



SISMICIDAD INDUCIDA

Antecedentes bibliográficos y aportes
para el caso de Vaca Muerta

AGOSTO 2021



F A R N
FUNDACIÓN AMBIENTE Y
RECURSOS NATURALES



CONTENIDO

<u>RESUMEN</u>	<u>03</u>
<u>INTRODUCCIÓN</u>	<u>03</u>
<u>Antecedentes bibliográficos</u>	<u>04</u>
<u>ELEMENTOS QUE PUEDEN INFLUIR EN LA OCURRENCIA DE LA SISMICIDAD</u>	<u>06</u>
<u>Elementos sobre la sismicidad en Vaca Muerta</u>	<u>07</u>
<u>BIBLIOGRAFÍA</u>	<u>11</u>

Por Guillermo Tamburini Beliveau y Javier Grosso

RESUMEN

Está corroborada la ocurrencia de terremotos debido a la fuerte alteración artificial del sustrato geológico, es decir, la sismicidad inducida o disparada por la acción industrial, en particular aquella vinculada a la actividad hidrocarburífera. Esto no implica que la sismicidad suceda indefectiblemente en zonas con pozos de petróleo o gas, pero como presentamos en este documento, múltiples factores ponen en evidencia su presencia en la cuenca Neuquina, conocida hoy en día popularmente como Vaca Muerta, en Argentina. A pesar de estas pruebas, las administraciones estatales no han tomado las debidas medidas al respecto.

Este documento recopila evidencia internacional y se introduce en el análisis de la sismicidad inducida para el caso de Vaca Muerta, en Argentina. Para ello se realiza un repaso de la principal bibliografía sobre la temática y se presentan algunos datos empíricos de la región argentina, como la actividad en los pozos petroleros y la actividad sísmica reciente.

INTRODUCCIÓN

Diversos trabajos científicos publicados tanto en revistas especializadas como en otras más generalistas, como *Nature* o *Science*, han demostrado la posibilidad de la ocurrencia de terremotos como consecuencia de actividades antrópicas. En particular, las del sector hidrocarburífero representan la principal causa de este tipo de sismos, con cientos de ejemplos corroborados en el planeta (Foulger, 2018).

Algunos de estos estudios han establecido el vínculo entre los eventos sísmicos y la actividad hidrocarburífera mediante métodos estadísticos, usando amplias bases de datos tanto de pozos productores como de registros sísmicos (Weingarten, 2015; Atkinson, 2016). Otros, en cambio, han realizado estudios de caso: un sismo en particular, un accidente industrial, o la identificación del incremento del riesgo geológico en el que la presencia de pozos de gas o petróleo resultó un factor determinante (Kim, 2018; Lei, 2017). Y otros han analizado las alteraciones que la actividad industrial produce en las propiedades físicas del subsuelo, que junto con propiedades geotécnicas y geológicas se convierten en un desencadenante de sismos (Guiglielmi, 2018; Mulargia, 2014). Incluso, la cuestión ha sido abordada estrictamente desde la sismología, sin atender a los procesos antrópicos, para demostrar cómo la ocurrencia de algunos terremotos no es posible sin una acción externa que los desencadene (Magnani, 2017).

Estas consecuencias de la actividad antrópica han sido descritas desde hace décadas (Evans, 1970; Hsieh, 1981; Gupta, 1984) y en general ponen el foco en: 1) los cambios en la presión porosa de los estratos sedimentarios, 2) los cambios en los estados de estrés y fuerzas tectónicas que reactivan fallas y fracturas preexistentes, y 3) la lubricación de los planos de fricción de estratos quebrados (Davies, 2013; Ellsworth, 2013; Mulargia, 2014). En algunos estudios, incluso, se han reproducido experimentalmente las condiciones en el terreno, generando de este modo terremotos artificiales para así corroborar la hipótesis de la sismicidad inducida o disparada¹ (Guiglielmi, 2018). En 1993, Davis (Davis, 1993) expuso un conjunto de criterios cualitativos que establece un mínimo imprescindible para considerar “inducida” la ocurrencia de un terremoto.

1. La diferencia entre ambos tipos de sismo radica en el hecho de que 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). Por su parte, el sismo inducido es aquel provocado por completo debido a la actividad industrial, ya que no hubiera sido posible por procesos naturales. Dadas estas características, el sismo disparado tiene más oportunidades de ser catastrófico ya que expresa magnitudes de sismos naturales que pueden ser elavadas, 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 (Mulargia, 2014), el efecto antrópico 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.

