

INFORME PROGRAMA DE RIESGO SÍSMICO

Primer semestre 2017



*Cerro Santa Lucía de Santiago, donde nació la sismología
en Chile y el continente*

Índice

Introducción	3
Antecedentes	4
Líneas y proyectos desarrollados al 1º semestre 2017	7
1. Línea de abordaje interdisciplinario desde las ciencias de la tierra.....	7
1.1. Investigación interdisciplinaria sobre Aysén 2007	7
1.2. Docencia	7
1.3. Relaciones institucionales	8
1.4. Investigación: Vulnerabilidad sísmica de bienes patrimoniales chilenos	8
1.5. Investigación: Evaluación integral de riesgo de desastres	8
2. Infrasonido remoto de erupciones volcánicas y terremotos de gran magnitud	8
3. Desarrollo de una plataforma de procesamiento de información sismológica y desarrollo de una plataforma web de visualización de información sismológica.	14
4. Línea de Tsunamis	20
Sub líneas: Modelamiento de Tsunamis, Alerta Temprana y Fuentes tsunamigénicas.....	20
5. Línea Peligro Sísmico	23
6. Línea Caracterización geofísica de la Cuenca de Santiago para la estimación de riesgo sísmico	33
7. Assessing giant tsunamigenic earthquakes along the hyperarid Northern Chile seismic gap in the last millennia.....	38
8. Trayectoria histórica, cambios ambientales y eventos catastróficos durante el Período Arcaico en la costa de Taltal, norte de Chile.....	39
9. Monitoreo sísmico y Potencial Sismogénico de la Falla San Ramón. ONEMI-CSN-FCFM, 2016-2019.	40

Introducción

A continuación se presentan los avances alcanzados hasta el Primer Semestre de 2017, en las distintas líneas y proyectos que desarrolla el Programa de Riesgo Sísmico. Estas iniciativas tienen su origen y están en continuidad con las actividades ejecutadas durante el año pasado.

El reporte de nuestro trabajo es una tarea que nos hemos propuesto para dar cuenta del aporte, cada vez más significativo, que están realizando las distintas líneas de investigación, su aplicación y potencial repercusión que puedan llegar a tener en otras instituciones públicas del país.

Es importante destacar que en este período, el Programa de Riesgo ha recibido invitaciones a participar en distintos trabajos e investigaciones, de instituciones del Estado y privadas. También son relevantes los trabajos de colaboración que se han iniciado con entidades nacionales e internaciones (MOP, Intendencia de Santiago, Universidad de la Basilicata y Universidad de Camerino, ambas de Italia), lo que fortalece la labor del PRS.

Lo anterior es de suma importancia toda vez que el Programa de Riesgo Sísmico está orientado a la transferencia tecnológica y de conocimientos, desde la academia a la sociedad, a través de la investigación, el desarrollo y la innovación (I&D+I) en torno a nuestra realidad sismológica. Este proyecto se encuentra enmarcado dentro de las Actividades de Interés Nacional (AIN) que lleva adelante la Universidad de Chile.

Antecedentes

El Programa de Riesgo Sísmico (PRS) es una Actividad de Interés de Nacional (AIN) de la Universidad de Chile, con financiamiento propio a través de la incorporación de una glosa en Ley Anual de Presupuesto, y alojado en el Departamento de Geofísica de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.

En líneas generales, su marco jurídico está compuesto por: a) su Reglamento Interno de Organización y Administración Presupuestaria, b) el Instructivo N°28 de Noviembre de 2014 de la VAEGI, c) el D.U. N°906 de 2009 “Reglamento de Facultades”, d) el D.U. N°2750 de 1979 “Reglamento de Administración Presupuestaria y de Administración de Fondos, e) el convenio anual entre la U. de Chile y el MINEDUC sobre AIN, f) la Resolución N° 30 de 2015 de la Contraloría General de la República que fija el procedimiento sobre rendición de cuentas, y g) Ley 10.366 Orgánica de la Contraloría General de la República.

¿Qué es una Actividad de Interés Nacional?

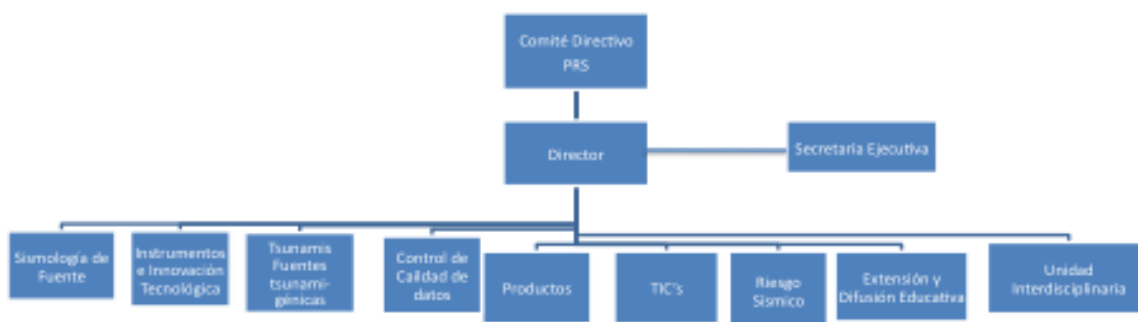
De acuerdo al Instructivo N° 28 de noviembre de 2014 de la Vicerrectoría de Asuntos Económicos y Gestión Institucional (VAEGI), que reglamenta a las Actividades de Interés Nacional (AIN) de la Universidad de Chile, define a éstas: como una amplia gama de actividades de impacto nacional y regional con directo beneficio para el país. Lo anterior ha llevado a la Universidad a definir, local o centralmente, políticas y acciones internas que prioricen actividades no sólo vinculadas con la difusión y aplicación del conocimiento adquirido por la vía de la investigación, sino también de aquellas actividades que dicen relación con los aspectos culturales y artísticos.

Dichas actividades denominadas Actividades de Interés Nacional (AIN), cuentan con financiamiento del Estado, considerado anualmente en la Ley de Presupuesto y se rigen por un convenio entre la Universidad de Chile y el Ministerio de Educación.

Para los efectos de asegurar la pertinencia y oportunidad del gasto de las AIN asociadas al convenio, el resguardo de la información de respaldo, facilitar la recolección y posterior entrega de información y la mantención de un registro ordenado y sistemático de los gastos referidos a las actividades y/o proyectos, estas actividades son fiscalizadas y supervigiladas por: a) el Director de la Unidad Académica donde se encuentra alojada al AIN, b) el Director Económico y Administrativo de la Facultad que aloja la AIN, c) por la Unidad de Análisis y Proyectos Institucionales (UAPI) de la VAEGI, d) por la Fiscalía del Ministerio de Educación, y e) la Contraloría General de la República.

Anualmente, el Director de cada AIN, como máximo responsable debe emitir un informe general de gastos y actividades, el cual, debe ser entregado al Director de Investigación de la Facultad que aloja a al AIN, a la Dirección de Investigación de la Vicerrectoría de Investigación y Desarrollo, la UAIP y al Ministerio de Educación.

Estructura Orgánica PRS



Líneas de investigación y desarrollo

- Sismología de la Fuente
- Instrumentos e innovación tecnológica
- Tsunami y fuente tsunamigénica
- Control de calidad de datos
- Desarrollo de productos
- TIC's
- Riesgo Sísmico
- Extensión y difusión educativa
- Unidad Interdisciplinaria

Antecedentes históricos PRS

1999: El Estado de Chile inicia apoyo económico para mejorar el sistema de monitoreo sísmico del país, operado hasta ese momento por el Servicio Sismológico Nacional (SSN), el cual era mantenido exclusivamente con aportes del Depto. de Geofísica, Universidad de Chile.

2000: El entonces Director del SSN, profesor Jaime Campos Muñoz-, realiza gestiones para que el Servicio Sismológico Nacional reciba de forma periódica -por glosa especial en el ítem Universidad de Chile de la Ley de Presupuesto de la Nación- flujos permanentes de recursos. Las gestiones incluyen un trabajo con las Vicerrectorías de Asuntos Económicos y



Gestión Institucional (VAEGI) y de Investigación y Desarrollo (VID) para la creación formal de la Actividad de Interés Nacional (AIN) denominada “Programa de Riesgo Sísmico” (PRS).

2009: El Rector de la Universidad de Chile, mediante el Decreto Universitario Exento N° 0011718, sanciona la creación del Centro Sismológico Nacional (CSN), como entidad nueva, distinta, separada del Departamento de Geofísica y dependiente del Decano de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, el cual pasó a sustituir al SSN. No obstante, como el CSN en sus inicios carecía de financiamiento real, desde el año 2009 hasta el mes de marzo del año 2013, este Centro fue mantenido con el aporte del PRS, fecha en que comenzaron a llegar las primeras remesas de recursos desde ONEMI para la gestión y operación del CSN.

2014: Los recursos ingresados a la Universidad de Chile vía glosa del Programa de Riesgo Sísmico, fueron re orientados en su utilización de acuerdo a las directrices entregadas por el entonces Director de Investigación de la VID, Sr. Patricio Velasco y consensuadas con el Director y equipo del PRS.

PRS inició proceso de institucionalización, a fin de cumplir de manera eficiente con las exigencias de rendición de cuentas y transparencia estipuladas en el la Resolución N° 759 de 2003 de la Contraloría General de la República, así como al Capítulo IV, artículo 77 y siguientes de la ley N° 10.336 de Organización y Atribuciones de la Contraloría General de la República.

Impacto del PRS

El Programa Riesgo Sísmico anima una importante actividad de investigación y extensión focalizada a la transferencia tecnológica y difusión educativa en el tema del riesgo sísmico en Chile.

Es una comunidad de más de 30 especialistas, de los cuales 11 son estudiantes de pre y postgrado, 2 postdocs, 3 profesionales y más de 17 investigadores, de los cuales 3 son académicos jornada completa, 2 profesores expertos y 2 profesores sénior invitados.

El impacto científico-tecnológico en el período 2014 – 2015 – 2016 se refleja en más de 29 publicaciones ISI, 34 presentaciones en workshop internacionales y 11 tesis de grado, una de ellas de doctorado.

El impacto en difusión científica se refleja en numerosas charlas, clases y seminarios, presencia mediática, una exposición y un Diplomado.

Todo este trabajo ha contribuido a fortalecer las capacidades científicas y tecnológicas del país en temas de sistemas de detección, alerta temprana y modelamiento de tsunamis. A nivel regional, se destacan los avances en temas de caracterización de la amenaza sísmica en la zona central de



PROGRAMA DE RIESGO SÍSMICO



UNIVERSIDAD DE CHILE

Chile, en particular en la Región Metropolitana de Santiago, y las acciones de difusión educativa en colegios de las Regiones VIII, XI, V y RM.

