

REVISTA

---

# GEOFÍSICA

---

---

Instituto Panamericano de Geografía e Historia

---



NÚMERO 66

ENERO-DICIEMBRE 2016

**AUTORIDADES DEL  
INSTITUTO PANAMERICANO DE GEOGRAFÍA E HISTORIA  
2018-2021**

<b>PRESIDENTE</b>	Lic. Israel Sánchez	<i>Panamá</i>
<b>VICEPRESIDENTE</b>	Mág. Alejandra Coll	<i>Chile</i>
<b>SECRETARIO GENERAL</b>	Mág. César Rodríguez	<i>Uruguay</i>

---

**COMISIÓN DE CARTOGRAFÍA**

(Costa Rica)

Presidente:

Mág. Max Lobo

Vicepresidente:

Mág. Álvaro Antonio Álvarez

**COMISIÓN DE HISTORIA**

(México)

Presidenta:

Dra. Patricia Galeana Herrera

Vicepresidente:

Mtro. Rubén Ruíz

**COMISIÓN DE GEOGRAFÍA**

(Estados Unidos de América)

Presidenta:

Dra. Patricia Solís

Vicepresidenta:

Geóg. JeanW. Parcher

**COMISIÓN DE GEOFÍSICA**

(Ecuador)

Presidente:

Dr. Mario Ruiz

Vicepresidente:

Dra. Alexandra Alvarado

---

**MIEMBROS NACIONALES DE LA COMISIÓN DE GEOFÍSICA**

Argentina	Ing. Alejandro Próspero Guiliano
Belice	Mr. Stanislaus Martinez
Bolivia	Tcnl. DIM Arturo Echalar Rivera
Brasil	Dr. Sergio Luis Fontes
Chile	Dr. Sergio Barrientos Parra
Colombia	María Teresa Martínez Gómez
Costa Rica	Géol. Gilfredo Rojas Quesada
Ecuador	Dr. Mario Ruiz
El Salvador	Ing. José Antonio Hernández Magaña
Estados Unidos	Dr. José V. Bajo Sanchez
Guatemala	Sr. Eddy Hardie Sánchez Bennet
Haití	
Honduras	Ing. Manrique Yu Way
México	Dr. Hugo Delgado
Nicaragua	M. Sc. Fabio Segura
Panamá	Luis E. Santamaría
Paraguay	Dr. Juan Carlos Velázquez
Perú	Dr. Juan Carlos Villegas Lanza
Rep. Dominicana	Eugenio Polanco Rivera
Uruguay	Cnel. Héctor Rovera
Venezuela	Ing. Gustavo Malavé

---

**COMITÉS DE LA COMISIÓN DE GEOFÍSICA**

Comité de Desastres Naturales

Comité de Cambio Climático

Comité de Geofísica Aplicada y Estudios Especiales

---

Instituto Panamericano de Geografía e Historia

---

REVISTA

# GEOFÍSICA



*NÚMERO 66*

*ENERO-DICIEMBRE 2016*

# INSTITUTO PANAMERICANO DE GEOGRAFÍA E HISTORIA

## COMISIÓN DE GEOFÍSICA

**Presidente:** Dr. Mario Ruiz Romero

*Instituto Geofísico, Escuela Politécnica Nacional, Ecuador*

**Vicepresidente:** Dra. Alexandra Alvarado Cevallos

*Instituto Geofísico, Escuela Politécnica Nacional, Ecuador*

## REVISTA GEOFÍSICA

Publicación fundada en 1971

Indizada en PERIÓDICA

Es distribuida en canje a las instituciones científicas y culturales

Para correspondencia científica y técnica dirigirse a los editores de la *Revista Geofísica*:

### J. Esteban Hernández-Quintero

*Instituto de Geofísica*

*Universidad Nacional Autónoma de México,*

*Circuito de la Investigación Científica s/n*

*Ciudad Universitaria, Deleg. Coyoacán, 04510 Ciudad de México*

*Correo electrónico: geofisica\_editor@ipgh.org*

### Comité Editorial

Gerardo Cifuentes (Instituto de Geofísica, UNAM, Campus Morelia, México)

Norma Sánchez Santillán (Universidad Autónoma Metropolitana-Xochimilco, CDMX)

Silvia Miranda (Universidad Nacional de San Juan, Argentina)

Ayelen Pereira (CONICET, Argentina)

David Escobedo (Facultad de Ingeniería, UNAM, México)

Luiz Benyosef (Observatorio Nacional de Río de Janeiro, Brasil)

Manuel Araneda (SEGMI, Chile)

Ana Caccavari Garza (Instituto de Geofísica, UNAM, México)

Jorge V. Bajo Sánchez (Buffalo State College, EUA)

Canje, venta y distribución de publicaciones, escribir a:

Instituto Panamericano de Geografía e Historia

Secretaría General

Apartado Postal 18879, 11870, Ciudad de México

Teléfonos: (5255) 5277-5888, 5277-5791 y 5515-1910

Fax: (5255) 5271-6172

Correo electrónico: publicaciones@ipgh.org / www.ipgh.org

Las opiniones expresadas así como el contenido y forma en notas, informaciones, reseñas y trabajos publicados en la *Revista Geofísica*, son de la exclusiva responsabilidad de sus respectivos autores. Los originales que aparecen sin firma ni indicación de procedencia son de la Dirección de la Revista.

**Portada:** Escalera interna de la Pirámide de Kukulcán, durante un levantamiento geofísico en el año 2014.

**Cover:** Internal stairs of Kukulcan Pyramed during a geophysical survey in 2014.

© 2018 Instituto Panamericano de Geografía e Historia.

---

*Revista Geofísica*, núm. 66, enero-diciembre 2016, es una publicación anual editada por el Instituto Panamericano de Geografía e Historia, Ex-arzobispado núm. 29, Col. Observatorio, Delegación Miguel Hidalgo, C.P. 11860, Ciudad de México. Tels. (52-55)5277-5888, 5277-5791, 5515-1910, www.ipgh.org, publicaciones@ipgh.org. Editor responsable: M. Sc. Juan Esteban Hernández-Quintero, geofisica\_editor@ipgh.org. Reserva de Derechos al Uso Exclusivo núm. 04-2015-100913191800-102, otorgado por el Instituto Nacional del Derecho de Autor, ISSN 0252-9769. Versión digital, licitud de título y contenido: en trámite. Responsable de la última actualización de este número: Departamento de Publicaciones del IPGH, Ex-arzobispado núm. 29, Col. Observatorio, Delegación Miguel Hidalgo, C.P. 11860 Ciudad de México. Fecha de actualización: 15 de marzo de 2018.

Queda estrictamente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización del Instituto Panamericano de Geografía e Historia.

REVISTA  
**GEOFÍSICA**

NÚMERO 66

ENERO-DICIEMBRE 2016

---

Contenido

Nota Editorial	5
Editorial Note	6
<b>Artículos inéditos de investigación</b>	
<b>Hipotético peligro sísmico en la estructura Falla San Ramón, Chile Central</b>	9
<i>Manuel Araneda C. Álvaro Araneda A. María Soledad Avendaño R.</i>	
<b>Validación de la presión en Santiago como índice para estimar la actividad del anticiclón del Pacífico Sur</b>	25
<i>Arnobio Germán Poblete Paola Belén Monrroy</i>	
<b>Marco tectónico y su correlación con la hidrología las cuencas de Tongoy y Limari, Chile</b>	43
<i>Manuel Araneda C. Álvaro Araneda A. Eugenio Celedon C.</i>	
<b>Relevamiento geofísico para la provisión de agua subterránea a Santa Rita de Catuna, provincia de La Rioja, Argentina</b>	57
<i>Manuel J. Mamani Daniel E. del Moral</i>	
<b>Reportes técnicos</b>	
<b>El radar de penetración terrestre como una herramienta de geofísica somera, aplicado a la exploración arqueológica</b>	77
<i>Walter Antonio Flores G.</i>	

**Reseña de las estancias de trabajo paleomagnético en Nicaragua y México: adiestramiento para la resolución de problemas en tectónica de placas** 95

*Luis Manuel Alva Valdivia*

*Bernardo Ignacio García Amador*

*Greybin Josué Borge Castro*

*Elliet Pérez Romero*

*Xochilt Esther Zambrana Areas*

**Reseña**

**El mito y el electrodo** 109

*Magdalena Castro*

Instructivo para autores 111

## Nota editorial

En este número se presentan los trabajos desarrollados por grupos de trabajo de varios Países Miembros; Argentina, Chile y México. Es evidente la importancia del riesgo sísmico y su estimación para evaluar el grado de peligro en el que se ven involucrados países tales como Chile o México; entre otros. En los artículos publicados, se hace explícita la importancia descriptiva y analítica de cada fenómeno geofísico; en particular la actividad sísmica requiere de especial atención en áreas importantes de América. El intercambio de experiencias entre los investigadores y profesionales del continente, nos lleva a tomar acciones importantes de mitigación ante tales fenómenos.

Se abordan temas tales como los cambios en el clima, que afectan a todo el planeta. La estimación de la actividad de algunos fenómenos locales, como lo es el anticiclón del Pacífico Sur, permite evaluar la influencia de estos cambios globales sobre fenómenos de escala menor en nuestro planeta. No menos importantes son los estudios geofísicos, que tienen como fin, la búsqueda del recurso hídrico para algunas regiones en las Américas.

La riqueza de América desde el punto de vista arqueológico, permite desarrollar estudios originales y novedosos para la exploración de zonas particulares, con el fin de conocer de manera más cercana las culturas prehispánicas. Esto a su vez nos acerca a los profesionales en Historia y Arqueología quienes enriquecen el trabajo que da la expresión física del subsuelo. Esta interacción da por resultado un ensayo sobre el trabajo que desarrollan los geofísicos en el campo, desde otras perspectivas.

La política del Instituto Panamericano de Geografía e Historia de difundir el trabajo de los proyectos de colaboración entre distintos países miembros, debe fomentarse para explorar los alcances que tienen áreas de la geofísica cuando dos o más profesionales de la geofísica de distintos países extienden estos lazos de colaboración.

La riqueza de temas que se abordan en este número, puede dar una idea aproximada del quehacer de los investigadores y grupos de trabajo a lo largo de las Américas. Se puede ver reflejada asimismo una variedad de trabajos que son la expresión de los diversos fenómenos naturales que pueden ser abordados desde la geofísica.

El editor de la revista hace patente su agradecimiento a aquellos autores que han puesto su confianza en nuestro Comité Editorial para la publicación de su trabajo científico en la *Revista Geofísica*; esta es una herramienta indispensable para difundir el trabajo cotidiano que se desarrolla en las Américas; y no menos importante es el intercambio de las experiencias y las soluciones que se presentan en problemas dentro del ámbito de la geofísica.

J. Esteban Hernández-Quintero

*Editor*

## Editorial note

This issue describes the work developed by different working groups of several member countries, such as Argentina, Chile and Mexico. It is evident the importance of seismological risk in the involved countries such as Chile or Mexico; for example. The published articles in this number become very important in analytical and descriptive ways for the geophysical phenomena; mainly in earthquake activity which is very important in the Americas. The interchange of experiences among professionals and researchers in continental scales, result in important actions for mitigation of such natural phenomena.

Different subjects are discussed such as weather worldwide changes, and its influence over smaller areas, as the South Pacific Anticyclone. The importance of geophysical exploration in water surveying in the Americas is of high priority.

The America's heritage from the archaeological point of view, allows to develop original studies in geophysical exploration of specific areas, in order to know more closely the prehispanic cultures, professionals in History and Archeology enrich the work that gives the physical expression of the subsoil. This interaction results in an essay on the way that geophysicists work in the field, from other point of view.

The policy of the Pan American Institute of Geography and History (PAIGH) to spread the work of collaborative projects among different member countries should be encouraged to explore the scope of geophysical areas when two or more geophysicists from different countries extend such collaboration.

The topics addressed in this issue are a good approach of the subjects treated by researchers and working groups throughout the Americas. It can also be seen as a variety of tasks that show the expression of the natural phenomena studied from geophysics.

