

LOS TERREMOTOS DE IQUIQUE 2014

S. Ruiz⁽¹⁾, M. Metois⁽²⁾, R. Grandin⁽³⁾, E. Rivera⁽¹⁾, S. Leon⁽¹⁾, S. Cararo⁽¹⁾, A. Fuenzalida⁽⁴⁾, M. Vallee⁽³⁾, F. Leyton⁽⁵⁾,
J. Ruiz⁽¹⁾, C. Vigny⁽⁶⁾, R. Madariaga⁽⁶⁾, J. Campos⁽¹⁾.

⁽¹⁾ Departamento de Geofísica, Universidad de Chile, sruiz@dgf.uchile.cl

⁽²⁾ Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Centro Nazionale Terremoti, Rome, Italy

⁽³⁾ Institut de Physique du Globe de Paris, Sorbonne Paris Cité, Université Paris Diderot, UMR 7154 CNRS, Paris, France.

⁽⁴⁾ School of Environmental Sciences, University of Liverpool, Liverpool, UK.

⁽⁵⁾ Centro Sismológico Nacional, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Santiago, Chile.

⁽⁶⁾ Laboratoire de Géologie, UMR 8538 CNRS Ecole Normale Supérieure, Paris, France

Resumen

En el Norte de Chile, reconocida laguna sísmica, ocurrió el terremoto de Iquique 2014, Mw 8.1. Este terremoto fue seguido, aproximadamente 24 horas después, por un réplica de magnitud Mw 7.6 y una compleja secuencia sísmica. Diferentes enjambres fueron identificados desde el 2008 rodeando el área de la secuencia sísmica del 2014, sugiriendo un deslizamiento asísmico que acelerará en su fase final. Varios precursoros ocurrieron antes del terremoto, posiblemente indicando la presencia de un terremoto lento. La secuencia completa de los terremotos de Iquique ha sido bien registrada por instrumentos sismológicos principalmente de las redes IPOC y el Centro Sismológico de la Universidad de Chile. De esta forma se ha podido realizar una inversión del terremoto de Iquique utilizando datos de campo cercano. Las réplicas relocalizadas se han concentrado alrededor del desplazamiento cosísmico. Esta distribución de réplicas coincide con la transición entre zonas de alto y bajo acoplamiento deducida a partir de inversiones de GPS del periodo intersísmico. Toda la secuencia sísmica de los terremotos de Iquique cubre solo una fracción de la laguna sísmica, existiendo aún zonas altamente acopladas en el norte de Chile donde podrían ocurrir otros terremotos de magnitud Mw > 8.0.

Palabras Clave: Terremoto de Iquique, GPS, Acelerogramas, Réplicas, Norte de Chile.

Abstract

In Northern Chile, the 2014 Mw8.1 Iquique earthquake occurred inside a well identified recognized seismic gap. This earthquake was followed approx. 24 hours later by a large aftershock of magnitude Mw7.6 and a complex seismic sequence. Several swarms were observed since 2008 in the vicinity of the 2014 sequence, suggesting a slow aseismic slip that was occurring accelerating in the final stage. Several fore-shocks have preceded the Mw8.1 Iquique earthquake, possibly indicating the existence of a slow slip event prior to the earthquake. The complete sequence of Iquique earthquakes was well recorded by seismological instruments from IPOC and Seismology Center of the Universidad of Chile networks. We use these data to make an inversion of the coseismic slip of the Iquique earthquake. The re-localized aftershocks are concentrated around the area of significant coseismic slip. These aftershocks also seem to fall within the transition zone between high and low coupling deduced from interseismic GPS inversions. Overall, the seismic activity associated with the 2014 Iquique sequence has filled only a fraction of the Northern Chile seismic gap. Other earthquakes with M>8 may still occur in highly coupled zones of the Chilean subduction which adjoin the site of the 2014 sequence.

Keywords: Iquique earthquake, GPS, accelerogram, after-shock, North Chile.

1 Introducción

El terremoto de Iquique 2014 Mw 8.1 ocurrió en el Norte de Chile, en medio de una reconocida laguna sísmica identificada desde la década de los 70's [1]. El último mega-terremoto de esta región (Mw > 8.5) ocurrió el 9 de Mayo de 1877 [2, 3, 4], luego terremotos de magnitud alrededor de Mw 8.0 han ocurrido en los años 1933, 1967 y 2007 además del reciente terremoto de Iquique [5, 6, 7]. Previo al terremoto de 1877 sólo 3 terremotos, que ocurrieron en los años 1543, 1615 y 1768, podrían ser de magnitud mayor a Mw 7.0. La interpretación del tamaño de estos terremotos queda sujeta a los daños ocasionados en los pocos pueblos fundados a esa fecha [2]. Trabajos de paleo-sismología [8, 9] permiten inferir que en esta zona los mega-terremotos, como el ocurrido el año 1877, presentan periodos de recurrencia de al menos un par de siglos, similar a lo propuesto en la zona Central [10] y en el Sur de Chile [11], Figure 1a.

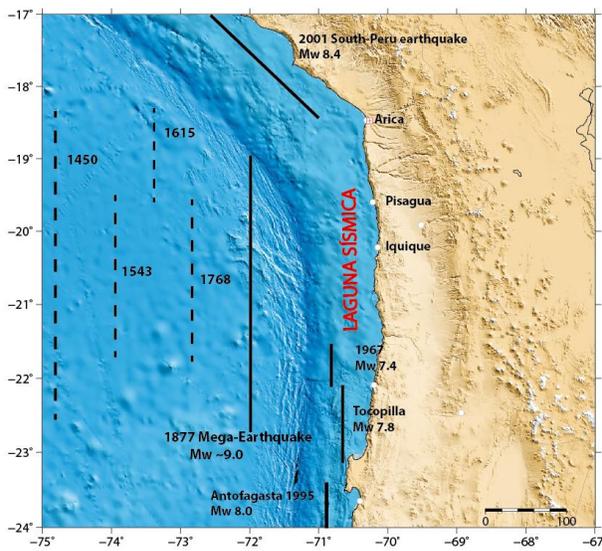
A partir de la década del 90 se instalaron los primeros GPS en la región [12]. Utilizando estos datos se han propuestos diferentes modelos de acoplamiento [13, 14, 15, 16]. En este caso, el acoplamiento mide la fricción entre la placas de Sudamérica y la de Nazca. Cuando el acoplamiento es alto, las dos placas están adheridas y no se mueven entre ellas, cuando este parámetro es débil la placa de Nazca desliza lenta pero continuamente con respecto a Chile. En esta zona el acoplamiento es débil frente a Iquique y es alto hacia el Norte (donde se produjo el sismo del 1 de abril) y hacia el sur a partir de la desembocadura del río Loa. En la Figure 1b se muestra el mapa de acoplamiento de Metois et al. [15], existiendo una zona de bajo acoplamiento alrededor de los -20.5, la cual también ha sido observada por Chlieh et al. [13] y Schurr et al. [16].