El Programa Riesgo Sísmico tiene también una fuerte componente de colaboración con instituciones públicas y privadas, que en el último año se ha traducido en fluidas colaboraciones con la Intendencia de la Región Metropolitana, el GORE de RM, el Ministerio de Obras Públicas, el Senado de la República, la Superintendencia de Banco e Instituciones Financieras, Colegios Profesionales, etc.

En la academia, el Programa Riesgo Sísmico contribuye con seminarios, docencia y formación de especialistas en el tema de riesgo sísmico. Destacados profesores son invitados a Chile cada año para impartir cursos y seminarios en sismología teórica y/o temas de frontera mejorando la oferta en la formación del capital humano avanzado del país.

Líneas y proyectos desarrollados al 1º semestre 2017

A continuación se presenta una síntesis de las líneas y proyectos que el Programa de Riesgo Sísmico está desarrollando en el 1º semestre de 2017 y que tienen como antecedente lo realizado en 2016 y años anteriores.

1. Línea de abordaje interdisciplinario desde las ciencias de la tierra

Investigadora responsable: Juliette Marín y equipo

1.1. Investigación interdisciplinaria sobre Aysén 2007

Revisión del caso del enjambre sísmico de Aysén y de la crisis de gobernanza consecuente. Colaboración con Geografía (FAU). 2017: *Publicación paper, seminario de difusión y artículo en prensa generalista.*

1.2. Docencia

- Curso de Formación General 2.0 “Desastres socionaturales en Chile, una introducción crítica”, 25 estudiantes; invitados del MOP, FSDLP, Banco Santander, MINSAL. 2017: *CFG 3.0*
- Aprobación del Diplomado de la FCFM “Gestión, Ingenierías & Ciencias para la resiliencia”. 2017: *1ª edición.*

1.3. Relaciones institucionales

- Partner académico de la Intendencia de la RMS en el proyecto “100 Ciudades Resilientes”, línea “Riesgo Sísmico”. 2016-2017.
- Coordinación de las iniciativas y proyectos con DIRPLAN Ministerio de Obras Públicas. 2015-2017.
- Integración del Consejo Público-Privado Santiago Resiliente. Intendencia de Santiago. 2016-2017
- Integración del Grupo Motor Santiago Preparado - Estrategia de Resiliencia - Smart City CORFO. Intendencia de Santiago. 2017

1.4. Investigación: Vulnerabilidad sísmica de bienes patrimoniales chilenos

- Desarrollo de una metodología de evaluación de vulnerabilidad sísmica para iglesias patrimoniales. Casos de estudio en Valparaíso y Tarapacá.
- Colaboración con Arquitectura (FAU) y la *Università de la Basilicata* (Italia).

1.5. Investigación: Evaluación integral de riesgo de desastres

- Desarrollo de una metodología integral de evaluación de riesgo adaptada a Chile. Colaboración con Geografía (FAU) y Geología.

Escala comunal, dos casos de aplicación en 6ª y 7ª Región.

2. Infrasonido remoto de erupciones volcánicas y terremotos de gran magnitud

Investigador responsable: Jaime Campos y Rodrigo De Negri

1. Introducción

El presente informe es continuación de la línea de trabajo presentada anteriormente (véase, informe de octubre de 2016 del PRS), por lo que lo referido a los fundamentos y motivaciones para el uso del infrasonido como herramienta de monitoreo y prevención de desastres no será mayormente desarrollado. En cambio, se presentarán los avances y se usarán las proyecciones buscadas anteriormente para revisar los objetivos cumplidos y evaluar así los caminos de desarrollo de este trabajo.

Para contextualizar, gracias al trabajo conjunto entre integrantes del Programa de Riesgo Sísmico (PRS) de la Universidad de Chile y la Comisión Chilena de Energía Nuclear (CCHEN), se han comenzado a usar desde el año 2016 una parte de los datos capturados por las estaciones chilenas pertenecientes al Sistema Internacional de Monitoreo (IMS, por su sigla en inglés) para observar

dos erupciones volcánicas (volcán Puyehue-Cordón Caulle, 2011; volcán Calbuco, 2015) y un terremoto de gran magnitud (terremoto del Maule, 2010) de forma remota (más de 600 km). Dichas estaciones son las llamadas IS-13 (Isla de Pascua) e IS-14 (Isla Robinson Crusoe), que están en territorio chileno gracias a que nuestro país está suscrito al Tratado de Prohibición Completa de los Ensayos Nucleares (TPCE y su sigla en inglés es CTBT). Los intentos de hacer uso de esta infraestructura son inéditos en Chile, por lo que representan un primer paso muy importante en la explotación científica de los datos capturados por estas estaciones.

2. Objetivos y proyecciones previas

El semestre anterior, según cita el informe correspondiente (referencia), se concluyó que:

1. Se detectan frentes de onda posiblemente relacionados con el terremoto M8.8 del 27 de febrero de 2010 (terremoto del Maule).
2. El algoritmo de detección de dichos frentes de onda, Progressive Multichannel Cross Correlation Method (PMCC), tiene una gran potencialidad para detectar las ondas de presión generadas por el movimiento superficial de la tierra en respuesta a actividad sísmica y volcánica.
3. Pese a obtener buenas aproximaciones de localización y cronologías de los eventos observados, hace falta un mayor procesamiento ulterior de los datos generados para extraer información más depurada y precisa. Se sugiere así usar, por ejemplo, el método de Beamforming para dicho objetivo.
4. Para obtener una resolución de los parámetros calculados que sea confiable, es necesario considerar modelos de la estructura atmosférica en el proceso de cálculo.
5. En el caso de estudio de terremotos, el uso de infrasonido representa una visión complementaria a la sísmológica, permitiendo enriquecer científicamente la comprensión del fenómeno. Sin embargo, no se espera que represente una herramienta de monitoreo por la naturaleza impredecible de los terremotos; por otro lado, en volcanes tiene una gran potencialidad al tener actividad previa y posterior a cada erupción susceptible a ser observada.

Por tanto las proyecciones generadas fueron las siguientes:

- Continuar con el análisis de los datos de infrasonido en torno a las erupciones del volcán Puyehue-Cordón Caulle (junio, 2011) y volcán Calbuco (abril, 2015).
- Aplicar métodos que sirvieran para refinar los resultados obtenidos, sugiriendo el método Beamforming.
- Usar más herramientas entregadas por el CTBT a través de la CCHEN.

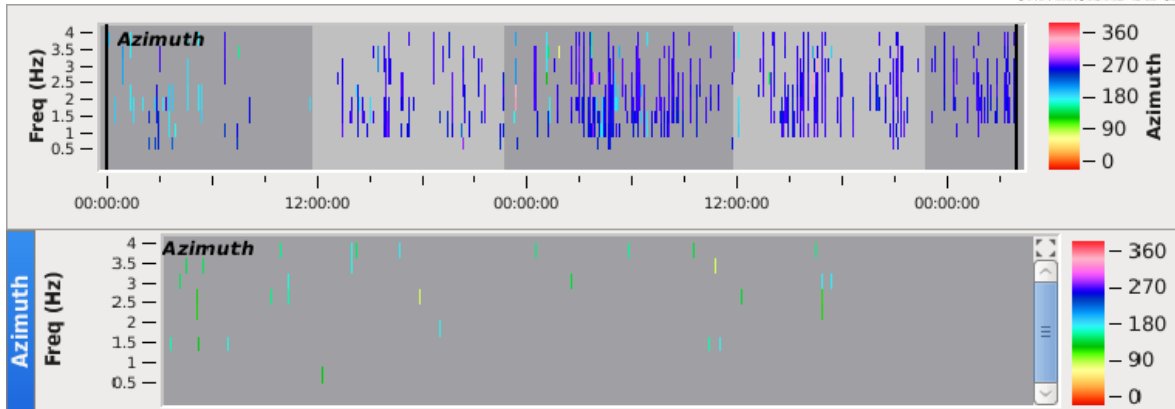


Figura 1: Resultados obtenidos para la estación IS-14 en días previos a la erupción del volcán Calbuco (23 de abril de 2015). Datos del 20 al 21 de abril de 2015. En el panel superior se muestran pixeles en colores dependiendo del azimuth para todas las señales detectadas, viéndose bastante actividad señalando un azimuth cercano a los 270 grados. En el panel inferior se ven los datos filtrados para un rango de azimuths de 90 a 180 grados, mostrándose muy poca actividad.

3. Avances y resultados

En cuanto a las proyecciones del semestre anterior, se puede establecer que:

1. Tanto la erupción del volcán Puyehue-Cordón Caulle como la del volcán Calbuco han sido estudiadas a través de los datos capturados por las estaciones IS-13 e IS-14. Sin embargo, el enfoque se centró en el volcán Calbuco, pues en el período correspondiente a la erupción del volcán Puyehue-Cordón Caulle (2011) la estación IS-14 permanecía inactiva debido a la destrucción generada por el tsunami tras el terremoto del Maule.
2. Se han mejorado ostensiblemente los resultados obtenidos gracias a un mejor uso del software disponible, cumpliendo los dos últimos puntos.

Para poder observar las señales de infrasonido generadas por las erupciones volcánicas, el tratamiento de los datos fue más dificultoso, pues durante las ventanas de tiempo observadas prevalecían señales coherentes correspondientes a varios fenómenos naturales y humanos que se mezclaban con las generadas por la actividad volcánica. Por este motivo se usaron varias herramientas presentes en el software DTK-PMCC disponible a través de la CCHEN para «filtrar» todas las señales que no eran de interés, permitiendo observar aquellas que evidenciaban fuerte actividad volcánica. Como se comentó anteriormente en el punto (1), los resultados que se muestran en las figuras 1, 2 y 3 corresponden únicamente a la erupción del volcán Calbuco en abril del 2015.

Se aprecia claramente un cambio en la detección de ondas en el rango de azimuth esperado. Existe también una actividad episódica que se mantiene durante los días de la erupción. Este tipo de actividad está comunmente asociada al fenómeno de «jet-noise» que corresponde al flujo continuo de la columna de ceniza levantada a altas presiones, similar al producido en turbinas de aviones. En la Figura 3 se muestra que las detecciones son numerosas y provienen de dos rangos

principales de azimuths, fenómeno que se puede ligar a la refracción de las ondas acústicas a lo largo de la topografía, como es la cordillera de Los Andes.

Es importante mencionar que los resultados obtenidos, así como la línea de trabajo desarrollada durante este período, serán presentados a través de un poster en el congreso «Science and Technology 2017» organizado por el CTBT del 26 al 30 de junio de este año a realizarse en Viena, Austria. En dicha actividad se buscará contactar a la comunidad científica que está trabajando con estaciones del IMS, en especial a los expertos que actualmente usan infrasonido para estudiar terremotos y volcanes.