A pesar de lo expuesto en estos párrafos, varios aspectos de las relaciones entre las variables implicadas en estos fenómenos aún deben ser estudiados y analizados con mayor profundidad (Mulargia, 2014). Esto obedece tanto a que el estudio de la sismicidad inducida o disparada no está plenamente desarrollado por ser relativamente novedoso, como a la complejidad de análisis de algunos de los factores clave, como el comportamiento del subsuelo a cientos o miles de metros de profundidad. Otro aspecto no menos importante que ha dificultado el desarrollo de esta ciencia es que algunos sectores sociales y de la academia son muy reticentes a aceptar estos hechos, principalmente por sus implicaciones económicas (Dart, 2018).

Mediante un repaso bibliográfico se expondrán a continuación algunos elementos destacados que presentan un escenario que obliga a reflexionar sobre lo que está sucediendo en la cuenca hidrocarburífera de Vaca Muerta y su vínculo con la sismicidad disparada o inducida.

Antecedentes bibliográficos

El trabajo de Atkinson y otros (Atkinson, 2016), publicado en *Seismological Research Letters* en 2016, es uno de los de referencia en la materia. Abarca la amplia región norteamericana de la Cuenca Sedimentaria Occidental del Canadá (WCSB, por su sigla en inglés) y examina si existe una correlación robusta entre la sismicidad y la fracturación hidráulica.

Para ello, el equipo de investigadores se sirve de las fuentes de datos públicas que les proporcionan las siguientes informaciones:

- Sobre pozos hidrocarburíferos (aprox. 500.000): localización, profundidad, fechas de operación, tasa de inyección e inyección mensual y acumulada.
- Sobre los sismos: base de datos del periodo 1973-2014. Por limitaciones instrumentales se considera completa solo para los eventos de magnitud mayor a 3 ML, pero incluye la totalidad de los registrados y los presenta inicialmente como potencialmente inducidos (hipótesis a descartar con el estudio posterior).

Con el fin de vincular (correlacionar estadísticamente) la actividad de un pozo a alguno de los sismos registrados, los autores establecen un radio de análisis en torno al pozo de 15 km (ventana espacial) y un lapso temporal de cuatro meses desde el inicio de las operaciones (ventana temporal). Si el sismo ocurre dentro de ambas ventanas, se considera vinculado. En su trabajo, los mismos autores califican de “conservadores” a estos parámetros. Debido al alto grado de incertidumbre que afecta a sus mediciones, ambas ventanas podrían haber sido extendidas justificadamente, incrementando las posibilidades de correlación entre pozos y sismos, facilitando así la corroboración de su hipótesis. La incertidumbre se encuentra en: el elevado error promedio en la determinación de los epicentros, la extensa longitud de las ramas horizontales subterráneas de los pozos y su dirección (paralelas a la superficie) y la existencia de antecedentes históricos de sismos inducidos a grandes distancias de la localización de sus factores desencadenantes. Aun así, los resultados obtenidos con estos umbrales conservadores son tan robustos que no dejan lugar a interpretaciones: la relación entre la actividad del *fracking* y la sísmica queda probada en la WCSB.

En 2015, Weingarten y otros (Weingarten, 2015) publican en *Science* otro importante estudio cuyo objetivo es mostrar el vínculo entre la cronología y localización (ventana espacio-temporal) de la inyección en pozos sumideros y recuperadores, y la sismicidad en los Estados Unidos de América Centrales y Orientales (CEUS, por su sigla en inglés).

De modo análogo al trabajo anterior, los investigadores disponen de una base de datos elaborada a partir de múltiples fuentes de diversas administraciones estatales de los Estados Unidos, de las que seleccionan los siguientes parámetros:

- Sobre los pozos: localización, profundidad, fechas de operación, tasa de inyección e inyección mensual y acumulada.
- Sobre los sismos: base de datos del periodo 1985-2015.

En el trabajo de Weingarten y otros, el radio de estudio seleccionado para vincular un pozo y un sismo es de 20 km, ligeramente mayor que el de Atkinson. Esto está fundamentado por los mismos elementos de incertidumbre mencionados por Atkinson (Atkinson, 2016).

Los trabajos de Atkinson y Weingarten exponen con claridad la correlación estadística robusta entre los sismos de las zonas de estudio y la actividad hidrocarburífera. Atkinson muestra cómo más de la mitad de los sismos de una cuenca con actividad sísmica previa (aunque menor a la actual) pueden ahora relacionarse con pozos de *fracking*. Y aun una parte importante de los restantes se vinculan con los sumideros. Es decir, en su mayoría se trata de sismos inducidos o disparados. Lo mismo sucede en el artículo de Weingarten, en el que el reciente cambio de tendencia en la ocurrencia de sismos en los últimos diez años para la zona CEUS –un incremento exponencial de menos de 20 sismos anuales a más de 600– se relaciona directamente con la distribución de pozos hidrocarburíferos.

