

# Reporte de Secuencia Sísmica Abril 2017

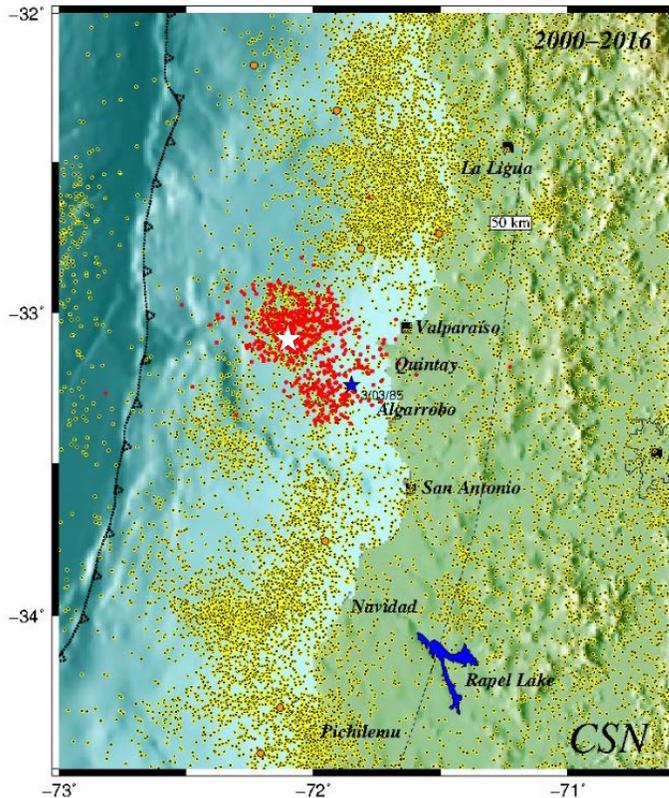
(Versión 10 de mayo 2017)

Sergio Barrientos y el equipo CSN

Mayo, 2017

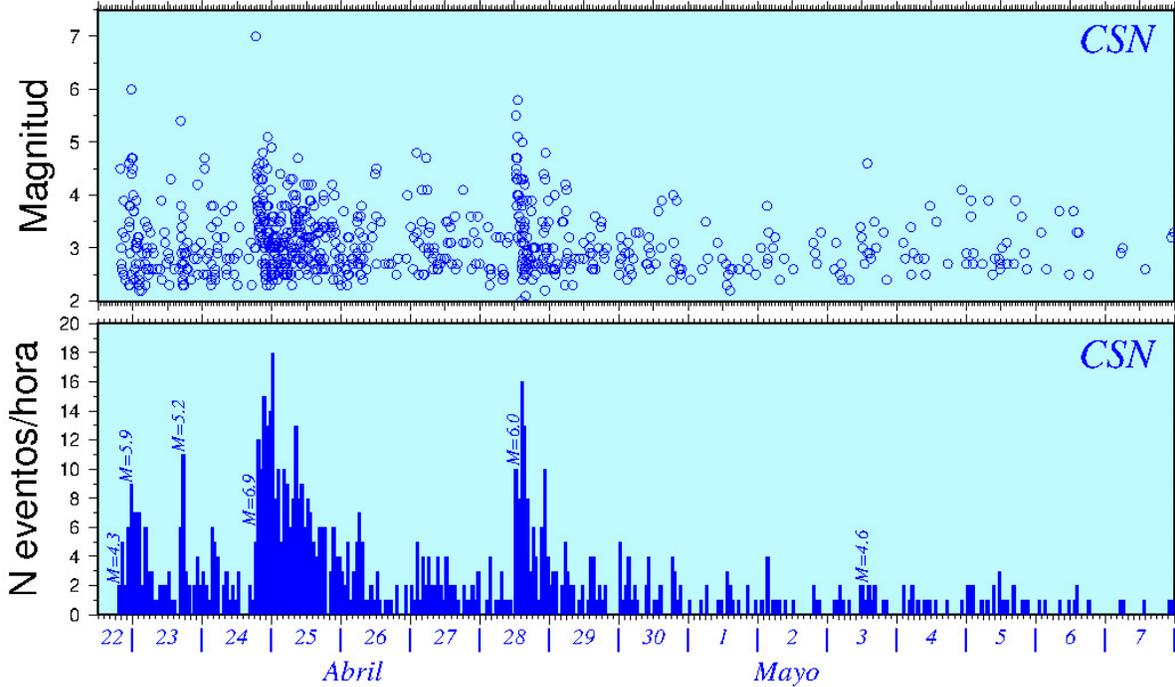
Una secuencia de sismos, percibidos por la población y localizados costa afuera de la Región de Valparaíso, comenzó a desarrollarse el 22 de abril de 2017. El primer sismo, de magnitud 4.8, ocurrió a las 19:59 horas, desde entonces y hasta el 1 de mayo, el CSN registró y localizó más de 650 sismos ( $M \geq 2.5$ ) asociados a esta secuencia entre los que se destaca el mayor, M6.9, 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 (M5.9), el día 23 de abril a las 16:40 (M5.5), el 24 de abril a las 22:43 (M5.2) 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).