The editor is grateful to those authors who have placed their trust in our Editorial Committee for the publication of their scientific work in *Geofísica Magazine*; this is an indispensable tool to disseminate the daily work that takes place in the Americas; and no less important is the exchange of experiences and solutions that arise in problems within the field of modern geophysics.

Esteban Hernández-Quintero

*Editor*



# Artículos inéditos de **investigación**



## Hipotético peligro sísmico en la estructura falla San Ramón, Chile Central

Manuel Araneda C.\*

Álvaro Araneda A.\*\*

María Soledad Avendaño R.\*\*

*Recibido en febrero de 2016; aceptado en enero de 2017*

### Abstract

The structure known as San Ramón fault is located at the western edge of the Andes between Mapocho and Maipo rivers. The city of Santiago is located in this area, with an approximate population of 6 million people. The urbanization and population in this area have increased exponentially. With this information it has been possible to conduct several geological, geochronological and morphological surveys (Rauld 2002, Armijo *et al.* 2010, Vargas y Rebolledo 2012), which results are related to the existence of a geological unit called San Ramón fault. This fact would imply a seismic hazard for the city of Santiago in this area since this structure would be in a mature state. After analyzing the research that provides information on the bedrock underground morphology, seismicity related to the large seismic events occurred in the central zone of Chile (M 6.9–7.4) which have resulted in relevant surface deformations and masswasting movements related to ground slow or rugged gravitational displacements. Besides the statistical analysis of tectonic movement in Central Chile and new information on gravimetric profiles conducted in the alleged San Ramón fault, we can come to the conclusion that such structure is just a hypothesis and any future dynamic event associated with a seismic hazard is hard to be forecasted, which if occurring, it would be related to a tectonic event within the formation dynamics of the Andes.

It is important to highlight that the potential hazard existing in this zone is the one associated with eventual masswasting effect of occasional landslides that could be generated by relevant rainfall at the end of the most important ravines in the region: San Ramón, Apoquindo, Nido de Águila, Macul, among others.

*Key words: Seismic hazard, Earthquake, Fault, Geology.*

### Resumen

La estructura denominada falla San Ramón está ubicada en el borde oeste de los Andes entre los ríos Mapocho y Maipo. En dicho sector se encuentra la ciudad de Santiago con una población aproximada de 6 millones. Localmente en el sector

.....  
\* UBO, Universidad Bernardo O'Higgins.

\*\* SEGMI, Servicios Geofísicos en Minería e Ingeniería Ltda.

oriente la urbanización y su poblamiento han aumentado de forma exponencial. Estos antecedentes han permitido realizar una serie de estudios geológicos, geocronológicos y morfológicos (Rauld 2002, Armijo *et al.* 2010, Vargas y Rebolledo 2012) cuyos resultados han sido asociados a la existencia de una estructura geológica que ha sido denominada falla San Ramón. Este hecho implicaría según se indica un peligro sísmico para la ciudad de Santiago ya que dicha estructura se encontraría en un estado maduro. Analizando investigaciones que aportan antecedentes sobre la morfología del basamento rocoso, la sismicidad asociada a grandes eventos sísmicos ocurridos en la zona central de Chile (M 6.9–7.4) los cuales habrían generado deformaciones importantes en superficie y remociones en masa asociados a desplazamientos gravitacionales lentos o abruptos del terreno. Además del análisis estadístico de los movimientos tectónicos en Chile Central y nueva información de perfiles gravimétricos sobre la supuesta falla San Ramón se puede concluir que dicha estructura es solo una hipótesis y cualquier evento dinámico futuro asociado a un peligro sísmico es de difícil pronóstico, que de generarse, estaría relacionado a un evento tectónico en la dinámica de la formación de los Andes.

Se desea destacar que el peligro potencial existente en esta zona es aquel asociado a posibles remociones en masa de aluviones ocasionales que pueden generar las grandes precipitaciones a la salida de las quebradas más importantes de la región; San Ramón, Apoquindo, Nido de Águila, Macul y otras.

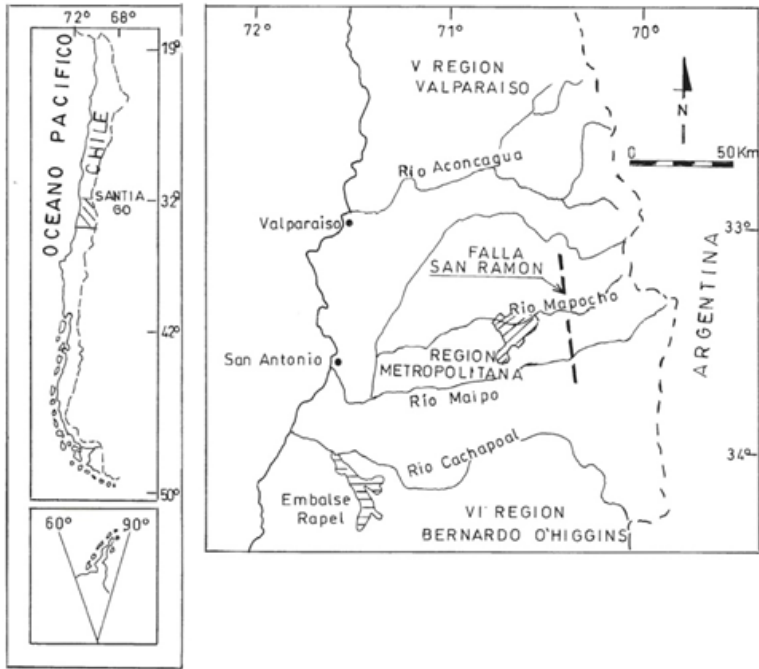
*Palabras clave: Riesgo sísmico, Terremotos, Fallas, Geología.*

## Introducción

La zona de estudio se ubica en el sector precordillerano de la ciudad de Santiago, entre los ríos Mapocho y Maipo, Figura 1. En ésta área existiría un peligro sísmico debido a una posible actividad de la denominada falla San Ramón, el cual se sustenta fundamentalmente en resultados geocronológicos, radiocarbono de sedimentos tipo grava con una matriz arenosa y antecedentes morfológicos de superficie tipo escarpes, los cuales demostrarían que el episodio tectónico habría ocurrido después de 2000 años y antes de los 8400 años calibrados AP que implica desplazamientos de varios metros a lo largo de la estructura (Vargas y Rebolledo 2012).

Adicionalmente estos autores sugieren que con estos antecedentes podría vincularse a un evento sísmico similar a una magnitud entre 6.9-7.4, el cual estaría en un estado de maduro. Para realizar una asociación de este tipo es necesario conocer otros parámetros de un terremoto, siendo los más importantes el epicentro, hipocentro, longitud de la ruptura y la estructura del suelo de la zona afectada, entre otros, aun así todavía la ciencia no tiene los elementos necesarios para predecir un evento de este tipo. Se destaca que en el área

investigada no existen antecedentes de desplazamientos estructurales producto de una actividad sísmica asociada.

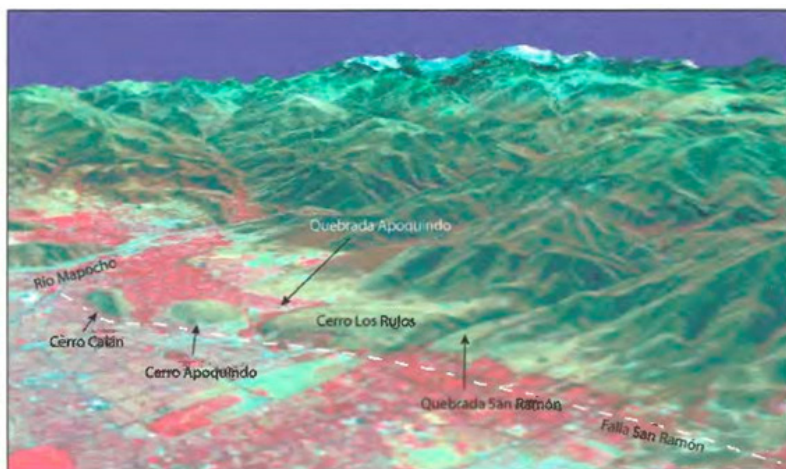


**Figura 1.** Mapa de ubicación de la zona de estudio la cual muestra la traza de la falla San Ramón.

La actividad de la falla San Ramón tendría su origen tectónico durante los últimos 2,200 años aproximadamente (Vargas y Rebolledo 2010). Por otra parte se supone que la actividad del sistema falla San Ramón-Pocuro sería menor que 5 Ma al norte de los Andes (Escribano 2008), información que indicaría que en la zona de estudio este sistema no tuvo actividad importante. De acuerdo a estos antecedentes se puede sustentar teóricamente que el área de interés tendría una actividad dinámica moderada según Slemmoss y Depolo (1966), caracterizándose tasas de deslizamientos de 0.1 mm/año a 1 mm/año. Esta conclusión se basa en afirmaciones de estos autores los cuales dicen que es posible esperar sismos de magnitud 7 en rangos de tiempo 100 a 10,000 años.

La data de los desplazamientos tectónicos posee márgenes de error muy significativo en la escala de tiempo geológico, por lo cual es muy complejo hacer

pronósticos de la existencia de un peligro sísmico asociado a la estructura falla San Ramón. Aún más, si no se tiene control riguroso de los desplazamientos relativos, movimientos del orden de milímetros o centímetros en la escala geológica pueden pasar desapercibidos.



**Figura 2.** Mapa de ubicación de la zona de estudio la cual muestra la traza de la falla San Ramón.

### Antecedentes morfológicos y geológicos

La zona estudiada se encuentra entre los ríos Mapocho y Maipo suscrito principalmente al borde oeste de los Andes cuya morfología es muy semejante a la existente al sur del paralelo 33° S en que se nota un fuerte cambio en las pendientes de los faldeos cordilleranos, aproximadamente 25° o más. Inmediatamente más al oeste se encuentran las planicies de la cuenca de Santiago, Figura 3, morfología que presenta profundas quebradas en su parte superior las cuales desaparecen en las planicies de la cuenca, teniendo los depósitos en esta zona un origen glacial (Karzulovic 1957). La formación final del piedemonte tiene un perfil típico en el cual los materiales más gruesos se localizan en las tierras más altas, aproximadamente hasta la cota 700 msnm. A partir de esta cota es posible reconocer algunos bloques y bolones, a veces facetadas que serían netamente de origen glacial, Figura 3.