El terremoto de Iquique es sin dudas el mejor registrado en Chile y uno de los mejores terremotos de subducción registrados en el mundo, donde gran cantidad de estaciones sismológicas y geodésicas pudieron registrar la secuencia completa de eventos sísmicos y deformación pre-sísmica que desencadenó un terremoto Mw 8.1. Utilizando estos datos nosotros discutimos el proceso de nucleación, la fase cosísmica y el proceso post-sísmico.

2 Base de Datos

El Centro Sismológico Nacional (CNS) de la Universidad de Chile; la red IPOC (Integrated Plate boundary Observatory Chile) formado por un consorcio de Universidades (GFZ, Alemania; ENS y IPGP Francia, Católica de Norte y Universidad de Chile, Chile); entre otras instituciones hicieron posible que el terremoto de Iquique 2014 fuera bien registrado por sismógrafos, acelerógrafos, GPS e inclinómetros registrando en tiempo continuo, Figura 2a. Estas redes sismológicas han permitido monitorear todo el proceso sísmico de un terremoto Mw 8.1, que en este caso fue precedido muy probablemente por un terremoto lento y un enorme número de eventos multiplets -sismos de similares características que ocurren a muy poca distancia - [7, 17]. El terremoto mismo fue registrado por un número importante de acelerogramas y GPS registrando en tiempo continuo (cGPS), Figura 3a.

a)



b)

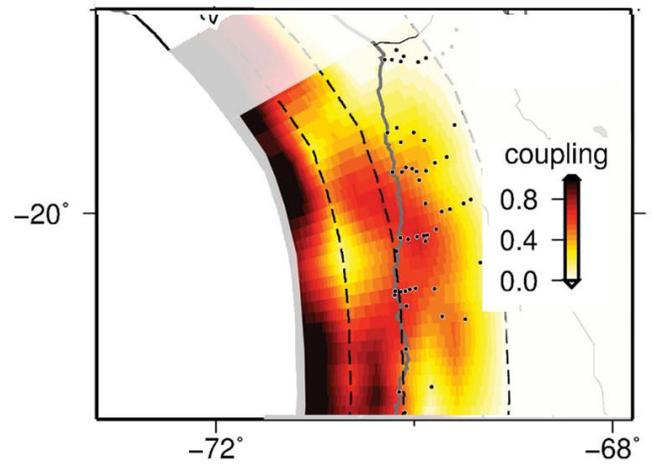


Figura. 1 a) Largos estimados de ruptura de terremotos históricos inferida a partir de Montessus de Ballore, 1912-1916; el terremoto de 1450 es inferido a partir de los datos de paleosismología de Vargas et al. 2005 y Vargas et al. 2014. **b)** Mapa de acoplamiento (modificada de Metois et al. [15]).

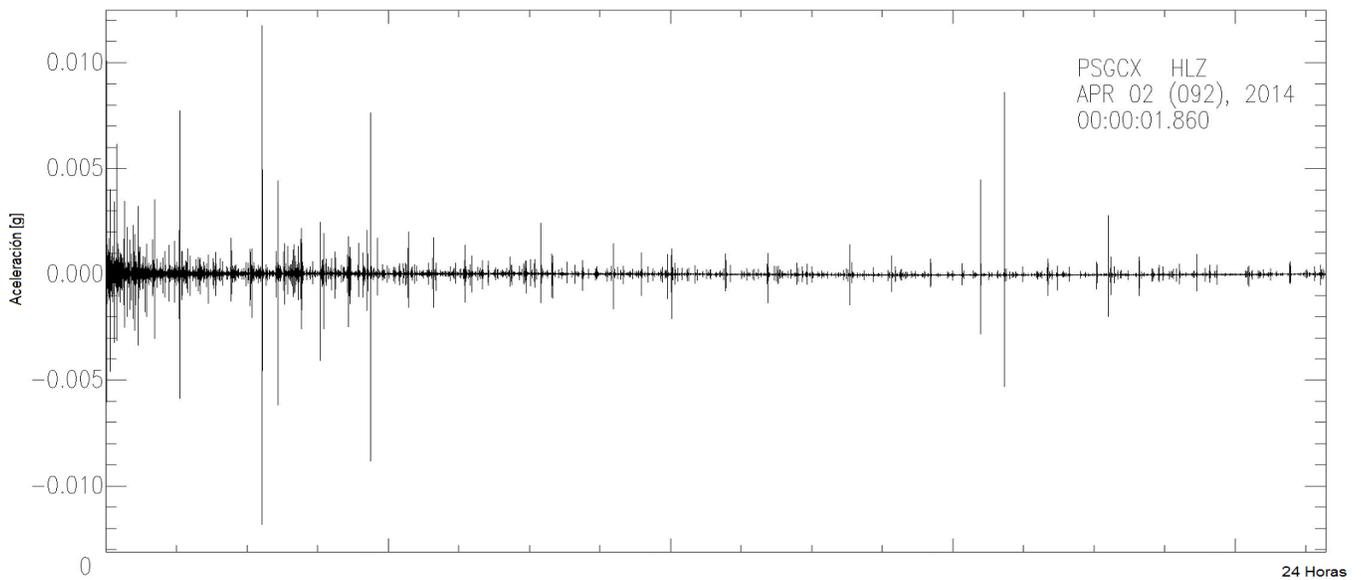


Figura 2. Acelerograma PSGCX, ubicado cerca de la ciudad de Pisagua. Registro vertical de aceleraciones del día 2 de Abril, cada barra vertical corresponde a un evento sísmico.

