

## Reporte de Secuencia Sísmica Abril 2017

Sergio Barrientos y el equipo CSN

Mayo, 2017

Una secuencia de sismos, percibidos por la población y localizados costa afuera de la Región de Valparaíso, comenzó a desarrollarse el 22 de abril de 2017. El primer sismo, de magnitud 4.8, ocurrió a las 19:59 horas, desde entonces y hasta el 1 de mayo, el CSN registró y localizó más de 650 sismos asociados a esta secuencia, con magnitud  $> 2.5$ , entre los que se destaca el de mayor magnitud,  $M=6.9$ , el día 24 de abril a las 18:38 hora local. Otros sismos relevantes en la secuencia ocurrieron el 22 de abril a las 23:36 ( $M=5.9$ ), el día 23 de abril a las 16:40 ( $M=5.5$ ), el 24 de abril a las 22:43 ( $M=5.2$ ) y dos cercanos a magnitud 6 ocurridos tres días después, el 28 de abril, a las 12:30 y 13:05 respectivamente. Incluyendo éstos, la secuencia ha mostrado ocho sismos de magnitud mayor o igual a 5 (Anexo I). En cuanto a aceleraciones, el mayor sismo de la secuencia produjo una aceleración máxima de 39%g en la estación ubicada en Valparaíso.

Gran parte de la sismicidad asociada a esta secuencia se ubica hacia el oeste de la costa entre Valparaíso y Algarrobo (Fig. 1).

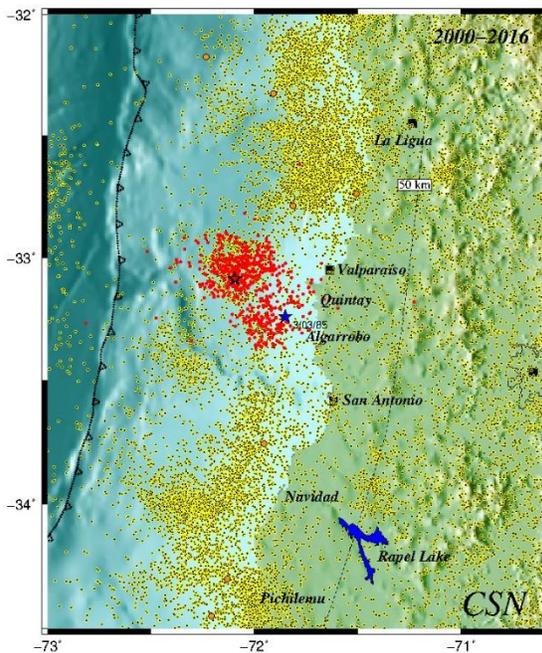


Fig. 1. Localización epicentral de la actividad sísmica entre los años 2000 y 2016 en la zona central. Aquella relacionada con la secuencia sísmica iniciada el 22 de abril de 2017 se destaca como círculos de color rojo mientras que el sismo principal  $M=6.9$  se grafica con una estrella roja. El epicentro del sismo de marzo de 1985 se destaca como una estrella azul.

Con anterioridad al sismo M6.9 ocurren más de 130 sismos precursores localizados y publicados por el CSN, tal como se evidencia en la Fig. 2. El número de sismos por unidad de tiempo, en este caso por hora, muestra que la secuencia se comporta como escenarios que se han observado en otros terremotos en el pasado. En particular, una secuencia similar a ésta ocurrió en junio de 2003 asociada a un sismo de magnitud 5.5.