4. Conclusiones y proyecciones

En julio de este año se cumple un año de trabajo en la línea de infrasonido, siendo una experiencia pionera en el uso de las estaciones IS-13 e IS-14 para detectar actividad sísmica y volcánica de forma remota. El trabajo desarrollado ha implicado un gran esfuerzo de coordinación, estudio y colaboración entre los involucrados tanto de la CCHEN como del PRS. En líneas generales, se puede concluir felizmente que la experiencia ha sido exitosa y permite abrir un área de desarrollo científico con grandes proyecciones para el país, trabajando a la par de otros centros de estudio en el mundo.

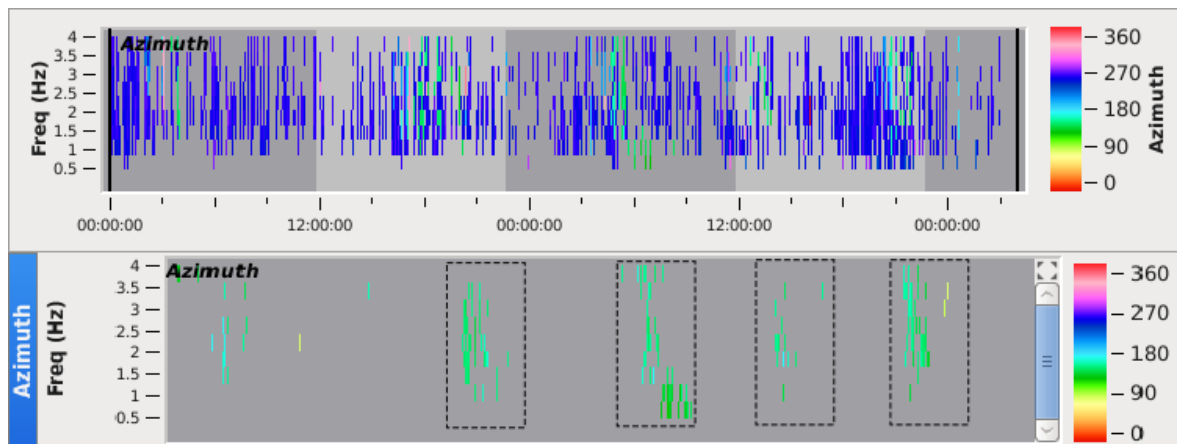


Figura 2: Resultados obtenidos para la estación IS-14 durante el primer día de la erupción del volcán Calbuco (23 de abril de 2015). El rango de datos comprende desde el día 22 al 23 de abril de 2015. En el panel superior se aprecia un aumento en general de la actividad en los rangos de frecuencia observados (0.5 a 4 Hertz). En el panel inferior se han filtrado las detecciones para un rango de azimuth de 90 a 180 grados. Se esperan detecciones alrededor de los 150 grados de azimuth, correspondiendo a la actividad episódica resaltada en líneas punteadas.

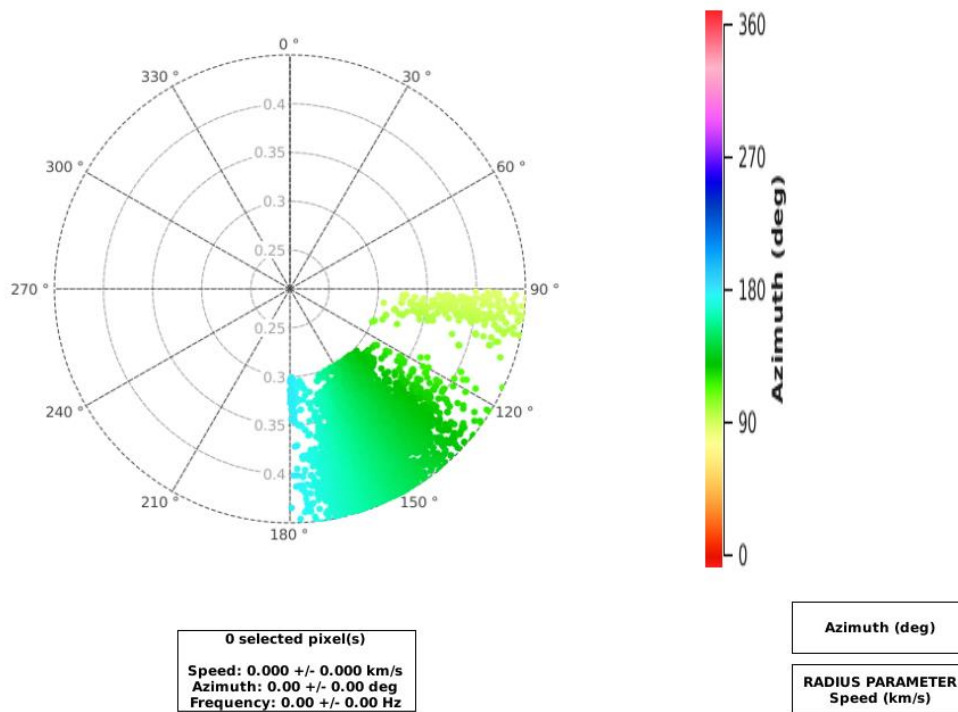


Figura 3: Detecciones en el rango de 90 a 180 grados de azimuth para la estación IS-14 durante los primeros días de la erupción del volcán Calbuco (22 al 23 de abril de 2015). Se aprecia una gran cantidad de eventos detectados dirigidos en dos frentes. Se presume que existen ondas directas, y otras refractadas por la topografía.

En cuanto a objetivos específicos establecidos anteriormente, como los objetivos surgidos a la luz del presente período, se concluye que:

1. Se ha cumplido con los objetivos establecidos en el período previo, continuando de forma coherente con el trabajo que implica el desarrollo del área.
2. Los resultados obtenidos para la erupción del volcán Calbuco en abril del 2015 son prometedores. La localización y la cronología de las observaciones corresponden a los rangos esperados, y los valores de otros parámetros de interés (espectrograma y energía total liberada, por ejemplo) se podrán obtener luego de un refinamiento de los datos.
3. Se debe hacer énfasis en la comparación y complementación de las observaciones sísmicas con las acústicas (infrasonido), especialmente en erupciones volcánicas. Ambas describen dos facetas de fenómenos comunes, por lo que desarrollar esta área es de suma importancia. Lamentablemente es un trabajo muy dificultoso al no existir una comunicación más fluida con las instituciones ligadas a la observación sísmica de dichos eventos. Por ejemplo, las cronologías sísmicas del volcán Calbuco no existen en publicaciones internacionales, pero seguramente existen registros no explotados que puedan ser utilizados.
4. Se puede acelerar el paso del desarrollo de esta área a través de la colaboración con expertos que puedan liderar los estudios a realizar en Chile. La futura experiencia en el congreso organizado por el CTBT puede implicar pasos importantes con este objetivo.

5. Considerando el impacto en la aeronáutica cada vez que una erupción volcánica levanta una columna de ceniza que alcanza alturas que interfieren con la trayectoria de los aviones, es sugerible establecer un tercer arreglo de microbarómetros similares a los disponibles en las estaciones del IMS en una zona estratégica en Chile. Bastaría con un arreglo para cubrir cientos de kilómetros con una latencia de respuesta de apenas 5 minutos. Con dicha infraestructura se podría entonces comenzar a implementar un algoritmo automático que levante alarmas de gran utilidad para la aeronáutica, similar al usado en Ecuador, Washington (EEUU) y Alaska (EEUU) [véase, ASHE project].

Por último, considerando lo anterior, para continuar la línea de trabajo a futuro es útil establecer que:

- Es necesario lograr establecer puentes de colaboración con aquellas organizaciones que estén capturando datos sísmicos de actividad volcánica, con el objetivo de promover la investigación en el área de forma complementaria.
- Sería de gran utilidad proponer un proyecto de investigación acotado a algún experto mundial, permitiendo de forma segura y rápida la generación de investigación de gran valor científico, además de la capacitación de científicos del país.
- Un posible polo de desarrollo es el buscar el financiamiento para establecer un tercer arreglo a distancias locales y regionales (menores a 250 km) de volcanes activos. Esto permitiría también generar un mayor interés internacional en el estudio del infrasonido de volcanes y terremotos en Chile, que ostenta récords mundiales eventos de gran magnitud.
- Para comprender a un nivel científico los métodos de filtro o discriminación de las señales capturadas se debe salir del modelo de «caja negra» que actualmente predomina. Es decir, hay que avanzar en la programación propia de software similar al disponible para poder controlar con precisión el proceso en todas sus etapas.

3. Desarrollo de una plataforma de procesamiento de información sísmológica y desarrollo de una plataforma web de visualización de información sísmológica.

Investigador responsable: Mauricio Marín, Rodrigo Scheihing y equipo

Los logros más importantes alcanzados durante el 2016 y a la fecha, ponen énfasis en aquellos productos que son un aporte o podrían ser aplicados por parte de otras instituciones públicas.

- Consolidar catálogo de mecanismos focales.
- Construcción de distintas herramientas de filtrado y visualización para información sísmológica, entre las que se encuentran filtros de colores por profundidad y fecha, gráficos de ubicación vs. sismicidad, entre otros.
- Revisión de las herramientas construidas por Jean-Claude Ruegg¹ en Fortran y GMT Tools para la deformación superficial post-sísmica.
- Integración de las herramientas para el cálculo de deformación superficial post-sísmica a la plataforma de procesamiento y plataforma web.
- Se deja en producción la plataforma funcional.

Durante el segundo semestre del 2017 se tiene como objetivo lograr que la plataforma sea útil como herramienta de apoyo en la toma de decisiones. Para ello se trabajará sobre tres puntos: Generación de Gráficos, Implementación de Shake Cast e incorporación de información externa.

Gráficos:

- Del trabajo realizado por Jean-Claude Ruegg se pretende extraer los gráficos implementados en las últimas versiones de esta, dentro de la plataforma.
- GMT Tools es una potente herramienta para el trabajo de los profesionales del área, pero desde nuestro punto de vista (Informático), resulta ser una limitante si se desea interacción y más aún si se desea lograr visibilidad. Por lo tanto, se hará un esfuerzo en lograr una herramienta interactiva que sirva de interfaz con GMT Tools, la cual será albergada dentro de la plataforma, complementándola con gráficos generados con JavaScript.