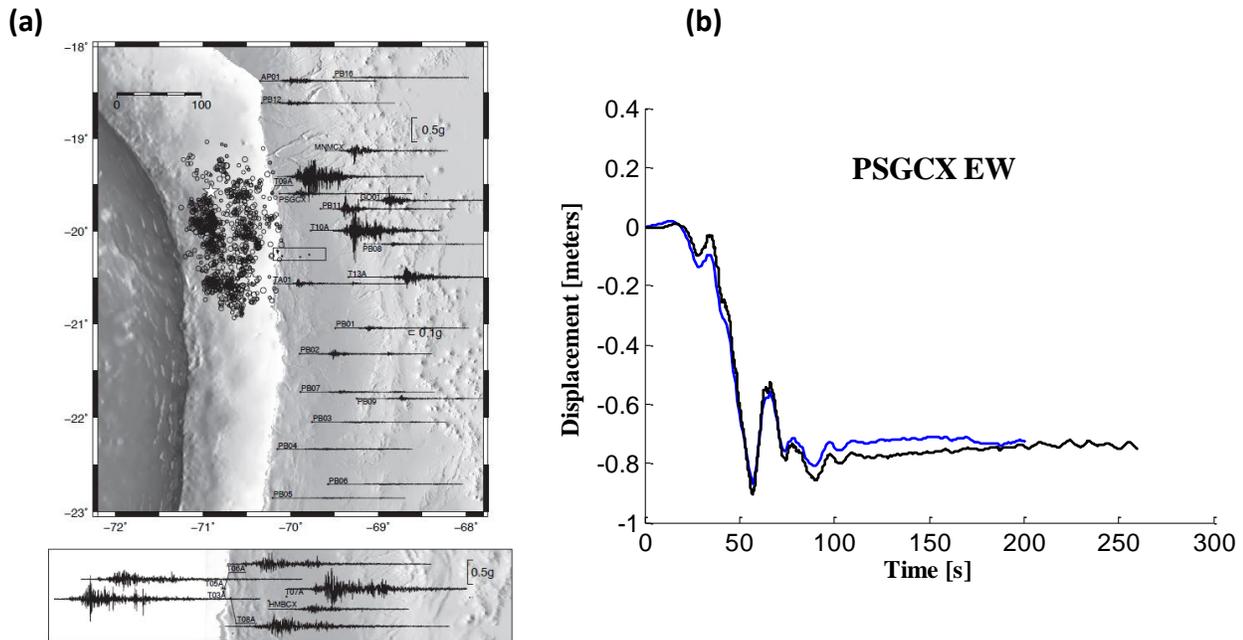


Figura 3. (a) Registros de aceleraciones obtenidos durante el terremoto de Iquique Mw 8.1. (b) Traza de color negro, registro de aceleración integrado 2 veces usando la técnica propuesta por Boore (2002), en color azul el registro de cGPS obtenido en la estación PSGCX.

3 Sismicidad previa al terremoto Mw 8.1. Fase de Nucleación.

La zona Norte mostró un aumento de la sismicidad posterior al terremoto intraplaca de profundidad intermedia de Tarapacá 2005 Mw 7.8 [18], lo que se vio reflejado en un aumento de la cantidad de eventos de magnitud mayor a Mw 5.0 desde el año 2005, Figura 4a. Por otro lado, una seguidilla o enjambre de eventos -sismos de similar magnitud que ocurren en sitios cercanos y en reducidos espacios de tiempo- se localizó en lo que serían los bordes del área de ruptura del terremoto de Iquique [7], Figura 4b. Estos enjambres se pueden agrupar en dos zonas: una ubicada en la parte Norte alrededor de los $\sim -19.5^\circ$ donde finalmente se ubica el hipocentro del terremoto de Iquique y en la parte Sur desde los -20.2° hasta aproximadamente los -20.5° .

Los enjambres ocurrieron en forma persistentes por varios años, al menos desde que la red IPOC instaló un número significativo de estaciones, alrededor del año 2008. Las características de esta sismicidad era evidente en Enero del 2014, cuando los enjambres, en la parte Norte y Sur de lo que sería el área de ruptura del terremoto de Iquique, se ordenaba con claridad (Figura 4c). Las zonas donde se concentra estas dos zonas de sismicidad coinciden con zonas de transición entre alto y bajo acoplamiento observadas en la Figura 1b [15, 7].

Se ha propuesto que estas zonas podrían estar deslizando asísmicamente, observándose durante el mes de Marzo del 2014 un terremoto lento que antecedió al terremoto de Iquique [7, 19, 17]. Ruiz et al. [7] y Grandin et al. [19] utilizaron las series de GPS que registraron el movimiento entre las placas de Nazca y Sudamericana para proponer la presencia de este evento lento, mientras que Kato y Nakawaga [17] lo sugieren por la presencia de multiplets previos al terremoto. Este terremoto lento, terminaría con la fase previa o nucleación del terremoto de Iquique 2014.

El precursor de mayor magnitud de toda la secuencia ocurre durante el mes de Marzo, de magnitud Mw 6.7 y ubicado en la placa Sudamericana a una profundidad de ~ 10 km, posterior a este evento se

desencadenó una serie de sismos de magnitud $M_w \sim 6.0$ que migraron hacia el Norte durante las próximas 2 semanas [7, 16, 21]. Esta sismicidad rodearía la parte más superficial de los que sería la zona de ruptura del terremoto de Iquique, Figura 5.