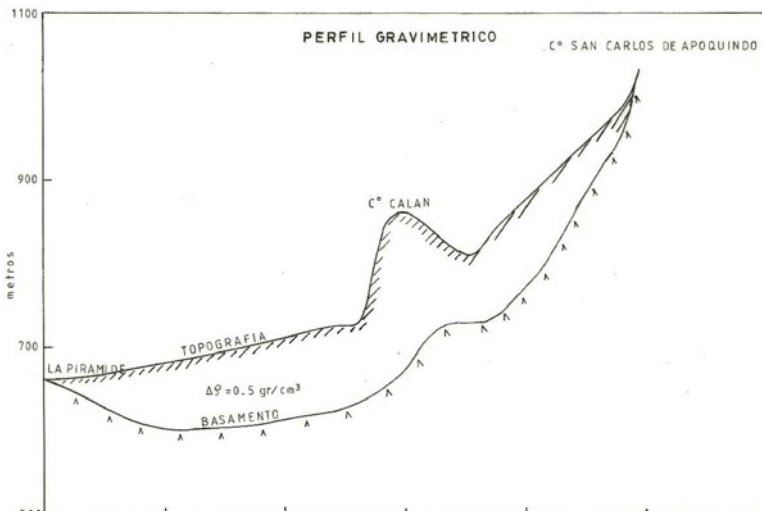
Pocos estudios globales se han realizado en el frente cordillerano de Santiago oriente no así con las interpretaciones de la morfología y depósitos cuaternarios que cubren el área los cuales describen en



DEPOSITO DE RELLENO		DEPOSITO DE RELLENO	
Qc	DEPOSITOS COLUVIALES Y CONOS DE DEYECCIÓN. Gravas mal seleccionadas y diamictos.	Qa1	DEPOSITOS DEL ABANICO ALUVIONAL DEL ESTERO LA ÑIPA. Gravas arenosas y arenas.
Qrm	DEPOSITOS DE REMOCIÓN EN MASA. Diamictos y bloques de rocas removidos.	Qa20	DEPOSITOS DEL ABANICO ALUVIONAL DEL RIO MAPOCHO. Gravas arenosas y arenas con intercalaciones de constantes de barro.
Qr	DEPOSITOS FLUVIALES ACTUALES. Gravas arenosas y arenas de los cursos actuales de los ríos. En la zona fluvial esta unidad incluye además depósitos fluviales subactuales (Qfa) y antiguos.	Qa1 Qa2 Qa3	DEPOSITO DEL ABANICO ALUVIONAL DEL RIO MAIPO. Sector 1: Gravas arenosas, avalanchas volcánicas y flujos piroclásticos. Sector 2: Gravas arenosas y arenas con flujo de barro y avalanchas volcánicas. Sector 3: Gravas arenosas con flujo de barro y avalanchas volcánicas.
Qta	DEPOSITOS FLUVIALES SUBACTUALES. Gravas arenosas y arenas de terrazas bajas laterales de los ríos.	Qa3	DEPOSITOS DEL ABANICO ALUVIONAL DEL RIO CLARILLO. Gravas arenosas-arcillosas y arenas.
Qfa	DEPOSITOS FLUVIALES ANTIGUOS. Gravas arenosas y arenas de terrazas medias y altas de los ríos.	Qa4	DEPOSITOS DEL ABANICO ALUVIONAL DEL ESTERO ESCORIAL. Gravas arenosas y coluvios.
Ql	DEPOSITOS LACUSTRES. Limos y arcillas laminadas a masivas en cuencas mal drenadas.	Qa5	DEPOSITOS DEL ABANICO ALUVIONAL DEL ESTERO ABRANTES. Gravas arenosas y coluvios.
Qal	DEPOSITOS DEL ABANICO ALUVIONAL DEL ESTERO LAMPA. Arenas derivadas de macizos graníticos lavados.	Qa6	DEPOSITOS DEL ABANICO ALUVIONAL DEL ESTERO ANOQUETURA. Gravas arenosas y arenas.
Qaco A B C	DEPOSITOS DEL ABANICO ALUVIONAL DEL ESTERO COLINA. Sector A: Gravas arenosas. Sector B: Arenas. Sector C: Lincorillitas.	Qcp	DEPOSITOS DE CENIZAS PUMICITAS. Ceniza rítilica con piedras pómez producida por flujo piroclástico (450 000 años Ap.).
ROCAS FUNDAMENTALES		ROCAS FUNDAMENTALES	
MT	ROCAS ESTRATIFICADAS VOLCÁNICAS Y SEDIMENTARIAS MESOZOICAS A Terciarias. Lavas, tobas y brechas andesíticas o rítilicas y lutitas, conglomeraos, areniscas y calizas.	Pg	CUERPOS INTRUSIVOS PALEOZOICOS. Tonalitas, icametas, granodioritas.
Kg	CUERPOS INTRUSIVOS PLUTONICOS MESOZOICOS A Terciarios. Granodioritas, tonalitas y adamantitas, andesitas y porfiro, antofitas y porfidos andesíticos y dioríticos.		

Figura 3. Mapa de ubicación de la zona de estudio la cual muestra la traza de la falla San Ramón.

forma extensa la morfología correspondiente a la comuna de Las Condes, al norte de la quebrada San Ramón y el sector de Macul ubicado al sur (Karzulovic 1957). Este autor también explica la morfología del frente cordillerano como resultado de depósitos glaciares, señalando que los cerros Calan y Apoquindo son accidentes topográficos producto de conglomerados de origen fluvial en la cumbre del primero y no observables en el segundo.



**Figura 4.** Perfil gravimétrico entre cerro San Carlos de Apoquindo y afloramientos de la Pirámide.

Referente a las capas de cenizas, las asoció a depósitos de acarreo, ricos en productos volcánicos observados en forma de depósitos aislados. Adicionalmente este autor menciona la existencia de un sondaje realizado por Corfo al oeste del cerro Calan y que cual alcanzó una profundidad de 50 metros lo cual está de acuerdo con observaciones gravimétricas (Araneda *et al.* 2012), Figura 4.

Otros autores (Brüggen 1950a) plantearon la existencia de una gran falla ubicada a los pies del cerro San Ramón basada en observaciones de la ladera oeste en que es posible encontrar una serie de vertientes termales. Tricart (1963, 1965), interpretó como morrenas las acumulaciones masivas de granulometría muy heterogénea con matriz fina limoarcillosa medianamente consolidada y grandes bloques dispersos en ella. Este autor intentó realizar un modelo estratigráfico definiendo cuatro edades para los materiales de relleno de la cuenca de Santiago, siendo los más antiguos los conglomerados. También expresó que la disposición del frente cordillerano es bastante uniforme entre las quebradas San Ramón y de Macul, y su relleno está compuesto por



depósitos de conglomerados que en algunos casos, presentan una cobertura de cenizas y depósitos aluviales en las desembocaduras de las quebradas. Es importante destacar de las observaciones de Tricart (1965), que los depósitos más antiguos se ubican en formas de terrazas escalonadas, topográficamente y más cercanas a la cordillera que las más jóvenes. Además señaló que los más antiguos se solevaron juntos en la precordillera. También el autor reconoció el contacto entre los depósitos más antiguos y los inmediatamente posteriores a estos como un escarpe que se puede seguir en toda la zona y que en algunos casos están cubiertos por conos aluviales provenientes de las quebradas. Esta última observación no necesariamente corresponde a la hipótesis de existencia de la falla San Ramón, Borde (1966) postuló la existencia de una falla al oeste del cerro San Ramón, esta estructura forma una gran muralla cuya longitud tiene aproximadamente 20 km y 2,000 m de altura, dicha morfología la asoció como falla de Pocuro en el sector norte y falla San Ramón en el sector sur, y que aún se ha mantenido activa durante el Plioceno, o por lo menos hasta el inicio de la glaciación en el Cuaternario (Rauld 2002), posteriormente Naranjo y Varela (1996) ubican a los pies de los Andes occidentales, depósitos de remoción en masa compuestos por bloques angulosos de diámetros heterogéneos en una matriz de limo, arena y arcilla sin estratificación. Dichos depósitos se encuentran en el curso medio de las quebradas de Macul y San Ramón conformando el relieve de los cerros Calan y Apoquindo. Los Rulos y la Cabrería, cuyas potencias mínimas serían de 200 m al norte del extremo superior de la quebrada de Macul, en quebrada Nido de Águila y en la zona del parque Peñalolen. Estos mismos autores interpretan estos fenómenos como eventos catastróficos, los cuales no los describen. Antecedentes morfológicos puntuales son dados por la geofísica, Meinardus (1967) reconoció la roca fundamental en el cerro Los Piques. Araneda (2012) examinó la roca fundamental en los cierres de perfiles gravimétricos, cerro Los Piques, sector la Pirámide y cerro isla San Luis, en este caso fue estudiada la cuenca de Santiago en el sector oriente a una escala 1:25 000.

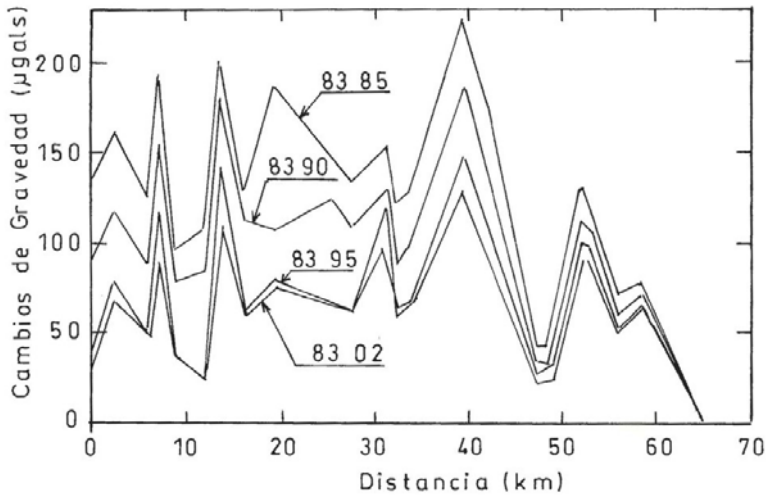
### **Sismicidad y deformaciones en Chile Central**

El área de los Andes centrales corresponde a un segmento de la placa sudamericana en la cual converge la placa de Nazca. Esta interacción produce grandes deformaciones diferenciales en la superficie del borde continental sudamericano.

El historial sísmico en Chile tiene una larga data, el resumen de ellos son proporcionados por Lomitz (1970). El sector que se analiza se encuentra ubicado en Chile Central entre las latitudes 33°-34° S, en dicha área la secuencia de sismos cuya magnitud es mayor de ocho, han ocurrido durante los años 1670, 1730, 1822, 1906, 1985 y 2010 en el borde sur del área los cuales presentan similitudes comunes como: ubicación epicentral costa afuera, solevantamientos en el sector de la costa, zona de ruptura mayor de 150 km y tsunamis relativamente pequeños en relación al tamaño de los sismos

(Barrientos y Kausel 1990). El único que se escapa de las similitudes es el ocurrido el año 1730, el cual tuvo una longitud de ruptura de 400 km acompañado por un tsunami de mayor dimensión.

Los primeros eventos sísmicos que tuvieron información detallada sobre solevantamientos y subsidencia mediante observaciones cualitativas fueron dadas por Graham (1824), que relata solevantamientos percibidos en el sismo del año 1822 frente a la costa de Valparaíso; éstos habrían sido 1.2 m en el sector de Quintero y 0.9 m en el sector de Valparaíso, Darwin (1851) informa de un solevantamiento ocurrido en la desembocadura del río Rapel durante el sismo del año 1835, el cual no fue cuantificado y Davison (1936) describe solevantamientos ocurridos durante el terremoto de 1906. Estos habrían sido entre 40 a 80 cm en el sector Pichilemu-Llico y Quintero-Zapallar y en Valparaíso del orden de 60 cm.



**Figura 5.** Cambios de la gravedad en el tiempo.

A los sismos descritos en 1670, 1730, 1822 y 1906 se les atribuyen desplazamientos verticales permanentes a lo largo de la costa, es decir, todos tienen signo positivo (solevantamientos) (Barrientos y Kausel 1990). Esta afirmación se sustenta en datos cualitativos observados en un lapso de tiempo posterior al evento sísmico, lo que significa que todos habrían tenido un comportamiento plástico, es decir, una deformación permanente, lo que no siempre sucede de acuerdo al seguimiento en el tiempo de la deformación

medida en el terremoto de 1985 ocurrido en Chile Central (Araneda y Avendaño 1991, 2006). Dicho evento fue controlado cada dos años mediante nivelación de primer orden y gravedad mediante 2 gravímetros, LaCoste Romberg en la línea de nivelación 2F, del Instituto Geográfico Militar (IGM). Este control permitió observar un comportamiento elástico de las estructuras litosféricas, Figura 5. Importa mencionar el sismo del 27 de febrero del 2010, ubicado en el extremo sur del segmento analizado, latitud 34° S, las deformaciones verticales y horizontales fueron detectadas mediante el sistema GPS y la técnica interferométrica, estas se presentaron mayormente en el borde costero.

Todos los antecedentes de deformaciones históricas asociadas a eventos sísmicos ocurridos en Chile Central cuya magnitud es  $\geq 7$ , se han manifestado principalmente en el borde costero. En la actualidad esto está cambiando debido al advenimiento del sistema GPS y la técnica interferométrica. Lo que se observa frecuentemente al interior del continente son daños en las edificaciones asociadas fundamentalmente al tipo de suelo y la calidad de la edificación. No existe ningún antecedente de deformaciones en los Andes occidentales que puedan atribuirse a un peligro sísmico entre el río Mapocho y río Maipo.