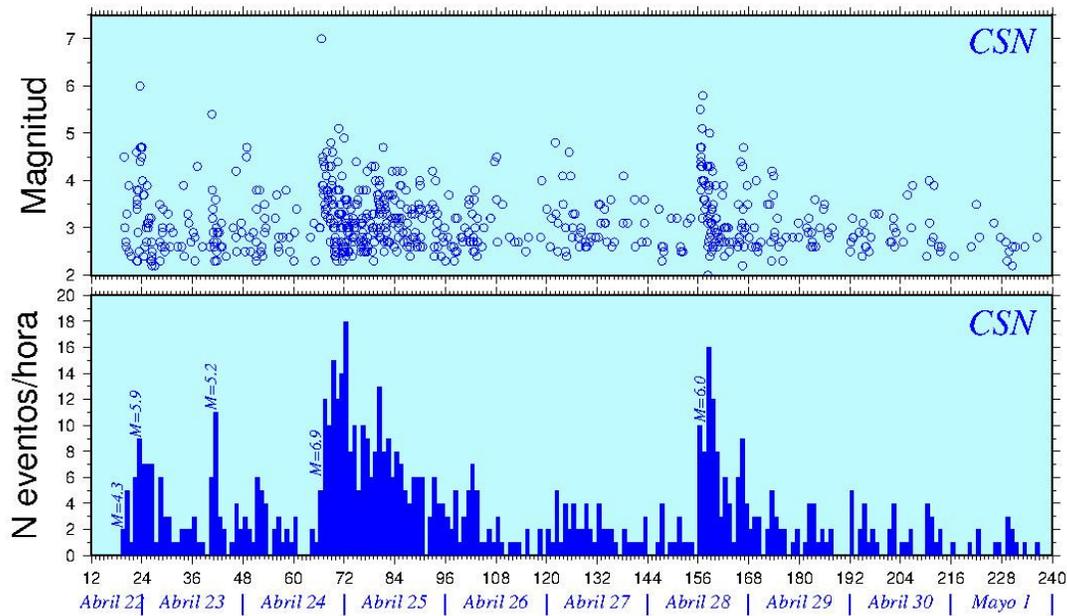


Fig. 2. Número de sismos por hora, en la región frente a Valparaíso, a partir del mediodía del 22 de abril de 2017, y hasta 21:00 horas del 1 de mayo. Corresponden a los sismos registrados y localizados por el CSN ( $M \geq 2.5$ ). El panel superior muestra la distribución de ellos en función de su magnitud.

Después del máximo observado en la figura, correspondiente al período en que ocurrió el sismo M6.9, la sismicidad comienza a decaer en función del tiempo, tal como lo han mostrado secuencias sísmicas anteriores ocurridas en el país. Sin embargo, la actividad sísmica aumenta significativamente a mediodía del 28 de abril asociada a dos sismos, uno magnitud 5.8 y otro 6.0, separados por 35 minutos. Desde ese momento, la sismicidad ha mostrado una tendencia de descenso en su actividad.

La distribución de magnitudes de una secuencia sísmica se puede caracterizar mediante la Ley de Gutenberg y Richter (G-R), que relaciona los sismos de diferentes tamaños mediante la ecuación  $\log N = a - bM$ . El valor de  $a$  representa el nivel de productividad sísmica y  $b$  ha sido asociado al nivel de esfuerzos en la región, cuyo valor puede alcanzar a 2 en el caso de enjambres sísmicos. El catálogo global de la sismicidad en la Región indica un valor de  $b$  de 1.

Al considerar el número de sismos de una cierta magnitud o superior en función de la magnitud se obtiene lo que se muestra en la Fig. 3.

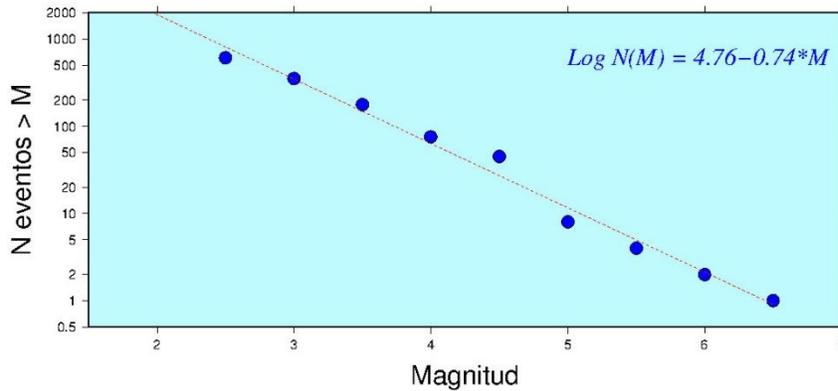


Fig. 3. Relación de Gutenberg y Richter para la secuencia de abril de 2017. Muestra la distribución del número de sismos con magnitud igual o superior a M.

En el caso de esta secuencia de abril de 2017, el valor de  $b$  de la relación G-R alcanza 0.74, lo que es bastante diferente de lo que se espera a un “enjambre sísmico”.