Además de los artículos mencionados, en la bibliografía hay distintas aproximaciones respecto de la sismicidad asociada a los diversos tipos de pozos hidrocarburíferos, en las que se exponen varios elementos que permiten distinguir la causalidad de los pozos en la ocurrencia de sismos, sean pozos no convencionales, convencionales, inyectoros de recuperación o sumideros.

Por su parte, estudios de Chen y otros (Chen, 2017) muestran la correlación directa con un 95% de fiabilidad entre las tasas de inyección de pozos sumideros y la ocurrencia de los sismos de mayor magnitud en la historia del estado norteamericano de Oklahoma. Atkinson y otros (Atkinson, 2015) describen por métodos sismológicos cómo tres sismos de considerable magnitud fueron inducidos por *fracking* en la Columbia Británica del Canadá. Otros investigadores (Skoumal, 2019) explican cómo, para algunas zonas (análisis a escala local), se ha comprobado que hasta uno de cada dos pozos en los que se fractura puede relacionarse con eventos sísmicos. Mulargia (Mulargia, 2014) expone la complejidad de los parámetros físicos interrelacionados en la posible ocurrencia de sismos disparados o inducidos, demostrando cómo ligeros cambios en el estado de equilibrio entre las fuerzas de presión porosa, de fricción y tensión pueden desencadenar sismos y, a la vez, alerta sobre el hecho de que estos pueden suceder a importantes distancias (30 km) de su fuente originaria y tras un largo lapso de tiempo del cese de toda actividad (10 años). Este último factor también es mencionado por Ellsworth (Ellsworth, 2013).

Por otro lado, en 1993 Davis elaboró un cuestionario cualitativo que permite distinguir con alto grado de fiabilidad si un sismo puede considerarse inducido respondiendo a las siguientes preguntas:

1. ¿Son estos eventos los primeros conocidos con tales características en la región?
2. ¿Existe una correlación directa entre la inyección y la sismicidad?
3. ¿Se encuentran los epicentros cercanos a los pozos, dentro de un radio de 5 km?
4. ¿Los hipocentros son cercanos a la profundidad de los pozos?

5. En caso negativo ¿se conoce la existencia de estructuras geológicas que puedan haber canalizado el flujo al lugar del epicentro?
6. ¿Son los cambios en la presión de los fluidos en el fondo de pozo suficientes para incentivar la sismicidad?
7. ¿Son los cambios en la presión de los fluidos en la zona del hipocentro suficientes para incentivar la sismicidad?

Otra fuente de información destacada es la base de datos *online* HiQuake: The human-induced earthquake database (Foulger, 2018), generada a partir de la revisión de trabajos científicos publicados sobre 1196 eventos sísmicos inducidos a escala mundial por cualquier actividad humana y en cualquier momento histórico. En ella se observa que el 48% de los eventos son causados por la industria hidrocarburífera, y que el 33% del total de sismos inducidos corresponde al *fracking*, siendo estos últimos la primera causa desencadenante de sismos artificiales (un evento sísmico puede involucrar múltiples temblores). Estos datos se dan a pesar de que históricamente el *fracking* ha sido menos estudiado que otros desencadenantes artificiales de sismicidad. Esto obedece a que es una técnica con menor recorrido histórico frente a la extracción convencional u otras causas de sismicidad inducida y a que existe un número total menor de pozos no convencionales (Atkinson, 2016).

Este documento se centra en los no convencionales (o sus sinónimos *fracking* o fracturación hidráulica) por considerarlos cruciales en el análisis que nos atañe, haciendo menciones puntuales a los otros casos cuando esto ayude a presentar los conceptos.

ELEMENTOS QUE PUEDEN INFLUIR EN LA OCURRENCIA DE LA SISMICIDAD

La alteración artificial de la presión porosa de los estratos sedimentarios, los estados de estrés que reactivan fallas y fracturas preexistentes y la lubricación de los planos de fricción de estratos quebrados son los tres elementos que favorecen la ocurrencia de sismicidad. En base a ello, se presentan a continuación las principales variables que llevan a la alteración de estos tres factores clave (Davies, 2013; Atkinson, 2016; Weingarten, 2015; Chen, 2017; Guiglielmi, 2018; Kim, 2018):

- Magnitud de la inyección de fluidos y materiales²: presión en boca de pozo y/o volumen mensual o acumulado.
- Tipo de pozo: convencional, no convencional, sumidero e inyector recuperador.
- Tipo de pozo: vertical vs. horizontal.
- Un solo pozo o varios en conjunto.
- Densidad espacial de pozos.
- Características del flujo inyectado: temperatura y viscosidad, entre otras.
- Proximidad al basamento cristalino y/o espesor del estrato sedimentario.
- Características de las fallas inactivas preexistentes: orientación, estado de estrés y vías de flujo de fluidos entre el pozo y la falla, entre otras.

