,4 km de profundidad en la zona sur y norte respectivamente). El cambio de volumen necesario para producir la deformación según el modelo es  $-2,7E + 06 \text{ m}^3$  para la fuente del sur y  $-1,54E + 06 \text{ m}^3$  para la fuente del norte. Los cambios de volumen de fluidos extraídos e inyectados en ambas áreas durante el mismo período y según los datos oficiales de producción son mayores:  $-6,4E + 06 \text{ m}^3$  en el sur y  $-5,3E + 06 \text{ m}^3$  en el norte. Pero a pesar de las diferencias entre el modelo y la realidad, los valores se encuentran en el mismo orden de magnitud, y considerando que las simplificaciones del modelo conllevan un margen de error, es posible afirmar que el modelo teórico de Mogi avala las observaciones satelitales, permitiendo establecer una relación entre la deformación superficial observada y la producción hidrocarbúfera.

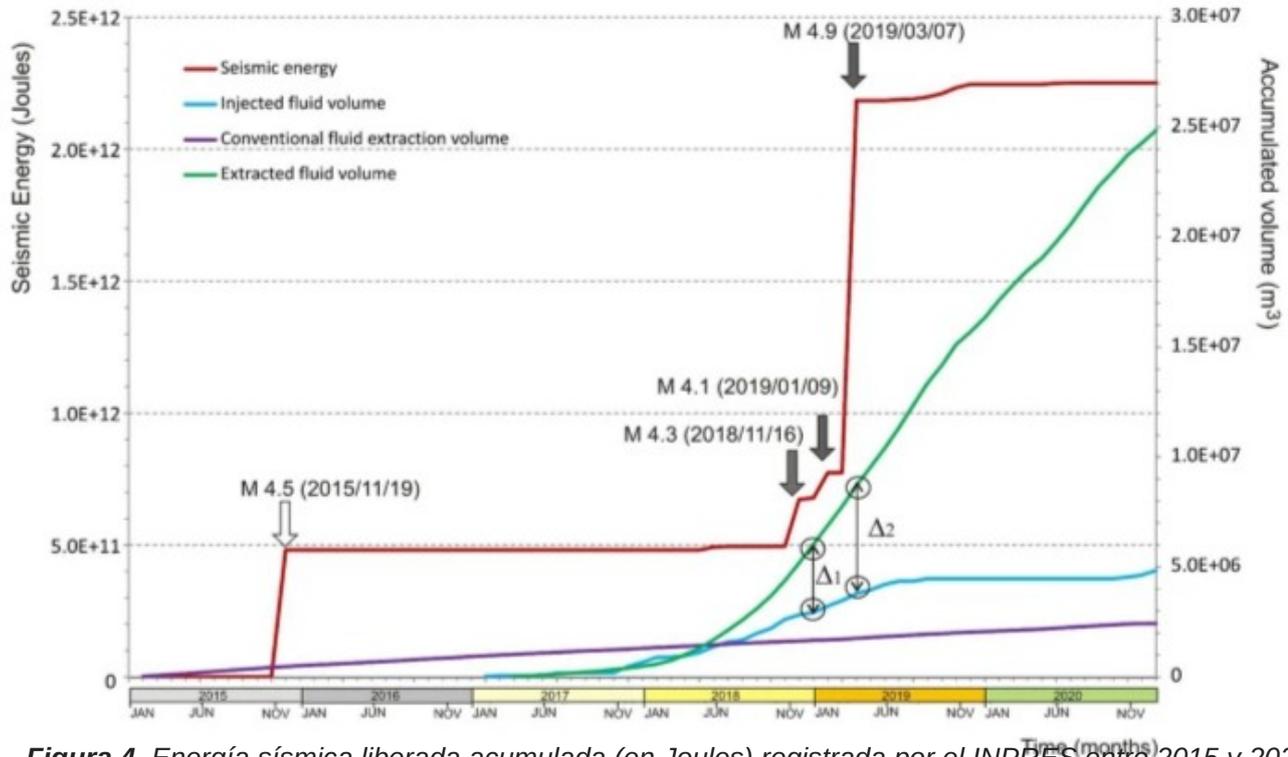
### **Producción de hidrocarburos y sismicidad en la cuenca Neuquina**

El análisis de los catálogos sísmicos revela que no se registraron terremotos en el área de estudio antes de 2015. Esta quietud cambió repentinamente con la intensificación de las actividades de fracturación hidráulica en el área, como se muestra en la Fig. 1. Por lo tanto, investigamos la relación entre las actividades de hidrocarburos y la sismicidad observada.

Los sismos clasificados como inducidos o gatillados normalmente muestran una relación temporal y espacial con la inyección subterránea y las operaciones industriales. Es decir, se dan en las mismas regiones y tiempos en los que sucede la actividad industrial. Para investigar la posible relación entre la sismicidad y las actividades de hidrocarburos en el área, se analizan los eventos sísmicos registrados por el Instituto Nacional de Prevención Sísmica de Argentina (INPRES<sup>29</sup>) durante el período noviembre 2015 a noviembre 2020 (figuras complementarias S1, S2). En este período se registraron un total de 63 sismos, con un sismo máximo de magnitud local ( $M_L$ ) 4,9.