Shake Cast:

- Se está estudiando la forma de integrar esta aplicación a la realidad chilena

1

Institut de Physique du Globe de Paris, France

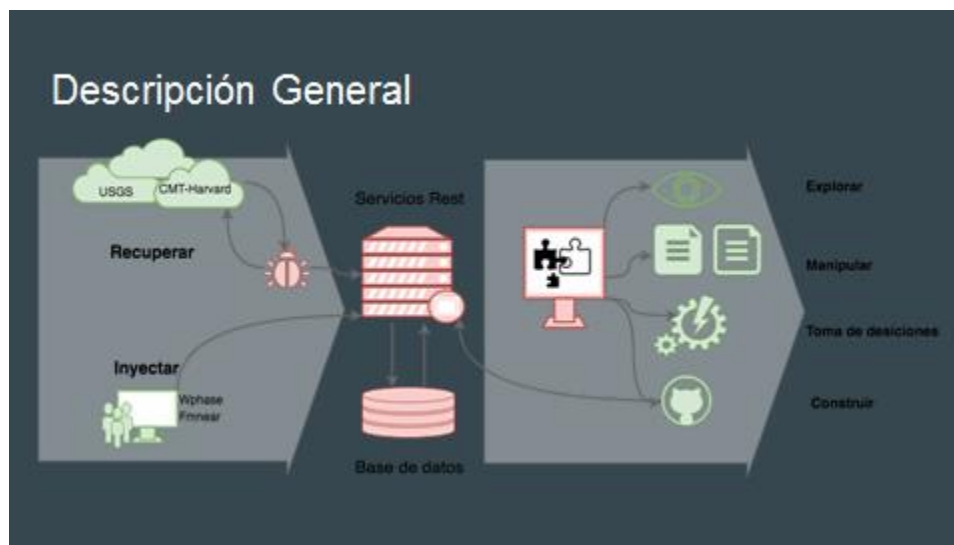
Incorporación de Información externa:

- La plataforma es capaz de albergar información de otros contextos, por ellos, se incorporará en primera instancia la información de tsunamis

Productos entregados:

prswb.dgf.uchile.cl

Imágenes del proyecto:



Descripción del sistema

Tolerante a fallas

Procesamiento en tiempo real

Orientado a servicios

Soporta la manipulación de la información para creación de nuevos componentes

Diseño modular

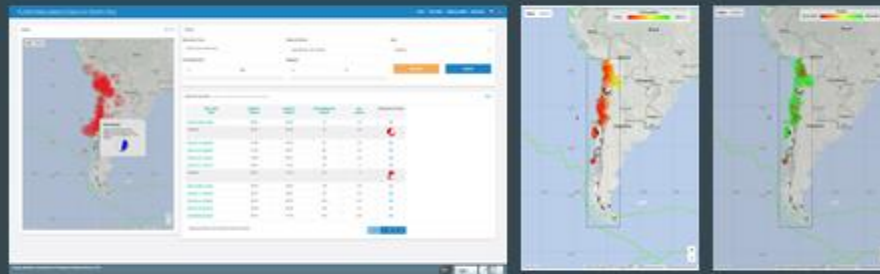
Descripción del sistema

- Tolerante a fallas
- Procesamiento en tiempo real
- Orientado a servicios
- Soporta la manipulación de la información para creación de nuevos componentes
- Diseño modular

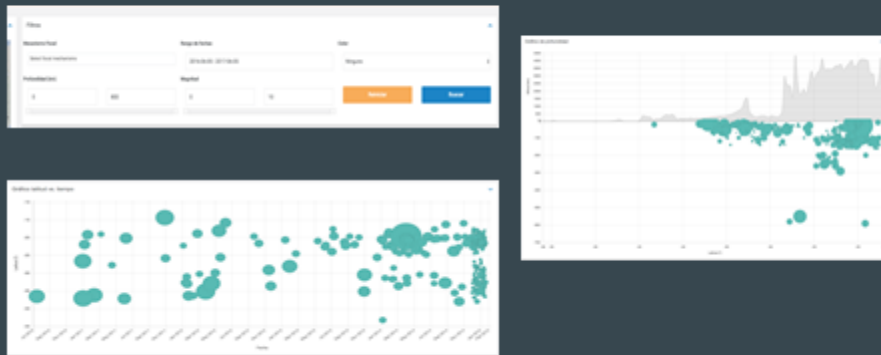
Objetivos de la plataforma

- Exploración de la información
- Manipulación de datos
- Toma de decisiones
- Construcción

Exploración



Exploración



Manipulación

Diferentes formatos disponibles



Implementación



Documentación



Repositorios disponibles

Toma de decisiones

- Automatización de script de JC Ruegg para determinar desplazamientos verticales y horizontales
- Obtención de información relevante en poco tiempo
- Visión global para el apoyo de decisiones



Trabajo Futuro

Gráficos

Obtención de nuevos gráficos a partir del script de JC Ruegg

Se pretende lograr interactividad para los scripts realizados en GMT Tools

Shake Cast

Se está estudiando la forma de integrar esta aplicación a la realidad chilena

Tsunamis

Incorporar información de tsunamis





Sitio Plataforma

<http://prsweb.dgf.uchile.cl/>

Documentación

<http://prsweb.dgf.uchile.cl/docu/>

Repositorio *requiere permiso

<https://bitbucket.org/prs/>

4. Línea de Tsunamis

Sub líneas: Modelamiento de Tsunamis, Alerta Temprana y Fuentes tsunamigénicas

Investigadores responsables:

- Jaime Campos, Mauricio Fuentes Serrano, Sebastián Riquelme
- , Jorge Crempien
- , Francisco Bravo y equipo
-

Trabajos realizados durante el 2016

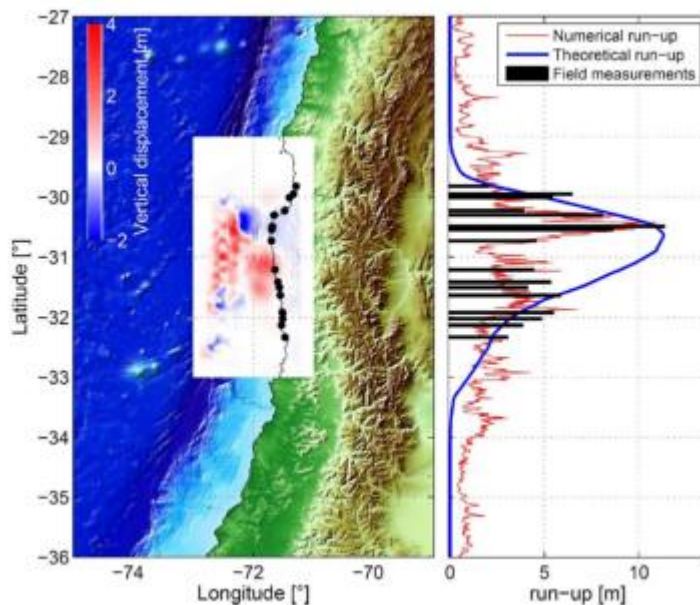
Durante el 2016 se ha finalizado la confección de una nueva solución matemática que entrega una rápida estimación de la altura de tsunami para el caso de una playa simple. Este resultado ha sido publicado en una clásica revista geofísica.

Por otra parte, se ha trabajado en reevaluar el potencial sísmico y tsunamigénico en la laguna sísmica en la región de Valparaíso.

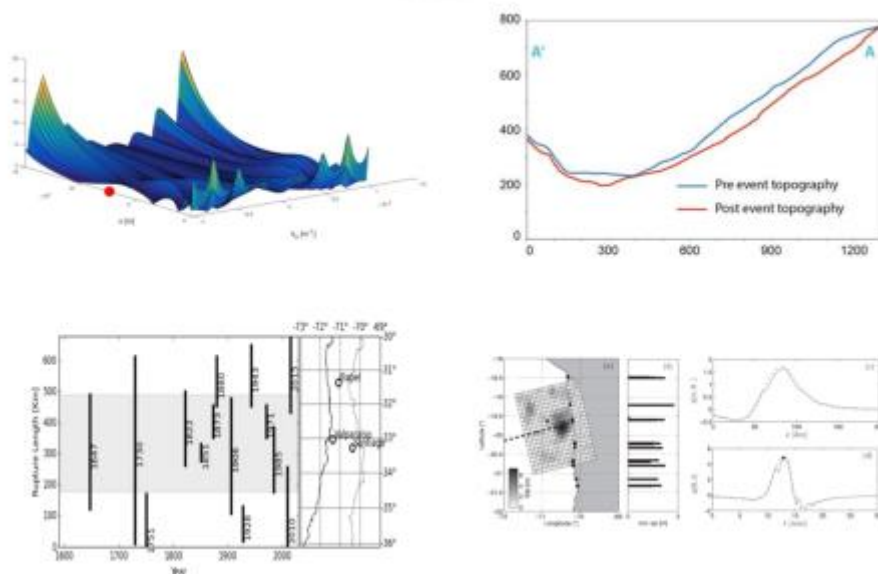
Publicaciones generadas:

Fuentes M., Riquelme S., Hayes G., Medina M., Melgar D., Vargas G., Gonzalez A., & Villalobos, A. *A Study of the 2015 Mw 8.3 Illapel Earthquake and Tsunami: Numerical and Analytical Approaches.* Pure and Applied Geophysics, 173(6), 1847-1858.

Fuentes, M. (2017). *Simple estimation of linear 1+1 D long wave run-up.* Geophysical Journal International, 209 (2): 597-605.



2016



Se están desarrollando dentro de la línea de tsunamis dos tesis de magister. Una está destinada al estudio de amplificaciones tardías de tsunamis producto de *edge waves*. La segunda, pretende desarrollar un modelo analítico para tsunamis de tipo *landslides*, los cuales son de interés nacional para las regiones australes con alta presencia de fiordos.

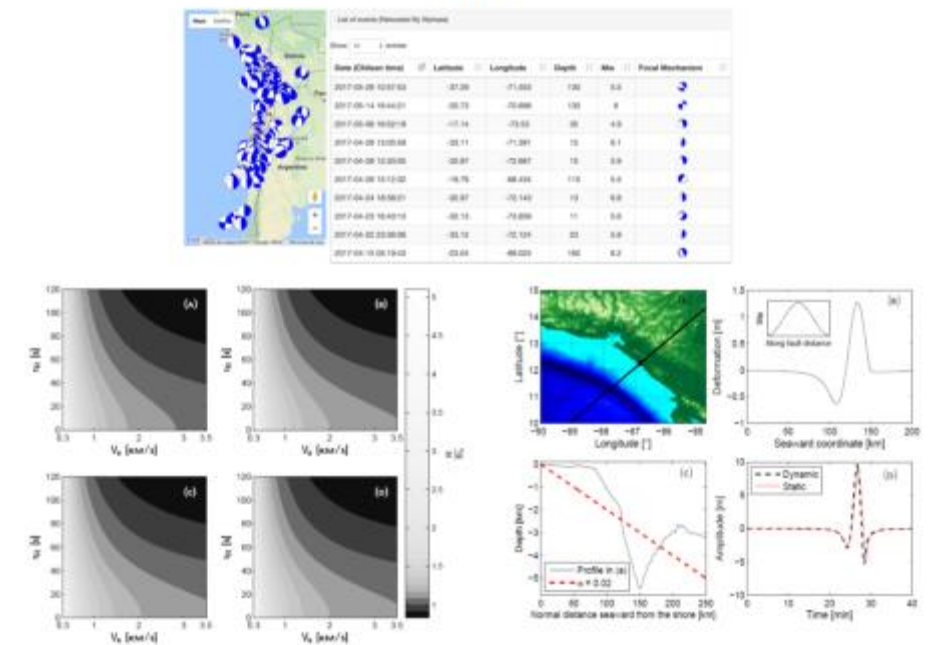
Proyecciones para el 2017:

Dentro del 2017, se preparará una nueva solución analítica con el fin de incluir términos de temporales de la fuente sísmica que podrían tener algún efecto en el proceso de run-up de un tsunami.