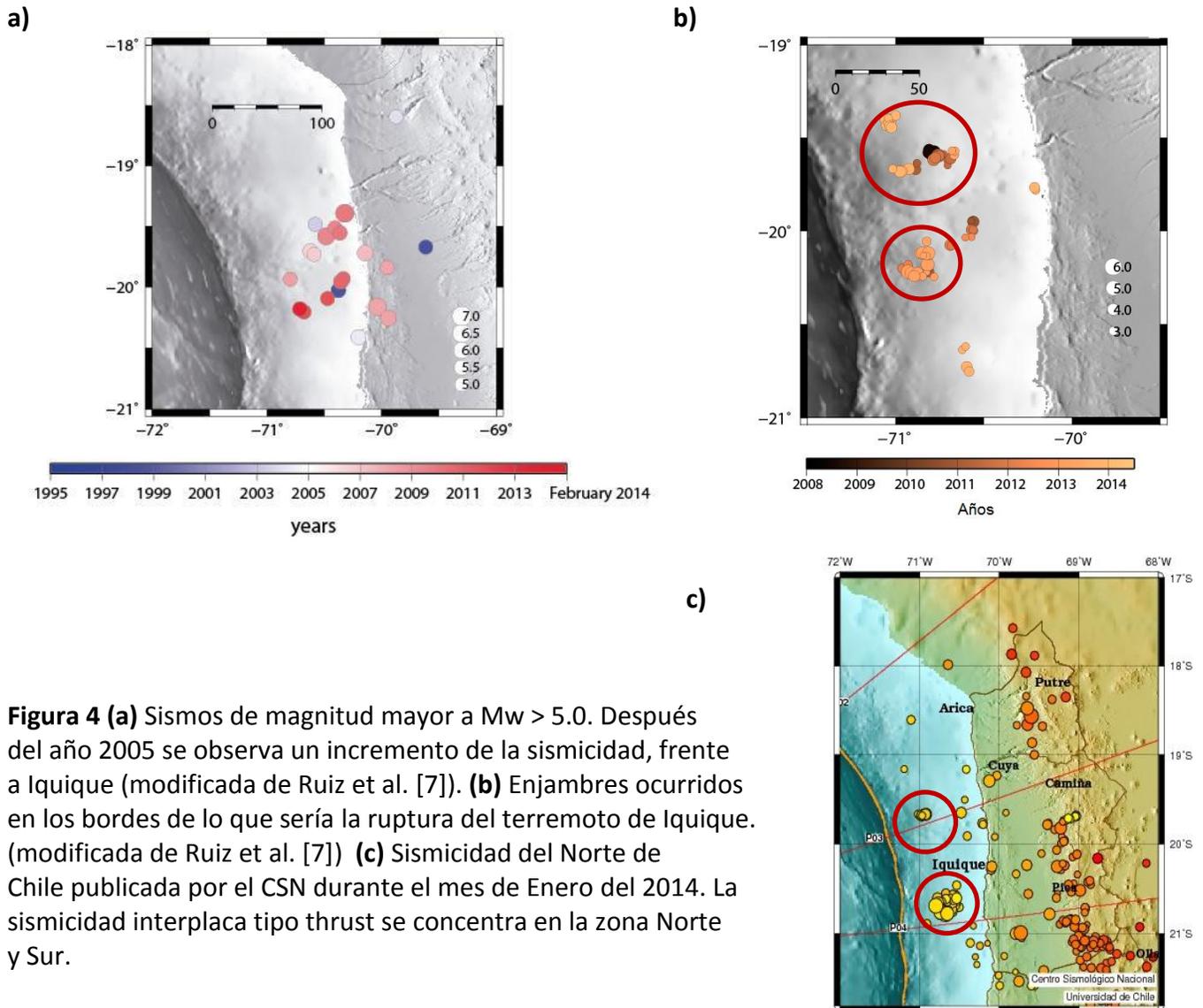


Figura 4 (a) Sismos de magnitud mayor a $M_w > 5.0$. Después del año 2005 se observa un incremento de la sismicidad, frente a Iquique (modificada de Ruiz et al. [7]). **(b)** Enjambres ocurridos en los bordes de lo que sería la ruptura del terremoto de Iquique. (modificada de Ruiz et al. [7]) **(c)** Sismicidad del Norte de Chile publicada por el CSN durante el mes de Enero del 2014. La sismicidad interplaca tipo thrust se concentra en la zona Norte y Sur.

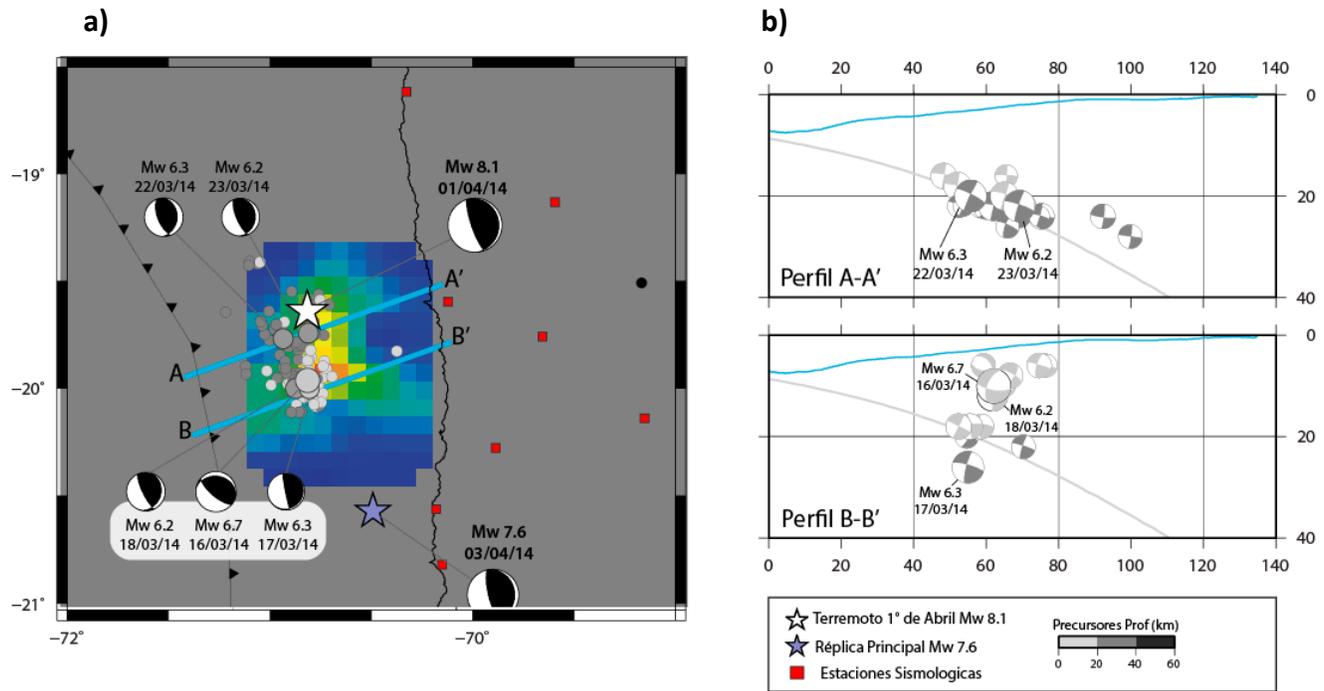


Figura 5. a) Ubicación de los precursoros de marzo del terremoto de Iquique 2014. Se muestran los mecanismos focales de los principales sismos junto a la distribución de deslizamiento del terremoto de Iquique Mw 8.1, computado utilizando registros de aceleración. La estrella blanca indica el epicentro del terremoto Mw 8.1. La estrella azul indica el epicentro de la principal réplica Mw 7.6. **b)** Perfiles en profundidad de la sismicidad presentada en a) donde se observan los mecanismos focales de estos eventos (modificada de Ruiz et al. [7]).

4 El Terremoto de Iquique Mw 8.1. Fase cósmica

El terremoto de Iquique comienza a las 23:46:45 horas con una fase preliminar de unos 20 segundos caracterizada por un amplitud muy baja, Figura 6. El terremoto acelera aproximadamente a los 20 a 30 segundos donde se gatillaría la principal aspereza que controla la ruptura de este terremoto. Nosotros hemos invertido este terremoto utilizando los registros de acelerogramas integrados y filtrados entre 0.01 y 0.08 Hz. Nuestros resultados en general están de acuerdo con lo observado en inversiones previas ([7], [20], [16], [21], [22], [23]). Encontrando una zona de ruptura de alrededor de 100 kilómetros con una gran aspereza al Sur de la ruptura.

