

Boletín Brackebuschiano

Geociencias y Sociedad
Asociación Geológica Argentina
Octubre-Noviembre 2020

Nº2

ISSN 0328-2724

ESCRIBIENDO SOBRE GEOCIENCIAS

AUMENTO NOTORIO DE LA SISMICIDAD DE LA PROVINCIA DEL NEUQUÉN,
EN EL PERÍODO 2015-2020

RECORDATORIO A LA MEMORIA
DE RICARDO SUREDA

ASAMBLEA ORDINARIA AGA
18 DE DICIEMBRE 2020

INTERNACIONALES

CONVENIO ENTRE LAS ASOCIACIONES GEOLÓGICAS
COLOMBIANAS (ACG-ACGGP) Y LA AGA

Fotografía: Lago Mari Menuco (Neuquén), al fondo la cordillera y el volcán Lanín.
Agradecemos especialmente a Pablo Sigismondí el permiso para usar esta foto.



ÍNDICE

NOTICIAS INSTITUCIONALES

- P. 3 [NUEVAS DELEGADAS DE LA AGA](#)
- P. 3 [ASOCIARSE A LA AGA](#)
- P. 3 [MOVIMIENTO DE SOCIOS](#)
- P. 4 [ASAMBLEA ORDINARIA 2020 AGA](#)
- P. 5 [BECAS PARA SIMPOSIO AAPG-AGA](#)
- P. 6 [CONVENIO CON LAS ASOCIACIONES HERMANAS COLOMBIANAS](#)
- P. 7 [PARTICIPACIÓN DE LA AGA EN LA SESIÓN EXTRAORDINARIA DE LA IUGS](#)

ESCRIBIENDO SOBRE GEOCIENCIAS

- P. 9 [AUMENTO NOTORIO DE LA SISMICIDAD DE LA PROVINCIA DEL NEUQUÉN, EN EL PERÍODO 2015-2020](#)
- P. 18 [RECORDATORIO A LA MEMORIA DE RICARDO SUREDA](#)

ESPACIO SEGEMAR

- P. 19 [CICLO DE CHARLAS DEL SEGEMAR](#)
- P. 20 [PRESENTACIÓN DEL MAPA METALOGÉNICO DE AMÉRICA CENTRAL Y EL CARIBE](#)
- P. 21 [DACYTAR, UN PORTAL DE ACCESO ABIERTO DE DATOS DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA](#)
- P. 22 [PREMIO "JUAN ABECIAN" A LA TRAYECTORIA CIENTÍFICO-TECNOLÓGICA EN CARTOGRAFÍA](#)

TEMAS VARIOS

- P. 23 [LA IMPORTANCIA DE LA GEOÉTICA](#)
- P. 23 [CHARLAS Y CONFERENCIAS AGA](#)
- P. 26 [CURSOS](#)
- P. 27 [CONGRESOS Y SIMPOSIOS](#)
- P. 28 [PUBLICACIONES PARA DESCARGAR](#)

Responsables del Boletín Brackebuschiano:

Silvia Irene Carrasquero (UNLP)

Gabriela Massaferró (UNPSJB-IPGP-CONICET)

Javier Elortegui Palacios (IGM/UNJ)

Silvia Chávez (SEGEMAR)

AUMENTO NOTORIO DE LA SISMICIDAD DE LA PROVINCIA DEL NEUQUÉN, EN EL PERÍODO 2015-2020

Joaquín Vásquez¹, Silvana Spagnotto², José Mescua^{3,4}, Laura Giambiagi³ y Mario Sigismondi⁵

1. Universidad de Talca, Chile
2. Universidad Nacional de San Luis, CONICET
3. IANIGLA, CONICET
4. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad Nacional de Cuyo
5. YPF

E-mail: silvanaspagnotto@gmail.com

Resumen

La sismicidad de base en la provincia de Neuquén, registrada en catálogos internacionales, eventos históricos y escasas publicaciones, muestra pocos eventos aislados y de baja magnitud. Desde 2015, se registra un notorio aumento con magnitudes que llegan a M_w 5.0 e intensidades IV a V (de medio a moderado) según lo reportado en los catálogos de INPRES (Instituto Nacional de Prevención Sísmica) y PDE-USGS (Servicio Geológico de los Estados Unidos). Esta sismicidad se focaliza en la parte central de la cuenca Neuquina, entre las localidades de Cutral-Có y Añelo.

En este trabajo se localizó y analizó la sismicidad desde noviembre de 2015 a julio de 2020, y se comparó con la localizada por INPRES. Además, se realizaron entrevistas a los pobladores locales para la estimación de las intensidades. Se destacan cinco eventos: el M_w 5.0 del 7 de marzo de 2019, el M_w 4.4 del 26 de septiembre de 2017, el M_w 4.2 del 19 de noviembre de 2015, los cuales, además de sobresalir en magnitud, presentan mecanismos focales reportados; y, por último, el sismo M_L 4.3 del 27 de octubre del corriente año 2020.

1. Introducción

La sismicidad en la zona de la provincia del Neuquén se ubica en dos sectores principalmente: sismos de la placa oceánica subducida (placa de Nazca), de profundidad intermedia, ubicados entre los 100 y 200 kilómetros de profundidad y sismos superficiales, algunos puramente tectónicos y otros asociados a los sistemas volcánicos, como los que ocurren en el volcán Copahue. Los sismos anteriores al 2015, reportados por EHB, (<http://www.isc.ac.uk/ehbulletin/search/catalogue/>) que se encuentran relocalizados de catálogos iniciales

como el PDE-USGS se indican en la Figura 1 mostrando escasos sismos en el sector.

Respecto a la sismicidad superficial y debido a la baja tasa de sismos históricos existentes, los trabajos publicados son escasos y las únicas investigaciones previas se limitan a los trabajos de Asch *et al.* (2001), Bohm *et al.* (2002) y Correa *et al.* (2016 y 2018). Sin embargo, la ocurrencia de eventos sísmicos -presuntamente superficiales- sentidos por los pobladores, se incrementó en los últimos años y algunos de ellos provocaron daños y pánico en algunas localidades.