### **Procesos gravitacionales de remoción en masa**

Estos procesos son bastante significativos en áreas de fuertes pendientes como los Andes centrales. Ellos proporcionan información sobre la morfología actual considerando el carácter recurrente y el grave daño que pueden ocasionar. Estas remociones en masa gravitacionales están asociadas a la interacción en el tiempo y el espacio de una serie de factores, tales como geográficos, orográficos, climáticos, hidrológicos, geológicos y tecnológicos (Hauser 1993). Sus mecanismos iniciales están vinculados al desarrollo repentino de lluvias de gran intensidad en ambientes de morfología con grandes pendientes en la cual escurren materiales fragmentados, rocas meteorizadas o suelos finos, los que una vez activados cambian la fisonomía superficial y a veces profunda (escarpes). Esta actividad es frecuente en Chile Central debido a su morfología preandina (Naranjo y Varela 1996). Esta observación es avalada por flujos de detritos ocurridos en el invierno del año 1993 para explicar la dinámica del frente cordillerano de Santiago este. Los autores señalan que la morfología es el resultado de procesos aluviales y gravitacionales. Entre los tipos de depósitos reconocieron depósitos coluviales y escombros de falda que se caracterizan por una granulometría irregular compuesta por clastos angulosos con una matriz variable que fueron generados por rocas preexistentes en el área y transportadas por procesos gravitacionales y en algunos casos de remoción en masa. Estos resultados concuerdan con nuestra hipótesis de que los escarpes existentes en la zona, son eventos que se han generado en períodos invernales transcurridos durante tiempo geológico y no a alzamientos o subsidencia de la roca fundamental. La Figura 6 corresponde a una representación triangular de los procesos de remoción en masa a partir de tres estados iniciales básicos

en respuesta a modificaciones por aumento gradual en el contenido de agua e incremento en el movimiento del material comprometido (suelo o roca) (Whittow 1986).

### Antecedentes geofísicos

El área de estudio cuenta con antecedentes regionales de la gravedad asociados a la determinación de la morfología de la roca basal de la cuenca de Santiago (Araneda *et al.* 2006). Para ello se consideró un modelo al cual se le asignó una densidad media de 2.1 gr/cm<sup>3</sup> a la estructura sedimentaria y 2.7 gr/cm<sup>3</sup> a la roca basal. Las potencias mayores obtenidas corresponden al sector de Pudahuel, Providencia este e Isla de Maipo, los cuales tienen profundidades cercanas a los 500 m. Adicionalmente fue reconocido un cordón montañoso en el centro de la cuenca con valores que fluctúan alrededor de los 100 m de profundidad, el cual concuerda con los afloramientos de los cerros San Cristóbal, Santa Lucía y de Chena.



**Figura 6.** Representación triangular de diversos tipos de remoción en masa (tomado de Whittow 1986).

Este estudio fue complementado con otro a menor escala el cual tuvo como objetivo investigar con mayor detalle el sector noreste de la cuenca de Santiago (Araneda *et al.* 2012) con la finalidad de conocer la morfología basal asociada a la prospección de aguas subterráneas. Lo obtenido mostró una morfología

irregular de la roca basal en esta zona. Adicionalmente dentro del área de interés se realizó un perfil gravimétrico entre afloramientos de rocas de la precordillera pasando por la cumbre del cerro Calan y los afloramientos del cerro La Pirámide, Figura 4. Este perfil muestra claramente la continuidad de la morfología basal casi en su totalidad, solamente muestra un alto en el cerro Calan. Hecho que puede interpretarse como una apófisis en el basamento o ser parte de una pequeña cadena montañosa que tendría dirección aproximada norte-sur, la cual desaparecería rápidamente. No se observa un salto que pudiese indicar una falla normal o inversa.

Con el objeto de tener mayor detalle sobre la estructura falla San Ramón, se realizaron cuatro perfiles de gravedad con estaciones cada 50 m, Figura 7, los cuales interceptan ortogonalmente la traza de la falla indicada por (Rauld 2002), Figura 2. Los resultados de estos perfiles muestran la anomalía de Bouguer con corrección topográfica, cuya tendencia hacia el oeste aumenta producto de la isostasia de los Andes.

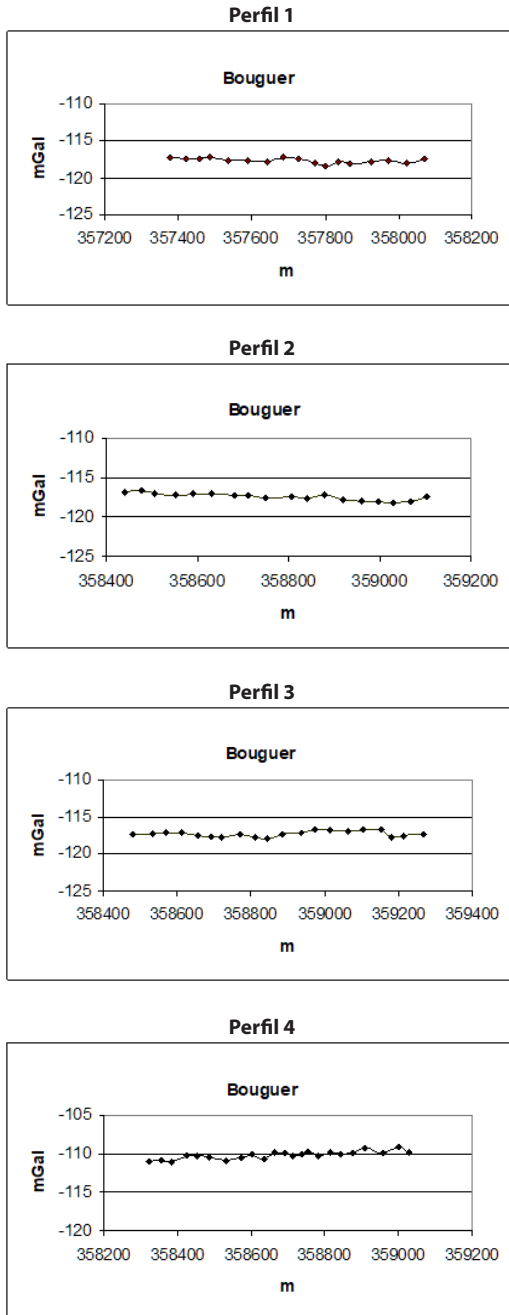
De todas formas la tendencia de la anomalía de Bouguer no muestra ningún indicio importante que pueda asociarse a un salto de falla, Figura 8.



**Figura 7.** Ubicación de perfiles gravimétricos ortogonales a estructura denominada falla San Ramón.

## Conclusiones

Analizando los resultados obtenidos de diferentes áreas del conocimiento y las existentes se concluye que la denominada falla San Ramón se puede considerar solamente como una hipótesis dentro del tiempo geológico que no presenta ningún peligro sísmico en la zona. Los antecedentes considerados para esta afirmación se sustentan en el análisis de los parámetros que a continuación se dan sucintamente: a) antecedentes geológicos: no existe ninguna manifestación superficial de una



**Figura 8.** Perfiles gravimétricos perpendiculares a la falla San Ramón donde se aprecia la anomalía de Bouguer con corrección topográfica

traza que pueda asimilarse a estructura falla San Ramón. Solamente existen algunos escarpes distribuidos aleatoriamente los cuales pueden interpretarse como remoción en masa desde que se formaron los Andes centrales (Karzulovic 1957, Naranjo y Varela 1996); b) los grandes sismos ocurridos en el área solamente muestran desplazamientos verticales y horizontales de poca monta que no pueden considerarse un peligro sísmico asociado a la falla San Ramón. El peligro sísmico se asocia fundamentalmente a la calidad del suelo en que se funda la edificación. El peligro sísmico se relaciona con la subsidencia o solevantamientos que ocurren cercanos al contacto de la subsidencia de la placa de Nazca bajo la Americana, efecto que se hace notar en el borde costero de Sudamérica; c) los Andes centrales están formado una gran muralla cuya longitud se prolonga al sur de la latitud 34° S y altura media de 2,000 m, cuyo ángulo de inclinación es de 20° aproximadamente. Estas características son propias para tener un resultado de los procesos aluviales y gravitacionales. Entre estos tipos de procesos se destacan los coluviales, escombros de falda caracterizados por una granulometría irregular con una matriz variable, los cuales han sido transportados por procesos gravitacionales y en algunos casos, de remoción en masa. Estas características son avaladas por los flujos ocurridos (Naranjo y Varela 1996) en el invierno del año 1993, resultados que concuerdan con nuestra hipótesis de que los escarpes ocurrieron en períodos invernales durante tiempo geológico; d) los antecedentes geofísicos del campo potencial de gravedad muestran claramente que la roca basal del pie andino no muestra ninguna discontinuidad que se asocie a una falla como se presenta en la Figura 7. El basamento penetra suavemente hasta una profundidad de 400 a 500 m en el sector oriente de la cuenca de Santiago.

Finalmente, realizando un análisis estadístico de los movimientos tectónicos en Chile Central, en base a una datación de radio carbono AP de un sector de los sedimentos del pie andino, no es suficiente para proyectarlo en el tiempo y menos decir que se está en un estado maduro de un nuevo alzamiento tectónico de los Andes centrales donde estaría la falla San Ramón, además, para hacer un análisis estadístico es necesario tener una serie de datos homogéneos que puedan proyectarse en el tiempo con el menor error posible.

### **Agradecimientos**

Queremos expresar nuestros agradecimientos al señor Arturo Hauser por su aporte en conversaciones respecto a la hipótesis de la existencia de la estructura denominada Falla San Ramón.

### **Referencias**

- Araneda, M. y Avendaño, M.S., 1991. "Gravity variations in Central Chile", in Torge W. ed., *Recent Geodetic and Gravimetric Research. Latin America*, pp. 176-183, Springer Verlag, Berlin.

- Araneda, M. y Avendaño, M.S., 2006. "Observaciones y nivelaciones en el proceso del terremoto del 3 de Marzo de 1985", Chile, *Revista Geofísica*, núm. 62, pp. 49-60.
- Araneda, M.; Avendaño, M.S. y Araneda, A., 2012. "Singularidades en el basamento de Santiago, sector oriente", XII Congreso Geológico Chileno p. 6, inédito.
- Armijo, R.; Rauld, R.; Thiele, R.; Vargas, G.; Campos, J.; Locassin R. and Kausel, E., 2010. "The west Andean Thrust, the San Ramon Fault and the Seismic Hazard for Santiago, Chile", *Tectonics*, vol. 29 pp. 1-34.
- Barrientos, S.E. y Kausel, E., 1990. "Génesis y proceso de ruptura del terremoto del 3 de marzo de 1985", *Revista Geofísica*, núm. 46, pp. 3-18.
- Borde, I., 1966. "Les Andes de Santiago et leur avantpays. Etude de Geomorphologie", Doctorate Thesis, p. 599, Univ. Bordeaux, Talence, France.
- Brüggen, J., 1950. *Fundamentos de geología de Chile*, Instituto Geográfico Militar, Santiago.
- Darwin, C. 1851. *Geological observation on coral reefs, volcanic island and on South America: Being the geologist of the voyage of the Beagle, under the command of Captain Fritz Roy R.N., during the years 1832-1836*, London, p. 768.
- Davison, C., 1936. "Great earthquakes", *Murby and Co.*, London, p. 286 .
- Escribano, J., 2008. " Superficies de bajo relieve en la cordillera de Chile Central, entre los 32° 30'S y los 33° 30'S, y su correlación con el alzamiento, Memoria para optar a título de geólogo", Universidad de Chile.
- Graham, M., 1824. An account of some effects of the late earthquake in Chile, *Trans. Geol. Soc. London 2nd Ser.* 1, pp. 413-415.
- Hauser, A. 1993. "Remociones en masa en Chile. Servicio Nacional de Geología y Minería", *Boletín núm. 45*, p. 75.
- Lomnitz, C., 1970. "Mayor earthquake and tsunamis in Chile during the period 1535-1955", *Sonderdruck aus der Geologischen Rundschau Band 59*, pp. 938-960.
- Meinardus, H., 1967. "Estudios geoelectrónicos en la cuenca de Santiago, sondajes eléctricos en las Condes", informe del Instituto de Investigaciones Geológicas, inédito, p. 9.
- Montessus de Ballore, F., 1912. *Historia sísmica de los Andes meridionales, al sur del paralelo XVI (cuarta parte Chile Central)*, Cervantes, Santiago de Chile, p. 116.
- Naranjo, J.A. y Varela, J., 1996. "Flujos de detritos y barro que afectaron el sector oriente de Santiago el 3 de mayo de 1993", reporte del Servicio Nacional de Geología y Minería, Santiago.
- Rauld, R.A., 2002. "Análisis morfoestructural del frente cordillerano: Santiago oriente entre el río Mapocho y quebrada de Macul", Memoria para optar al título de Geólogo, p. 57, Departamento de Geología, Universidad de Chile, Santiago.
- Slemmons, B. and Depolo, C., 1996. "Evaluation of active faulting and associated hazards", *Active Tectonic: Studies in Geophysics*, Wallace R. panel chairman, Natl. Acad. Sci., Washington, D. C., Chapter 3, pp. 45-62.