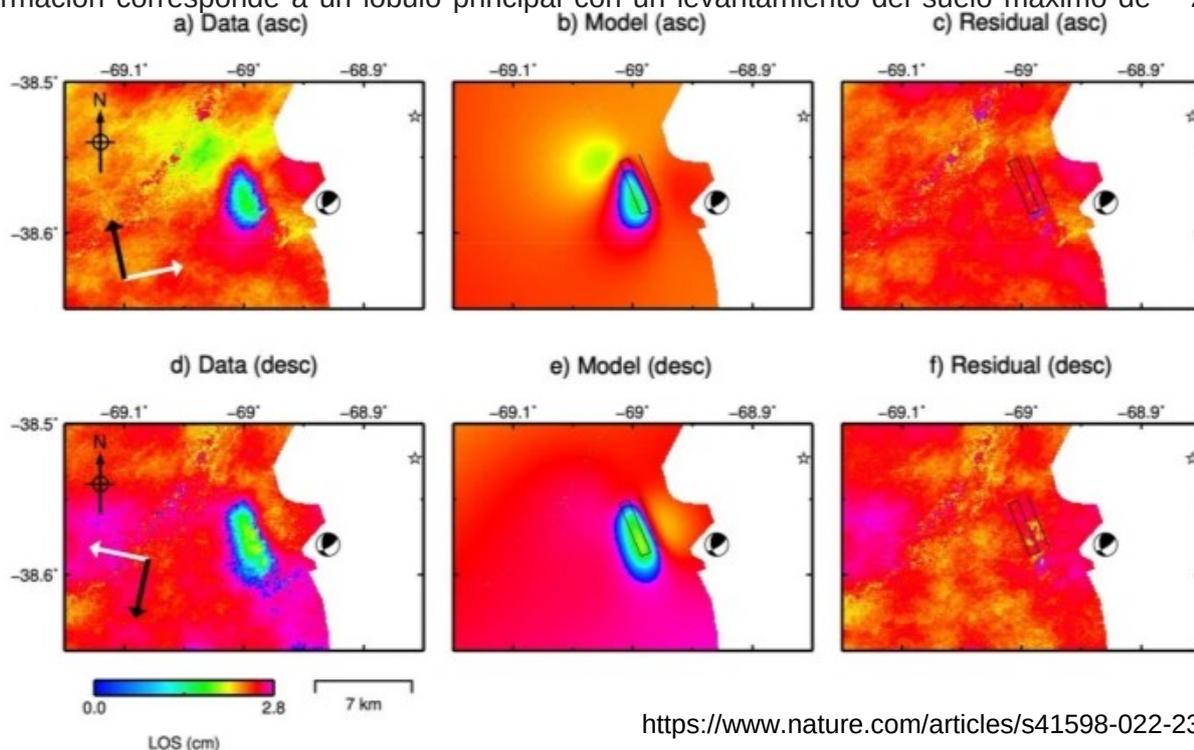
La relación temporal entre las operaciones subterráneas de fracking y la ocurrencia de terremotos, para el período de enero de 2015 a diciembre de 2020, se muestra en la Fig. 4. La energía sísmica acumulada se compara con los volúmenes acumulados de inyección/extracción de fluidos durante las actividades de producción de hidrocarburos tanto convencionales como no convencionales. De este modo se observa si hay una posible correspondencia entre los volúmenes de fluidos (hidrocarburos y agua) manipulados por la industria y la energía asociada a los terremotos en la zona (hay que comprender que un terremoto es equivalente a la liberación de una gran energía).

Los terremotos de 2019 ( $M_L$  4.1 y  $M_L$  4.9) aparecieron en las etapas finales de inyección de fluidos y en las primeras etapas de extracción de fluidos. Asimismo, y relacionado con el estancamiento de la inyección de fracking (línea azul), la energía sísmica disminuyó a un umbral bajo sin sismos relevantes de  $M_L > 3.6$ . El evento sísmico más grande registrado en el área de estudio ocurrió el 7 de marzo de 2019 a las 05:10:37 UTC, con magnitud local  $M_L$  4.9, según INPRES y magnitud de momento  $M_w$  de 5 según (USGS)<sup>26</sup>.



**Figura 4.** Energía sísmica liberada acumulada (en Joules) registrada por el INPRES entre 2015 y 2020, versus diferentes operaciones subterráneas dentro del área de estudio de la cuenca Neuquina (en  $m^3$ ). Las líneas azul y verde muestran el volumen de fluido inyectado y extraído respectivamente, utilizando métodos no convencionales. La línea morada muestra el volumen de líquido extraído utilizando métodos convencionales. Los datos de producción usados para esta Figura son los mismos usados en la Fig. 3.

Este evento sísmico produjo una deformación del suelo medible con datos DInSAR de satélite. Usamos los interferogramas cosísmicos (los mapas de deformación obtenidos con los datos DInSAR) para definir las características del terremoto. La Figura 5 muestra la deformación del suelo asociada con el terremoto para las distintas observaciones satelitales. El patrón de deformación corresponde a un lóbulo principal con un levantamiento del suelo máximo de  $\sim 22$  mm.



**Figura 5 (a) y (d)** Muestran la deformación provocada por el terremoto de Mw 5, 2019 del 7 de marzo de la cuenca de Neuquén obtenida como el promedio de 11 interferogramas cosísmicos de un conjunto de datos (a) y como el promedio de 10 interferogramas de otro conjunto de datos (d). **(b) y (e)** Muestran la deformación predicha por el modelo matemático. **(c) y (f)** Muestran los residuos (la diferencia del dato real menos el modelo teórico). El rectángulo negro representa el contorno del plano de falla óptimo.

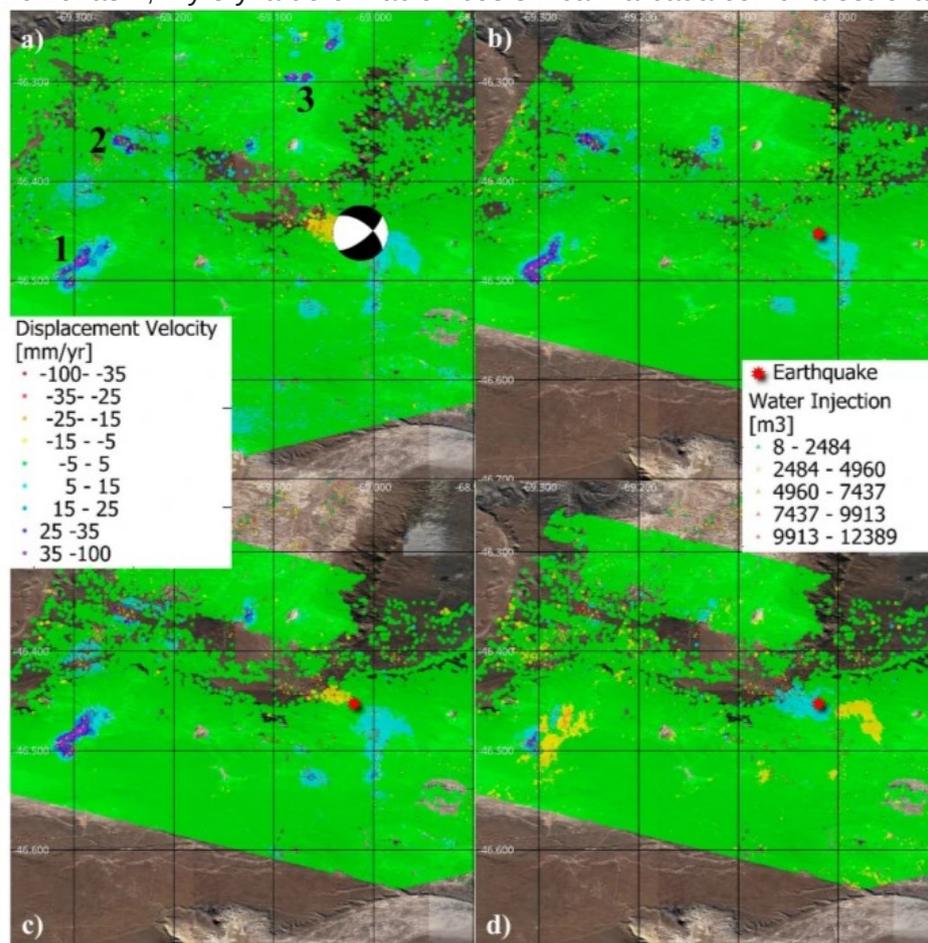
Según el modelo, la deformación observada con el satélite se puede explicar con un sismo centrado en la latitud 38,5691° S, longitud 68,9982° W (Fig. 5) y a 1,2 km de profundidad. Otros parámetros también son consistentes entre el modelo teórico, las observaciones instrumentales y las descripciones geológicas de la zona. Consulte "Métodos" y material complementario (Figuras S7 , S8, S10 , S11 , S12 y Tabla S2, S3) para obtener más detalles.