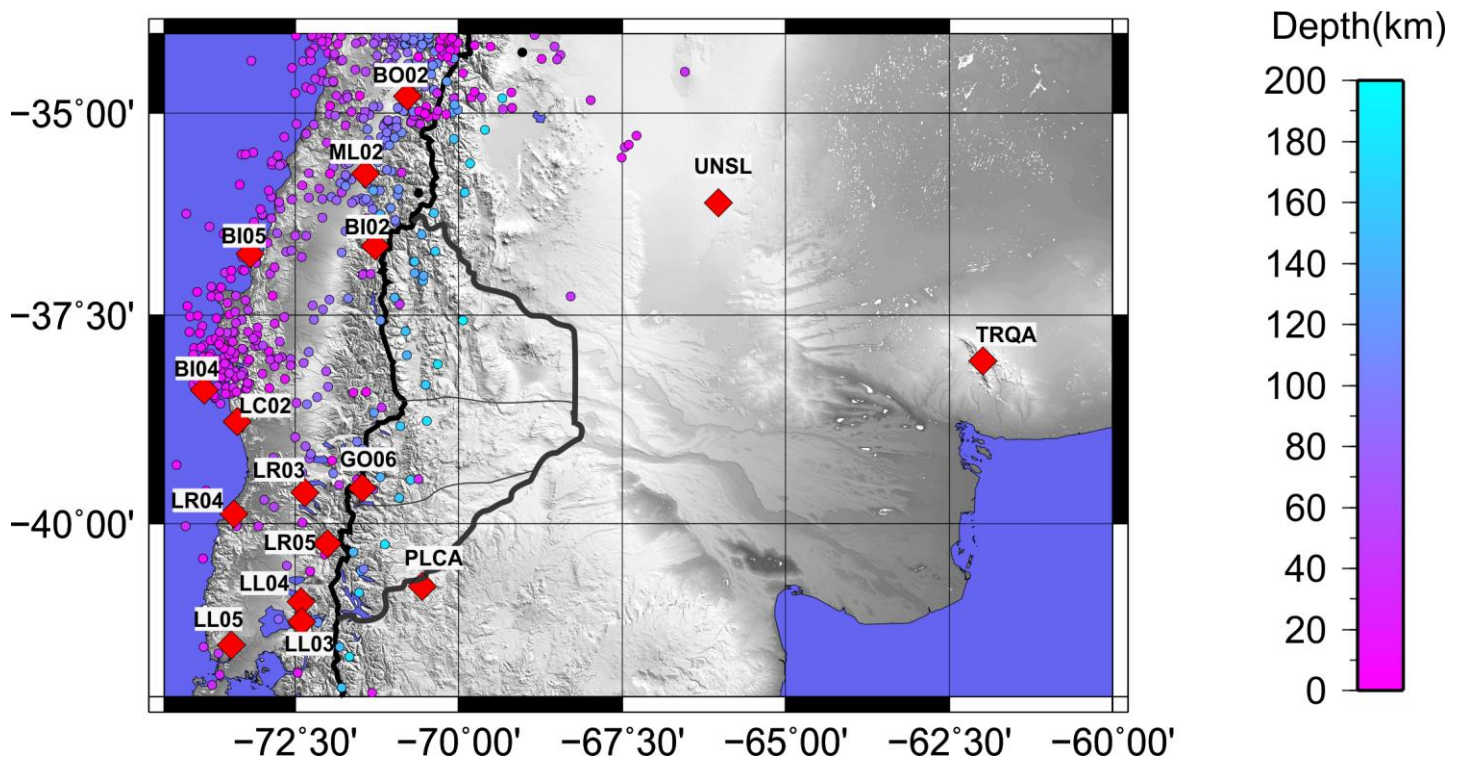


Figura 1: Mapa de la zona centro-sur de Chile y Argentina indicando la sismicidad anterior a 2015, reportada en la zona por el catálogo EHB en degradé de color, mostrando escasos sismos en la región analizada. Las principales estaciones usadas en las localizaciones se indican en diamantes rojos. Se indican los límites de la provincia de Neuquén en línea negra gruesa y en línea más delgada los límites de la dorsal de Huincul según Mosquera y Ramos (2006), dentro de la provincia.

2. Estructuras principales que pueden producir la sismicidad observada

La cuenca Neuquina abarca un área de más de 120.000 km² y contiene un registro estratigráfico de al menos 6.000 metros de espesor, con edades que van desde el Triásico al Paleógeno (Legarreta y Gulisano 1989; Legarreta y Uliana 1999), de facies continentales y marinas silicoclásticas, carbonáticas y evaporíticas, convirtiendo a la cuenca en un excelente laboratorio de campo para la realización de un análisis sedimentológico, estratigráfico secuencial y tectónico detallado. El ambiente estructural de la zona que se analiza en este trabajo, denominada "zona de deformación de transición" – "Bajo de Añelo" (Sigismondi 2013), está circunscripta entre tres ambientes morfoestructurales mayores: la dorsal de Huincul por el sur, el dorso de los Chihuidos en oeste – noroeste y la plataforma de Catriel por el este. Su estructuración ha sido el resultado de una combinación de complejas interacciones de las fábricas o patrones de deformación del basamento,

junto con una naturaleza segmentada de la deformación en la época andina (Sigismondi, 2013). La consecuencia de la acreción de diferentes terrenos del Paleozoico, y la subsiguiente ruptura Triásico - Jurásico, controló fuertemente la sedimentación de la Formación Vaca Muerta del Jurásico tardío-Cretácico temprano. Los sectores central y sur de la cuenca estaban dominados por la subducción normal y sus diferentes estructuras estaban condicionadas por la reología y fabricas previas de su basamento (Ramos *et al.* 2019).