- Tricart, J.; Hirsch, A.R and Griesbach, J.C. 1965. "Geomorphologie et eaux souterraines dans le basin de Santiago du Chile", *Bull. Fac. Lett. Strasbourg*, 7, pp. 605-673.
- Whittow, J., 1986. *Dictionary of Physical Geography*, Ediciones The Penguin, p. 591, New York.



## Validación de la presión en Santiago como índice para estimar la actividad del anticiclón del Pacífico Sur

Arnobio German Poblete\*  
Paola Belén Monrroy \*\*

*Recibido en diciembre de 2016; aceptado en septiembre de 2017*

### Abstract

The rainfall pattern in the Arid Andes depends on the passage of frontal systems, surface depressions, troughs and cut-off lows, to name but a few, added to the orographic forcing imposed by the mountain range. Their activity is conditioned by dynamic-hemispheric factors the most outstanding of which are the Sea Surface Temperatures (SST) in the area of the El Niño 3+4, the Anticyclone of the Southeast Pacific Subtropical Ocean (ASPSO), the latitudinal displacement of the Pacific Anticyclone (LDPA) and the Pacific Decadal Oscillation (PDO), among others. The activity of this anticyclone affects the snowfall in the Arid Andes, significantly reducing it. To quantify it, various institutions (NCEP-NCAR, Bureau of Meteorology de Australia and others) and research workers have attempted to build indexes for its estimation, giving it numerical values by using methods produced by gridded data, the application of multivariate statistical techniques and others. However, no homogeneous series have been obtained to evaluate the long-term influence of the anticyclone.

An index, known as Índice de Presión del Pacífico Sur (IPPS), Index of the South Pacific Pressure, elaborated by the Meteorological Service of Chile [Dirección Meteorológica de Chile (DMC)], has allowed estimating the annual surface pressure since 1971 as the first main component of the mean atmospheric surface pressures from eight stations located within the sphere of influence of the anticyclone.

The facts above and the uncertainties generated by the prolonged drought in the period 2010-2014 create the need of some operating index that allows direct monitoring of the ASPSO and is used as a diagnostics and seasonal predictor.

This article proposes an easily accessible Index based on the atmospheric pressure measured in Santiago de Chile (PSGO) to estimate the ASPSO activity by applying correlation analysis and NCEP-NCAR reanalysis. This index includes extended homogeneous temporal series exceeding 100 years, which is the threshold to conduct studies on the Climatic Change.

.....  
\* Doctor en Geografía, Av. Rioja 111° norte, San Juan, CP. 5400, Argentina, [agpoblete@gmail.com](mailto:agpoblete@gmail.com)

\*\* Diseñadora Gráfica, B° D.F. Sarmiento S2 mbk 7 1°A. Rawson, San Juan, CP. 5425, Argentina, [monrroypaola2@gmail.com](mailto:monrroypaola2@gmail.com)

The use of the PSGO for the seasonal analysis of the relationship between the anticyclone and the snowfall allows obtaining results that are quite similar to those obtained with the IPPS.

*Key words: Anticyclone, Snow, Displacement, Index, Atmospheric Pressure.*

## Resumen

El régimen de precipitación en los Andes áridos depende del paso de sistemas frontales, depresiones en superficie, vaguadas y bajas segregadas, entre otros, a lo que se suma el forzamiento orográfico que impone la cordillera. La actividad de los mismos está condicionada por factores dinámicos- hemisféricos, destacándose: las TSM en el área Niño 3+4, el Anticiclón Subtropical del Pacífico Sur Oriental (ASPSO), el desplazamiento latitudinal del mismo (DLAP) y la Oscilación Decadal Pacífica (ODP), entre otros.

La actividad de dicho anticiclón incide reduciendo significativamente la caída de nieve en los Andes áridos. Para cuantificarla diversas instituciones (NCEP-NCAR, Bureau of Meteorology de Australia y otras) e investigadores, han intentado construir índices que la estimen asignándole un valor numérico utilizando métodos a partir de datos grillados, la aplicación de técnicas estadísticas multivariantes y otros, pero no han logrado series homogéneas a los efectos de evaluar su influencia en el largo plazo.

La Dirección Meteorológica de Chile (DMC) ha elaborado un índice llamado IPPS (Índice de Presión del Pacífico Sur), que estima la presión superficial anual desde 1971, como primer componente principal de las presiones atmosféricas superficiales medias de ocho estaciones, situadas dentro del dominio de influencia del anticiclón.

Por lo expuesto, y ante la incertidumbre producida por la prolongada sequía en el periodo 2010-2014, motiva contar con un índice operativo que permita una vigilancia directa del ASPSO para ser utilizado como diagnosticador y predictor estacional.

Este artículo propone un índice basado en la presión atmosférica de Santiago de Chile (PSGO) para estimar la actividad del ASPSO aplicando análisis de correlación y el *Reanalysis* del NCEP-NCAR, cuya disponibilidad es de fácil acceso contando además con series temporales homogéneas extensas que superan los 100 años, límite mínimo para realizar estudios sobre el cambio climático.

Mediante el empleo de PSGO en el análisis estacional de la relación con la caída de nieve, se logran resultados muy semejantes a los obtenidos con el IPPS.

*Palabras claves: anticiclón, nieve, desplazamiento, índice, presión atmosférica.*

## Introducción

El régimen de precipitación en los Andes áridos está regido, principalmente por el paso de sistemas frontales, depresiones en superficie, vaguadas y bajas segregadas,

entre otros, a lo que se suma el forzamiento orográfico que impone la cordillera (Viale 2010). La actividad de los mismos depende de factores de la larga escala, entre los que se destacan: las Temperaturas Superficiales del Mar (TSM) en el área Niño 3+4, la actividad del Anticiclón Subtropical del Pacífico Sur Oriental (ASPSO) (Figuras 3a y 3b), el Desplazamiento Latitudinal (DLAP) del mismo y la Oscilación Decadal Pacífica (ODP), entre otros.

La actividad de dicho anticiclón incide reduciendo significativamente la caída de nieve en los Andes áridos (Figura 5) estimada en este artículo por los derrames anuales del río San Juan (DJUA, Figura 2) (Poblete y Hryciw 2015).

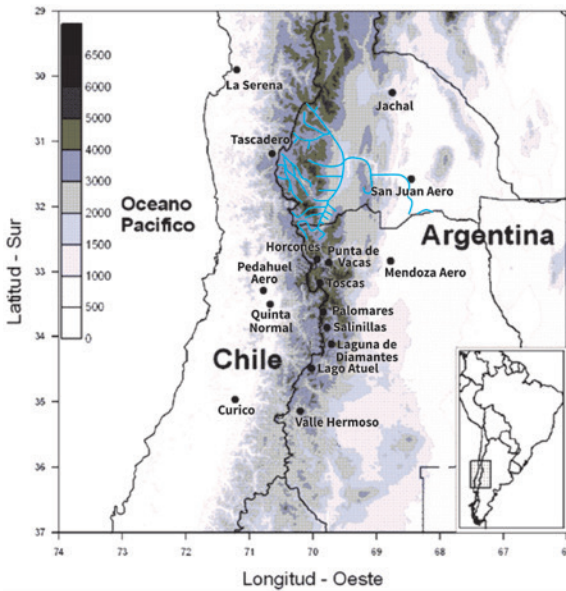
Para cuantificar el ASPSO diversas instituciones de investigación climática e investigadores, han intentado construir índices que lo estimen, asignándole un valor numérico, tales como NCEP (National Center for Environmental Prediction), NCAR (National Center for Atmospheric Research), (Kalnay *et al.* 1996); (Kistler *et al.* 2001), National Climate Centre (NCC) del Australian Bureau of Meteorology, utilizando diversos métodos tales como los provenientes de datos grillados, la aplicación de componentes principales a registros de estaciones meteorológicas ubicadas en la costa de Chile y otros, pero no han logrado series homogéneas a los efectos de evaluar su influencia en las precipitaciones regionales y el largo plazo (Kidson 1925 entre 1890-1923; Das 1956 entre 1909-1953), (Pittock 1971, 1973 y 1980), (Smagorinsky 1963), entre otros, asociando su influencia en las precipitaciones regionales (Minetti y Vargas 1998); (Rusticucci y Penalba 2000), (Minetti *et al.* 2004). En el área de estudio los intentos de utilizar al ASPSO para explicar la variabilidad interanual del clima fueron realizados por: Pittock (1980), Minetti y *et al.* (1982), Radicella *et al.* (1989) y Minetti y Vargas (1990). En la mayoría de los casos, los períodos investigados para discernir sobre los impactos de las posiciones e intensidad del ASPSO, con otras variables climáticas han incluido pocas décadas y sin embargo han obtenido conclusiones inherentes al cambio climático global, lo que resulta contradictorio respecto de la definición del mismo.

La Dirección Meteorológica de Chile (DMC) ha elaborado un índice llamado IPPS (Índice de Presión del Pacífico Sur), que estima la presión superficial anual del ASPSO desde 1971 hasta la actualidad como primer componente principal de las presiones superficiales medias de ocho estaciones situadas dentro del dominio del anticiclón (Figura 4): Arica (18.3° S, 70.3° W), Iquique (20.5° S, 70.2° W), Antofagasta (23.4° S, 70.4°) Santiago de Chile (33.5° S, 70.7° W), Concepción (36.9° S, 73.0° W), Juan Fernández (33.7° S, 79.0° W) y Semana Santa Isla (27.2° S, 109.4° W). Los problemas con la disponibilidad de datos para algunas de estas estaciones impidieron el cálculo del mismo para el período anterior a 1970 (Quintana y Aceituno 2002). En otro artículo los autores demostraron (Poblete *et al.* 2013), que también el desplazamiento hacia el sur del Anticiclón Subtropical del Pacífico Sur (DLAP) tiene una conexión negativa que contribuye en la disminución de la caída de nieve en los Andes áridos.

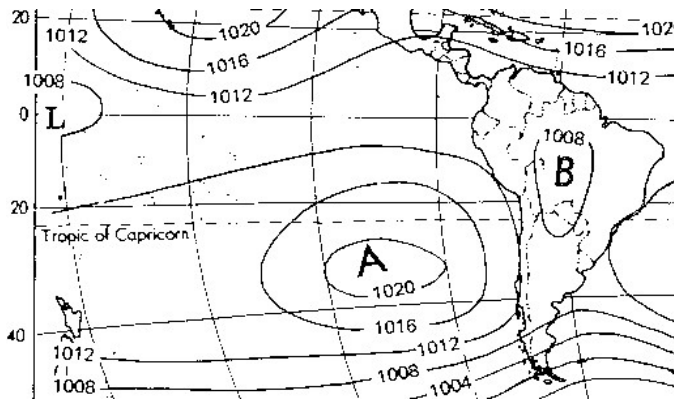
De lo expuesto y por la incertidumbre producida por la prolongada sequía en el periodo 2010-2014, motiva contar con un índice operativo que permita una vigilancia directa del ASPSO y de esa manera ser utilizado como diagnosticador y predictor estacional.