## La cuenca del Golfo de San Jorge (GSJ)

Este apartado sigue una estructura análoga al anterior. Los datos disponibles para el estudio de la cuenca GSJ incluyen mediciones de desplazamiento obtenidas con métodos satelitales (DInSAR), volúmenes mensuales de producción de pozos convencionales y datos sísmicos (un solo evento). En esta cuenca no hay presencia relevante de pozos no convencionales.

La Figura 6 muestra mapas de deformación obtenidos los datos de radar satelital (técnica DInSAR-SBAS-CTTC) <sup>22</sup>. La Figura 6a se ha obtenido a partir de 108 imágenes satelitales Sentinel-1 que cubren el período de enero de 2017 a diciembre de 2020. La Figura 6b se ha obtenido a partir de otro conjunto de imágenes de 95 imágenes Sentinel-1. La escala de colores representa la velocidad de desplazamiento de cada punto en mm/año en LOS (a y b) y en componentes vertical y horizontal en c y d.

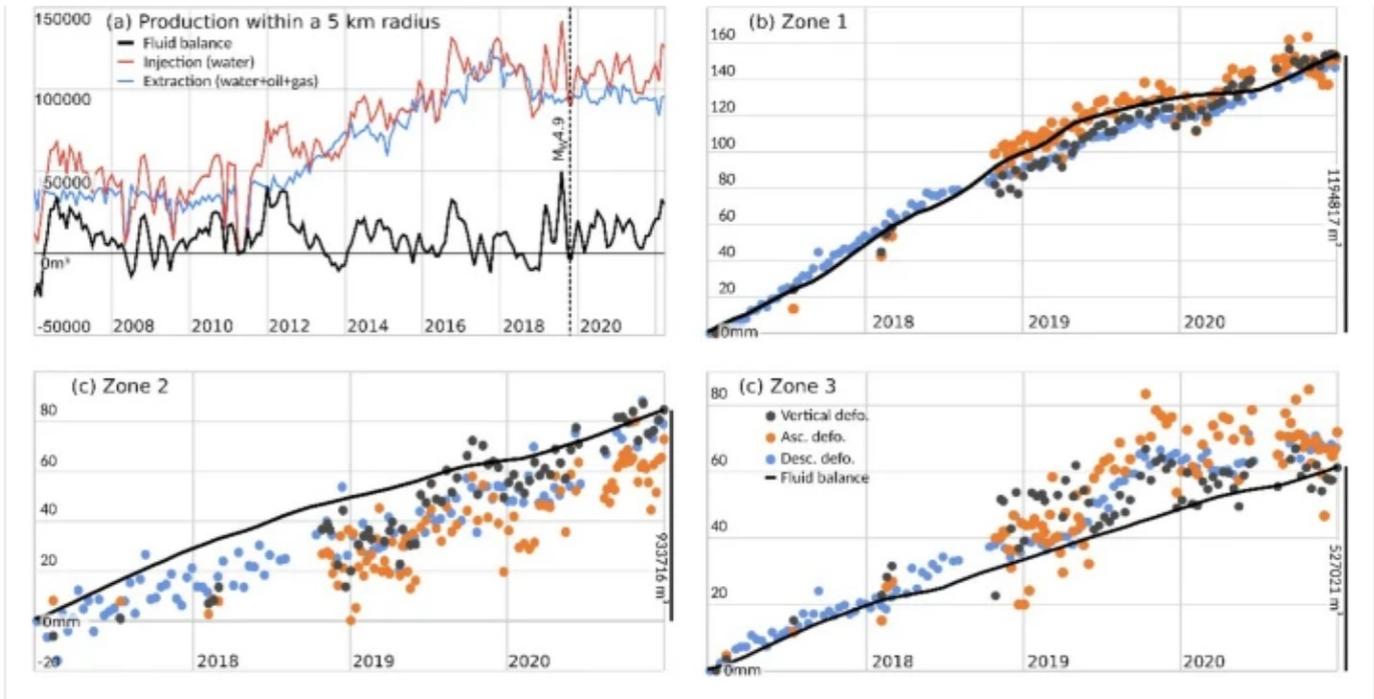
Para este estudio se analizan en detalle las áreas de deformación del suelo identificadas en la Fig. 6 como zonas 1, 2 y 3 y la deformación cosísmica marcada con una estrella.



**Figura 6. (a) y (b)** Mapas de velocidad de desplazamiento del suelo (deformación) obtenidos con los datos satelitales. **(c) y (d)** muestran el desplazamiento vertical del suelo y el componente Oeste-Este respectivamente. El período analizado abarca desde enero de 2017 hasta diciembre de 2020. Los valores positivos son movimientos hacia el satélite. 1, 2 y 3 señalan las zonas con tasas más altas. La estrella roja indica la ubicación del epicentro del terremoto ML 5 2019 del 17 de octubre..

## Producción de hidrocarburos y desplazamientos de suelo en la cuenca GSJ

Las tasas de desplazamiento han sido medidas utilizando distintas trayectorias satelitales, esto permite tener mediciones redundantes que dan mayor rigor a las mediciones y permite interpretar mejor las características de la deformación (Fig. 6).



**Figura 7 (a)** Tendencias de producción de los últimos 15 años en un área de 5 km de radio (indicada por el círculo rojo discontinuo en la Fig. 1 b) que incluye los 223 pozos (con una profundidad promedio de 1,5 km) ubicados alrededor epicentro del terremoto del 17 de octubre de 2019 (estrella roja en la Fig. 6) en la cuenca del GSJ. Extracción de fluido (agua e hidrocarburos, en azul) e inyección (agua, rojo) y balance entre ellos (inyección menos extracción, negro). La fecha de ocurrencia del sismo está indicada por una línea vertical en el eje cronológico. El sismo ocurre inmediatamente después del pico histórico más alto de inyección y en el desequilibrio histórico más fuerte y repentino del balance. **(b - d)** Gráficas de series de tiempo de deformación (naranja y azul según trayectoria del satélite) y balance de fluidos (escalado, línea negra) para pozos sobre las zonas de deformación marcadas 1,2,3 en la Fig. 6 a. **(b)** Representa las tendencias de 85 pozos de recuperación dentro de la zona de deformación 1, **(c)** 29 pozos en la zona 2 y **(d)** 15 pozos en la zona 3. La barra de escala en el eje vertical derecho proporciona la magnitud de el balance de fluidos acumulado durante el período analizado para toda la zona de deformación.