La sismicidad asociada a esta secuencia se ubica hacia el oeste de la costa entre Valparaíso y Algarrobo (Fig. 1). El epicentro del sismo principal de esta secuencia se muestra con una estrella de color blanco.



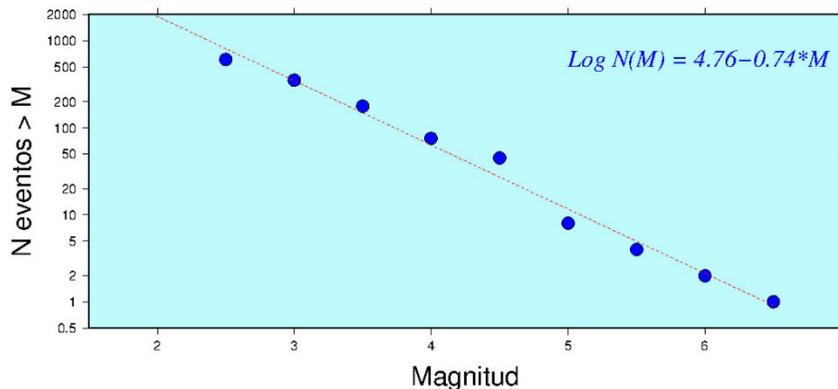
**Fig. 1.** Localización epicentral de la actividad sísmica entre los años 2000 y 2016 en la zona central. Aquella relacionada con la secuencia sísmica iniciada el 22 de abril de 2017 se destaca como puntos de color rojo mientras que el sismo principal M6.9 se grafica con una estrella blanca. El epicentro 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 precursora se comporta como escenarios que se han observado en el pasado en esta región como en otros lugares de Chile, por ejemplo frente a costas de Iquique, agosto 2016, o frente a las costas de Navidad en noviembre de 2012.



**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 medianoche del 7 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.



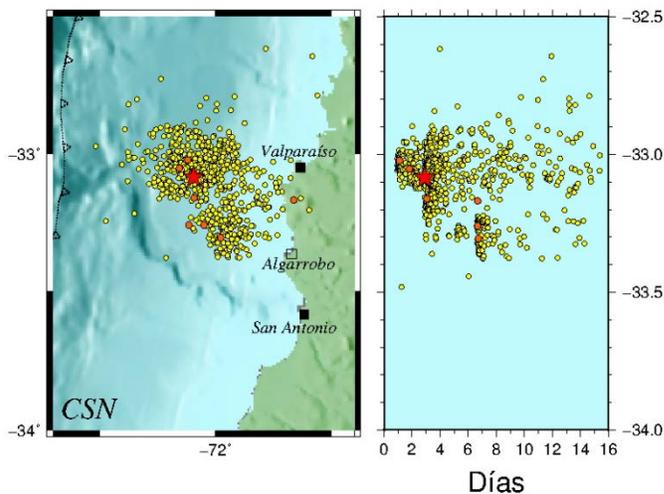
**Fig. 3.** Relación de Gutenberg y Richter para la secuencia de abril de 2017. Muestra la distribución del número de sismos con magnitud igual o superior a M.