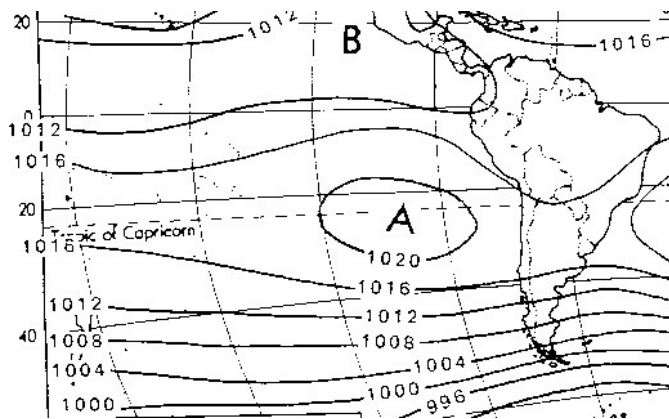
**Figura 1.** Ubicación de Santiago de Chile.



**Figura 2.** Ubicación de medición de precipitaciones en el área de estudio y del río San Juan (DJJA en azul). Índice que representa la caída de nieve en la temporada correspondiente.

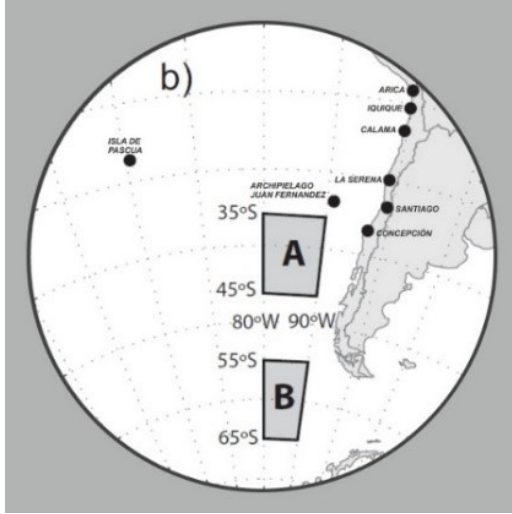


**Figura 3a.** Posición media del Anticiclón Subtropical Pacífico (ASPSO) en enero. Adaptado de Langley D. (1970). *Meteorología.*

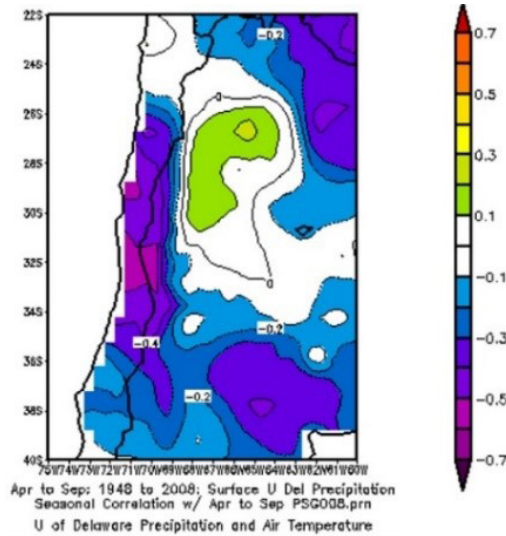


**Figura 3b.** Posición media del Anticiclón Subtropical Pacífico (ASPSO) en julio. Adaptado de Langley D. (1970). *Meteorología.*

Este artículo propone un índice basado en la presión atmosférica de Santiago de Chile (PSGO) (Figura 1) para estimar la actividad del ASPSO aplicando análisis de correlación y el *Reanalysis* del NCEP-NCAR cuya disponibilidad es de fácil acceso contando además con series temporales homogéneas extensas que superan los 100 años, límite mínimo para realizar estudios sobre el cambio climático.



**Figura 4.** Estaciones en las cuales, la DMC utilizó la medición de su presión atmosférica superficial para calcular el IPPS. Las regiones A y B, son las áreas con las que se calculó, mediante sus diferencias estandarizadas, el gradiente meridional de la misma, entre las latitudes medias y altas.  
Fuente: Quintana y Aceituno (2002).



**Figura 5.** Isocorrelatas entre la presión atmosférica superficial en Santiago, como representativa del ASPSO y la precipitación de abril-septiembre en los Andes áridos y Chile Central. Obsérvese las significativa correlata inversa ( $p < 0.001$ ).



En los meses de verano, el cinturón de altas presiones de latitudes subtropicales se desplaza hacia el sur de su posición media (Figura 3a). Mientras que en el periodo invernal la situación meteorológica se invierte (Figura 3b) originando: a) en la vertiente Atlántica, el desplazamiento de los centros de alta presión a latitudes más bajas es acompañado por una retracción hacia el norte de la Zona de Convergencia Intertropical, un aumento de la presión atmosférica sobre el subtropical, y la consiguiente disminución de la precipitación en la vertiente oriental de los Andes al norte de los 35° S; b) la banda dominante de vientos del oeste se desplaza a menores latitudes sobre la costa pacífica iniciándose el período más húmedo, en los Andes áridos y norte de la Patagonia. De esta manera la influencia Pacífica sobre la Cordillera de los Andes es máxima en invierno, en el entorno de abril-septiembre, cobrando protagonismo el ASPSO, que influye directamente en el límite sur del desierto de Atacama-Puna, cuyo régimen de variabilidad ha sido descrito como de alta "climo-sensibilidad" por las oscilaciones espaciales-temporales de la posición del anticiclón subtropical del Océano Pacífico Sur, afectado por el Cambio Climático Global (CCG), como fue mostrado por Smagorinsky (1963) en las primeras ecuaciones de su modelo numérico de circulación, expresando que la posición latitudinal del Jet y anticiclón subtropical estarían condicionados por la baroclinicidad en latitudes medias, y ésta a su vez por el CCG, favoreciendo un desplazamiento del mismo hacia latitudes altas en una hipótesis de calentamiento global.

### Datos y métodos

Los datos utilizados en este trabajo fueron aportados por la DMC y por el *Reanalysis* del NCEP-NCAR en este caso, para poder realizar las isocorrelatas con la malla del mismo, se sube un archivo ASCII (American Standard Code for Information Interchange) con las presiones mensuales de Santiago de Chile en columnas, al sitio <https://www.esrl.noaa.gov/html/>; obteniendo como resultado los mapas que muestran las zonas delimitadas por las isolíneas de las correlatas entre ambos; calculadas con el índice de Pearson.

Los métodos estadísticos utilizadas fueron:

*Variable estandarizada*

$$z_i = \frac{x_i - \bar{X}}{S} \quad (1)$$

Donde:

$z_i$ =variable estandarizada

$x_i$ =valor original

$\bar{X}$  = media los  $x_i$

$S$ = desviación estándar

*Análisis de correlación*

Para el estudio de la relación entre las series se aplicó el coeficiente producto-momento de Pearson, cuyo algoritmo es:

$$r = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \bar{x})}{s_x} \frac{(y_i - \bar{y})}{s_y} \quad (2)$$

Donde:

$n$  = número de datos

$x_i$  = es el dato en la posición  $i$ , con  $\bar{x}, \bar{y}$  medias de las dos series

$s_x, s_y$  = desviaciones estándar de las variables  $x$  e  $y$ .

Oscilando entre: -1 (correlación perfecta inversa), 0 (sin correlación) y 1 (correlación perfecta) la significación de los valores intermedios se estima por medio de un test "t" de Student <<http://www.socscistatistics.com/pvalues/pearsondistribution.aspx/>>.

Para determinar la significación de  $r$  en un nivel de confianza  $\alpha$ , se utiliza el valor de  $p$  (p-value). En este caso se plantea una prueba de hipótesis donde la  $H_0$  postula que no hay correlación entre las variables consideradas. Dicho valor de  $p$  oscila entre 0 y 1 e indica la probabilidad para un nivel de significación ( $\alpha$ ) de rechazar o aceptar la misma. Se compara el valor de  $p$  con el nivel de significación ( $\alpha$ ) para decidir si debe rechazar la hipótesis nula ( $H_0$ ):

- Si el valor  $p \leq \alpha$ , se rechaza  $H_0$
- Si el valor  $p > \alpha$ , no se rechaza  $H_0$

En este artículo se utilizaron los niveles de significación del 1% ( $\alpha=0.01$ ) y 5% ( $\alpha=0.05$ ), por ejemplo si el valor de  $p$  es  $p \leq 0.05$ , se rechaza  $H_0$ . Es decir que la correlación es significativa a ese nivel.

*Ajuste polinómico por Mínimos Cuadrados Ordinarios (MCO):*

Se lo emplea para el suavizado de las series de tiempo:

Se obtiene el polinomio de grado  $n$ :

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_nx^n \quad (3)$$

Donde  $y$  es la variable dependiente,  $x$  la independiente y los  $a_i$  son los coeficientes a determinar mediante las siguientes ecuaciones normales:

$$\begin{aligned}
 na_0 + (\sum x_i)a_1 + (\sum x_i^2)a_2 + \dots + (\sum x_i^n)a_n &= \sum y_i \\
 (\sum x_i)a_0 + (\sum x_i^2)a_1 + (\sum x_i^3)a_2 + \dots + (\sum x_i^{n+1})a_n &= \sum y_i x_i \\
 &\dots\dots\dots \\
 (\sum x_i^n)a_0 + (\sum x_i^{n+1})a_1 + (\sum x_i^{n+2})a_2 + \dots + (\sum x_i^{2n})a_n &= \sum x_i^n y_i
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

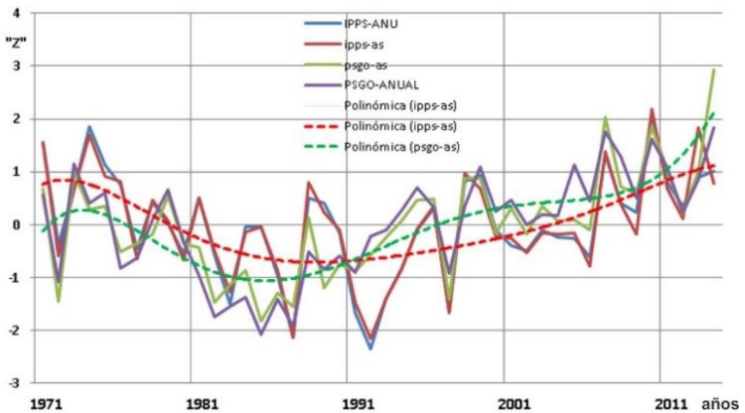
(Draper and Smith 1998)

**Resultado y discusión**

Para validar el uso del PSGO como índice que estima la actividad del ASPSO se compara su variabilidad con la del IPPS, en el periodo abril-septiembre cuando se produce la mayor precipitación de nieve, luego mediante el Reanalysis se analiza la distribución areal de las isocorrelatas.

	PSGO-AS	PSGO-ANUAL
IPPS-ANU	0.67	0.59
IPPA-AS	0.66	0.57

**Tabla 1.** Correlaciones entre PSGO e IPPS en los periodos en estudio: PSGO-AS, e IPPS-AS en el lapso abril-septiembre, PSGO-ANUAL e IPPS- ANU para el anual.

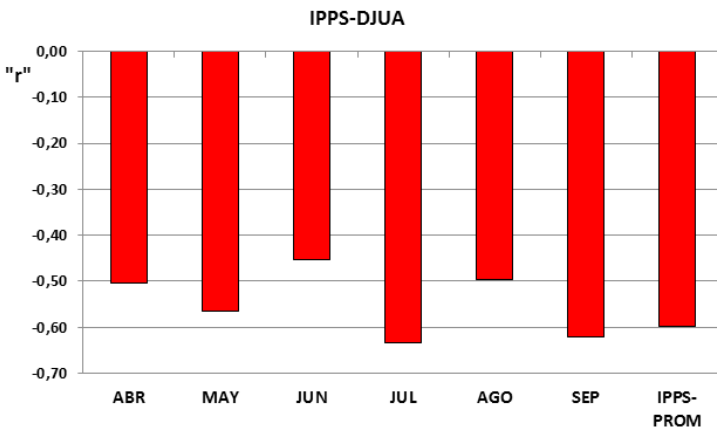


**Figura 6.** Correlación entre las presiones medias mensuales del ASPSO (medido con IPPS) y el DJUA . Rojo = significativo al 5% ( $p < 0.05$ ).