Las series temporales de desplazamiento promedio estimadas para las zonas 1, 2 y 3 utilizando las distintas trayectorias satelitales y el cálculo de deformación vertical (puntos naranja, azul y gris respectivamente) se muestran en la Fig. 7 b–d. Según estos gráficos, podemos concluir que los desplazamientos son casi verticales y en sentido ascendente, levantamientos.

Las líneas negras de la Fig. 7 b–d representan el balance de fluidos para cada área. Por balance de fluidos nos referimos al agua inyectada menos los fluidos extraídos, tanto para agua como para hidrocarburos.

De manera similar al caso de la deformación de la cuenca de Neuquén, se puede utilizar un enfoque de modelado de Mogi para investigar la relación entre los desplazamientos del suelo y la producción de hidrocarburos. Sin embargo, en el caso del GSJ, los patrones de deformación son más complejos: mientras que en la cuenca Neuquina la deformación del suelo se concentró principalmente en dos áreas que son circulares, en la cuenca del GSJ la deformación del suelo se distribuye en numerosas áreas irregulares, por lo que no es fácil el modelado utilizando fuentes simples de Mogi. Elegimos la zona 3 porque presenta un patrón de deformación relativamente simple. La deformación del suelo observada en esta área durante el período de estudio puede explicarse con dos fuentes Mogi (Figura S15) ubicadas a 349,1 m de profundidad (fuente Oeste) y 337,5 m de profundidad (fuente Este).

Estas profundidades son consistentes con la profundidad promedio de los pozos que operan en ambas áreas (642 m y 628 m de profundidad en la zona oeste y este respectivamente, según las bases de datos de la Secretaría de Energía de Argentina).

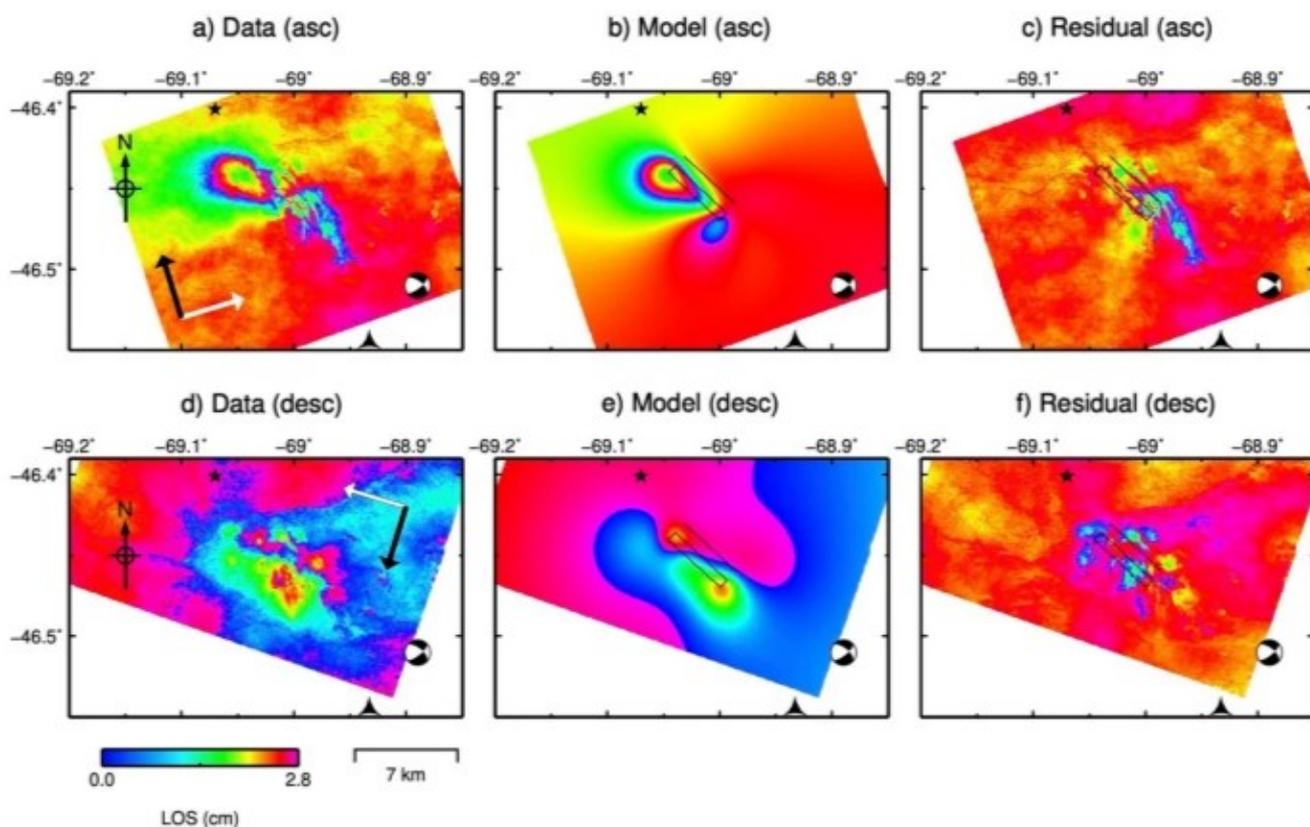
El cambio de volumen del modelo óptimo es de 152,992 m<sup>3</sup> para la fuente de Mogi occidental y de 125,570 m<sup>3</sup> para la fuente de Mogi oriental. Los cambios de volumen total de fluidos extraídos e inyectados (gas y agua) en los pozos que operan en ambas áreas durante el mismo período son mayores: 233.415 m<sup>3</sup> en el oeste y 283.754 m<sup>3</sup> en el este. Estos valores son del mismo orden de magnitud que los resultados de Mogi y también son cambios de volumen positivos, lo que es consistente con la inyección de fluido dominante en ambas áreas durante el período de estudio. Consulte "[Métodos](#)" y materiales complementarios (Figuras [S13](#) , [S14](#) y Tabla [S4](#)) para obtener más detalles sobre el procedimiento de inversión.

### **Producción de hidrocarburos y sismicidad en la cuenca GSJ**

No se registraron sismos en la cuenca del GSJ antes de octubre de 2019 según los catálogos sísmicos consultados (Figura complementaria [S1](#))<sup>33</sup>. Aunque esta zona se considera no sísmica en la actualidad, el análisis de las fallas normales del Paleoceno sugiere que pueden generar terremotos de magnitud superior a 5<sup>35</sup>.