2. En la extracción de hidrocarburos, y en distintas técnicas, la inyección de agua o agua con productos químicos, geles y arenas en el subsuelo forma parte esencial del proceso productivo.

- Velocidad de la difusión porosa de los materiales sedimentarios.
- Otros factores geológicos.

Sin embargo, el modo en que estos factores inciden como disparadores sísmicos no ha sido todavía plenamente esclarecido. Muchos trabajos no pretenden determinar con detalle cuáles de estos factores tienen mayor importancia en la sismicidad inducida, sino establecer con claridad el vínculo real entre la actividad hidrocarburífera y la ocurrencia de terremotos. Esa es, también, la pregunta que guía el interés de la investigación en curso. Nos proponemos definir si los sismos están relacionados con la actividad en los pozos o no, independientemente de las posibles razones.

En cada caso, las condiciones particulares de la producción y las características del terreno afectarán a su respuesta sísmica. Es de destacar, como indica Davies (Davies, 2013), que las zonas con fallas preexistentes pueden ser de particular interés para las empresas que realizan fracturación hidráulica, ya que debido a esta característica el sustrato resulta más permeable y, en consecuencia, más productivo. Sin embargo, el accionar sobre zonas con fallas preexistentes incrementa el riesgo de disparar o inducir sismicidad.

Elementos sobre la sismicidad en Vaca Muerta

A continuación se presentará la sismicidad de Vaca Muerta³ y se contrastará esa información tanto con algunos de los discursos más extendidos en la opinión pública así como con los argumentos que se despliegan a lo largo de este documento.

“Vaca Muerta es la segunda mayor reserva mundial de gas no convencional y la cuarta de este tipo de crudo” es una afirmación, ya convertida en eslogan, que surge de la Administración de Información Energética de los Estados Unidos de América (US-EIA, por sus siglas en inglés) (US-EIA, 2021), el organismo de estadística y de análisis del Departamento de Energía de los Estados Unidos.

La cuenca nuequina, gracias a su formación Vaca Muerta, es una cuenca con un fuerte desarrollo de los hidrocarburos no convencionales (Stinco, 2014; SE, 2020) que recibe importantes incentivos productivos del Estado argentino (Ley 27.605) y grandes inversiones de capital, sumado al hecho de que trabaja con una expansión constante de las fronteras tecnológicas y productivas. Entonces, ¿por qué deberíamos suponer que aquello que sucede a escala global, es decir, la presencia habitual de la sismicidad inducida en los campos de *fracking* (Atkinson, 2016; Magnani, 2017), no sucedería también en esta cuenca argentina?

3. Vaca Muerta es el nombre con el que se conoce a la región de la Patagonia norte argentina donde se está desarrollando la industria del *fracking*. Y también es el nombre de la principal formación geológica de tipo *shale* del subsuelo, perteneciente a la cuenca hidrocarburífera nuequina que se extiende por los territorios de las provincias de Neuquén, Río Negro, Mendoza y La Pampa.

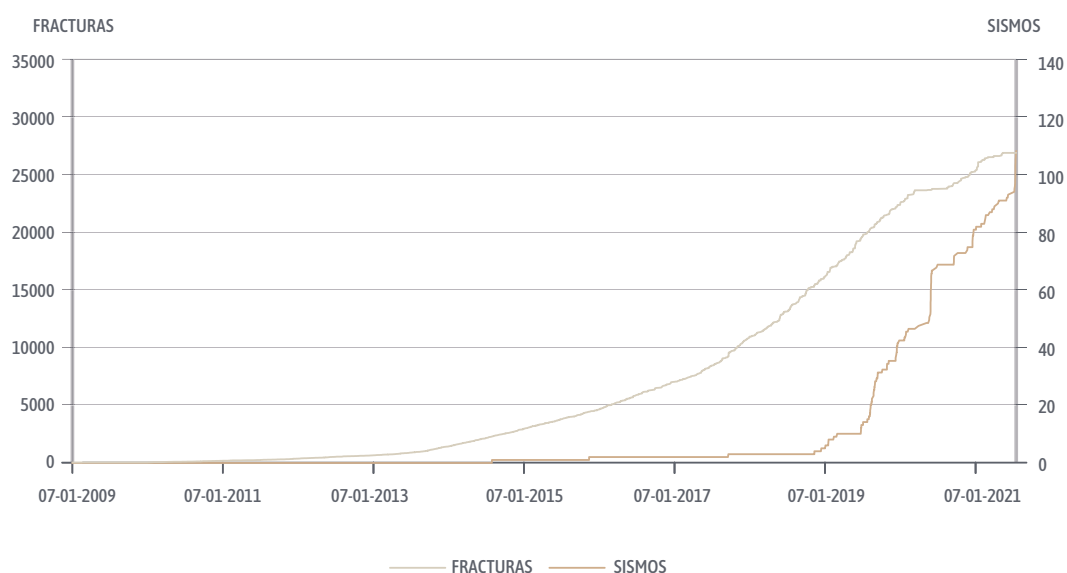
La respuesta es que sí podemos conjeturar qué sucede. Y para evidenciarlo se puede responder el cuestionario de Davis:

1	¿Estos eventos son los primeros conocidos con tales características en la región?	SÍ
2	¿Existe una correlación directa entre la inyección y la sismicidad?	SÍ
3	¿Se encuentran los epicentros cercanos a los pozos dentro de un radio de 5 km?	SÍ
4	¿Los hipocentros son cercanos a la profundidad de los pozos?	SÍ
5	En caso negativo ¿se conoce la existencia de estructuras geológicas que puedan haber canalizado el flujo al lugar del epicentro?	SÍ
6	¿Son suficientes los cambios en la presión de los fluidos en el fondo de pozo para incentivar la sismicidad?	SÍ
7	¿Son suficientes los cambios en la presión de fluidos en la zona del hipocentro para incentivar la sismicidad?	SÍ

Las respuestas afirmativas se fundamentan en la información disponible de localización y profundidad de epicentros e hipocentros en la zona de Vaca Muerta, que se puede consultar en la web del Instituto Nacional de Prevención Sísmica (INPRES) de Argentina. En los últimos cinco años, se registraron más de 80 sismos mientras que no se había declarado actividad sísmica antes de 2015 (ver Figuras 1 y 2), es decir, antes del inicio del *fracking* en la zona.

Vale aclarar que el INPRES no publica información relativa a sismos de magnitud menor a 2.5 ML y muchos de los registros tienen magnitudes por encima de 3 y 4 ML, valores considerados preocupantes incluso dentro de la misma industria hidrocarburífera (Patagonia Shale, 2020). Además, la información sobre localizaciones, tasas, presiones, fracturas y periodos de inyección y extracción de los pozos está disponible en la web de la Secretaría de Energía de la Nación (SE). La consulta de estas fuentes, parcialmente representadas en la Figura 1, permite confirmar la respuesta afirmativa a las preguntas de Davis.

FIGURA 1. CANTIDAD DE SISMOS (INCLUIDOS LOS MENORES DE MAGNITUD 2.5 ML) Y FRACTURAS POR MES Y ACUMULADAS EN LA CUENCA NEUQUINA (ENERO DE 2009 A ABRIL DE 2021)



Fuente: Elaboración propia a partir de datos de fracturas reportados por la Secretaría de Energía (SE) y eventos sísmicos reportados por el INPRES (INPRES).

Es común observar cómo en distintos ámbitos del discurso público, Neuquén (donde se concentra el grueso de la actividad de Vaca Muerta) es presentada como una “provincia sísmica” (con actividad sísmica natural), intentando justificar así los movimientos ocurridos en las zonas aledañas a la cuenca hidrocarburífera.

Neuquén corresponde a una división administrativa, no geológica, y su catalogación como provincia sísmica se debe a la actividad tectónica de su sector andino, occidental, que está vinculada a los procesos activos de las interacciones entre las placas de Nazca y Sudamericana o a sistemas volcánicos (Vásquez, 2020). Sin embargo, su sector estepario extrandino y oriental, que es lejano de la subducción oceánica, y donde se concentra la actividad hidrocarburífera, no tiene casi actividad sísmica. Incluso, según el propio INPRES, está situado en la frontera entre los sectores de “actividad sísmica reducida” o “muy reducida” (las dos categorías de menor magnitud definidas por el ente nacional). Así, la sismicidad propia de Neuquén nada tiene que ver con la observada en Vaca Muerta, como queda demostrado en la Figura 2. Se hace referencia al trabajo de Vásquez y otros (Vásquez, 2020) y a la bibliografía allí citada para aquello relativo a los detalles geológicos y estructurales de la región.

En lo relativo a la inyección de fluidos, un valor alto citado por Weingarten y asociado a la sismicidad inducida es de 50 mil m³/mes (pozos sumideros). Si se traslada este valor a la fracturación hidráulica en Neuquén, consultando los datos de la Secretaría de Energía se observa que es excedido en un orden de magnitud (>500 mil m³/mes) cuando se considera la acción conjunta de pozos muy cercanos, de la misma locación productiva, separados apenas por escasos ocho metros de distancia. Encontrar pozos cercanos fracturando simultáneamente es una práctica habitual en Vaca Muerta, y las consecuencias de ello han sido presentadas por Lei (2017), quien describe fuertes eventos sísmicos en la región china de Sichuan bajo esas condiciones.