La Tabla 1 muestra las correlaciones entre PSGO e IPPS, para los periodos abril-septiembre y anual. Se observa que todas son estadísticamente significativas al 1% (es decir el valor de  $p < 0.01$ ). Lo que indica que PSGO es compatible con el IPPS y por lo tanto también puede ser usado para estimar el comportamiento del ASPSO.

Para corroborar lo anterior se analiza la variabilidad interanual de los periodos anual y abril-septiembre de ambos, en el intervalo 1971 (cuando se elabora el IPPS) y 2015. Observándose en la Figura 6 una óptima coherencia, tanto en las altas como en las bajas frecuencias.

Como el derrame del río San Juan (DJUA) representa la cantidad de nieve caída en el periodo abril-septiembre de la temporada correspondiente, se calculan las correlatas entre la presión atmosférica superficial media mensual y la de dicho periodo, representada por el índice IPPS con los derrames mensuales y el periodo completo. Se verifica (Figura 7) que todos los meses invernales tienen una correlación inversa significativa, destacándose julio y septiembre  $r = -0.60$  ( $p < 0.01$ ) significativo al 1%. También se destaca la del promedio del periodo completo ( $r = -0.60$ ). Resultados que validan a dicho índice como un buen estimador de la nieve caída en los Andes áridos.



**Figura 7.** Correlación entre las presiones medias mensuales del ASPSO (medido con IPPS) y el DJUA. Rojo = significativo al 5% ( $p < 0.05$ ).

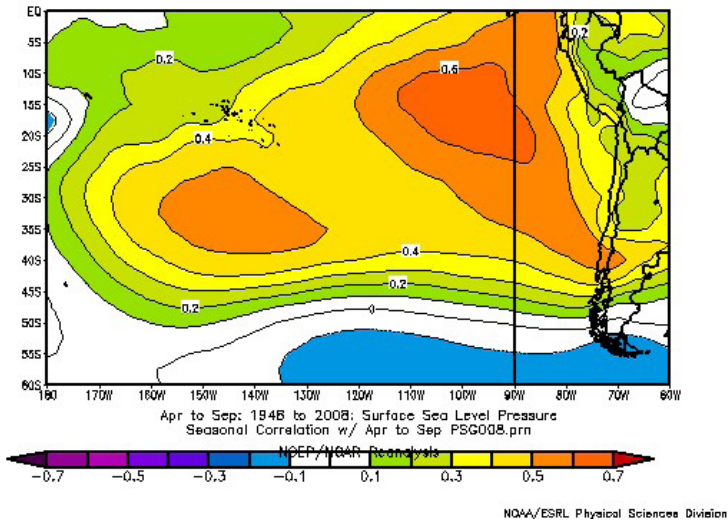
Sin embargo su construcción resulta compleja puesto que se debe contar con las presiones de las ocho localidades (Figura 4) a las que se realiza un análisis de componentes principales resultando el IPPS como el componente que explica la mayor cantidad de varianza. Por

el contario el PSGO solo necesita la presión atmosférica medida en la estación Quinta Normal, ubicada en Santiago de Chile (Figura 1).

La óptima correlación demostrada entre PSGO y el IPPS, que representa una superficie costera extensa (Figura 4), valida al primero para realizar análisis espaciales, es decir, determinar su área de cobertura geográfica mediante el *Reanalysis* del NCEP-NCAR estimando su correlación con la grilla de presiones atmosféricas presentes en la zona oceánica en donde se ubica el ASPSO.

Teniendo en cuenta estos resultados se realiza el análisis espacial de las correlatas para cada uno de los meses invernales y el periodo completo.

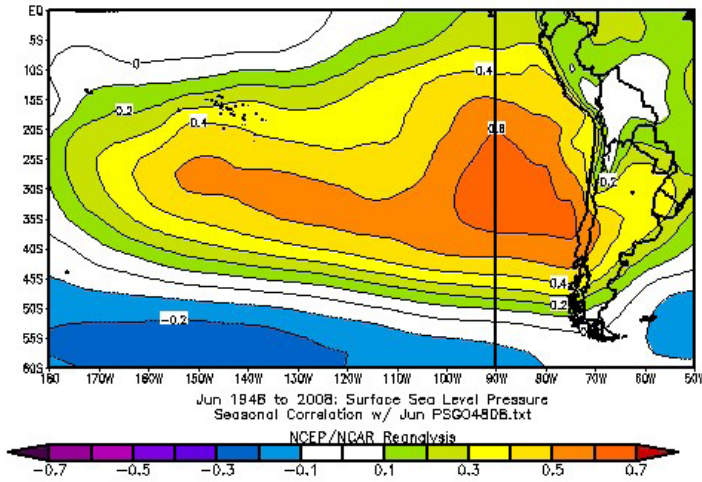
La distribución espacial de las isocorrelatas en el periodo abril-septiembre entre PSGO y la presión atmosférica a nivel del mar en el área que ocupa el ASPSO, (Figura 8) se observa una alta asociación ( $r > 0.70$ ,  $p < 0.001$ ) entre los 10° y 25° de latitud Sur y los 85° y 110° de longitud Oeste, incluida en una superficie mayor que se inicia a los 5° latitud Norte. Extendiéndose desde la costa mar adentro en dirección este-oeste con una inflexión dirigida hacia el noroeste, incluyendo en su parte sur a Santiago. El área descrita está contenida en una superficie más extensa que abarca gran parte del Océano Pacífico Sur, delimitada por isocorrelatas de  $r > 0.50$  y  $r > 0.40$  que aunque resultan bajas, son significativas por sus respectivos valores de  $p$ , teniendo en cuenta además, que la asociación entre estas variables explica entre el 40 y el 50% de la misma, y dado que en clima los procesos son multicausales, sobre todo los inherentes a la teleconexión.



**Figura 8.** Correlación entre la Presión Atmosférica Media en el periodo abril-septiembre en Santiago y la Presión a Nivel del Mar estimada por el Reanalysis. Fuente: Reanalysis NCEP-NCAR.

Todas ellas confirman la validez del índice construido con PSGO para estimar la posición media e intensidad del anticiclón en el periodo de mayor precipitación de nieve.

Para corroborar lo anterior se analizó el comportamiento mensual del índice, y se lo asoció con los meses que producen la mayor cantidad de nevadas, con montos considerables: junio, julio y agosto.

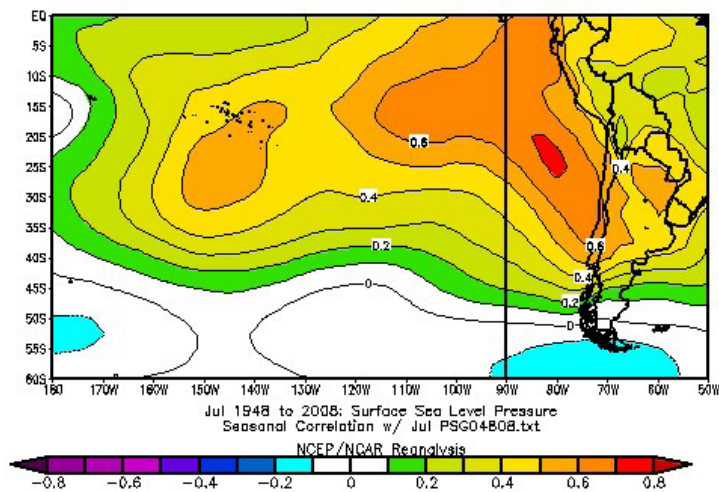


**Figura 9.** Correlación entre la presión atmosférica del mes de junio en Santiago, y la misma a nivel del mar estimada por el Reanalysis. Fuente: Reanalysis NCEP-NCAR.

Para el mes de junio la isocorrelata espacial entre PSGO y la Presión Atmosférica a Nivel del Mar (PANM) fue significativa superando los 0.70 ( $p < 0.001$ ) (Figura 9), y ocupa un área irregular adyacente a Santiago de Chile, que lo incluye, en el marco de las coordenadas 22° y 40° latitud Sur y 72° y 98° longitud Oeste, formando parte de una más extensa con correlatas  $r > 0.50$  ( $p < 0.01$ ) que cubre una zona ocupada frecuentemente por el anticiclón y se extiende hasta los 155° de longitud Oeste. Obsérvese que hay una superficie con correlatas  $r > 0.40$  ( $p < 0.05$ ) que cubre prácticamente todo el Océano Pacífico Sur.

Las isocorrelatas de presión espaciales en el mes de julio entre PSGO y la PANM es muy significativa, ya que alcanzó el  $r = 0.80$  ( $p < 0.001$ ) (Figura 10) hecho que es muy relevante dada la importancia que tiene este mes, (Figura 7), esta isocorrelata abarca un sector del ASPSO que como se mostró resulta importante como inhibidor de los procesos generadores de precipitación de nieve. Se extiende en una superficie que alcanza aproximadamente la latitud

de del desierto de Atacama incluida en un área de menor significación estadística pero de mayor superficie, puesto que se prolonga hacia el norte ensanchándose abruptamente hasta la costa peruana con correlatas superiores a  $r = 0.50$  ( $p < 0.01$ ) y hacia el sur cubriendo el centro de Chile y Comahue. Las asociaciones  $r > 0.40$  ( $p < 0.05$ ) al igual que en los casos anteriores abarcó casi todo el Océano Pacífico Sur Oriental.



**Figura 10.** Isocorrelatas entre la presión atmosférica del mes de julio en Santiago y la PANM estimada por el Reanalysis. Fuente: Reanalysis NCEP-NCAR.

La continuidad de las isocorrelatas encontradas en los meses mayo, junio y julio, también se verifican en el mes de agosto (Figura 11), pero en áreas más restringidas y con configuraciones discontinuas, siendo más significativa  $r > 0.60$  ( $p < 0.01$ ) la adyacente a la costa, que a su vez cubre el área de Chile Central. Se destaca la asociación inversa significativa  $r > -0.40$  ( $p < 0.05$ ) con la zona de las bajas subpolares, como se visualiza en las proximidades de Tierra del Fuego.

Habiendo validado puntual y arealmente la pertinencia de estimar la actividad del ASPSO, mediante el uso de la presión atmosférica medida en Santiago de Chile, se ratifica su correcta implementación utilizándolo como índice para asociar al ASPSO con la caída de nieve estimada por medio del DJUA. Por lo que se realiza el mismo análisis estacional empleando el IPPS (Figura 7) con PSGO (Figura 12) logrando resultados muy semejantes en especial para los meses de julio y periodo completo.

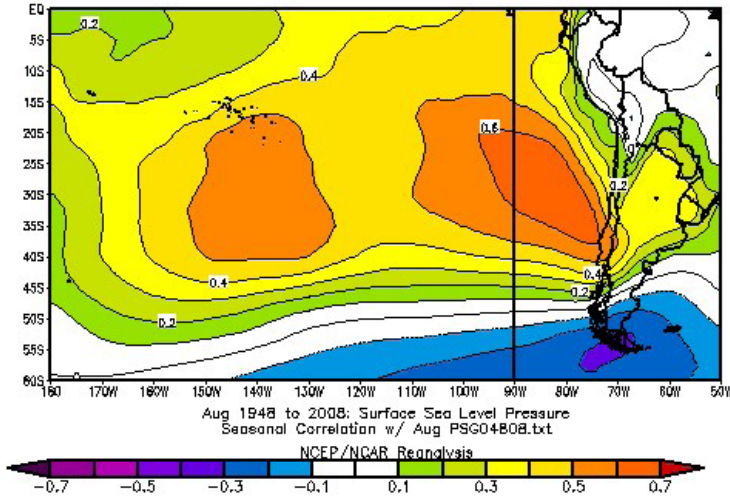


Figura 11. Isocorrelatas entre la presión atmosférica del mes de agosto en Santiago y la presión a nivel del mar estimada por el Reanalysis. Fuente: NCEP-NCAR.