El único evento sísmico registrado en el área de estudio a la fecha ocurrió el 17 de octubre de 2019 a las 16:58:28.55 UTC. Este evento sísmico indujo una deformación del suelo medible con datos satelitales DInSAR. Hemos utilizado la información proporcionada por los interferogramas cosísmicos (mapas de deformación sísmica obtenidos con el satélite) para restringir los parámetros de la fuente del terremoto. La Figura 8 muestra la deformación del suelo asociada con el terremoto en dos trayectorias distintas del satélite. Este patrón de deformación corresponde a un desplazamiento máximo del suelo de ~35 mm hacia el satélite y ~40 mm alejándose del satélite. Este patrón de deformación se puede explicar con un sismo (Fig. 8) centrado en la latitud 46,4529° S, longitud 69,0196° W y a 1,17 km de profundidad según los cálculos del modelo. Consulte "[Métodos](#)" y materiales complementarios (Figuras [S16](#) , [S17](#) y Tabla [S5](#)) para obtener más detalles sobre el procedimiento de inversión.

Similar al caso de Neuquén, los epicentros del terremoto de GSJ del 17 de octubre de 2019 estimados por otras agencias están ubicados a distancias significativas de la ubicación de nuestro modelo preferido (4.5–37 km dependiendo de la agencia, ver Figura complementaria [S18](#)) y los hipocentros son más profundo (8,8–13,8 km). Estas ubicaciones no son consistentes con la deformación del terreno medida. La ubicación diferente se puede explicar también en este caso debido a la escasa red sísmica en la región GSJ (ver Figura S1).



**Figura 8** (a) y (d) Muestran la deformación superficial generada por el terremoto de la cuenca GSJ del 17 de octubre de 2019 de Mw 4.9 obtenida como el promedio de 4 y 6 interferogramas independientes. (b) y (e) Muestran la deformación predicha por el modelo matemático. (c) y (f) Muestran las diferencias entre la observación satelital y el modelo matemático.

Varios datos de caracterización del sismo presentados aquí como el modelo matemático o la observación satelital son coincidentes con otras fuentes de información, agencias sísmicas internacionales o bibliografía geológica. Al igual que en el caso de Neuquén, la localización precisa del epicentro sísmico y su profundidad no coincide con las agencias sísmicas nacionales e internacionales debido a la escasa red sísmica en la región patagónica (ver Figura S1). La falta de instrumentos de medición impide a estas agencias obtener datos precisos que sin embargo nosotros podemos brindar con la aplicación de los modelos y gracias a las fuentes satelitales.

## Discusiones y conclusiones

Se han observado y analizado dos tipos diferentes de fenómenos que ocurren en dos regiones diferentes de los campos petrolíferos patagónicos, la cuenca Neuquina y la cuenca del Golfo de San Jorge. Para cada sitio analizamos la relación entre los desplazamientos de la superficie del suelo, los terremotos ocurridos alrededor de los campos de pozos activos y las operaciones de producción de hidrocarburos.

En la cuenca Neuquina, el foco de análisis es una zona de intensa producción de hidrocarburos no convencionales, en la región conocida como Vaca Muerta. Utilizamos técnicas satelitales (DInSAR y SBAS) para medir la deformación del suelo en el área. Detectamos desplazamiento del suelo debido a diferentes fuentes. Se detectaron dos áreas afectadas por hundimiento alrededor de dos conjuntos de pozos. Estas áreas se indican como 1 y 2 en la Fig. 2. El análisis de estas áreas demostró una relación entre las actividades de producción de pozos y el desplazamiento de la superficie del terreno. Los resultados obtenidos muestran que no hubo deformación del terreno durante la ausencia de pozos de fracking, y que los movimientos comenzaron unos meses después del inicio de las operaciones de fracking. Además, los datos

recopilados sobre la actividad productiva muestran un claro desequilibrio entre extracción e inyección que se corresponde con el tipo de movimiento detectado (hundimiento).

Además, investigamos la relación entre la deformación del suelo y la producción de hidrocarburos (a partir de las bases de datos de la Secretaría de Energía de Argentina) utilizando un enfoque matemático de modelado de Mogi. El resultado del modelo explica (en un primer orden de aproximación) el patrón de deformación observado sobre las zonas 1 y 2. Las diferencias entre los resultados del modelo de Mogi y las profundidades y volúmenes estimados a partir de las bases de datos de la Secretaría de Energía pueden explicarse por los supuestos realizados tanto por el modelo de Mogi como por nuestras estimaciones de cambio de volumen. Por ejemplo, el cambio de volumen obtenido en el modelado de Mogi se refiere al cambio de volumen de la cavidad; este volumen no puede compararse directamente con el cambio total de volumen de los fluidos extraídos e inyectados, ya que Mogi supone un fluido incompresible. Por otro lado, la suposición de un medio isotrópico-elástico en los modelos de Mogi es probablemente una simplificación excesiva en áreas de fracturación hidráulica intensa, que puede modificar el comportamiento mecánico de la corteza. En cuanto al cambio de volumen estimado a partir de las bases de datos de la Secretaría de Energía de Argentina, la conversión de volumen de gas, de condiciones estándar a condiciones de reservorio, si bien es útil para analizar la correlación con otros parámetros (como la deformación del terreno), debe considerarse como una aproximación al considerar el volumen total. Atendiendo a estos aspectos, los resultados nos permiten confirmar el vínculo entre la producción de pozos y el hundimiento del suelo en el área de estudio.

También analizamos los eventos sísmicos ocurridos durante el período de estudio en el sitio de estudio de la cuenca Neuquina. Por un lado, nuestro análisis satelital (DInSAR) reveló un segundo fenómeno de deformación relacionado con el terremoto  $M_w$  5 que ocurrió el 7 de marzo de 2019. Los interferogramas cosísmicos (mapas de deformación superficial asociada al terremoto) nos permitieron ubicar con precisión el epicentro. Por otro lado, nuestro análisis de los datos sísmicos y el historial de producción sugiere que existe una correlación entre la energía sísmica liberada acumulada y los cambios de volumen debido a las actividades de inyección y extracción:

- Los datos de producción muestran que en el área observada se inició la industria hidrocarburífera con pozos no convencionales en 2017 y que unos meses después se inició la actividad sísmica.
- Los datos muestran que en comparación con el resto del período analizado, las tasas de fracturamiento hidráulico y los volúmenes de fluidos operados fueron altos inmediatamente antes de los eventos sísmicos más grandes.
- Los eventos sísmicos más grandes ocurrieron inmediatamente después del aumento de las actividades productivas.
- El terremoto más grande ( $M_w$  5 2019 7 de marzo) de poca profundidad (1,2 km según nuestro modelo de fuente óptima) es consistente con la profundidad promedio de los pozos que operan en el área de estudio (~ 3 km).
- Los paralelismos entre la energía sísmica liberada acumulada y los fluidos de inyección/retirada acumulados muestran una buena correlación en los cambios bruscos de pendiente. Aunque se trata de una comparación cualitativa, la correlación muestra una coincidencia temporal de dos hechos a priori independientes.