### Evolución de la sismicidad

Esta secuencia sísmica hasta el momento se puede dividir en cuatro etapas a) la primera corresponde al intervalo entre el 22 de abril a las 19:46 y 23:36, momento en que inicia la secuencia ( $M=4.8$ ) y culmina con un sismo  $M=5.9$ , b) al día siguiente, 23 de abril a las 16:40 ocurre un sismo  $M=5.5$  cuyo epicentro se localiza un poco más al sur del anterior, c) el mayor sismo de la secuencia ( $M=6.9$ ) activa la zona de contacto hacia el sur, y d) dos sismos de magnitud 5.8 y 6.0 que ocurren el 28 de abril un poco después de mediodía. La evolución espacio-temporal de la sismicidad se puede apreciar en la Fig. 4.

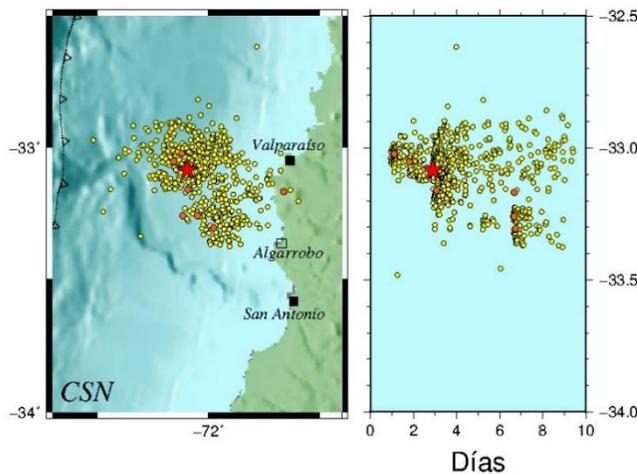


Fig. 4 Localización de la sismicidad asociada a la secuencia de abril de 2017. La estrella de color rojo indica el sismo  $M6.9$ . En el panel izquierdo se puede observar la migración de la sismicidad hacia el sur, al igual que la sismicidad de magnitud  $\geq 5.0$  (círculos de color naranja), revelando la activación de diferentes secciones de la falla, que se interpreta como el contacto entre las placas de Nazca y Sudamericana.

Un sismo magnitud 7 tiene un momento sísmico del orden de  $3.5 \times 10^{19}$  Nm, lo que significa que, de acuerdo a leyes de escala, tendría una longitud de ruptura ( $L$ ) del orden de 50 km por unos 14 km de ancho (Ward, 2010), con un desplazamiento de aproximadamente 1 m. Sin embargo, la

extensión del área de réplicas indica que la longitud de ruptura de este sismo es menor, lo que implicaría un desplazamiento en la falla un tanto mayor. Manteniendo el ancho constante, si  $L$  es 25 km, el desplazamiento en la falla sería de 2 m.

## Caracterización de la zona de ruptura a partir de observaciones GNSS

Datos de deformación observados en dos estaciones GNSS -que poseen la capacidad RTX (entregan posición den tiempo real cada segundo)- ubicadas en la costa, en Valparaíso y Quintay, muestran desplazamientos horizontales del orden de 30 a 40 mm, tal como lo muestra la Fig. 5. Suponiendo que el origen de esta deformación se ubica a lo largo del contacto entre las placas de Nazca y Sudamericana, se puede invertir para la ubicación espacial de la fuente de la deformación (Fig. 5). El momento sísmico determinado geodésicamente para este sismo es  $2.5 \times 10^{19}$  Nm, consistente con lo estimado con ondas sísmicas.

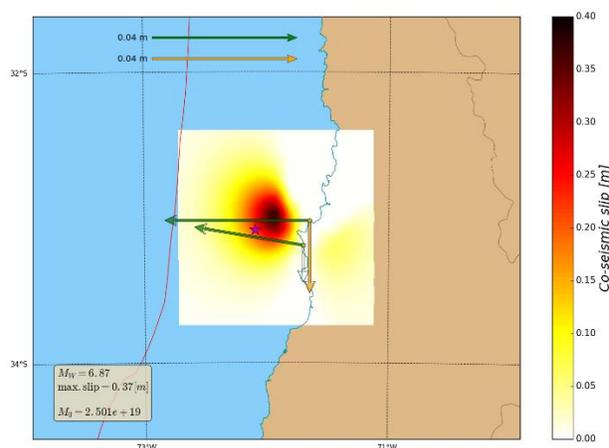


Fig. 5. Ubicación geográfica de la zona de mayor desplazamiento en la falla asociado al sismo M6.9 del 24 de abril (F. del Campo, CSN). Suponiendo que la superficie de falla corresponde al contacto entre las placas de Nazca y Sudamericana dado por Tassara y Echaurren (2012)