Se espera que las tesis antes mencionadas sean finalizadas. Una tercera tesis dará comienzo con el fin de estudiar la fase W n campo regional y el *run-up* en zonas de subducción.

Se pretende terminar y enviar para publicación el estudio asociado a la región de Valparaíso.

2017



Manuscritos por publicar:

Fuentes, M., Riquelme S., Ruiz J., & Campos J. (2017). *Implications on 1+1 D runup modeling due to time features of the source.* (En preparación).

Bravo, F., Fuentes, M., Riquelme, S., & Campos, J. (2017). *Slip distribution of the Chilean Earthquake of March 3, 1985 on the central Chile Seismic Gap.* (En preparación).

5. Línea Peligro Sísmico

Investigador responsable: Sergio Ruiz y equipo

Introducción

Durante los últimos 5 años Chile se ha visto afectado por grandes terremotos Iquique 2014, Mw 8.2; Illapel 2015, Mw 8.3 y Chiloé 2016. Estos terremotos han causado daños importantes en infraestructura y han sido bien registrados por instrumentos de movimiento fuerte del Centro Sismológico Nacional. Dentro del contexto andino en la frontera de Perú-Brasil ocurrieron en un corto periodo de tiempo dos terremotos de magnitud Mw 7.5 y Mw 7.6 a gran profundidad. Además de estos grandes terremotos diariamente en Chile se registran más de 10 eventos de magnitud mayor a MI 2.5. Todo esta sismicidad genera un importante peligro sísmico que esta línea aborda de diferentes formas.

Se ha caracterizado la sismicidad de Chile en un contexto andino para estimar el peligro sísmico. Luego se han realizado estudios de la fuente sísmica de los últimos grandes terremotos. Se ha caracterizado el efecto de sitio que amplifica la señal emanada de la fuente sísmica. Se ha obtenido un tomografía preliminar de la cuenca de Santiago y se ha re-estudiado terremotos históricos en particular los terremotos de Valdivia del 21 de Mayo de 1960 Mw 8.1 y el más grande registrado en el mundo del 22 de Mayo de 1960 Mw9.5.

De esta forma se han obtenido los siguientes productos:

- Caracterización de la fuente sísmica de Terremotos
- Metodología para la caracterización de suelos
- Tomografía preliminar de Santiago
- Programa de simulación de movimiento Fuerte
- Metodología de simulación de movimiento fuerte para terremotos máximos creíbles

Estos productos están asociados a líneas de trabajo que continuarán desarrollándose para mejorar los resultados obtenidos hasta el momento.

Caracterización de la fuente sísmica de Terremotos

Durante el periodo 2016- 2017 Se han estudiado los siguientes terremotos:

- Illapel 2015, Mw 8.3 (Ruiz et al., 2016; Poli et al., 2016). Figure 1.
- Perú-Brasil terremotos doble, Mw 7.5 y Mw 7.6 (Ruiz et al., 2017a), Figure 2.
- Chiloé 2016, Mw 7.6 (Ruiz et al., 2017b), Figure 3.

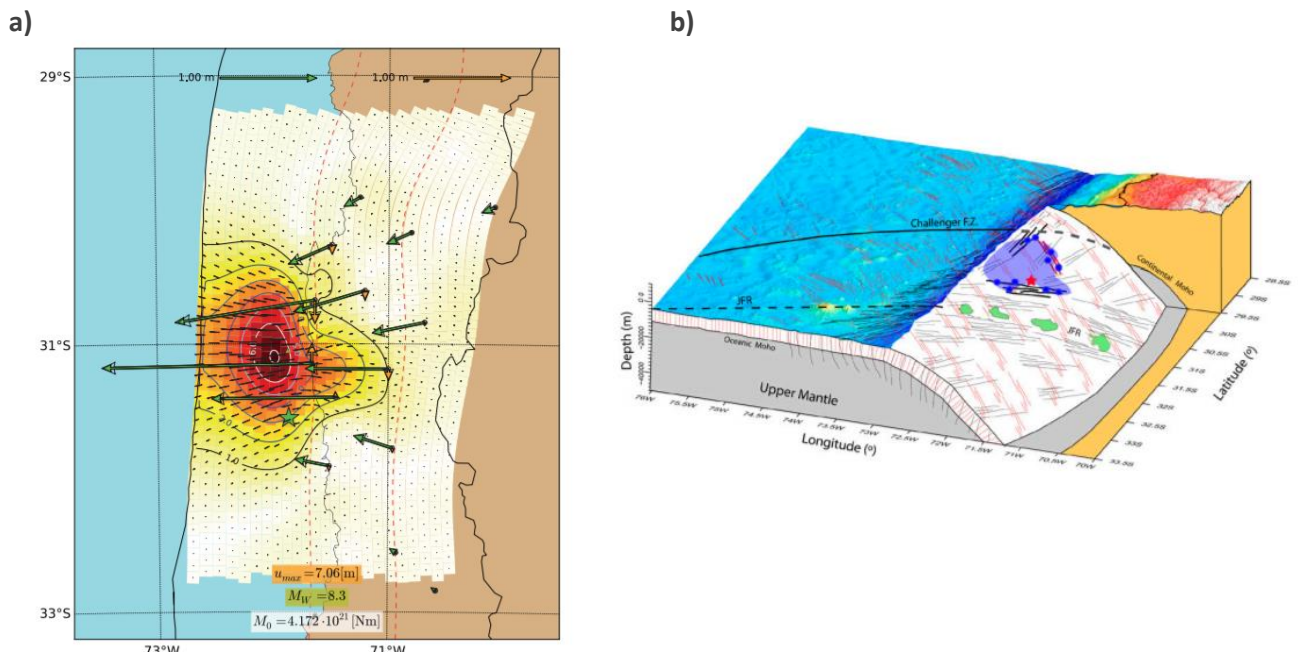


Figure 1. a) Distribución de deslizamiento del terremoto de 2015 Illapel, invertida a partir de desplazamientos GPS estáticos (diferencia entre el 17 de septiembre y el 16 de septiembre) que muestra la discretización utilizada en este trabajo (modificada de Ruiz et al., 2016). **B)** Modelo conceptual de las estructuras hidratadas y sismicidad en el límite interplaca. Está figura presenta una visión hipotética desde el sureste. La estrella roja es el epicentro del terremoto de Illapel (Chile), los círculos azules ejemplifican la sismicidad tipo repeater y los enjambres, y el área azul representa la zona de ruptura asociada al terremoto Mw 8.3. En la placa subductada, las líneas rojas son las estructuras generadas durante la formación de la losa, y las líneas negras muestran las fallas generadas en la zona de subida exterior. Según el modelo, algunas de estas estructuras (líneas en negrita) liberan fluidos al contacto, favoreciendo la generación de enjambres y

repetidores. En particular, el terremoto de Illapel fue detenido al sur por algunas de estas estructuras hidratadas, paralelas a la dirección de Juan Fernández (JFR). F.Z.-zona de fractura (modificada de Poli et al., 2016).

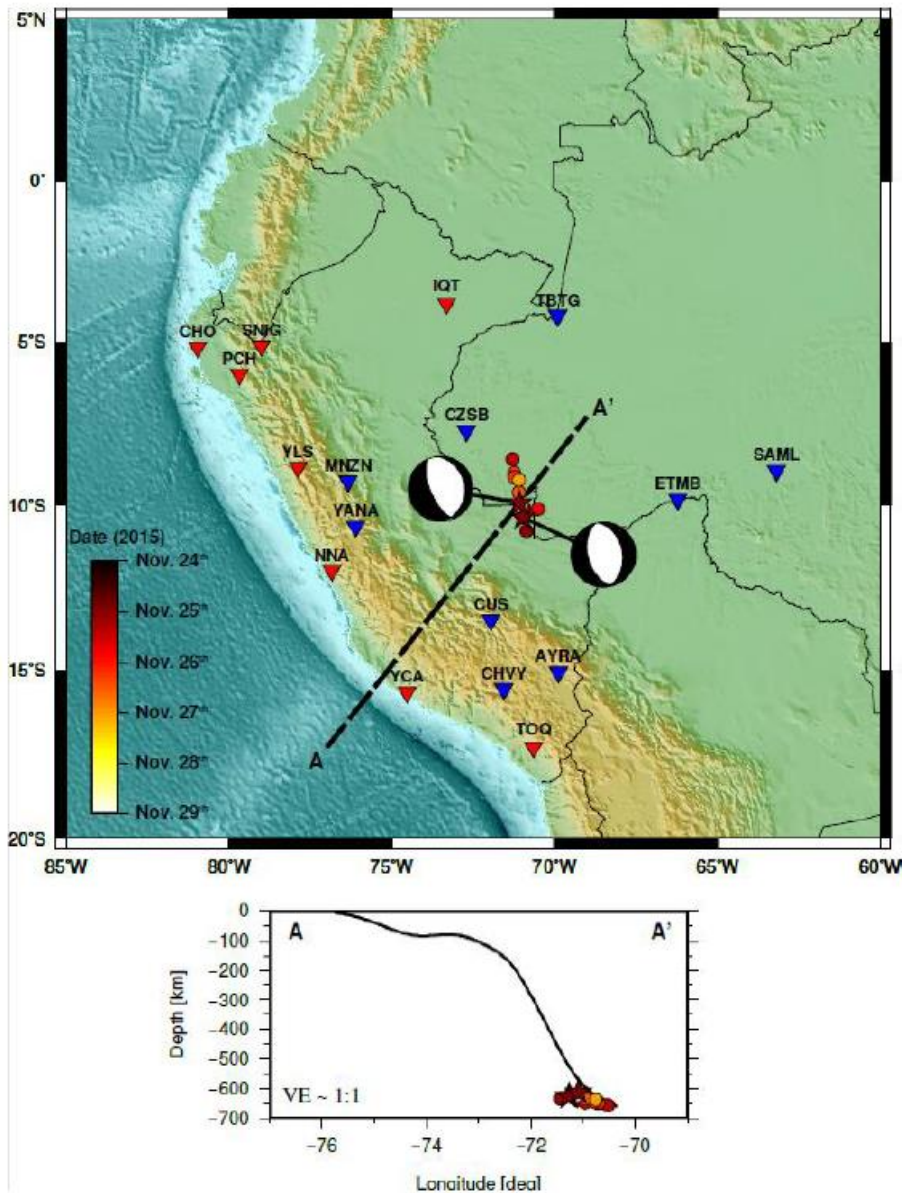


Figura 2. Datos sísmicos regionales utilizados para estudiar el doblete 2015 en Perú. Los triángulos invertidos son los instrumentos regionales de banda ancha de las redes sísmicas peruanas y brasileñas. Los triángulos azules invertidos se utilizaron en la inversión cinemática y todos ellos se utilizaron para calcular la localización de las réplicas. Los puntos son las réplicas localizadas en este trabajo. Figura inferior, perfil vertical a lo largo del perfil AB que se muestra en el panel A. Los puntos son las réplicas del doblete profundo de Perú, las estrellas corresponden el hipocentro de

los dos choques principales. La línea continua es la losa modelada por Hayes et al. (2012). Los mecanismos focales son los de los dos eventos del doblete 2015. (USGS, Centro Nacional de Información sobre Terremotos, PDE). (modificada de Ruiz et al., 2017a)