La zona de ruptura de este terremoto está rodeado por dos zonas de bajo acoplamiento ([15], [7]), Figura 7. Propagándose desde una profundidad de ~15 km hasta los ~35 km. Este terremoto rompe la parte superficial del contacto sismogénico, probablemente sin llegar hasta la fosa, lo que se confirma por la carencia de un gran tsunami [24]. Esta zona de ruptura es diferente a la del terremoto de Tocopilla 2007 que rompió la zona más profunda del contacto entre placas [25, 6].

Al sur del área de ruptura y a unos ~30 km de profundidad ocurre la principal réplica de magnitud Mw 7.6. Esta réplica más profunda parece seguir una tendencia de las réplicas a rodear la zona de bajo acoplamiento observado alrededor de los -22.5°, Figura 7.

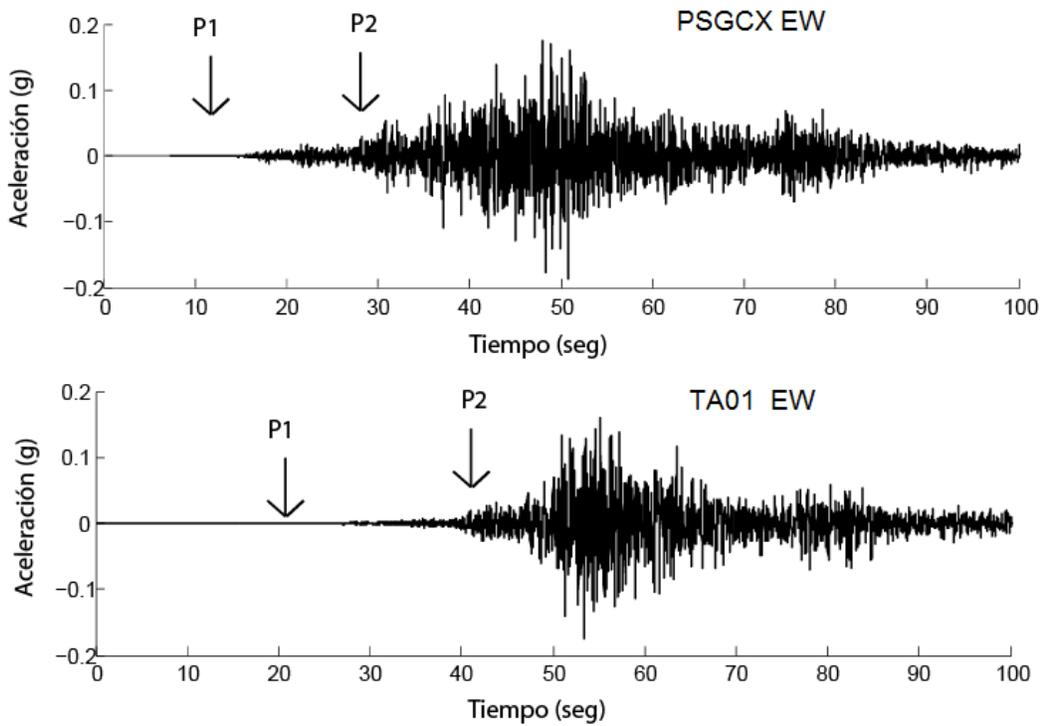
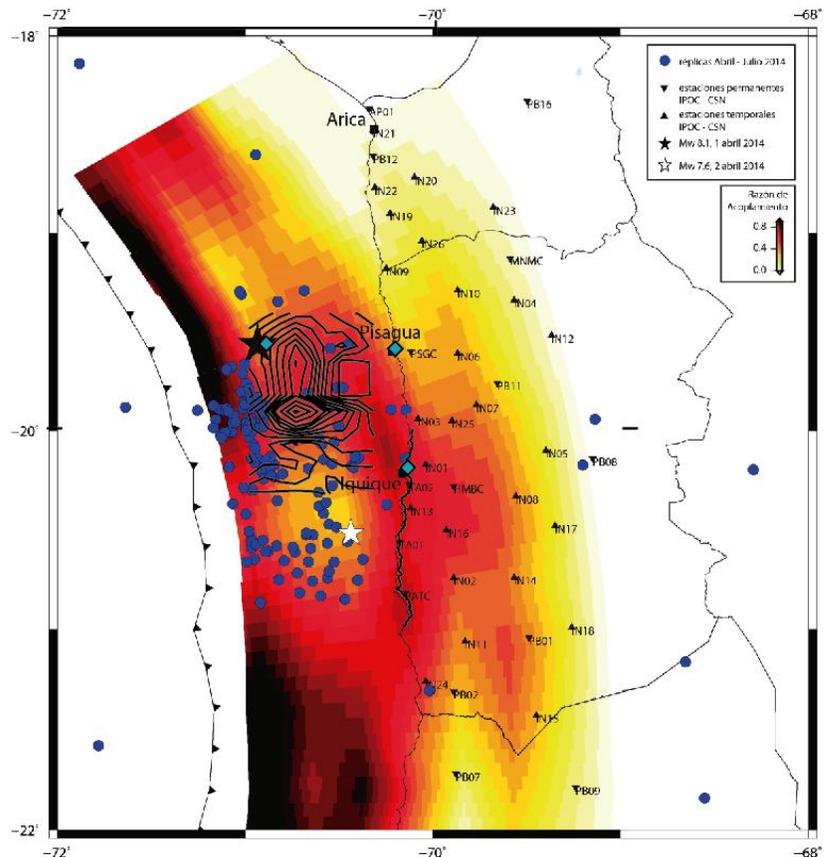


Figura 6. Registros de aceleraciones de estaciones localizadas en Pisagua (PSGCX) y a 50 km al Sur de Iquique (TA01). La llegada de la primera onda P (P1) y el arribo de la onda P asociada a la principal aspereza son indicadas con flechas (P2).

Figura 7. Mapa de acoplamiento (modificado de Metois et al. [15]). Líneas continuas negras, zona de desplazamiento cosísmico del terremoto de Iquique Mw 8.1 (similar al presentado en la Fig. 5a) Puntos azules, réplicas de magnitud mayor a 4.5 (del 1° de Abril al 31 de Agosto de 2014). Los triángulos corresponden a las estaciones sismológicas utilizadas para realizar las relocalizaciones. La estrella negra indica el epicentro del terremoto Mw 8.1. La estrella blanca indica el epicentro de la principal réplica Mw 7.6.