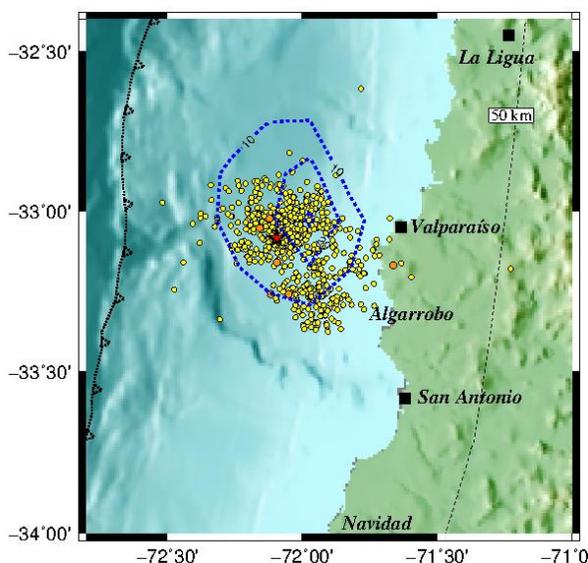


Fig. 6. Ubicación geográfica de la zona de mayor desplazamiento en la falla asociado al sismo M6 en relación a la ubicación de las réplicas.

Otros métodos para determinar la ubicación y distribución del desplazamiento en la falla se basan en la modelación de ondas internas registradas en estaciones ubicadas a distancias tele-sísmicas (30° a 90° de distancia). Dependiendo de la ubicación y geometría de falla, las ondas P y ondas S se registran de un modo característico y el resultado que produce el mejor ajuste de estas ondas se presenta en las Figs. 7 y 8 (P. Koch, CSN).

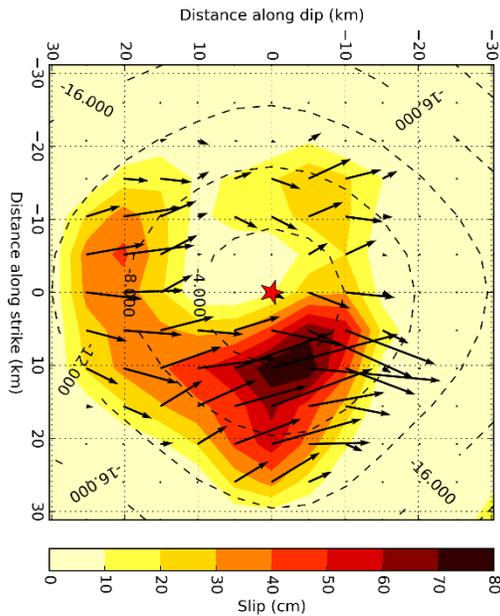


Fig. 7. Inversión de la función de desplazamiento en la zona de ruptura a partir de las señales tele-sísmicas generadas por el sismo M6.9.

El mayor desplazamiento se concentra hacia el este del epicentro (Fig. 7), es decir, hacia mayores profundidades a lo largo de la zona de contacto entre placas. Este resultado es totalmente consistente con lo derivado a partir de las señales geodésicas.

La tasa de liberación de momento en la fuente, es decir, cuál es la duración del sismo en la zona de ruptura, y su complejidad se puede apreciar en la Fig. 8. El sismo M6.9 tiene menos de 15 s de duración en la fuente y el momento total alcanza a  $2.2 \times 10^{19}$  Nm, este último valor es también consistente con el resultado derivado a partir de las deformaciones estáticas.

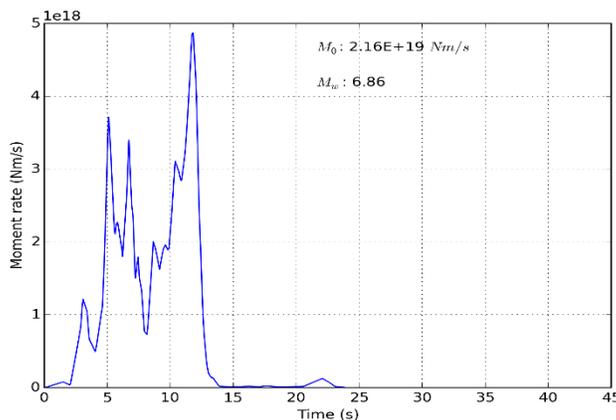


Fig. 8. Función de tiempo en la fuente. Representa la tasa de liberación del momento sísmico en la zona de ruptura.