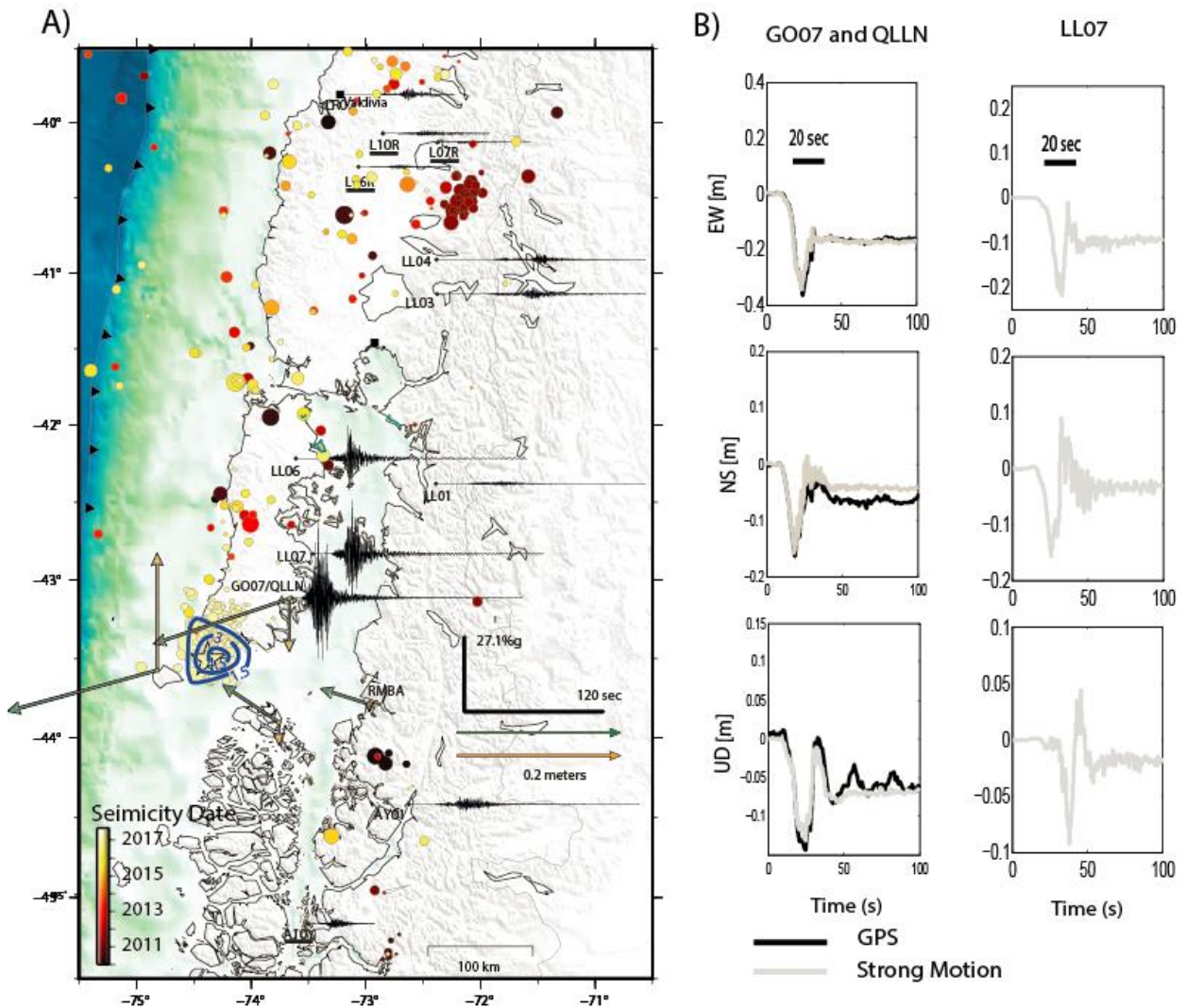
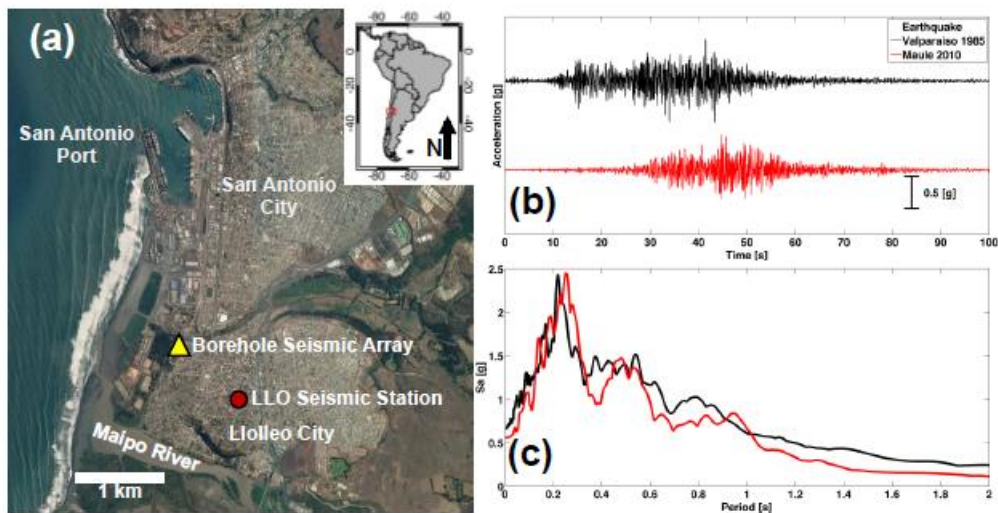


Figura 3.A) Componentes EW de los registros de movimiento fuerte del terremoto de Chiloé de 2016 Mw 7.6 y desplazamiento estático co-sísmico de estaciones GPS QLLN y RMBA. Los nombres de código no subrayados identifican estaciones en tiempo real que fueron utilizadas en la determinación de hipocentros por CSN y agencias internacionales. Los nombres de código de las estaciones subrayadas son acelerógrafos desencadenados. Los puntos de color corresponden a la sismicidad reportada por CSN desde 2010 hasta el 31 de enero de 2017, la estrella amarilla es la localización de choque principal. Las réplicas se agrupan en un círculo de ~ 25 km de radio en el extremo suroeste de la isla de Chiloé. Las líneas azules de iso-contorno de 1,5, 3 y 4,5 metros

muestran el resultado de la inversión geodésica-deslizamiento de Chiloé Main-shock. B) GO07 y LL07 muestran acelerogramas doblemente integrados utilizando el procedimiento de Boore [2001]. Los desplazamientos calculados en GO07 se comparan con la serie temporal QLLN GPS. Las barras de 20 segundos destacan la duración del movimiento fuerte en estos registros. (modificada de Ruiz et al., 2017b)

Metodología para la caracterización de suelos

Durante este período se estudio la respuesta sísmica de el único downhole instrumentado que existe en Chile y que se ubica en la ciudad de Lolleo. Los análisis de estos datos han permitido caracterizar una metodología de estimación de la amplificación de suelos, para el caso de suelo con capas rígidas ocultas, Figura 4.



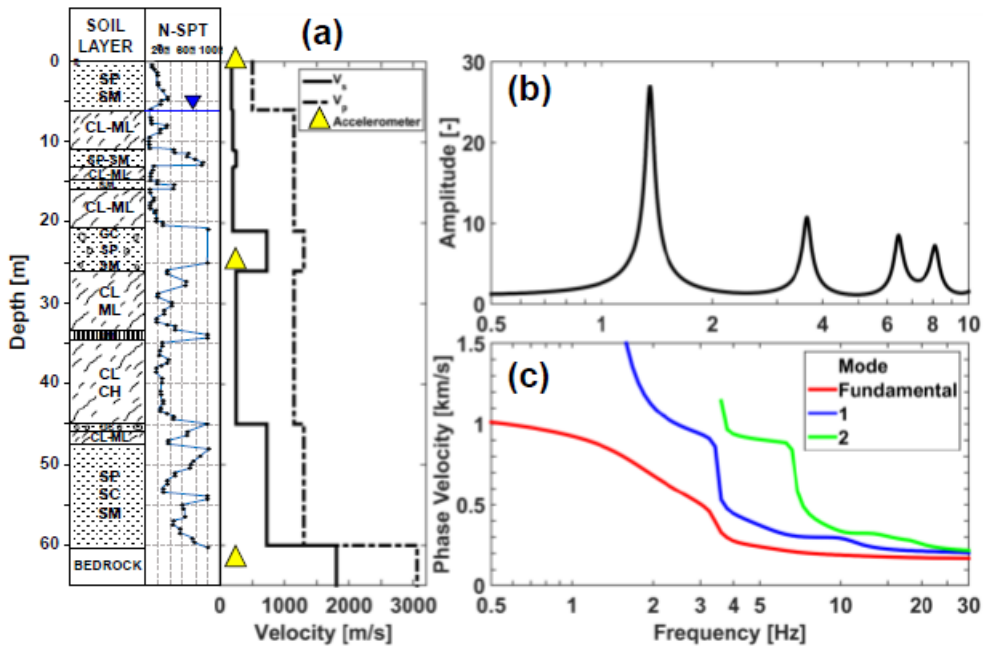
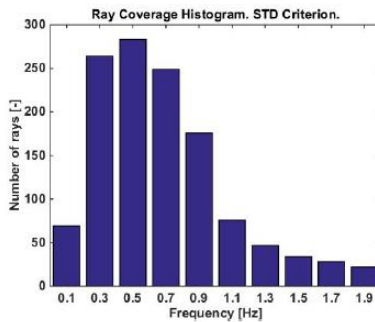
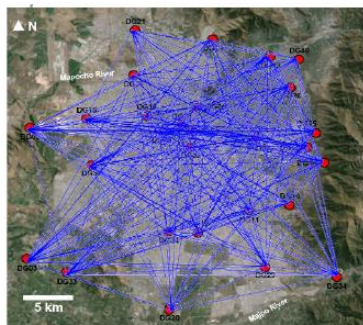


Figura 4. Panel Superior ubicación del downhole y registros obtenidos para los terremotos de 1985 y Maule 2010. Panel inferior, perfil de velocidad y función de transferencia. (Saez et al., 2017).