Como se muestra en nuestro análisis de sismicidad en la cuenca Neuquina (Fig. 4), se presenta un fuerte aumento de la energía sísmica liberada en relación con el aumento de las actividades productivas. Sin embargo, los datos disponibles no permiten concluir qué tipo de actividad

productiva (inyección o extracción de fluidos) podría ser la responsable de desencadenar sismos inducidos.

Un análisis similar se ha realizado en el área de GSJ. Aunque las características del área son bastante diferentes, nuestro análisis nos permitió vincular los procesos de desplazamiento del suelo con las operaciones de hidrocarburos. Al igual que en el sitio de prueba de la cuenca Neuquina, hemos estudiado dos tipos de desplazamientos del suelo: procesos de levantamiento alrededor de los pozos de explotación durante el período monitoreado y un solo evento de desplazamiento relacionado con el terremoto  $M_w$  4.9 ocurrido el 17 de octubre de 2019.

Enfocamos el análisis de los fenómenos de levantamiento en 3 de las áreas más significativas, etiquetadas 1, 2 y 3 en la Fig. 6. La comparación entre los fenómenos de levantamiento y la explotación de hidrocarburos muestra que existe una buena concordancia entre el balance de fluidos acumulado (positivo) y el levantamiento durante el período medido, lo que sugiere una relación causa-efecto. También investigamos en esta área la relación entre la deformación del suelo y la producción de hidrocarburos utilizando un enfoque de modelado de Mogi, centrándonos en la zona de deformación 3, que presenta un patrón de deformación simple distribuido en dos áreas. La deformación del suelo observada sobre esta área durante el período de estudio puede ser explicada por el modelo Mogi en primer orden de aproximación con los valores de cambios de profundidad y volumen estimados a partir de las bases de datos de la Secretaría de Energía de Argentina. En ambos casos, los cambios de volumen son positivos, lo que es consistente con la inyección predominantemente de fluidos durante el período de estudio.

La sismicidad en el área de estudio de GSJ muestra un comportamiento diferente al ejemplo de Neuquén. En este caso se trata de un único evento, sin registro de sismicidad en la zona antes o después de este evento. El pico histórico de inyección más alto y el desbalance histórico más fuerte entre la inyección y extracción de fluidos en este lugar ocurrió solo unos días antes del terremoto, ver Fig. 7 a. Los interferogramas cosísmicos nos permitieron ubicar el terremoto a 1,17 km de profundidad, lo cual es consistente con la profundidad de los pozos. La falla obtenida con el modelo es consistente con la geología local<sup>20, 34</sup>. Estos tres hechos, fuente superficial del terremoto, ausencia de registro de eventos sísmicos previos y posteriores, y la intensa actividad de inyección sugieren que este evento estuvo directamente relacionado con las operaciones de los pozos.

Ambos casos son dos ejemplos interesantes y diferentes donde se puede mostrar claramente la correlación entre la sismicidad y las operaciones de hidrocarburos y la deformación del terreno. Nuestros resultados también sugieren una relación directa entre la producción de hidrocarburos y la sismicidad en ambas áreas, aunque análisis adicionales<sup>35, 36, 37, 38</sup>, y una mejor caracterización de eventos sísmicos ayudaría a comprender mejor la relación entre la producción y la sismicidad inducida.

Los estudios presentados son buenos ejemplos de cómo esta industria puede afectar el medio ambiente. Además, los casos estudiados en este trabajo afectaron a la población que vivía alrededor de las áreas de explotación, produciendo malestar social, desde manifestaciones a escala local hasta demandas judiciales en la Corte Suprema<sup>39, 40</sup>, que en algunos casos culminó con la paralización de operaciones. Una pregunta que surge a lo largo de estos casos es si esos eventos podrían evitarse con una mejor caracterización de los sitios de explotación y con una mejor planificación de las actividades de inyección-extracción. Estas son preguntas abiertas hoy en día, pero que deben ser abordadas tanto por la industria como por la administración pública. Esto es, por ejemplo, especialmente crítico hoy en día en Europa, Canadá o Brasil, donde explotaciones potenciales no convencionales de grandes yacimientos de gas han sido detenidas o limitadas debido a la fuerte oposición de la población local<sup>39, 41, 42</sup>. Otro punto importante a considerar son los desplazamientos del suelo que producen dichas actividades y que potencialmente pueden producir daños por diferentes motivos, como la afectación de

infraestructuras (por ejemplo, en tuberías y torres, cuando la deformación del suelo produce la pérdida de integridad de las instalaciones) y por ende la seguridad durante las operaciones. O la contaminación de las aguas subterráneas que afecta a la población local. Por lo tanto, la caracterización de los fenómenos tanto del subsuelo como de la superficie es necesaria para prevenir problemas potenciales.

Estos ejemplos están en línea con trabajos previos disponibles en la literatura y confirman la necesidad de mejorar la industria de hidrocarburos para prevenir los riesgos geológicos inducidos y sus consecuencias. En nuestros casos de estudio, los daños potenciales causados por las actividades de producción de hidrocarburos, como la deformación del suelo y la sismicidad inducida, no están siendo evaluados correctamente debido a la ausencia de políticas de prevención. Por ejemplo, ambos sitios son aún considerados de escasa sismicidad en la zonificación nacional de riesgo sísmico del INPRES<sup>29</sup> debido a la ausencia de eventos sísmicos en términos históricos. Esto significa que la normativa de construcción no considera criterios antisísmicos en la zona (incluso para las estructuras relacionadas con los nuevos pozos). En la cuenca del GSJ la situación parece menos alarmante ya que solo se ha registrado un evento. Sin embargo, la ausencia casi absoluta de un debate científico y público sobre el vínculo de la industria con los terremotos y sus consecuencias en el contexto de nuestros dos sitios de estudio, conlleva el riesgo de reproducir y agravar las experiencias vividas en los últimos años.

## Métodos y materiales suplementarios

---

Esta es una versión simplificada del texto original en inglés. Por favor, diríjase a la versión original en inglés de este documento para consultar detalles pertenecientes a esta sección.