5 Réplicas del Terremoto de Iquique Mw 8.1. Fase postsísmica

Como se observa en la Figura 7 las réplicas de magnitud mayor a Mw 4.5 muestran una estructura que rodea la zona de desplazamiento cosísmico del terremoto de Iquique. E igualmente en la zona Sur tienen a rodear la zona de bajo acoplamiento. Si comparamos la sismicidad del Norte de Chile que ocurrió antes y después del terremoto de Iquique podemos observar que se mantiene una zona sin que ocurran gran cantidad de sismos. La Figura 8 muestra la densidad de número de eventos -mapa de calor- que ha ocurrido antes y después, manteniéndose una zona de baja densidad de sismos alrededor de los -20.5° zona de bajo acoplamiento. Esta zona con menor densidad de sismos ha sido marcada por los círculos negros.

Durante las réplicas ha sido posible encontrar una serie de multiplets que permiten sospechar que los bordes de la ruptura del terremoto de Iquique 2014 Mw 8.1 aún siguen deslizando asísmicamente. Permitiendo especular que el proceso de ruptura de los terremotos de Iquique 2014 aún no ha terminado. En la Figura 9 se presentan dos eventos que ocurrieron en lugares cercanos y que presentan similares características.

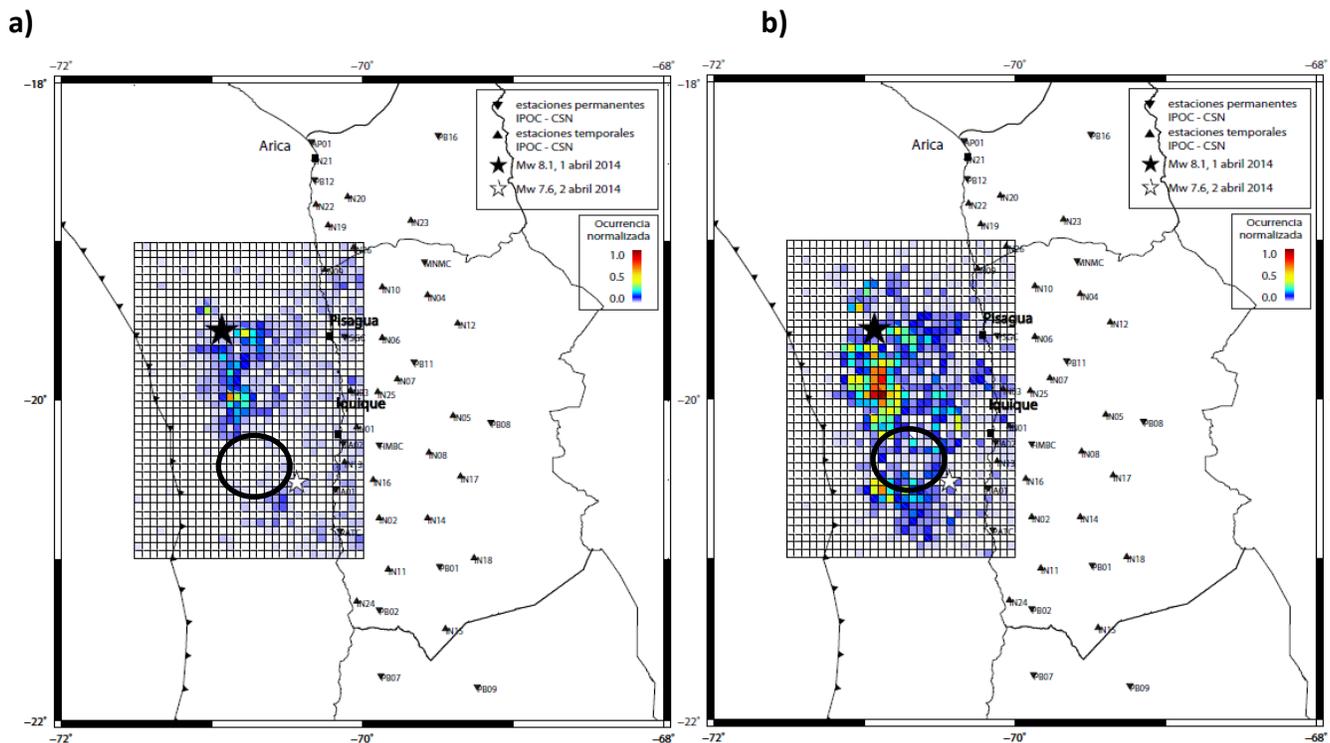


Figura 8. Mapa de calor, el color rojo está relacionado con el mayor número de eventos que ocurre en un mismo sitio, mientras que el color azul corresponde a la menor densidad en un determinado sitio. Los círculos indican una zona donde no se observa mayor sismicidad. Para esta figura se ha utilizado el catalogo del CSN **a)** Sismicidad previa al terremoto Mw 8.1 (1 de abril), del 1 de Enero de 2006 al 31 de Marzo de 2014; **b)** Posterior al terremoto de Iquique, del 1 de Abril y el 19 de Agosto de 2014.

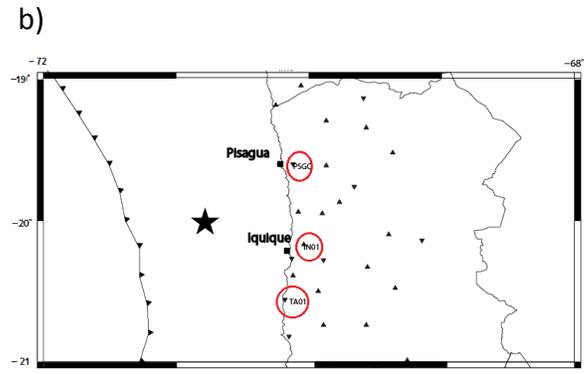
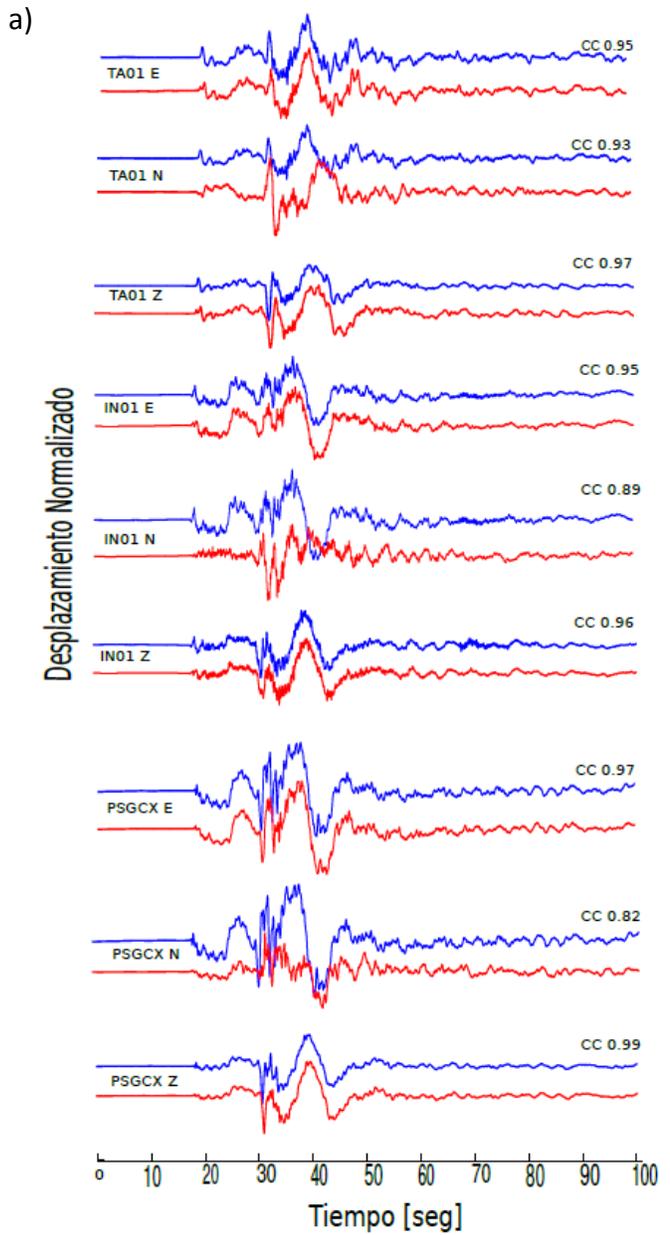