Tomografía preliminar de Santiago

Se ha desarrollado una metodología para la caracterización de las velocidades de onda de corte de cuencas en zonas de subducción. En particular se ha obtenido una tomografía preliminar para la cuenca de Santiago, Figura 5.



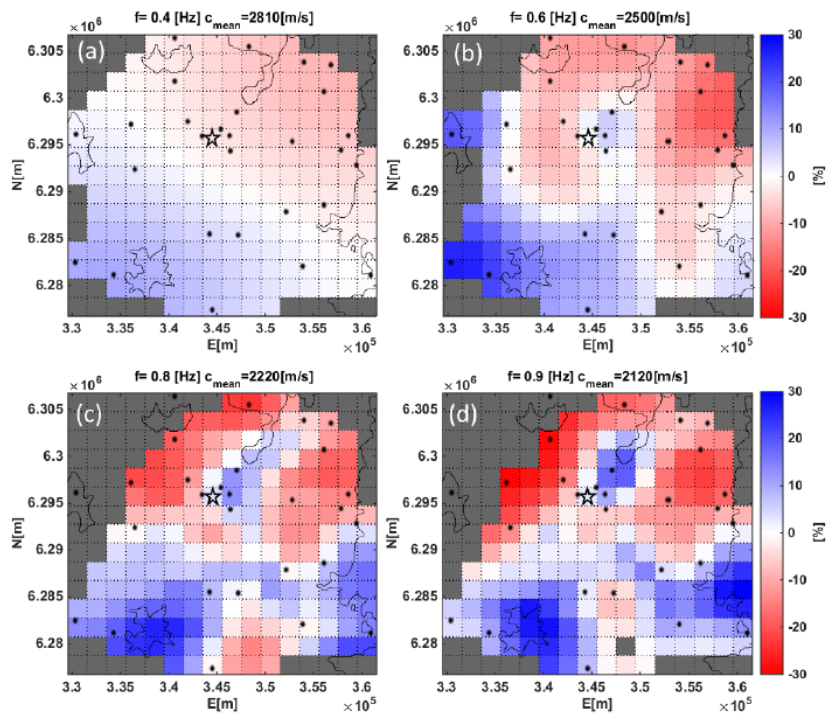


Figura 5. Panel Superior. Cantidad de rayos utilizados en la inversión. Panel inferior variaciones de velocidad de fase para distintas frecuencias.

Programa de simulación de movimiento Fuerte

Se ha desarrollado un nuevo método de simulación de registros de movimiento fuerte. Que incorpora el tipo de suelo por medio de su función de transferencia, Figura 6.

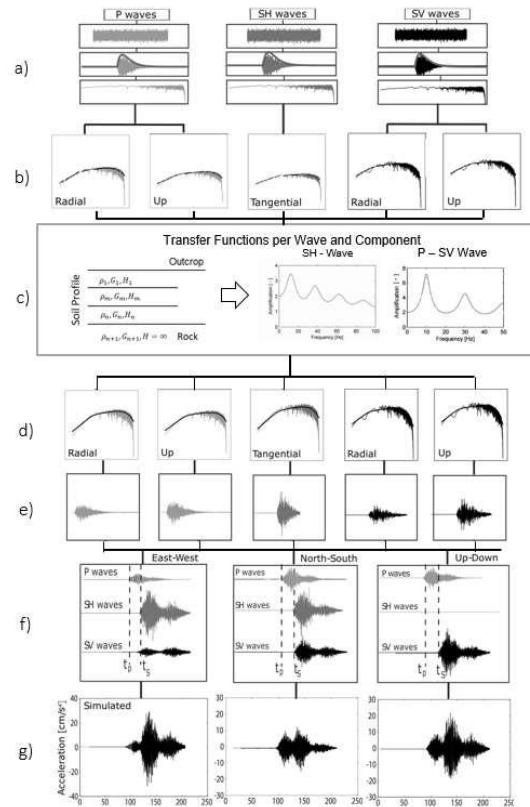


Figura 6. Esquema de simulación de acelerogramas artificiales. Está es una propuesta de simulación nueva desarrollada en el programa de riesgo sísmico, la cual permitirá reproducir el movimiento fuerte de terremotos en distintos sitios y para distintos tipos de suelo.

Metodología de simulación de movimiento fuerte para terremotos máximos creíbles

Se ha trabajado extensamente en este tema, en este momento nuestra metodología se está calibrando para los casos de los terremotos de 1960 de Valdivia, lo cual incluye el terremoto del 21 de Mayo Mw 8.1 y el terremoto más grande registrado del mundo el ocurrido el 22 de mayo de 1960, Mw 9.5, Figura 7.

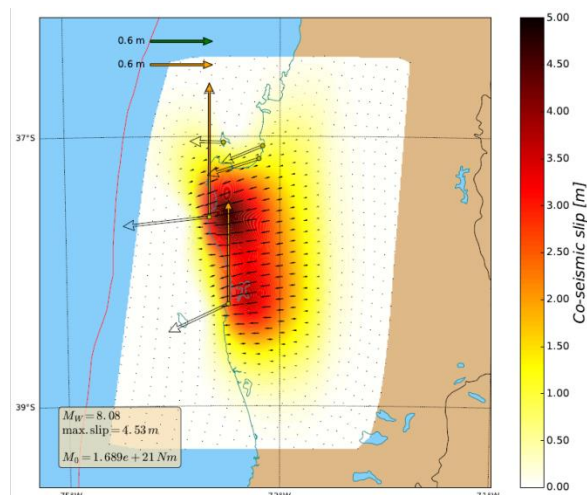


Figura 7. Inversión de desplazamiento preliminar del terremoto del 21 de Mayo de 1960.

Gran parte de este trabajo ha sido plasmado en publicaciones, las más destacadas se presentan a continuación (publicaciones de los años 2016 a 2017):

Ruiz, S., Moreno, M., Melnick, D., del Campos, F., Poli, P., Baez, J.C., Leyton, F. and Madariaga, R. (2017). Reawakening of large earthquakes in South-Central Chile: The 2016 Chiloé Mw7.6 event. *Geophysical Research Letter*.

Herrera, C., Ruiz, S., Madariaga, R., Poli, P. (2017). Inversion of the dynamic parameters of the 2015 Jujuy intermediate depth earthquake, and their values compared with other intraslab earthquakes. *Geophysical Journal International* doi:10.1093/gji/ggx056

Poli, P., Maksymowicz, A. and Ruiz, S.. (2017). The Mw8.3 Illapel earthquake (Chile): Preseismic and postseismic activity associated with hydrated slab structures. *Geology* doi:10.1130/G38522.1

Idini, B., Rojas, F., Ruiz, S., Pastén, C. (2017). Ground motion prediction equations for the Chilean subduction zone. *Bulletin of Earthquake Engineering* doi: 10.1007/s10518-016-0050-1

J Salomón, M Sáez, C Pastén, S Ruiz, F Leyton, Ortega, F., 2017. Ambient Seismic Noise Tomography of Santiago Basin: Preliminary results. 16WCEE.

Otarola, C. and Ruiz, S., (2016). Generation of accelerograms in three components for subduction zone earthquakes using a stochastic method. *Bulletin of the Seismological Society of America*. Vol. 106, No6, doi: 10.1785/012015026

Leon, S., Ruiz, S., Maksymowicz, A., Leyton, F., Fuenzalida, A., Madariaga, R. (2016). Diversity of the Iquique's foreshocks and aftershocks: A clue about the complex rupture process of a Mw 8.1 earthquake. *Journal of Seismology*. DOI 10.1007/s10950-016-9568-6

Ruiz, S., Klein, E., del Campo, F., Rivera, E., Poli, P., Metois, M., Vigny, C., Baez, J.C., Vargas, G., Leyton, F., Madariaga, R., Fleitout, L. (2016) The seismic sequence of the 16 September 2015, Illapel Mw 8.3 earthquake. *Seismological Research Letter*. DOI: 10.1785/0220150281



PROGRAMA DE RIESGO SÍSMICO



UNIVERSIDAD DE CHILE

Madariaga, R. and Ruiz S. (2016). Earthquake dynamics: a review 1970-2015. *Journal of Seismology*. DOI 10.1007/s10950-016-9590-8

Poli, P., Prieto, G., Rivera E. and Ruiz S. (2016). Earthquakes nucleation and thermal shear instability in the Hindu-Kush intermediate-depth nest. *Geophysical Research Letter*. DOI:10.1002/2015GL067529

Pasten, C., Saéz, M., Ruiz, S., Leyton, F., Salomón J. and Poli. P., (2016). Deep Characterization of the Santiago Basin using cross-correlation of ambient seismic noise. *Engineering Geology*, 201, 57-66, doi:10.1016/j.enggeo.2015.12.021.

6. Línea Caracterización geofísica de la Cuenca de Santiago para la estimación de riesgo sísmico

Investigadores responsables: Sergio Contreras, Emilio Vera y equipo NGA

El Núcleo de Geofísica Aplicada (NGA) es un grupo de especialistas geofísicos del más alto nivel técnico, constituido por investigadores con un amplio rango de intereses científicos y una formación común a nivel del Doctorado y Magíster. Estos profesionales realizan investigaciones en el área de la geofísica aplicada y colaboran en proyectos multidisciplinarios, a la vez que se dedican a generar nuevos métodos, modelos, algoritmos y software, para ampliar la aplicación de la geofísica en sectores industriales altamente prioritarios en Chile, tales como el minero y energético.