## Contexto de grandes terremotos en la zona

A pesar de haber sido cuestionada por Kagan y Jackson (1991) y Rong *et al.* (2003), la hipótesis de "brechas sísmicas" propuesta por McCaan *et al.* (1979) se utiliza como concepto de orden cero para describir la evolución del ciclo sísmico de grandes terremotos en diferentes zonas de subducción, del cual Chile forma parte. Esta última propuesta incluso fue actualizada por Nishenko *et al.* (1985) indicando zonas posibles de ocurrencia para Chile en sus zonas central y norte, donde ocurrieron los sismos de 1985 y 2014 respectivamente. De acuerdo a la visión propuesta inicialmente por McCaan *et al.* (1979) -para una zona, en particular a lo largo de una zona de subducción- mientras mayor intervalo transcurrido desde el último terremoto de gran magnitud, es más probable que ocurra otro de similares características. El conocimiento sismológico ha avanzado en estas últimas décadas y se reconoce el concepto de ruptura variable, es decir, una misma zona puede presentar tanto longitudes y anchos de ruptura como desplazamientos en la falla que difieren entre ciclos. Un ejemplo claro se presenta en la zona central de Chile; grandes terremotos que han afectado en esta región han ocurrido en 1647, 1730, 1822, 1906 y 1985. De esta secuencia, el que se destaca por su magnitud es aquel ocurrido en 1730 ya que su magnitud se estima cercana a 9 y fue el único de esta secuencia que produjo un tsunami que causa daños en Valparaíso y observado en Japón.

Las áreas de ruptura de los terremotos recientes de 2010 (Maule) y 2015 (Illapel) dejan una brecha que no ha sido activada entre Los Vilos y Pichilemu. Los terremotos más recientes que han ocurrido en esta zona son aquellos de 1971 y 1985, de modo que se encuentra en preparación el próximo terremoto significativo en esta región. Los lapsos transcurridos entre grandes terremotos de 83, 92, 84 y 79 años, entregan un promedio de un poco más de 80 años. Sin embargo, como la muestra posee apenas cuatro elementos, no se puede considerar como representativa ya que no se conoce el detalle de cada ruptura. En 80 años se acumulan alrededor de 5 m de desplazamiento equivalente, a razón de 6,5 cm/año.

El escenario futuro más probable dentro de los próximos días es la continuación de la sismicidad de menor magnitud asociada a este evento de magnitud 6.9, disminuyendo en el tiempo próximo, aunque dada la historia sísmica no se puede descartar la ocurrencia de sismos de mayor magnitud en la región.

## Referencias

- Kagan y Jackson (1991). Long-term earthquake clustering, *Geophys. J. Int.*, **104**, 117-134.
- Rong, Y., D. Jackson and Y. Kagan (2003), Seismic gaps and earthquakes, *J. Geophys. Res.*, **108**, B10, 2471, doi:10.1029/2002JB002334.
- McCann, W.R., S.P. Nishenko, L.R. Sykes, J. Krause, (1979). Seismic gaps and plate tectonics: seismic potential for major boundaries, *Pure Appl. Geophys.*, **117**, 1082-1147.
- Nishenko, S.P. (1985), Seismic potential for large and great interplate earthquakes along the Chilean and southern Peruvian margins of South America: a quantitative reappraisal, *J. Geophys. Res.*, **90**, 3589-3615.
- Tassara, A. y A. Echaurren (2012). Anatomy of the Andean subduction zone: three-dimensional density model upgraded and compared against global-scale models, *Geophys. J. Int.*, **189**, 161-168.
- Ward, S.N., Tsunami (2010). Encyclopedia of Solid Earth Geophysics, Springer Press.

## Anexo I

### Sismos de la secuencia de abril con $M \geq 5.0$ (Hora U.T.C.)

Día	Hora	Min	Latitud	Longitud	Prof.	Magnitud
23	2	36	33.023	72.120	23.9	5.9
23	19	40	33.053	72.156	17.3	5.5
24	21	38	33.085	72.094	24.8	6.9
25	1	43	33.161	72.093	23.9	5.2
28	15	30	33.259	72.115	23.0	5.5
28	15	58	33.259	72.049	23.2	5.1
28	16	5	33.169	71.661	25.5	6.0
28	17	41	33.305	71.977	21.8	5.2