Recientemente, Vásquez y otros (2020) han hecho un acercamiento preliminar a la evolución sísmica de la cuenca hidrocarburífera de Neuquén desde un enfoque geológico y sísmico, e identificaron 206 sismos entre 2015 y 2020 (incluidos los de magnitud <2.5, observando así 134 más que los registrados en la web del INPRES en el momento de la redacción de este documento). Su conclusión es que esta nueva dinámica sísmica, inexistente con anterioridad a la llegada del *fracking*, tiene una estrecha relación con este tipo de extracción. Aunque su estudio no analiza la relación entre ambos factores, reconoce que parece no haber otra explicación aparente, en la línea del trabajo de Magnani (2017).

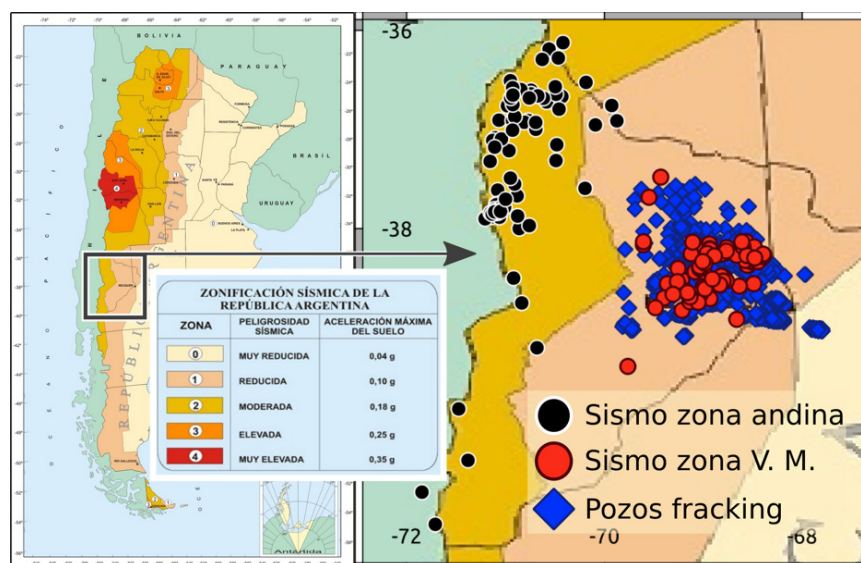
Como indica Davies (2013), nada hace suponer que el comportamiento de la progresión en magnitud de los eventos sísmicos sea distinto en aquellos artificiales respecto de los naturales. Es decir, cada cierta cantidad de sismos de una magnitud es previsible la ocurrencia de un sismo de magnitud mayor, en una proporción aproximada de 10 a 1. Por lo que cuantos más sismos se registran, más probabilidad hay de que ocurra uno de cierta importancia. Esto se evidencia en el caso de Vaca Muerta, donde se cuentan cuatro sismos de magnitud mayor a 4 ML, y cerca de 40 de magnitud mayor a 3 ML (INPRES).

Al margen de los déficits de la red sismográfica para el monitoreo de la región, los eventos de mayor magnitud son los que pueden ser identificados más fehacientemente. Por ello, que se puede considerar su registro como válido, como se ha demostrado en los antecedentes bibliográficos, y es por ello también que múltiples agencias son capaces de registrarlos, como los cinco sismos identificados por el Servicio Geológico de los Estados Unidos desde 2015 (USGS, por su sigla en inglés). Por la misma lógica de la progresión de la cantidad de sismos según su magnitud, se debe suponer que los de menos a 2.5 ML, no disponibles en la fuente del INPRES, serían cerca de 400.

Además, si bien es cierto que existe este déficit en la calidad del registro sísmico en la zona (como surge recurrentemente en el debate público), también lo es que ese déficit cubre tanto el periodo histórico como el actual (no se han incorporado nuevas estaciones recientemente), y ni el INPRES ni el USGS tienen registros sísmicos para la zona previos a la llegada del *fracking*, en 2015.