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  $\text{Log } N = a - bM$ . El valor de  $a$  representa el nivel de productividad sísmica y  $b$  ha sido asociado al nivel de esfuerzos en la región, que generalmente alcanza valores entre 0.5 y 2.5. 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. En el caso de esta secuencia de abril de 2017, el valor de  $b$  de la relación G-R alcanza 0.74. Hasta el momento de preparación de este reporte, el sismo de magnitud 6.9 se puede considerar como el principal con su actividad precursora y secuencia de réplicas.

## 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.

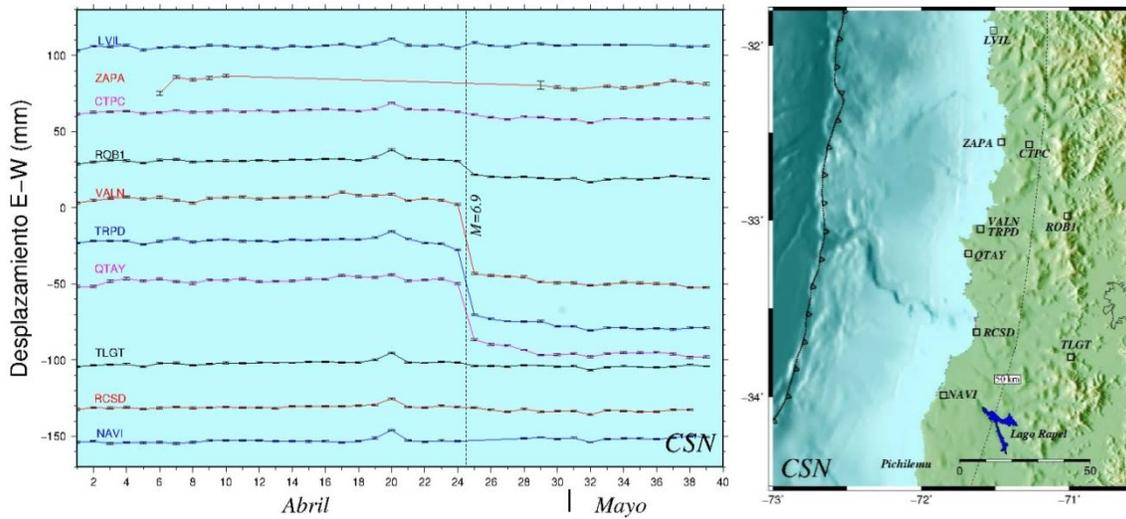


**Fig. 4** Localización de la sismicidad asociada a la secuencia de abril de 2017. La estrella de color rojo indica el sismo  $M6.9$ . En el panel izquierdo se puede observar la migración de la sismicidad hacia el sur, al igual que la sismicidad de magnitud  $\geq 5.0$  (círculos de color naranja), revelando 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.

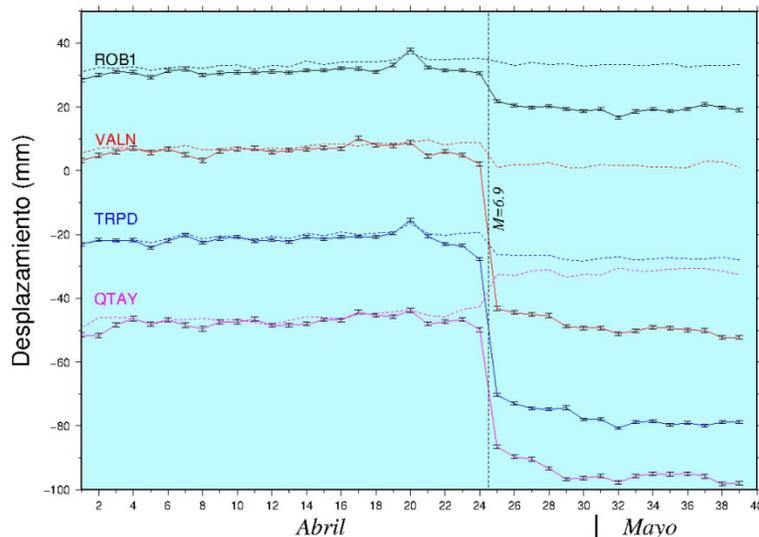
## Caracterización de la zona de ruptura a partir de observaciones GNSS

Datos de deformación observados en varias estaciones GNSS que posee el CSN a lo largo de la costa y el interior, permiten establecer como se ha desplazado parte del territorio durante este episodio sísmico. La Fig. 5 muestra el desplazamiento hacia el oeste, más pronunciado en las estaciones Valparaíso (VALN, TRPD) y Quintay (QTAY) y en menor medida en el Cerro El Roble (ROB1) y Talagante (TLGT). También se podría argumentar un ligero desplazamiento hacia el oeste en la estación de Catapilco (CTPC).