## Disponibilidad de datos

---

Los informes públicos de producción de hidrocarburos en Argentina y las especificaciones de los pozos están disponibles gratuitamente en línea en la página web oficial: <https://datos.gob.ar/dataset/energia-produccion-petroleo-gas-por-pozo-capitulo-iv> . Las imágenes de satélite Sentinel 1 ESA SAR están disponibles gratuitamente en línea en el sitio oficial: <https://scihub.copernicus.eu/dhus/> . Los conjuntos de datos procesados derivados de estos datos sin procesar están abiertos. Los autores pueden compartir bajo petición. Escriba al autor correspondiente para cualquier solicitud.

## Agradecimientos

---

Gracias a Red Geocientífica Chile, al Observatorio Petrolero Sur y a las personas que viven y trabajan en Sauzal Bonito y Añelo por compartir su información sobre los riesgos geológicos de la industria en la región. Este trabajo forma parte de las Becas Españolas PID2020-116540RB-C21 y PID2020-116540RB-C22, financiadas por MCIN/AEI /10-.13039/501100011033 y la Beca FPU19/03929 financiada por MCIN/AEI/10-.13039/501100011033 y por "FSE invierte en tu futuro". Este trabajo fue desarrollado parcialmente bajo el objetivo del proyecto FAMRAD, nº de convenio PID2020-113407RB-I00. Los datos de Sentinel-1 fueron proporcionados por la Agencia Espacial Europea. Las Figuras se prepararon utilizando los softwares de dominio público GMT, QGIS, LibreOffice e Inkscape.

## Referencias

---

- 1 - Kim, J.-W. & Lu, Z. Association between localized geohazards in West Texas and human activities, recognized by Sentinel-1A/B satellite radar imagery. *Sci. Rep.* <https://doi.org/10.1038/s41598-018-23143-6> (2018).

- 2 - Shirzaei, M., Ellsworth, W. L., Tiampo, K. F., González, P. J. & Manga, M. Surface uplift and time-dependent seismic hazard due to fluid injection in eastern Texas. *Science* **353**(6306), 1416–1419 (2016).
- 3 - Semple, A. G., Pritchard, M. E. & Lohman, R. B. An incomplete inventory of suspected human-induced surface deformation in North America detected by satellite interferometric synthetic-aperture radar. *Remote Sens.* **9**, 1296 (2017).
- 4 - Segall, P., Grasso, J.-R. & Mossop, A. Poroelastic stressing and induced seismicity near the Lacq gas field, southwestern France. *J. Geophys. Res.* **99**(B8), 15423–15438 (1994).
- 5 - Van Thienen-Visser, K. & Breunese, J. N. Induced seismicity of the Groningen gas field: History and recent developments. *Lead. Edge* **34**(6), 664–671. <https://doi.org/10.1190/tle34060664.1> (2015).
- 6 - Weingarten, M., Ge, S., Godt, J., Bekins, B. & Rubinstein, J. Induced seismicity. High-rate injection is associated with the increase in U.S. mid-continent seismicity. *Science (New York, N.Y.)* **348**, 1336–1340. <https://doi.org/10.1126/science.aab1345> (2015).
- 7 - Lei, X. *et al.* Fault reactivation and earthquakes with magnitudes of up to Mw4.7 induced by shale-gas hydraulic fracturing in Sichuan Basin, China. *Sci. Rep.* <https://doi.org/10.1038/s41598-017-08557-y> (2017).
- 8 - Atkinson, G., Assatourians, K., Cheadle, B. & Greig, W. Ground motions from three recent earthquakes in Western Alberta and Northeastern British Columbia and their implications for induced-seismicity hazard in Eastern Regions. *Seismol. Res. Lett.* **86**, 1022–1031. <https://doi.org/10.1785/0220140195> (2015).
- 9 - Mulargia, F. & Bizzarri, A. Anthropogenic triggering of large earthquakes. *Sci. Rep.* **4**, 6100 (2014).
- 10 - Grigoli, F. *et al.* The November 2017 Mw 5.5 Pohang earthquake: A possible case of induced seismicity in South Korea. *Science* <https://doi.org/10.1126/science.aat2010> (2018).
- 11 - Keranen, K. M., Savage, H. M., Abers, G. A. & Cochran, E. S. Potentially induced earthquakes in Oklahoma, USA: Links between wastewater injection and the 2011 mw 5.7 earthquake sequence. *Geology* **41**(6), 699–702. <https://doi.org/10.1130/G34045.1> (2013).
- 12 - Samsonov, S., Feng, W. & Fialko, Y. Subsidence at Cerro Prieto Geothermal Field and postseismic slip along the Indiviso fault from 2011 to 2016 RADARSAT-2 DInSAR time series analysis. *Geophys. Res. Lett.* <https://doi.org/10.1002/2017GL072690> (2017).
- 13 - Ministry of natural gas development and minister responsible for housing
- 14 - YPF. (2021). <https://www.ypf.com/desafiovacamuerta/Paginas/vaca-muerta.html>.
- 15 - Correa-Otto, S. Experimento sismológico en la Cuenca Neuquina, la región de mayor explotación de hidrocarburos por métodos no convencionales de la Argentina. Universidad Nacional de San Juan. FCEFyN. Instituto Geofísico Sismológico Volponi (2021).
- 16 - Vásquez, J., Spagnotto, S., Mescua, J. F., Giambiagi, L. & Sigismondi, M. Aumento notorio de la sismicidad de la provincia del Neuquén, en el período 2015–2020. Boletín Brackebuschiano, Asociación Geológica Argentina. ISSN: 0328–2724 (2020).
- 17 - Petersen, M. D., Harmsen, S. C., Jaiswal, K. S., Rukstales, K. S., Luco, N., Haller, K. M., Mueller, C. S. & Shumway, A. M. Seismic hazard, risk, and design for South America: U.S. geological Survey data release. <https://doi.org/10.5066/F7Wm1BK1>(2018).
- 18 - Farr, T. G. & Koblrick, M. Shuttle radar topography mission produces a wealth of data. *EOS Trans. Am. Geophys. Union* **81**(48), 583–585. <https://doi.org/10.1029/EO081i048p00583> (2000).