En nuestro caso en particular, posiblemente el elemento estructural mayor que condiciona la deformación en la zona de estudio es la dorsal de Huincul (De Ferraris 1947), con una serie de estructuras regionales alineadas en dirección latitudinal que se desarrollan a los 39°S, presentando en conjunto una orientación general E-O que marcan

el límite natural norte de la Patagonia (Ramos *et al.* 2004). Además de la faja plegada y corrida del Agrio – Chos Malal, es el sector que presenta la mayor estructuración de la cuenca, involucrando una serie de lineamientos que representan estructuras tanto contraccionales como transcurrentes, que se extienden por más de 270 km de largo en los cuales

3. Metodología

Se obtuvieron datos de estaciones sismológicas libres de las redes globales disponibles en IRIS, en un rango de distancia entre los 200 y 1000 kilómetros aproximadamente, observándose minuciosamente los registros de las estaciones sismológicas GO06, PLCA, BIO2, LR05, ML02, BO02 y LL04 en tiempo real entre noviembre de 2018 y 2020, debido a su cercanía con el área de estudio. Para los sismos más grandes se incluyó el uso de la estación UNSL instalada en La Florida, San Luis, y hasta estaciones más distantes como TRQA. Las señales de los sismos más grandes muestran claramente (**Fig. 2**), que aun en distancias grandes, las señales son muy claras y por ello se usaron estaciones a 700 km o más. Los sismos originados en la provincia del Neuquén y registrados por las estaciones anteriormente mencionadas, fueron calculados manualmente y se discriminó a aquellos que estuviesen dentro del área de estudio. Se desarrolló un software para detectar parámetros preliminares de manera automática que luego se picaron manualmente. Se utilizó el paquete SEISAN (Ottemöller *et al.* 2012) para el procesamiento de los datos sismológicos. Los registros sismológicos de las redes globales también fueron analizados con el programa SWARM y ObsPy bajo Python. La determinación de los hipocentros se realizó utilizando HYPOCENTER (Lienert *et al.* 1986) y el modelo de velocidades inicial usado fue el de Bohm *et al.* (2002), pero se obtuvo un nuevo modelo usando Velest y se relocalizaron los eventos.

Las soluciones de los mecanismos focales reportados hasta el momento en la zona son cuatro, dos del

es posible reconocer orientaciones estructurales: ONO a NO, NE, N-S y E-O.

La distribución espacial de la actividad sísmica detectada en la provincia de Neuquén sugiere que estos sistemas de fallas se han reactivado notoriamente desde 2015.

Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS-NEIC), una del CMT Central Moment Tensor de Harvard y una publicada por Correa-Otto *et al.* (2018). Las soluciones se analizaron de acuerdo con las fallas mapeadas y mostradas en las **figuras 3 y 5**.

Por otro lado, se contactó a pobladores locales y se habilitó un sitio de mensajería y de encuesta sísmica en aquellas localidades que estuvieran dentro del área de estudio para reportar los sismos perceptibles. La intensidad en la escala de Mercalli Modificada de todos los sismos se estimó de acuerdo con una encuesta sísmica siguiendo las preguntas del *¿"Did you felt it?"* del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS). Para ello se realizó una encuesta *online* que llamamos **"¿Percibiste el sismo? ¡Repórtalo aquí!"** y encuestas vía telefónica con habitantes del lugar.

El procesamiento de los datos mostrados en este trabajo permitió obtener la localización de 206 sismos, entre los años 2015 y 2020, en la zona centro y oriente de la provincia del Neuquén. Además de los 206 sismos localizados y mostrados en la Figura 3, hay una cantidad considerable de eventos en la zona que no pudieron ser localizados por su baja magnitud, los cuales fueron detectados por 1 a 3 estaciones y en dichos casos se consideró dentro del área de estudio debido a la similitud de las ondas y fases con otros sismos y la percepción en las localidades cercanas, pero no se muestran por falta de localización de los mismos.