Figura 9. a) Registros de desplazamiento normalizado de dos eventos localizados muy cerca (estrella negra en (b)). Los eventos son del 02-04-2014 Mw 5.4 y del 10-04-2014 Mw 5.0. Los registros son de velocidad (sismografos), se remueve la tendencia y se integran directamente (sin filtrar). El número de la derecha representa el coeficiente de correlación aplicado a todo el registro. b) Mapa donde se ubican las 3 estaciones de los registros mostrados en (a).

6 La laguna sísmico del Norte de Chile

A pesar de que desde la década del 70 se esperaba un mega-terremoto en esta zona, asumiendo que los terremotos de 1543, 1615, 1768 eran similares al mega-terremoto de 1877, sólo han ocurrido terremotos de magnitud Mw ~ 8.0: Tocopilla 2007 e Iquique 2014. Aparentemente esto se debe a una mala interpretación de los terremotos históricos, la que se basó en crónicas escritas por Montessus de Ballore [2]. El Norte de Chile es una zona desértica, con una escasa población que permitiera documentar las crónicas. Del terremoto de 1768 sólo se sabe que hubo un terremoto antes de esa fecha que derrumbó parte de iglesias en 2 pueblos del Norte [2]. Sin embargo, se ha extrapolado esta información asignando incluso magnitud a este evento. Por otro lado, recientes estudios de paleosismología [9] parecen favorecer la idea de que mega-terremotos como el de 1877 son eventos extremos con periodos de recurrencia de al menos un par de siglos. Para profundizar en

estas conclusiones se necesita continuar instrumentando el Norte de Chile y realizando más estudios de paleosismología. Por el momento la instrumentación de GPS desde la década del 90 ha permitido inferir el nivel acoplamiento lo que indicaría que aún existen grandes zonas del Norte de Chile donde se puede nuclear un nuevo terremoto de magnitud mayor a Mw 8.0, por ejemplo entre el río Loa y Tocopilla.

7 Conclusiones

Los terremotos de Iquique tuvieron una fase previa que ha sido identificada en los desplazamientos de GPS ubicados en la zona costera. Una serie de enjambres precursores rodeando lo que sería la zona de ruptura del terremoto de Iquique sugieren la existencia de un desplazamiento asísmico previo al 1° de Abril. El 16 de Marzo, ocurre un terremoto de magnitud Mw 6.7 a partir del cual se acelera el proceso de nucleación, ocurriendo probablemente un terremoto lento con lo cual terminaría la fase previa del terremoto Mw 8.1. Este tipo de nucleación también ha sido observado en simulaciones de laboratorio donde previo a la fase dinámica de ruptura existe un movimiento lento [26]. El proceso cosísmico ha quedado caracterizado por un terremoto Mw 8.1 que se inicia lentamente por alrededor de 25 a 30 segundos, liberando la mayor parte de su energía en la parte sur de la ruptura. Casi 24 horas después de este terremoto ocurre la réplica de mayor magnitud Mw 7.6, localizada en el Sur de la ruptura. Las réplicas en general se han distribuido siguiendo una estructura similar a lo observado antes del terremoto, encontrándose la presencia de eventos multiplets, lo cual permite postular que el Norte de Chile aún desliza asísmicamente. Las réplicas de magnitud mayor a Mw 4.5 rodean el área de deslizamiento del terremoto Mw 8.1, como también las zona de bajo acoplamiento. Además, los precursores como las réplicas se han ubicado preferentemente en la transición entre zonas de alto a bajo acoplamiento. Finalmente, este terremoto rompió parte de la laguna sísmica del Norte de Chile, existiendo zonas de alto acoplamiento donde podría en el futuro gestarse un terremoto de magnitud mayor a Mw 8.0.

8 Agradecimientos

Agradecemos los datos proporcionados por el Centro Sismológico Nacional (CSN) y la red IPOC (Integrated Plate boundary Observatory Chile). Este trabajo ha sido posible gracias a la ayuda del proyecto Fondecyt de Iniciación N° 11130230 y el proyecto Fondecyt N° 1130636

9 Referencias

- [1] Kelleher, J.A., 1972. Rupture Zones of Large South American Earthquakes and Some predictions, *J. geophys. Res.*, 77(11), 2087–2103
- [2] Montessus de Ballore, F., 1911–1916. Historia Sísmica de los Andes Meridionales, 6 vols. Cervantes, Santiago, Chile. Kausel
- [3] E. Kausel, 1986. Los terremotos de agosto de 1868 y mayo de 1877 que afectaron el sur del Perú y norte de Chile. Boletín de la Academia Chilena de Ciencias; Instituto de Chile. Editorial Universitaria, Santiago, V. 3, N° 1, pp. 8 - 13.
- [4] Comte, D. & Pardo, M., 1991. Reappraisal of great historical earthquakes in the northern Chile and Southern Peru seismic gaps, *Nat. Hazards*, 4, 23–44.
- [5] Malgrange, M. & Madariaga, R., 1983. Complex distribution of large thrust and normal fault earthquakes in the Chilean subduction zone, *Geophys. J. R. astr. Soc.*, 73, 489–505