El Mapa 1 representa los 171 sismos publicados por el INPRES para la provincia de Neuquén (a la fecha de redacción de este material, enero de 2021) superpuestos sobre el mapa de riesgo sísmico para la República Argentina, también publicado por dicha institución. En círculos negros, 90 pertenecen al sector andino (zona de sismicidad moderada según el INPRES), 22 de los cuales (el 24,4%) se registraron antes de 2015. La profundidad promedio del hipocentro de estos es de 89,7 km. Los 81 sismos restantes (círculos rojos) pertenecen al sector de explotación por *fracking*, son todos posteriores a 2015 y tienen una profundidad promedio de 6 km, muy cercana a la profundidad de los pozos (entre los 2 y 3,5 km), considerando que el error de cálculo del hipocentro es mayor a 5 km. En el mapa se ha representado también (rombos azules) la localización de todos los pozos no convencionales de la cuenca de Vaca Muerta. Más allá del instrumental del INPRES, ningún otro registro histórico documental u oral ha probado que existiera sismicidad en el área en más de 150 años de ocupación.

MAPA 1. SISMOS OCURRIDOS EN NEUQUÉN A ENERO DE 2021, SEGÚN EL INPRES



Fuente: Elaboración propia en base a datos del INPRES (INPRES 2021) y Secretaría de Energía (SE).

A la izquierda, mapa de zonificación sísmica de la República Argentina elaborado por INPRES con un recuadro sobre el área de estudio. A la derecha, adaptación para este documento y vista ampliada del mapa en el área de estudio donde se han superpuesto los datos de interés. Las líneas negras son las divisiones provinciales.

Por último, cabe recordar que la tensión liberada por un terremoto se incrementa en unas treinta veces por cada grado de magnitud (Davies, 2013). Es decir, un sismo de magnitud 4 es 900 veces más demolidor que uno de magnitud 2; uno de magnitud 5, 27.000 veces más que el de magnitud 2. Por ello, no tomar en consideración las causas de los pequeños temblores puede ser un error.

irreparable. La comunidad científica se muestra preocupada por la aparición de sismicidad en zonas donde antes era inexistente y en las que por lo tanto las poblaciones no están preparadas para reaccionar debidamente (Atkinson, 2016; Kim, 2018; Lei, 2017; Skoumal, 2019; Ellsworth, 2013). Esta situación se agrava por la falta de políticas de prevención por parte de la administración pública y las empresas, a pesar de contar con un registro fehaciente de la actividad telúrica reciente. Cabe preguntarse, entonces, qué capacidad de respuesta tienen las empresas ante la eventualidad de incidentes derivados de los temblores. Pero no se trata solo de la capacidad de respuesta, sino también de la responsabilidad misma de las acciones sobre estos incidentes. Además, importa indagar cuán fiable es la estanqueidad de las formaciones geológicas y de las estructuras impermeables en las que se inyectan fluidos nocivos (pozos sumideros y de *fracking*) ante la acción de los sismos.

En respuesta a estos planteos, otras naciones han establecido márgenes de tolerancia sobre los sismos observados cerca de zonas donde se realizan trabajos de *fracking*. Un criterio general en la industria es el de parar las actividades ante la sospecha de estar disparando terremotos de magnitud superior a 1.5 ML. En el Reino Unido, las actividades se paralizan temporalmente con sismos de magnitud superior a 0.5 ML (BBC, 2019), si bien este es un criterio conservador en su contexto. ¿Cuál es el criterio en Argentina tras cerca de cien sismos de magnitud superior a 2.5 ML?

Se observa en Argentina una tendencia generalizada a desvincular la ocurrencia de los sismos de las actividades de la industria hidrocarburífera. Esto es visible en los titulares de los principales medios de comunicación, en las declaraciones de profesionales, instituciones y corporaciones del sector y por parte de la misma administración (Tamburini, 2021). Puede deberse a un desconocimiento de la materia o a un ocultamiento activo de esta realidad. Pero aunque las causas de esta tendencia puedan ser distintas, las consecuencias son las mismas y de notable gravedad. Es imperioso, entonces, atender a esta problemática con la mayor celeridad posible.

BIBLIOGRAFÍA

Atkinson, G. M., Eaton, D. W., Ghofrani, H., Walker, D., Cheadle, B., Schultz, R., Shcherbakov, R., Tiampo, K., Gu, J., Harrington, R. M., Liu, Y., van der Baan, M., y Kao, H. (2016). Hydraulic fracturing and seismicity in the western Canada sedimentary basin. *Seismological Research Letters* 87, 3 (Mar. 2016), 631-647.

Atkinson, G., Assatourians, K., Cheadle, B., y Greig, W. (2015). Ground motions from three recent earthquakes in western Alberta and northeastern British Columbia and their implications for induced-seismicity hazard in eastern regions. *Seismological Research Letters* 86,3 (Abr. 2015), 1022-1031.

Chen, X., Nakata, N., Pennington, C., Haffener, J., Chang, J. C., He, X., Zhan, Z., Ni, S., y Walter, J. I. (2017). The Pawnee earthquake as a result of the interplay among injection, faults and foreshocks. *Scientific Reports* 7, 1 (Jul. 2017).