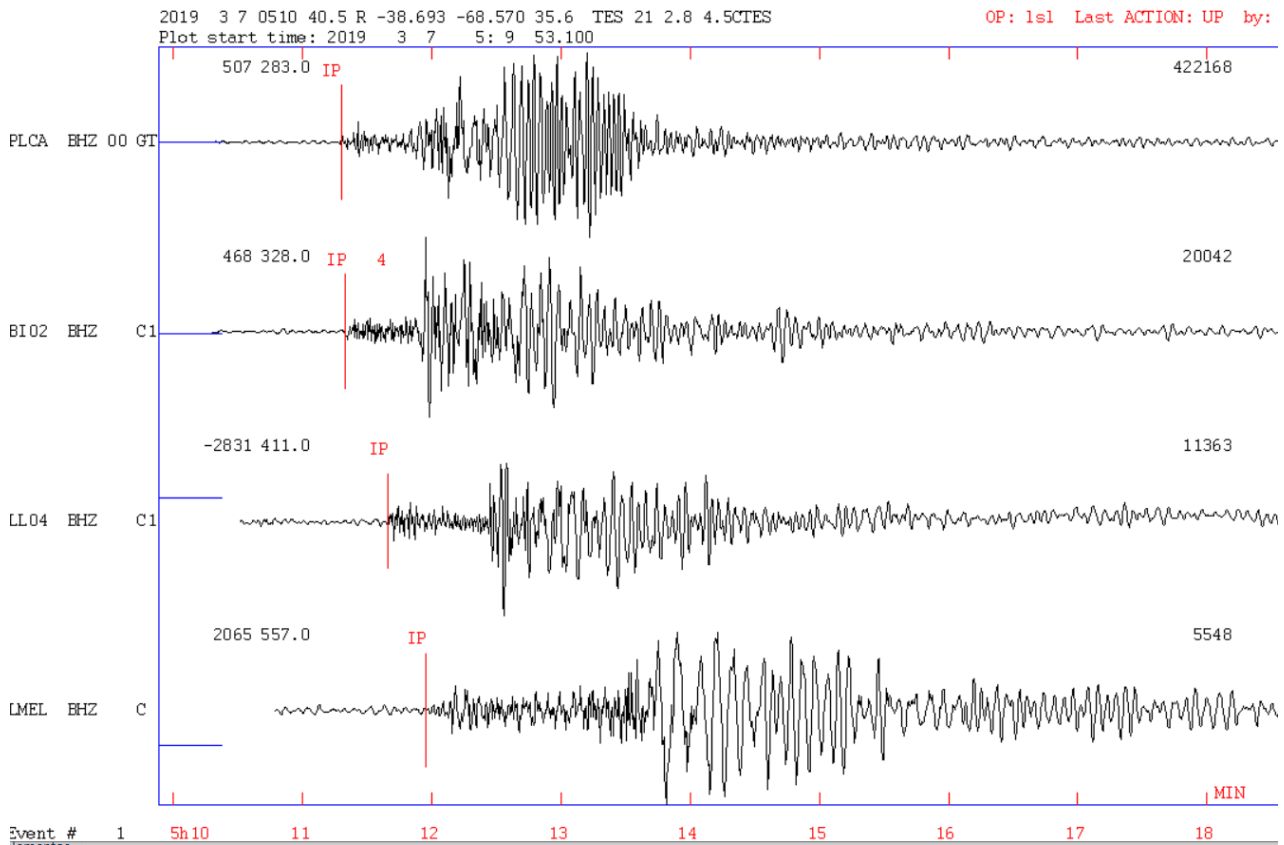


Figura 2: Registro del sismo del 7 de marzo de 2019 en algunas de las estaciones libres. Las señales son muy claras aún a distancias superiores a los 500 km.

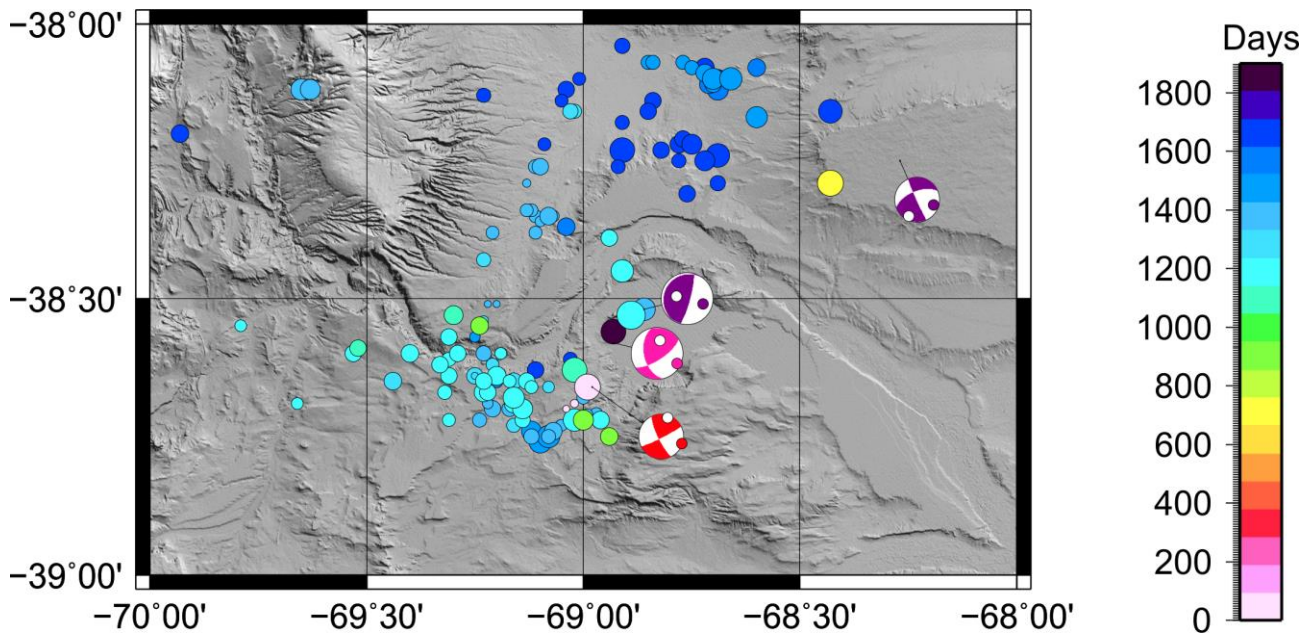


Figura 3: Sismos localizados en este trabajo coloreados de acuerdo con el orden cronológico. El primer sismo del 2015 localizado en este trabajo cuenta como día 1. Se ve claramente que la nube de sismos celestes de 2019 se mueve hacia el norte en el 2020 (azules). Mecanismos focales: color Rojo, Correa *et al.* (2018), Violeta reportados por USGS y Rosa reportado por CMT Catalog. El sismo M_w 5.0 del 7 de marzo de 2019 posee dos mecanismos focales diferentes y localización de acuerdo con la agencia (CMT o PDE) que la reporta.

4. Resultados y discusión

En orden cronológico podemos destacar como un primer evento el 31 de julio de 2011 a las 20:15:52 UTC, perceptible en Añelo con una intensidad de III Mercalli, registrado por la estación PLCA. El epicentro no pudo determinarse, ya que se carecían de más estaciones operativas en ese momento. Con la única estación disponible se determinó su magnitud en $M_L=3.5$, y una localización aproximada, que junto al reporte de percepción y el registro sismográfico muestra que el sismo provino desde la zona norte de la provincia del Neuquén. Los sismos que pudieron localizarse comienzan en 2015, con el sismo magnitud de $M_L=4.5$ ocurrido el 19 de noviembre de 2015. Este evento, según Correa *et al.* (2018), se produjo justamente sobre una falla geológica de tipo transcurrente dextral con orientación NE-SO en el borde suroeste del Embalse Los Barreales. La elección del plano de falla en el mecanismo focal fue realizada por los mismos autores siguiendo las réplicas del sismo principal, proponiendo un rumbo $63,2^\circ$, inclinación $85,0^\circ$ y *rake* o deslizamiento $167,8^\circ$.