- 19 - Silvestro, J. & Zubiri, M. Convergencia oblicua: modelo estructural alternativo para la Dorsal Neuquina (39°S)-Neuquén. *Rev. Asoc. Geol. Argent.* **63**, 49–64 (2008).
- 20 - Allard, J. O. *et al.* Comparative structural analysis of inverted structures in the San Bernardo fold belt (Golfo San Jorge basin, Argentina): Inversion controls and tecto-sedimentary context of the Chubut Group. *J. S. Am. Earth Sci.* **97**, 102405 (2020).
- 21 - Devanthery, N., Crosetto, M., Monserrat, O., Cuevas-González, M. & Crippa, B. The PSIG chain: An approach to Persistent Scatterer Interferometry. *Remote Sens.* **6**, 6662–6679. <https://doi.org/10.3390/rs6076662> (2014).
- 22 - Palamà, R. *et al.* A multi-temporal small baseline interferometry procedure applied to mining-induced deformation monitoring. *Remote Sens.* **14**(9), 2182 (2022).
- 23 - Notti, D. *et al.* A methodology for improving landslide PSI data analysis. *Int. J. Remote Sens.* **35**(6), 2186–2214 (2014).
- 24 - Baranova, V., Mustaqeem, A. & Bell, S. A model for induced seismicity caused by hydrocarbon production in the Western Canada Sedimentary Basin. *Can. J. Earth Sci.* **36**, 47–64. <https://doi.org/10.1139/cjes-36-1-47> (2011).
- 25 - INPRES. INRPES. Buscador de sismos. INPRES\_SEARCH (2021).
- 26 - USGS. Latest earthquakes. USGS. [www.Earthquake.usgs.gov](http://www.Earthquake.usgs.gov) (2021).
- 27 - ISC. International Seismological Centre. ISC <http://www.isc.ac.uk/iscbulletin/search/catalogue/> (2021).
- 28 - Ellsworth, W. L. Injection-induced earthquakes. *Science* **341**, 1225942. <https://doi.org/10.1126/science.1225942> (2013).
- 29 - INPRES. INPRES. Zonificación sísmica. INPRES (2021).
- 30 - Mousavi, S. M., Ogwari, P. O., Horton, S. P. & Langston, C. A. Spatio-temporal evolution of frequency-magnitude distribution and seismogenic index during initiation of induced seismicity at Guy-Greenbrier, Arkansas. *Phys. Earth Planet. Inter.* **267**, 53–66 (2017).
- 31 - Guzmán, C., Cristallini, E. & Bottesi, G. Contemporary stress orientations in the Andean retroarc between 34 S and 39 S from borehole breakout analysis. *Tectonics* <https://doi.org/10.1029/2006TC001958> (2007).
- 32 - Perl, Y. S. & Delucchi, D. Stress organization along Neuquen Basin in Vaca Muerta formation and their impact in microseismic response. In *First EAGE/AMGP/AMGE Latin-American Seminar in Unconventional Resources* (Vol. 2017, No. 1) 1–4 (European Association of Geoscientists & Engineers, 2017).
- 33 - U.S. Geological Survey, Earthquake Hazards Program. Advanced National Seismic System (ANSS) Comprehensive Catalog of Earthquake Events and Products: Various. <https://doi.org/10.5066/F7MS3QZH> (2017)
- 34 - Figari, E., Stelkov, E. E., Laffitte, G., Cid de la Paz, M., Courtade, S., Celaya, J., Vottero, A., Lafourcade, P., Martinez, R., & Villar, H. Los sistemas petroleros de la Cuenca del Golfo San Jorge: Síntesis estructural, estratigráfica y geoquímica. In *4° Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos* 197–237 (Buenos Aires, 1999).
- 35 - Foix, N. *et al.* Upper Cretaceous–Paleocene extensional phase in the Golfo San Jorge basin (Argentina): Growth-fault model, paleoseismicity and paleostress analysis. *J. S. Am. Earth Sci.* **33**(1), 110–118. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2011.07.005> (2012).
- 36 - King, G. C. P., Stein, R. S. & Lin, J. Static stress changes and the triggering of earthquakes. *Bull. Seismol. Soc. Am.* **84**(3), 935–953. <https://doi.org/10.1785/BSSA0840030935> (1994).
- 37 - Segall, P. Earthquakes triggered by fluid extraction. *Geology* **17**(10), 942–946 (1989).

- 38 - Segall, P. & Fitzgerald, S. D. A note on induced stress changes in hydrocarbon and geothermal reservoirs. *Tectonophysics* **289**(1), 117–128. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(97\)00311-9](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(97)00311-9) (1998).
- 39 - Donaire de Santana, A. Fracking na nossa terra, não! Resistências e conflitos ambientais em torno dos recursos energéticos não convencionais no oeste paulista e centro-oeste paranaense (Unesp - Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2022).
- 40 - Grosso, J. Vaca Muerta: tensiones territoriales y ambientales. in Argentina entramado de geografías en disputa (cord. García Ríos, D.). 205–232 (Cartograma 2022).
- 41 - Vlek, C. Rise and reduction of induced earthquakes in the Groningen gas field, 1991–2018: Statistical trends, social impacts, and policy change. *Environ. Earth Sci.* **78**, 59. <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8051-4> (2019).
- 42 - Tawonezvi, J. The legal and regulatory framework for the EU' shale gas exploration and production regulating public health and environmental impacts. *Energy Ecol. Environ.* **2**, 1–28. <https://doi.org/10.1007/s40974-016-0044-5> (2017).
- 43 - Bagnardi, M. & Hooper, A. Inversion of surface deformation data for rapid estimates of source parameters and uncertainties: A Bayesian approach. *Geochem. Geophys. Geosyst.* **19**(7), 2194–2211 (2018).
- 44 - Okada, Y. Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space. *Bull. Seismol. Soc. Am.* **75**(4), 1135–1154 (1985).
- 45 - Mogi, K. Relations between the eruptions of various volcanoes and the deformations of the ground surfaces around them. *Earthq. Res. Inst.* **36**, 99–134 (1958).

#### Información de los autores. Afiliaciones.

---

Guillermo Tamburini-Beliveau (Correspondencia a: [guillermotb@conivet.gov.ar](mailto:guillermotb@conivet.gov.ar))  
 Centro de Investigaciones y Transferencia de Santa Cruz (CIT SC - CONICET), Lisandro de la Torre  
 860, Río Gallegos, Argentina

Javier A. Grosso-Heredia  
 Departamento de Geografía, Universidad del Comahue, Buenos Aires 1400, Neuquén, Argentina

Marta Béjar-Pizarro & Raúl Pérez-López  
 Instituto Geológico y Minero de España (IGME-CSIC), Ríos Rosas, 23, 28003, Madrid, España

Juan Portela  
 Universidad Politécnica de Madrid. GI-Terra: Geomática, Amenazas Naturales y Riesgos, Mercator 2,  
 28031, Madrid, España

Martín Cismondi-Duarte  
 Instituto de Investigación y Desarrollo en Ingeniería de Procesos y Química Aplicada (IPQA-  
 CONICET-UNC), Ciudad Universitaria, Córdoba, Argentina

Oriol Monserrat  
 Departamento de Geomática, Centre Tecnològic de Telecomunicacions de Catalunya, Carl Friedrich  
 Gauss 7, Castelldefels, España