**Fig. 5.** Desplazamiento diarios en la componente este-oeste de las estaciones GNSS en la zona central de Chile durante el mes de abril y los primeros días de mayo de 2017. El día 31 corresponde al 1 de mayo. En esta figura, el instante del sismo  $M=6.9$  del 24 de abril, se encuentra demarcado por la línea segmentada vertical.

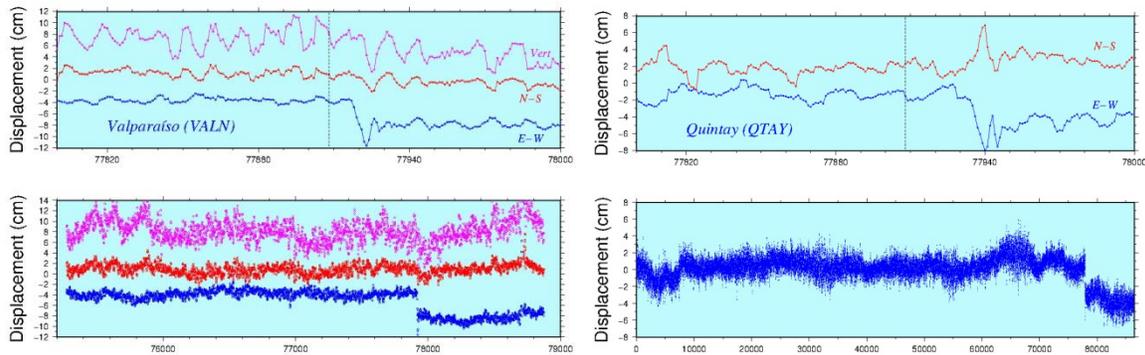
El procesamiento de las señales GNSS para efectuar determinaciones diarias de la posición ha sido realizado por J.C. Báez (CSN) utilizando órbitas satelitales estimadas de manera rápida. Para ello, se requiere procesar los datos cada 24 horas.



**Fig. 6.** Amplificación de las señales diarias mostradas en la figura anterior en las estaciones más cercanas al epicentro, y en líneas segmentadas, el desplazamiento en la componente norte-sur. Se pueden observar los desplazamientos pre-, co-, y post-sísmicos en ambas componentes. Al igual que en la figura anterior, 1 de mayo corresponde al día 31. El último día de registro corresponde al 9 de mayo.

En las estaciones de VALN y TRPD mostradas en la Fig. 5 se puede observar un desplazamiento precursor y un post-ajuste principalmente en la estación QTAY. Una amplificación de estas señales se puede observar en la Fig. 6.

Vale la pena destacar que dos de estas estaciones GNSS -Valparaíso y Quintay- poseen la capacidad RTX (entregan posición en tiempo real cada segundo), las que muestran desplazamientos horizontales en la componente este-oeste del orden de 30 a 40 mm (Fig. 7).

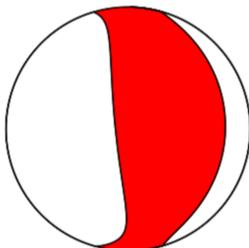


**Fig. 7.** Estimaciones de desplazamiento en la costa observado con el sistema RTX que entrega posiciones estimadas cada segundo en tiempo real. El panel izquierdo muestra las estimaciones en las 3 componentes (vertical, N-S y E-W, desde arriba hacia abajo) y las dos componentes horizontales (N-S y E-W) para la estación ubicada en Quintay en el panel derecho. En ambos casos, el panel superior muestra un acercamiento al momento del sismo (línea vertical negra segmentada).