Los otros sismos destacados son un sismo $M_w=4.4$ del 26 de septiembre de 2017 a las 01:04:30 UTC localizado a 18 km al este de Añelo y un sismo de $M_L=4.2$ ocurrido el 16 de noviembre de 2018 a las 03:05:24 UTC en las cercanías de Sauzal Bonito, ubicándose a solo 7,7 km al SE de la localidad antes mencionada (-38.629 - 69.023). Este último sismo produjo que sea uno de los sismos con mayor intensidad percibidos en Sauzal Bonito, con una intensidad de V a VI Mercalli.

Entre las 01:27:50 UTC del 23 de enero de 2019 y las 08:51:19 UTC del 24 de enero de 2019 se registraron 37 sismos entre $M_L=1.4$ y $M_L=3.6$, los cuales finalizan en un evento de $M_L=3.5$, localizados en su mayoría entre 10 a 20 km al oeste y suroeste de Sauzal Bonito. El sismo más fuerte de esta serie ($M_L=3.6$) se localizó a 10 km al SSO de Sauzal Bonito (-38.676, -69.155). El último sismo de esta serie ($M_L=3.5$) se produjo a 11 km al SSO de Sauzal Bonito (-38.695, -69.142) a 5.4 km de profundidad. En los siguientes días se continuaron registrando eventos provenientes del mismo lugar, aunque de manera más esporádica y aislada. No se pudo determinar mecanismos focales

de los eventos. La ocurrencia de sismos en serie, precursores de otros sismos más importantes, sugiere que sería posible implementar un sistema de alerta sísmica en la zona, para prevenir tempranamente a la población sobre posibles eventos más importantes, y como un mecanismo de control para las actividades petroleras.

El 10 de febrero de 2019 a las 03:03:55 UTC se originó otro sismo destacado, de $M_L=3.8$, localizado a 15 km al SO de Añelo y a 24 km al NE de Sauzal Bonito (-38.451, -68.911); no se tiene mecanismo focal del mismo.

El 7 de marzo de 2019 a las 05:10:36 UTC se produjo un evento sísmico de $M_w=4.8$ (M_w 4.99 según el USGS), siendo el sismo más fuerte registrado en la zona central de la Provincia del Neuquén. El epicentro obtenido en este trabajo cae en el Embalse Los Barreales, a unos 20 kilómetros al este de Sauzal Bonito (-38.529, -68.891) con 10,3 kilómetros de profundidad. El mecanismo focal reportado por USGS muestra una falla inversa y los resultados del mecanismo focal son los planos de rumbo, inclinación y deslizamiento $219^\circ/9^\circ/114^\circ$ para el primer caso y $15^\circ/81^\circ/86^\circ$ para el segundo. Las distintas agencias sismológicas varían su ubicación de -38.529 -68.891 profundidad 10 km y magnitud M_w 4.8 (este trabajo), -38.540 -68.870, 10.0 km, 4.6 m_b (GFZ), -38.523 -68.857, 11.5 km 5.0 M_{ww} (USGS), -39.232 -68.886, 11 km 4.8 M_L (INPRES) y -38.599 -68.969 14.1 km 4.8 M_w (CSN). Las intensidades en la escala de Mercalli fueron las siguientes: Sauzal Bonito: V-VI, Añelo: V, Cutral Có: III-IV entre otras.

Por último, el 27 de octubre de 2020 a las 16:32 (UTC) se produce un sismo de $M_L=4.3$ ubicado a 16 km al ENE de Sauzal Bonito (-38.561, -68.9353) a 11,3 km de profundidad e intensidades: IV en Sauzal Bonito; III-IV Añelo, Tratayen; III Mari Menuco, Plaza Huinul, Cutral-Co; II-III Neuquén, Plottier.

Todos los sismos están graficados en **las figuras 3, 4 y 5** donde puede apreciarse que la actividad es importante, respecto a la actividad histórica mostrada en la figura 1. En la **figura 3** coloreamos los sismos para poder detectar cambios temporales de las localizaciones, y para ello fueron coloreados de

acuerdo con el orden cronológico. El primer sismo del 2015 localizado en este trabajo cuenta como día 1.

Se ve claramente que la nube de sismos celestes, de 2019, se mueve hacia el norte en el 2020 (azules).