Camino recorrido 2015 – 2016

- **“CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA DE LA CUENCA DE SANTIAGO PARA LA ESTIMACIÓN DE RIESGO SÍSMICO”**, desarrollado por el Núcleo de Geofísica Aplicada (NGA), durante el 2015 y 2016, para el Programa de Riesgo Sísmico (PRS) del Departamento de Geofísica (DGF) de la Universidad de Chile.
- El principal resultado del proyecto corresponde a un **PRIMER MODELO GEOFÍSICO DE LA CUENCA DE SANTIAGO** que describe su morfología y la señal geoléctrica del relleno sedimentario y el basamento subyacente.
- **BASES DE DATOS GEOFÍSICOS DE LA CUENCA DE SANTIAGO** (sísmica de refracción, gravimetría, resistividad eléctrica (TEM, ERT y SEV)) y datos de contexto (geología y pozos (geotecnia y profundidad de napa))

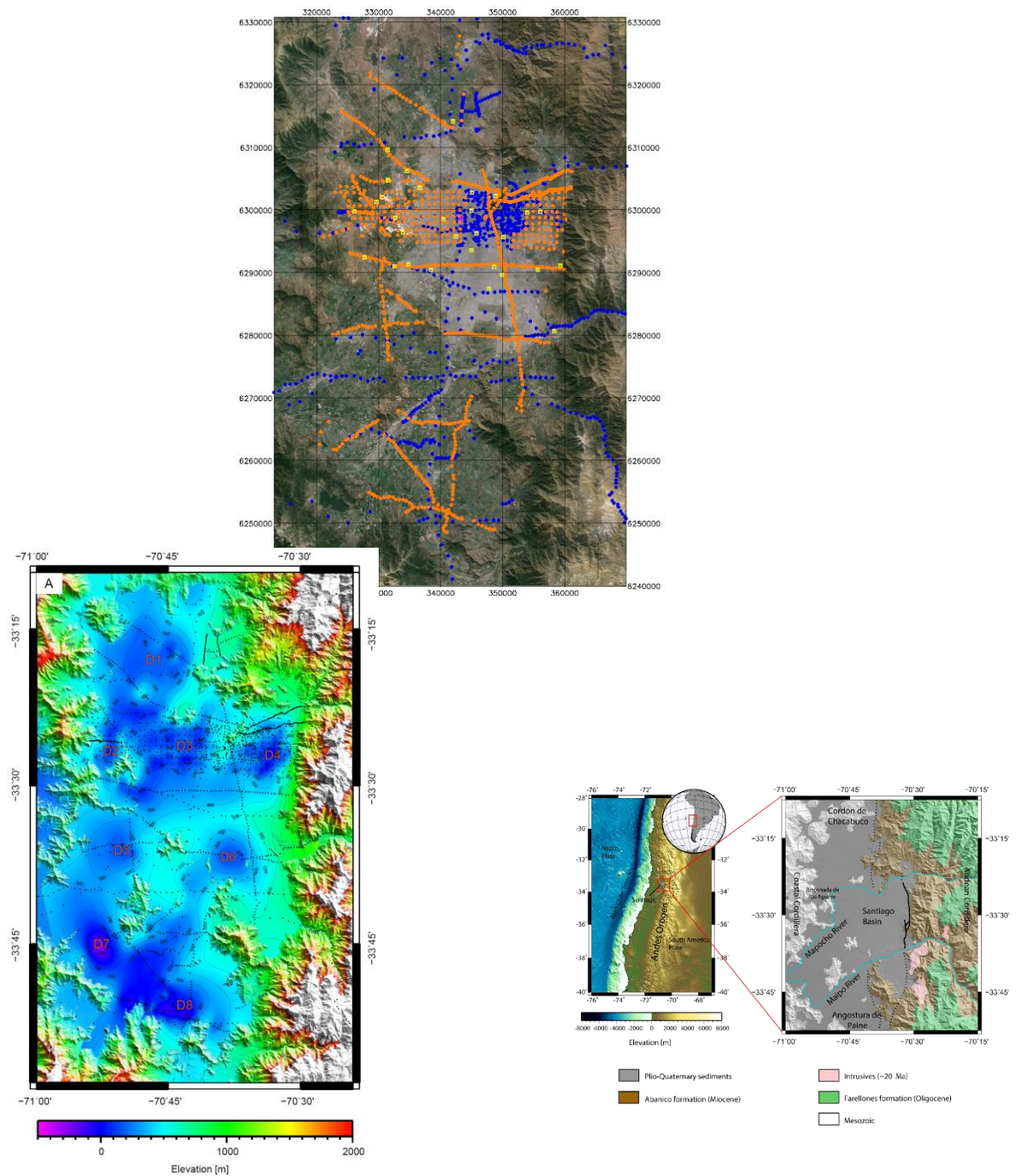
Characterization of the depocenters and the basement structure, below the Central Chile Andean fore-arc: a 3D geophysical modeling in Santiago basin area.

F. González^{2*}, A. Maksymowicz^{1,2}, D. Diaz^{1,2}, L. Villegas², M. Leiva², B. Blanco², E. Vera^{1,2}, S. Contreras², D. Cabrera², S. Bonvalot³

⁽¹⁾ Departamento de Geofísica, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile

⁽²⁾ Núcleo de Geofísica Aplicada, Departamento de Geofísica, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.

⁽³⁾ Géosciences Environnement Toulouse, Observatoire Midi-Pyrénées, Toulouse, France.



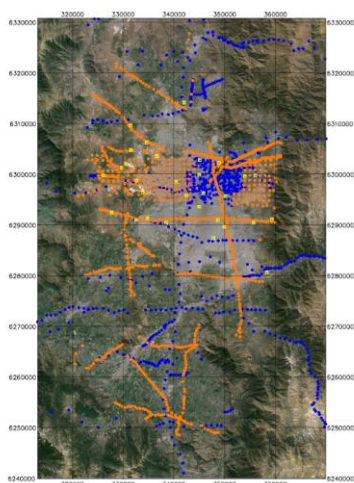


Figura 2. Datos de gravedad y TEM.

Los puntos de color azul representan mediciones gravimétricas compiladas desde fuentes de información pública. Los puntos de color naranja y rectángulos de color amarillo representan datos de gravedad y TEM, respectivamente, medidos por el NGA durante el año 2015 - 2016.

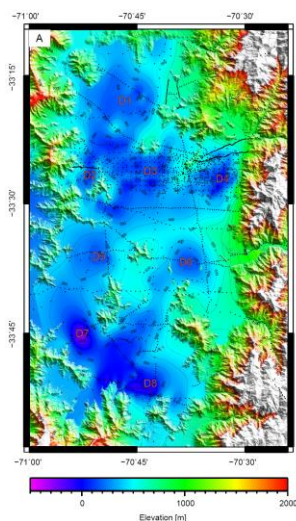


Figura 3. Elevación de basamento.

En la figura los puntos de color negro corresponden a puntos de gravedad y las etiquetas D1 a D8 representan bajos topográficos del basamento.

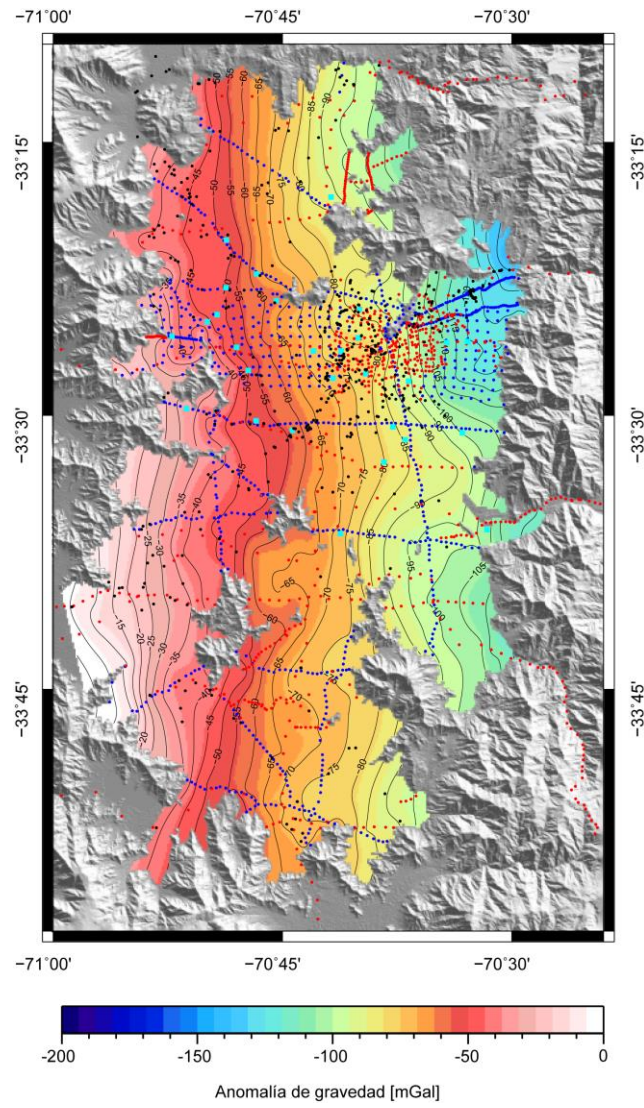
Cartera de proyectos 2017 – 2018

1. ESTUDIO DE CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA DE DETALLE DE LA CUENCA mediante el análisis de las siguientes variables:

- *Construcción de modelos de velocidad*, con profundidades objetivo de ~500 [m], mediante el análisis multicanal de dispersión ondas superficiales (MASW profundo).
- *Construcción de un nuevo modelo geofísico* incorporando modelos de gravedad 2-D y 3-D en la zonas de la cuenca de Santiago con baja densidad de información.

2. ESTUDIO FALLA SAN RAMÓN, UBICADA EN EL BORDE ORIENTE DE LA CUENCA.

1. Mapeo de la traza inferida de la FSR mediante la respuesta eléctrica del relleno sobre ella utilizando Tomografía de resistividad eléctrica.
2. Caracterizar la forma del techo del basamento subyacente en distintos lugares a lo largo de ella mediante un levantamiento gravimétrico con un diseño del experimento geofísico adecuado para el estudio de un falla somera.
3. **DISEÑO DE UN SISTEMA DE GESTIÓN WEB PARA LA BASE DE DATOS (BD) DE LA CUENCA DE SANTIAGO** con la información levantada durante el año 2017 (variables geofísicas y no geofísicas) e implementar funcionalidades y herramientas intuitivas que consulten (*queries*) y muestren datos de una manera que sea fácil de ver y analizar.
4. **DESDE UN MODELO GEOFÍSICO DE CUENCA HACIA UN MAPA DE PELIGRO SÍSMICO.** Desarrollo de un método para la construcción de un mapa de peligro sísmico en la cuenca de Santiago, que permita establecer las bases conceptuales y teóricas para la implementación efectiva de un estrategia futura en la construcción de un MPS.
5. **ESTUDIO DE CARACTERIZACIÓN DE LA CUENCA DE RANCAGUA PARA LA CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO GEOFÍSICO DE CUENCA.**



7. Assessing giant tsunamigenic earthquakes along the hyperarid Northern Chile seismic gap in the last millennia.

Investigador responsable: Gabriel Vargas y equipo

FONDECYT-Regular #1161547, Investigador Responsable, 2016-2018.

Objective: The main goal of this project is to assess the recurrence of giant-extreme tsunamigenic earthquakes along the Northern Chile Seismic Gap in the last millennia.

8. Trayectoria histórica, cambios ambientales y eventos catastróficos durante el Período Arcaico en la costa de Taltal, norte de Chile.

Investigador responsable: Gabriel Vargas y equipo

FONDECYT-Regular #1151203, Co-Investigador, 2015-2018.

Objetivo: Determinar la relación entre episodios catastróficos, cambios culturales y resiliencia a escala milenaria en la costa hiperárida de Taltal, Norte Grande.

9. Monitoreo sísmico y Potencial Sismogénico de la Falla San Ramón. ONEMI-CSN-FCFM, 2016-2019.

Investigador responsable: Gabriel Vargas y equipo

Objetivo: Implementar el monitoreo sísmico permanente y evaluar el potencial sismogénico de la Falla San Ramón, en el borde este de Santiago.