Dart, T. (2018). El *fracking* desencadena una ola de terremotos en zonas de Texas que llevaban millones de años inactivas. ElDiario.es (10 enero de 2018) Disponible en: https://www.eldiario.es/internacional/theguardian/fracking-desencadena-terremotos-texas-inactivas_1_2951336.html

Davies, R., Foulger, G., Bindley, A., y Styles, P. (2013). Induced seismicity and hydraulic fracturing for the recovery of hydrocarbons. *Marine and Petroleum Geology* 45 (Ag. 2013), 171-185.

Davis, S. D., y Frohlich, C. (1993). Did (or will) fluid injection cause earthquakes? – criteria for a rational assessment. *Seismological Research Letters* 64 (1993), 207-224.

Foulger, G. R., Wilson, M. P., Gluyas, J. G., Julian, B. R., y Davies, R. J. (2018). Global review of human-induced earthquakes. *Earth-Science Reviews* 178 (Mar. 2018), 438-514.

Guglielmi, Y., Cappa, F., Avouac, J.-P., Henry, P., and Elsworth, D. (2015). Seismicity triggered by fluid injection-induced aseismic slip. *Science* 348, 6240 (Jun. 2015), 1224-1226.

INRES. Instituto Nacional de Prevención Sísmica. Web: inpres.gob.ar/

Kim, J.-W., y Lu, Z. (2018). Association between localized geohazards in west texas and human activities, recognized by sentinel-1a/b satellite radar imagery. *Scientific Reports* 8, 1 (Mar. 2018).

Lei, X., Huang, D., Su, J., Jiang, G., Wang, X., Wang, H., Guo, X., y Fu, H. (2017). Fault reactivation and earthquakes with magnitudes of up to mw4.7 induced by shale-gas hydraulic fracturing in sichuan basin, china. *Scientific Reports* 7, 1 (Aug. 2017).

Ley 27.605 (2020) Aporte Solidario y Extraordinario para Ayudar a Morigerar los Efectos de la Pandemia. Publicada en el Boletín Oficial de la República Argentina: <https://www.boletinoficial.gob.ar/detalleAviso/primera/238732/20201218>

Magnani, M. B., Blanpied, M. L., DeShon, H. R., and Hornbach, M. J. (2017). Discriminating between natural versus induced seismicity from long-term deformation history of intraplate faults. *Science Advances* 3, 11 (Nov. 2017).

Mulargia F., Bizzarri A. Anthropogenic Triggering of Large Earthquakes. *Scientific Reports*. 2014.

Patagonia shale (2020). "Shell suspendió operaciones en Vaca Muerta tras la seguidilla de sismos". Disponible en: <https://patagoniashale.com.ar/shell-suspendio-operaciones-en-vaca-muerta-por-la-seguidilla-de-sismos/>

SE (2020). Reporte de producción. Secretaría de Energía de la Nación. Disponible en: <http://datos.minem.gob.ar/dataset/produccion-de-petroleo-y-gas-por-pozo>

Skoumal, R. *Hydraulic Fracturing Induced Seismicity*-Dr. Rob Skoumal, USGS (IRIS Webinar): <https://www.youtube.com/watch?v=o1MqP9lanxE> (accedido: enero 2021)

Stinco, L., and Barredo, S. (2014). Características geológicas y recursos asociados con los reservorios no convencionales del tipo shale de las cuencas productivas de la argentina. *Petrotecnia* (oct. 2014), 44-65.

Tamburini Beliveau G., Grosso J. (2021). "La administración pública y la gestión del riesgo sísmico en la cuenca hidrocarburífera de Vaca Muerta mediante el análisis de sus expedientes internos". En prensa.

USEIA, U.S. Energy Information Administration (2021). *Argentina*. Disponible en: <https://www.eia.gov/international/analysis/country/ARG> (última visita: enero 2021)

USGS, United States Geological Survey: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/map>

Vásquez, J., Spagnotto S., Mezcua, J., Giambiagi, L., y Sigismondi, M. (2020). Aumento notorio de la sismicidad de la provincia del Neuquén, en el período 2015-2020. *Boletín Brackebuschiano* (2020), 9-17.

Weingarten, M., Ge, S., Godt, J. W., Bekins, B. A., y Rubinstein, J. L. (2015). High-rate injection is associated with the increase in U.S. mid-continent seismicity. *Science* 348, 6241 (Jun. 2015), 1336-1340.

Wilson, M. P., Foulger, G. R., Gluyas, J. G., Davies, R. J., and Julian, B. R. (2017). HiQuake: The human-induced earthquake database. *Seismological Research Letters* 88, 6 (Oct. 2017), 1560-1565.