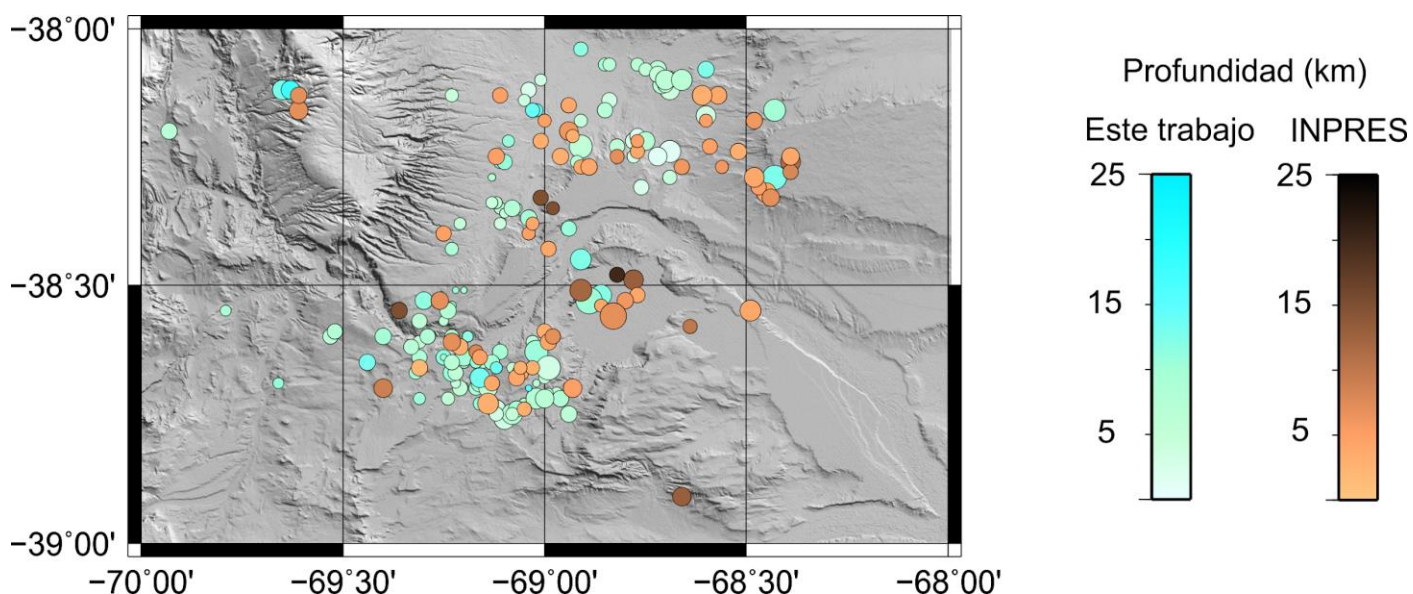


Figura 4: Sismos localizados en este trabajo (celestes) y su comparación con sismos localizados por INPRES (marrones). Todos los sismos en su totalidad no son los mismos, aunque sí en un número elevado de ellos. Las localizaciones de INPRES se encuentran ligeramente al este de las presentadas aquí.

Los sismos localizados en este trabajo fueron comparados con los localizados por INPRES (Ver figura 5; celestes y marrones respectivamente). Todos los sismos mostrados en ambos conjuntos (INPRES, y este trabajo) en su totalidad no son los mismos, aunque sí en un número elevado de ellos, siendo menos sismos los localizados por INPRES que los que localizamos en este trabajo. Las localizaciones de INPRES se encuentran ligeramente al este de las presentadas aquí, poseen el mismo rango de profundidades y magnitudes.

Los mecanismos focales fueron graficados también en la **figura 3**, tanto el reportado por Correa *et al.* (2018), los de USGS (Servicio Geológico de los Estados Unidos) y el de CMT (<https://www.globalcmt.org/CMTsearch.html>) de Harvard. El sismo M_w 5.0 del 7 de marzo de 2019 posee dos mecanismos focales diferentes y localización de acuerdo a la agencia (CMT o USGS) que la reporta, cambiando de rumbo/inclinación/rake $167^\circ/48^\circ/28^\circ$ y $57^\circ/70^\circ/134^\circ$ de CMT a $219^\circ/9^\circ/114^\circ$ y $15^\circ/81^\circ/86^\circ$ de USGS, lo que implica que el sismo puramente inverso reportado por USGS,

pasaría a tener una componente mayormente de transcurrencia en el de CMT, con una solución similar a la reportada por Correa-Otto *et al.* (2018) en una región cercana al evento del 19 de noviembre 2015.

Por último, en la **figura 5** se graficaron las localizaciones obtenidas sobre el mapa de fallas de Pángaro *et al.* (2011), lo cual permite sugerir que las fallas que principalmente están mostrando actividad pueden separarse en tres sectores que indicamos en dicha figura y que son:

1. Fallas inversas de rumbo cercano a N-S mapeadas por Pángaro *et al.* (2011), cercanas al alto de Sauzal Bonito que coinciden con la localización de varios eventos, en particular con el sismo del 7 de marzo de 2019, y con el mecanismo focal reportado por USGS.
2. La nube de sismos ubicada más al sur en la cual se encuentra el mecanismo focal reportado por Correa-Otto *et al.* (2018), podría estar asociada a reactivaciones de las fallas normales y de transcurrencia del *sinrift* triásico-jurásico ubicadas en el sector, levemente desplazado al este de la

ubicación de los sismos. Correa-Otto *et al.* (2018) no descartan la posibilidad de que la estructura del subsuelo vinculada al sistema de fallas de la Dorsal de Huincul podría seguir ejerciendo un control en la actividad sísmica.

3. El tercer sector, que incluye el sismo M_w 4.4 del 26 de septiembre de 2017, y que posee

un mecanismo focal casi puramente de transcurrencia que podría estar asociado a fallas de rumbo y en particular el plano $156^\circ/87^\circ/-30^\circ$, izquierdo y con una pequeña componente normal, coincide con las fallas reportadas por Pángaro *et al.* (2011).