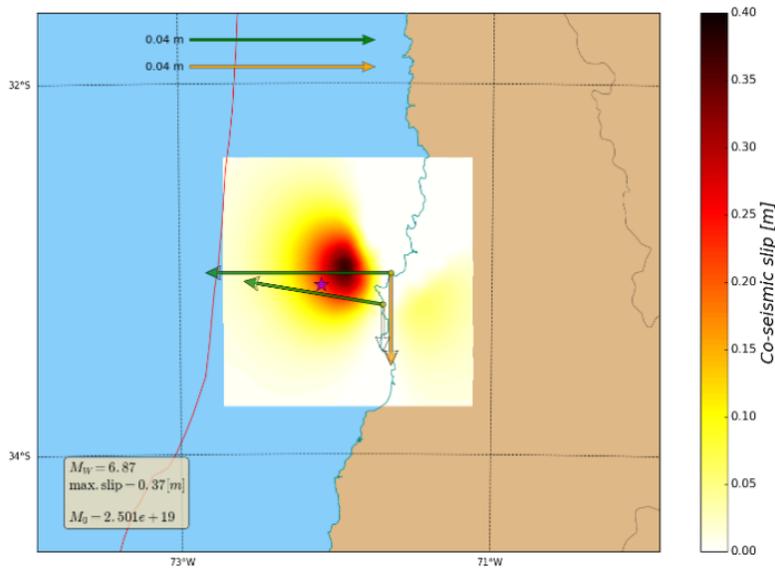
De acuerdo a los registros de la fase W en diferentes estaciones sismológicas regionales se puede estimar de manera rápida y confiable, tanto la magnitud del evento como su geometría de la falla (Fig. 8). Esta geometría o mecanismo de foco -junto con la distribución hipocentral de la secuencia- sugiere que el origen de esta deformación se ubica a lo largo del contacto entre las placas de Nazca y Sudamericana, por lo tanto, los datos de deformación observados en la costa se pueden invertir para ubicar espacialmente la fuente de la deformación (Figs. 9 y 10). El momento sísmico determinado geodésicamente para este sismo es  $2.5 \times 10^{19}$  Nm, consistente con lo estimado con ondas sísmicas.

Tabla I

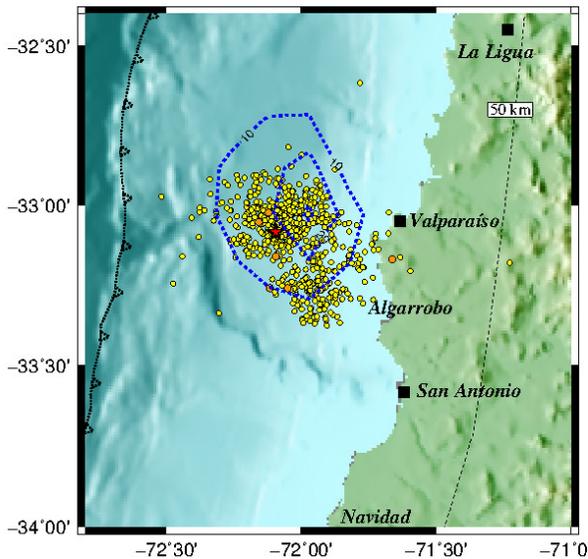
	Rumbo	Manteo	Ángulo de deslizamiento
Plano 1	5.9	12.5	101.6
Plano 2	174.0	77.7	87.4



**Fig. 8.** Representación del mecanismo focal de la fuente sísmica utilizando una proyección estereográfica. Los planos principal y auxiliar mostrados en la Tabla I representan las “fallas equivalentes” que ajustan de la mejor manera la fase W registrada en diferentes estaciones. Esta solución admite componentes no solamente de cizalle, sino que también de cambio volumétrico (implementado en el CSN por S. Riquelme).