- [6] Peyrat, S., Madariaga, R., Buforn E., Campos, J., Asch, G. and Vilotte, J.P. Kinematic rupture process of the 2007 Tocopilla earthquake and its main aftershocks from teleseismic and strong-motion data. *Geophys. J. Int.* 182, 1411-1430, 2010
- [7] Ruiz, S., M. Metois, A. Fuenzalida, J. Ruiz, F. Leyton, R. Grandin, C. Vigny, R. Madariaga, J. Campos. (2014) Intense foreshocks and a slow slip event preceded the 2014 Iquique Mw 8.1 earthquake. Science DOI: 10.1126/science.1256074
- [8] Vargas, G., Ortlieb, L., Chapron, E., Valdes, J. & Marquardt, C., 2005. Paleoseismic inferences from a high resolution marine sedimentary record in northern Chile (23°S), *Tectonophysics*, 399, 381–398.
- [9] G. Vargas, S. Ruiz, F. Leyton, R. Abrahams, J. Le Roux, S. Pantoja, C. Lange, E. Contreras-Reyes y J. Campos, 2014. Assessing giant tsunamigenic subduction earthquakes in the Northern Chile Seismic Gap during the last two millennia. AGU San Francisco.
- [10] Udías, A., R. Madariaga, E. Buforn, D. Muñoz, and M. Ros. The Large Chilean Historical Earthquakes of 1647, 1657, 1730, and 1751 from Contemporary Documents *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 102, 1639-1653, 2012.
- [11] Cisternas, M. *et al.*, 2005. Predecessors of the giant 1960 Chile earthquake, *Nature*, 437, 404–407. Ruegg *et al.*, 1996
- [12] C. Ruegg, J. Campos, R. Armijo, S. Barrientos, P. Briole, R. Thiele, M. Arancibia, J. Cañuta, T. Duquesnoy, M. Chang, D. Lazo, H. Lyon-Caen, L. Ortlieb, J. C. Rossignol y L. Serrurier, 1996. The Mw = 8.1 Antofagasta earthquake of July 30, 1995: First results from teleseismic and geodetic data, *Geophys. Res. Letters*, 23(9), 917–920.
- [13] Chlieh, M., H. Perfettini, H. Tavera, J.-P. Avouac, D. Remy, J.-M. Nocquet, F. Rolandone, F. Bondoux, G. Gabalda, and S. Bonvalot (2011), Interseismic coupling and seismic potential along the Central Andes subduction zone, *J. Geophys. Res.*, 116, B12405, doi:10.1029/2010JB008166.
- [14] Béjar-Pizarro, M., Socquet, A., Armijo, R., Carrizo, D., Genrich, J., Simons, M. (2013). Andean structural control on interseismic coupling in the North Chile subduction zone, *Nature Geoscience*, doi: 10.1038/NGEO1802.
- [15] M. Métois, A. Socquet, C. Vigny, D. Carrizo, S. Peyrat, A. Delorme, E. Maureira, M.-C Valderas-Bermejo and I. Ortega. Revisiting the North Chile seismic gap segmentation using GPS-derived interseismic coupling, *Journal International*
- [16] Schurr, B., G. Asch, S. Hainzl, J. Bedford, A. Hoechner, M. Palo, R. Wang, M. Moreno, M. Bartsch, Y. Zhang, O. Oncken, F. Tilmann, T. Dahm, P. Victor, S. Barrientos y Jean-Pierre Vilotte., 2014, Gradual unlocking of plate boundary controlled initiation of the 2014 Iquique earthquake. *Nature*.
- [17] Kato, A., and S. Nakagawa (2014), Multiple slow-slip events during a foreshock sequence of the 2014 Iquique, Chile M_w 8.1 earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, 41, 5420–5427, doi:10.1002/2014GL061138.
- [18] Peyrat, S. *et al.*, 2006. Tarapacá intermediate-depth earthquake (Mw 7.7 2005, northern Chile): a slab-pull event with horizontal fault plane constrained from seismologic and geodetic observations, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L22308, doi:10.1029/2006GL027710.
- [19] R. Grandin, S. Ruiz, M. Metois, M. Bejar, C. Vigny, F. Boudin, S. Allgeyer, M. Motagh, A. Fuenzalida, F. Leyton, J. Ruiz, E. Rivera, M. Vallee, J. Jara, N. Cotte, J. Bernard de Chaballier, R. Lacassin, D. Carrizo, A. Socquet, R. Armijo y J.C. Ruegg, 2014. The 2014 Pisagua-Iquique (Chile) earthquake sequence : geodetic constraints on space-time slip behaviour of a megathrust segmen. AGU San Francisco
- [20] Lay, T., H. Yue, E. E. Brodsky, and C. An, The April 1, 2014 Iquique, Chile Mw 8.1 earthquake rupture sequence, *Geophysical Research Letters*, 05/2014, DOI: 10.1002/2014GL060238.
- [21] G. Hayes, M. Herman, W. Barnhart, K. Furlong, S. Riquelme, H. Benz, E. Bergman, S. Barrientos, P. Earle y S. Samsonov, 2014. *Nature*.
- [22] Yagi, Y., R. Okuwaki, B. Enescu, S. Hirano, Y. Yamagami, S. Endo, and T. Komoro (2014), Rupture process of the 2014 Iquique Chile Earthquake in relation with the foreshock activity, *Geophys. Res. Lett.*, 41, 4201–4206, doi:10.1002/2014GL060274.
- [23] M. Vallee, R. Grandin, S. Ruiz, B. Delouis, C. Vigny, E. Rivera, M. Aissaoui, S. Allgeye, C. Satriano, N. Poiata, P. Bernard, J.P. Vilotte and B. Schurr, 2014. Rupture process of the two main 2014 Pisagua earthquakes (Mw 8.1 and 7.6) from strong motion, geodetic and global seismic data. AGU San Francisco.

- [24] An, C., I. Sepúlveda, and P. L.-F. Liu (2014), Tsunami source and its validation of the 2014 Iquique, Chile Earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, 41, 3988–3994, doi:10.1002/2014GL060567.
- [25] Delouis, B., Pardo, M., Legrand, D. & Monfret, T., 2009. The Mw 7.7 Tocopilla Earthquake of 14 November 2007 at the Southern Edge of the Northern Chile Seismic Gap: rupture in the Deep Part of the Coupled Plate Interface, *Bull. seism. Soc. Am.*, 99, 87–94.
- [26] Latour, S., A. Schubnel S. Nielsen and R. Madariaga Characterization of Nucleation during Laboratory Earthquakes, *Geophys. Res. Lett.*, 40, 5064-5069, doi:10.1002/grl.50974, 2013