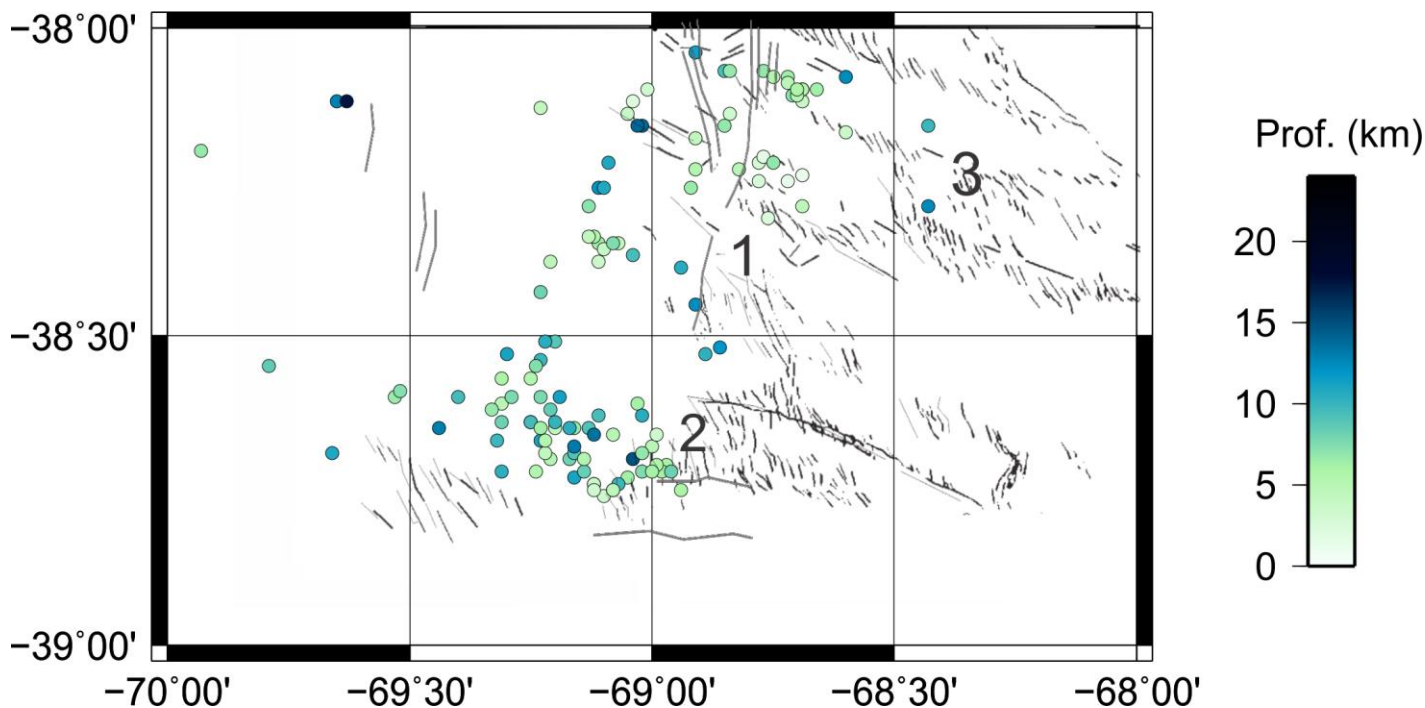


Figura 5: Sismos localizados en este trabajo coloreados de acuerdo con su profundidad sobre las fallas publicadas por Pángaro *et al.* (2011). Indicamos con números (1, 2, 3) a los sectores nombrados en la discusión.

Conclusiones

El aumento de sismicidad asociado a actividades humanas ha sido reportado en otros lugares del mundo, por ejemplo, en el sector centro – norte del estado de Oklahoma (Langenbruch y Zoback 2016) como consecuencia de actividades en reservorios (pozos *disposal* de agua) en zonas potencialmente activas (Walsh y Zoback 2015).

En la mayoría de los casos de sismos inducidos en el mundo por fracturamiento hidráulico, la magnitud de la sismicidad inducida es proporcional a la energía entregada por la actividad humana que estimula la fracturación de las rocas (Ellsworth 2013; Keranen *et al.* 2014; Goebel *et al.* 2015) y determinada principalmente por el estado de esfuerzos de las fracturas y fallas previas presentes en el área y la

resistencia de las rocas. Los experimentos de extracción / inyección registrados e investigados en esos trabajos sugieren que la inyección de agua o la estimulación por fractura serían los causantes, al llevar a fallas que estaban en un estado crítico de esfuerzos a deslizarse.

El incremento de la actividad sísmica en el sector mostrado en este trabajo coincidió con el inicio y la intensificación de fracturamiento hidráulico en la zona, lo cual sugiere que la inyección hidráulica dispararía el deslizamiento de fallas previas óptimamente orientadas con respecto al campo de esfuerzos regionales. De todas maneras, la correlación de estas actividades con los sismos no es suficiente y se sugiere realizar estudios detallados

con estaciones sismológicas instaladas en la zona. Estos estudios en conjunto con información de subsuelo como sísmica de superficie, imágenes de registración de microsísmica en pozos, datos de estimulación y pérdidas de fracturación, permitirían analizar el rol de la percolación de fluidos, el aumento de la presión de fluidos en los sistemas de fallas y conocer mejor el riesgo sísmico asociado. También debería considerarse el rol que puede jugar el peso adicional de los embalses "Los Barreales" y "Mari Menuco" inmediatamente al este de la zona de actividad de explotación no convencional en este sector.

Las localizaciones de los sismos presentadas en este trabajo tienen baja precisión y sus elipses de error pueden llegar a tener 50 km en algunos casos en la longitud, sobre todo, ya que en latitud la cobertura norte-sur de estaciones está cubierta y el error es aproximadamente un tercio de esa cantidad. Sin