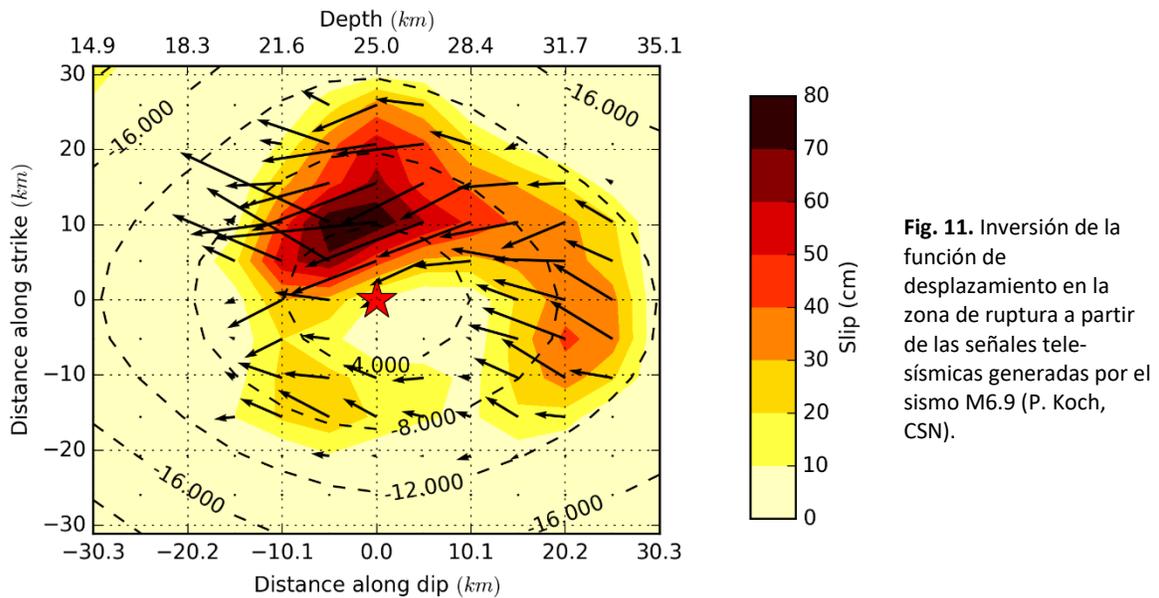


**Fig. 9.** Ubicación geográfica de la zona de mayor desplazamiento en la falla asociado al sismo M6.9 del 24 de abril (F. del Campo, CSN). Suponiendo que la superficie de falla corresponde al contacto entre las placas de Nazca y Sudamericana dado por Tassara y Echaurren (2012).



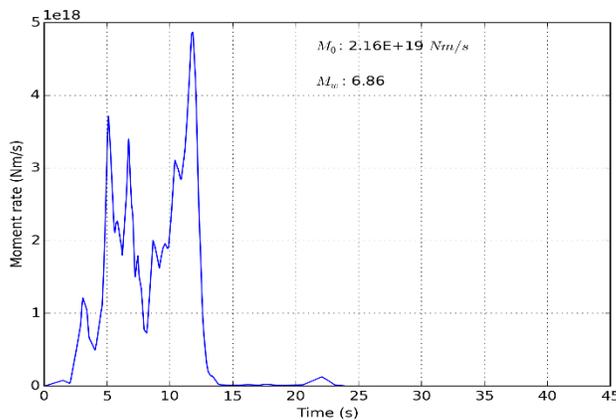
**Fig. 10.** Ubicación geográfica de la zona de mayor desplazamiento en la falla asociado al sismo M6 en relación a la ubicación de las réplicas.

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 se selecciona el resultado que produce el mejor ajuste.



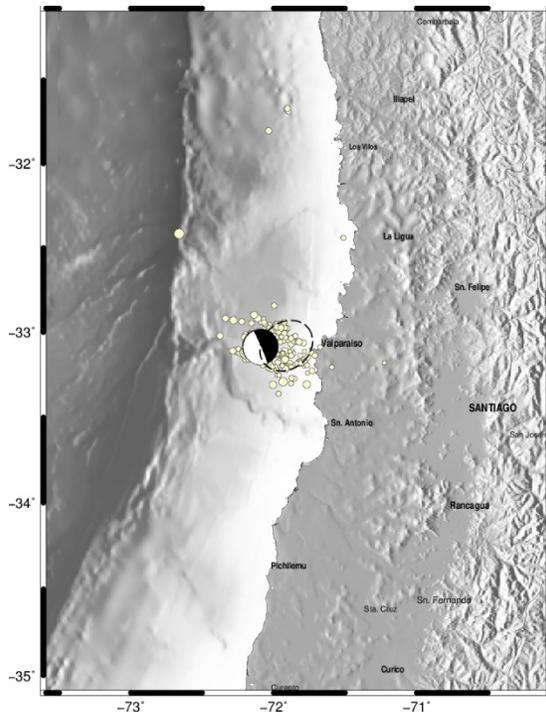
El mayor desplazamiento se concentra alrededor del hipocentro (Fig. 11) y en parte, hacia mayores profundidades a lo largo de la zona de contacto entre placas. Este resultado es consistente con lo derivado a partir de las señales geodésicas.