Bibliografía

- Asch, G., Bohm, M., Bruhn, C., Rietbrock, A. y Wigger, P. 2001. A passive seismological experiment in the Southern Andes. 26th General Assembly of the European Geophysical Society (EGS), ISSA Working Group.
- Bohm, M., Lüth, S., Echtler, H., Asch, G., Bataille, K., Bruhn, C., Rietbrock, A., Wigger, P. 2002. The Southern Andes between 36° and 40°S latitude: seismicity and average seismic velocities. *Tectonophysics*, 356: 275-289.
- Correa-Otto, S., Nacif, A., Nacif, S., Furlani, R., Giménez M., Ruiz, F. 2016. Seismological study at the highest oil exploitation region in Argentina. I Simposio de Tectónica Sudamericano.
- Correa-Otto, S., Nacif, S., Pesce, A., Nacif, A., Gianni, G., Furlani, R., Giménez, M., Francisco, R. 2018. Intraplate seismicity recorded by a local network in the Neuquén Basin, Argentina. *Journal of South American Earth Sciences*, 87: 211-220.
- De Ferraris, C. 1947. Edad del arco o dorsal Antigua del Neuquén Oriental de acuerdo con la estratigrafía de la zona inmediata: *Revista de la Sociedad Geológica Argentina*, 2 (3): 256-283.
- embargo, a pesar de la falta de precisión, la ocurrencia de estos eventos señala el claro aumento de la sismicidad en la región, que además posee un comportamiento temporal interesante. Por un lado, la nube de sismos se va moviendo en el tiempo y por otro lado varios de los eventos más grandes fueron precedidos por eventos más pequeños, lo que sugiere que es posible producir alertas y si hubiere una relación directa con el fracturamiento hidráulico, atenuar las actividades.
- Creemos que en la cuenca neuquina la inyección de fluido asociada a la explotación de yacimientos de reservorios no convencionales, dentro de un área ya sometida a esfuerzos tectónicos, sería la causa más probable del notorio aumento de la sismicidad y sugerimos estudios detallados en la región a fin de poder evitar más eventos importantes y un riesgo elevado en las poblaciones y en los pozos de la zona.
- Ellsworth, W.L. 2013. Injection-induced earthquakes: *Science*, 341 (6142) 1225942: 142-143. Doi: 10.1126/science.1225942.
- Keranen, K.M., Weingarten, M., Abers, G.A., Bekins, B.A. y Ge, S. 2014. Sharp increase in central Oklahoma seismicity since 2008 induced by massive wastewater injection. *Science*, 345 (6195): 448-451. <http://dx.doi.org/10.1126/science.1255802>.
- Goebel, T. H. W., Hauksson, E., Aminzadeh, F. y Ampuero, J.P. 2015. An objective method for the assessment of fluid injection-induced seismicity and application to tectonically active regions in central California. *Journal Geophysical Research: Solid Earth*, 120: 7013-7032. Doi:10.1002/2015JB011895.
- Hummel N. y Shapiro, S.A. 2013. Nonlinear diffusion-based interpretation of induced microseismicity: A Barnett Shale hydraulic fracturing case study. *Geophysics*, 78 (5): B211-B226.
- Langenbruch, C. y Zoback, M.D. 2016. How will induced seismicity in Oklahoma respond to decreased saltwater injection rates? *Science*

- Advances*, 2(11): 1-10. Doi: 10.1126/sciadv.1601542.
- Legarreta, L. y Gulisano, C.A. 1989. Análisis estratigráfico secuencial de la cuenca Neuquina (Triásico superior-Terciario inferior). *In* Cuenas Sedimentarias Argentinas. (eds.) Chebli, G. y Spalletti, L.). Universidad Nacional de Tucumán, Facultad de Ciencias Naturales, *Correlación Geológica Serie*, 6: 221-243. Tucumán.
- Legarreta, L. y Uliana, M.A. 1999. El Jurásico y Cretácico de la Cordillera Principal y la cuenca Neuquina. 1. Facies sedimentarias. *In* Geología Argentina (ed. Caminos, R.). Servicio Geológico y Minero Argentino, Instituto de Geología y Recursos Minerales, *Anales* 29 (16): 399-416. Buenos Aires.
- Lienert, B.R., Berg, E. y Frazer, L.N. 1986. Hypocenter: an earthquake location method using centered, scaled, and adaptively damped least squares. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 76 (3): 771-783.
- Mosquera A y Ramos V.A 2006. Intraplate deformation in the Neuquén Embayment. *Geological Society of America Special Paper*, 407: 97-123.
- Pángaro F., Pereira M., Micucci E. 2009. El *sinrift* de la dorsal de Huincul, Cuenca Neuquina: evolución y control sobre la estratigrafía y estructura del área. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 65: 265-277.
- Ottmøller, L., Voss, P.H, y Havskov, J. 2020. SEISAN: Earthquake Analysis Software for Windows, Solaris, Linux and MacOSx. Available from <ftp.geo.uib.no/pub/seismo/SOFTWARE/SEISAN/seisan.pdf>. Consultado el 24/11/2020.
- Pángaro, F., Martínez, R., Sattler, F. y Bettini, F. H. 2011. El flanco oriental. *Relatorio del XVIII Congreso Geológico Argentino*. Neuquén. 407-418.
- Pángaro F., Pereira, M., Silvestro, J.L., Raggio, F., Pioli, O., Zubiri, O. y Gozávez, G. 2006. Tectonic Inversion of the Huincul High, Neuquén Basin, Argentina: An Endangered Species. Stratigraphic Evidences of It's Disappearance. 9º Simposio Bolivariano. Petroleum Exploration in the Subandean Basins, Cartagena.
- Ramos, V.A., Naipauer, M., Leanza, H.A. y Sigismondi, M.E. 2019. The Vaca Muerta Formation of the Neuquén Basin: An Exceptional Setting along the Andean Continental Margin. (eds.) Minisini, D., Fantin, M., Lanusse, I. y Leanza, H. *in* Integrated geology of unconventional: The case of the Vaca Muerta play, Argentina: AAPG Memoir 120.
- Ramos, V.A. 2004. La plataforma Patagónica y sus relaciones con la plataforma Brasileira (chapter 22), (eds.) Mantesso-Neto, V., Bartorelli, A., Ré Carneiro, C.D. y Brito Neves, B.B. *in* Geologia do continente Sul-Americano, 371-381. Sao Paulo, Beca Produções Culturais Ltda
- Sigismondi, M. 2012. Estudio de la deformación litosférica de la cuenca Neuquina: estructura termal, datos de gravedad y sísmica de reflexión. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires, Tesis doctoral, 367 páginas.
- Silvestro, J. y Zubiri, M. 2008. Convergencia oblicua: modelo estructural alternativo para la dorsal neuquina (39°S)-Neuquén. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 63: 49-64.
- Urien, C.M y Zambrano, J.J. 1994. Sistemas petroleros en la cuenca de Neuquén, Argentina. *Memorias de la Asociación Estadounidense del Geólogo Petrolero*, 513-513.
- Urien, C.M. 2001. Petróleo presente y futuro en provincias del sur de América del Sur. *Memoria de AAPG* 74, cap. 19.
- USGS Catalog <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>
- Walsh, F. R. y Zoback, M.D. 2015. Oklahoma's recent earthquakes and saltwater disposal. *Science Advances*, 1(5): 1-10. e1500195.