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. 12. 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. 12.** Función de tiempo en la fuente. Representa la tasa de liberación del momento sísmico en la zona de ruptura.

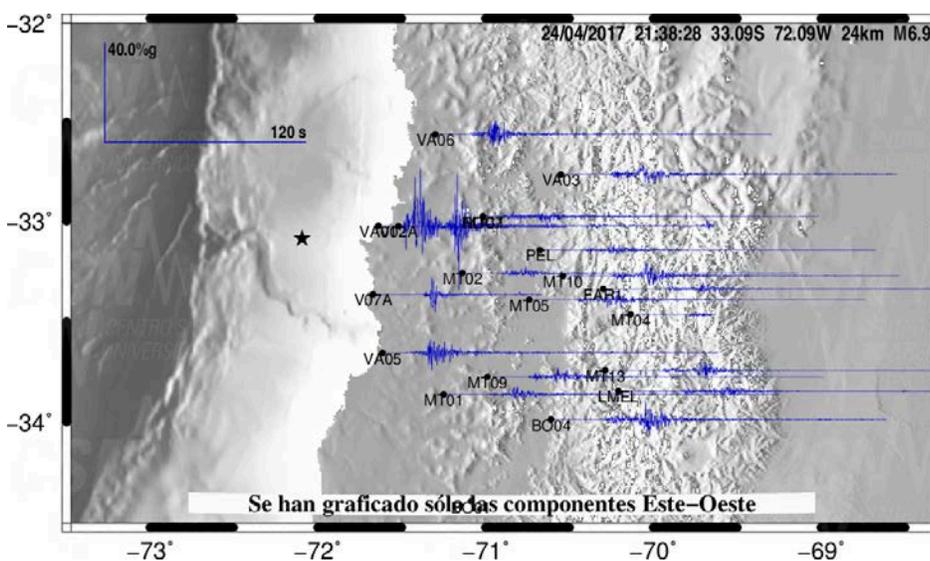
Otro método para estimar localización y tamaño de la fuente se basa en el método de parches elípticos desarrollado en el CSN por F. Leyton (Fig. 13). Este método consiste en una inversión cinemática de las ondas sísmicas registradas en el campo cercano (a distancias menores de 400 km). El modelo presenta un máximo desplazamiento de la falla en el centro de la elipse, el cual decae hacia los bordes. Además, se presenta el mecanismo focal obtenido con el mismo procedimiento.



**Fig. 13.** Este mapa muestra las réplicas del sismo principal tomadas a 24 horas de su ocurrencia. Además, se presenta una solución del plano de falla obtenida mediante el método de parches elípticos. Al igual que métodos anteriores, concentran el deslizamiento en la falla frente a las costas de Valparaíso.

## Aceleraciones

A pesar de tener una magnitud de solamente 6.9, este sismo ha producido aceleraciones del orden de 40%g en la estación de Valparaíso. Estos valores máximos son comparables a aquellos registrados debido a sismos de mayor magnitud. Los datos observados (Fig. 14) se pueden extraer desde el sitio <http://evtdb.csn.uchile.cl/> que contiene los registros de movimientos fuertes.



**Fig. 14.** Aceleraciones registradas en acelerógrafos de la zona central. Un valor horizontal máximo del orden de 40%g se registró en Valparaíso

## 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 sísmológico 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.

En los últimos días se ha observado una disminución de la sismicidad en términos de número de sismos por unidad de tiempo, tal como se muestra en la Fig. 2. El escenario más probable en el futuro próximo es que esta sismicidad asociada al sismo M6.9 continúe decayendo como ha sido hasta ahora. Sin embargo, dada la historia sísmica de la región, no se puede descartar la ocurrencia de sismos de mayor magnitud.

## 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