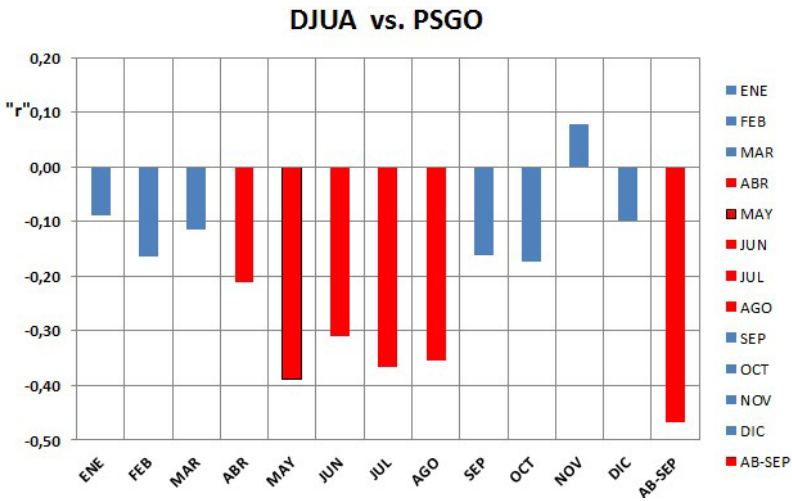


Figura 12. Correlación entre las presiones medias mensuales del ASPSO (medido con PSGO) y el DJUA. Rojo = significativo al 5% ( $p < 0.05$ ).



## Conclusiones

Se concluye que PSGO constituye un índice adecuado para estimar la actividad del ASPSO, por las siguientes razones:

1. Las correlación entre PSGO e IPPS, para los periodos abril-septiembre y anual son estadísticamente significativas al 1% ( $p < 0.01$ ).
2. El análisis de la variabilidad interanual de ambos en los periodos anual y de mayor caída de nieve, en el intervalo 1971 y 2015 muestra una óptima coherencia, tanto en las altas como en las bajas frecuencias.
3. La validación geográfica del índice propuesto mediante el *Reanalysis* del NCEP-NCAR, se obtiene de la correlación con las presiones atmosféricas grilladas en el área oceánica en donde se ubica el ASPSO, tanto en el periodo abril-septiembre como en los meses cuando la caída de nieve es más intensa: junio, julio y agosto. Con las áreas delimitadas por isocorrelatas altamente significativas en todos los lapsos analizados. Entre los que se destaca el mes de julio por su muy alta correlación  $r > 0.80$  ( $p < 0.001$ ) lo que es relevante, puesto que este mes es determinante para estimar el monto total de las nevadas en los Andes áridos.
4. Mediante el empleo de PSGO en el análisis estacional de la relación entre DJUA, se logran resultados muy semejantes a los obtenidos con el IPPS, en especial para los meses de julio y periodo completo.

Dada la sustancial diferencia entre el cálculo del IPPS, respecto de la inmediata lectura de un registro de presión atmosférica, justifica la implementación de PSGO como estimador del ASPSO. Lo mismo se pueden afirmar en comparación cuando se valúa al anticiclón con datos grillados generados por los Modelos de Circulación General (MCG), tarea que sobrelleva una mayor complejidad.

## Agradecimientos

A la Universidad Nacional de San Juan, por sus aportes económicos en el desarrollo de este trabajo y "Análisis de las condiciones de borde, factores y agentes oceánicos de circulación atmosférica regional y de la cupla Océano Atmósfera que inciden en las nevadas de Los Andes áridos". Res. 1531-R-16/CS-UNSJ. Al Instituto de Investigaciones Hidráulicas (IDIH) de la Universidad Nacional de San Juan por facilitar el lugar de trabajo.

## Bibliografía

Draper and Smith, 1998. *Applied Regression Analysis*, 3rd Edition, Ed. Wiley, pp. 736, New York.

- Das, 1956. "Statistical analysis of Australian pressure data". *Australian Journal of Physics*, no. 9, pp. 394-399.
- Kalnay, Kanamitsu, Kistler, Collins, Deaven, Gandin, Iredell, Saha, White, Woollen, Zhu, Chelliah, Ebisuzaki, Higgins, Janowiak, Mo, Ropellewski, Wang, Leetnaa, Reynolds, Jenne and Joseph, 1996. "The NCEP/NCAR 40-year Reanalysis project", *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77:437-471.
- Kidson, 1925. "Some periods in Australian weather". Commonwealth Bureau of Meteorology Australia, Bulletin no. 17.
- Kistler, Kalnay, Collins, Saha, White, Woollen, Chelliah, Ebisuzaki, Kanamitsu, Kousky, Vanden dool, Jenne and Fiorino, 2001. "The Hadley Circulation" 258 The NCEP/NCAR 50-year Reanalysis: Monthly means CD-ROM and documentation. *Bulletin of the American Meteorological Society*, no. 82:247-267.
- Minetti, Menegazzo, Radicella, y Sal Paz, 1982. "La actividad anticiclónica y las precipitaciones en Chile y en la zona cordillerana central andina", *Revista Geofísica*, núm. 16, pp. 145-157, IPGH-OEA, México.
- Minetti y Vargas, 1998. "Trends and Jumps in the annual precipitation in South America", south of the 15° S. *Atmósfera* 11, pp. 205-223, México.
- Minetti y Vargas, 1990. "Comportamiento del borde anticiclónico subtropical en Sudamérica-II Parte". *Revista Geofísica*, núm. 33, pp. 179-190, IPGH-OEA, México.
- Minetti y Mendoza, 2004. "Inventario de las sequías regionales en Argentina y Chile. Informe Técnico del Laboratorio Climatológico Sudamericano", Fundación Caldenius, San Miguel de Tucumán.
- Pittock, 1971. "Rainfall and the general circulation". Proceeding of the International Conference on Weather Modification, Canberra 6-11 September. *American Meteorological Society*, pp. 330-338.
- Pittock, 1973. "Global meridional interactions in stratosphere and troposphere", *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, no. 99, pp. 424-437.
- Pittock, 1980. "Modelos de variación climática en la Argentina y Chile". Sección Primera, Precipitación 1931-60. *Meteorológica*, vol. XI, núm. 1, 73-97. CAM. Bs.As.
- Poblete, Iranzo y Aguiar, 2013. "Análisis Espacio-Temporal del posible impacto del corrimiento de la Posición Latitudinal del Anticiclón Subtropical del Pacífico Sur", *Revista Universitaria de Geografía*. Departamento de Geografía y Turismo, Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, Argentina vol. 22, pp. 129-146.
- Poblete y Hryciw, 2015. "Validación de la Presión Atmosférica Medida en Santiago de Chile como Índice para estimar el comportamiento del anticiclón del Pacífico sur oriental", enviado a la *Revista Cuadernos de Geografía*, Bogotá, Colombia.
- Quintana y Aceituno, 2002. *Changes in the rainfall regime along the extratropical west coast of South America (Chile): 30-43° S*, Departamento de Geofísica, Universidad de Chile, Blanco Encalada, Santiago, Chile.
- Radicella, Minetti, Saavedra y Valdivia, 1989. "Estudio hidroclimatológico de zonas áridas y semiáridas de Latinoamérica", *Revista Geofísica*, núm. 30, pp. 19-30, IPGH-OEA, México.

- Rusticucci y Penalba, 2000. "Interdecadal changes in the precipitation seasonal cycle over Southern South America and their relationship with surface temperature". *Climate Research*, no. 16, pp.1-15.
- Smagorinsky, 1963. "General circulation experiment with primitive equation", *Monthly Weather Review*, no. 91, pp. 99-164.
- Viale, 2010. "Características de las precipitaciones orográficas de invierno sobre los Andes subtropicales centrales", Universidad de Buenos Aires Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos, tesis presentada para optar por el título de Doctor de la Universidad de Buenos Aires en al área Ciencias de la Atmósfera y los Océanos, pp. 143-146.



## Marco tectónico y su correlación con la hidrología en las cuencas de Tongoy y Limari, Chile

Álvaro Araneda A.\*  
Manuel Araneda C.\*  
Eugenio Celedon C.\*

*Recibido en diciembre de 2016; aceptado en junio de 2017*

### Abstract

The tectonic model between the Tongoy Bay area and the west part of Limarí River basin allows connecting the morphological structure of the underground bedrock with the current and historical hydrology of Limarí River. Such morphology was obtained from the analysis and interpretation of 668 gravimetric stations distributed in 28 profiles. The information is supported by the results of several seismic profiles already conducted in the area.

The result of the gravimetric analysis shows a very irregular bedrock morphology, where two underground basins of considerable dimensions separated by a gap in the bedrock stand out. The first basin is located in the north area of the survey zone, Seca/Pachingo creek area, which main axis is north-south strike with an approximate depth of 550 m to the bedrock; end the second basin is located south-west from the survey area, Barraza/Socos zone, with the main axis of east-west strike and approximate depth of 500 m to the bedrock.

According to the existing and available background information, the hypothesis states that Limarí River, in ancient times, run into the Pacific Ocean through Tongoy Bay, east from Puerto Aldea site. The hypothesis is also supported by drilling results conducted in nearby Quebrada Seca and Cerrillos de Tamaya sites, indicating the existence of sedimentary materials characteristic from north-strike hydric flows.

*Key terms: Geophysics, Tectonics, Hydrology.*

### Resumen

El modelo tectónico entre el sector de la bahía de Tongoy y la parte oeste de la cuenca del río Limarí permite relacionar la estructura morfológica del basamento subterráneo con la hidrología actual e histórica del río Limarí. Dicha morfología que fue obtenida mediante el análisis e interpretación de 668 estaciones gravimétricas distribuidas en 28 perfiles. La Información obtenida fue complementada con resultados de una serie de perfiles sísmicos ya realizados en la zona.

.....  
\* Consultores independientes, Santiago, Chile: [segmi@netexpress.cl](mailto:segmi@netexpress.cl)

El análisis de los resultados gravimétricos muestra una morfología del basamento bastante irregular, destacan dos cuencas subterráneas de considerables dimensiones separadas por un alto en el basamento rocoso. La primera de ellas, está ubicada en el área norte de la zona de estudio, sectores de Quebrada Seca–Pachingo, cuyo eje principal tiene dirección norte-sur con profundidad aproximada al basamento de 550 m y, la segunda, ubicada al suroeste de la zona de estudio, sectores de Barraza–Socos con un eje principal de dirección este-oeste y profundidad aproximada al basamento de 500 m.

De acuerdo a los antecedentes obtenidos y existentes se postula que el río Limarí en la antigüedad desembocó en el océano Pacífico por la bahía de Tongoy, al este de la localidad de Puerto Aldea. Hipótesis sustentada en resultados de sondeos realizados en las zonas cercanas a las localidades de Quebrada Seca y Cerrillos de Tamaya, indicadores de materiales sedimentarios característicos de flujos hídricos con dirección norte.

*Palabras claves: geofísica, tectónica, hidrología.*

## Introducción

Varias bahías del litoral chileno como la de Tongoy, Coquimbo y Mejillones presentan similitudes geomorfológicas en las cuales se destacan bahías profundas abiertas hacia el norte limitadas hacia el oeste por cordones montañosos compuestos por rocas fundamentales de edad Precámbrica y rocas graníticas y, hacia el este, la cordillera de la Costa. Al interior de estas bahías, se presentan extensas mesetas marinas en las que afloran secuencias sedimentarias rodeadas por depresiones tectónicas que guardan un completo registro de la sedimentación marina Cenozoica (Krebs *et al.* 1992, Benado 2000). El estudio de estas secuencias sedimentarias aporta antecedentes importantes para entender la evolución tectónica del margen continental activo del norte de Chile asociado al proceso de subducción.

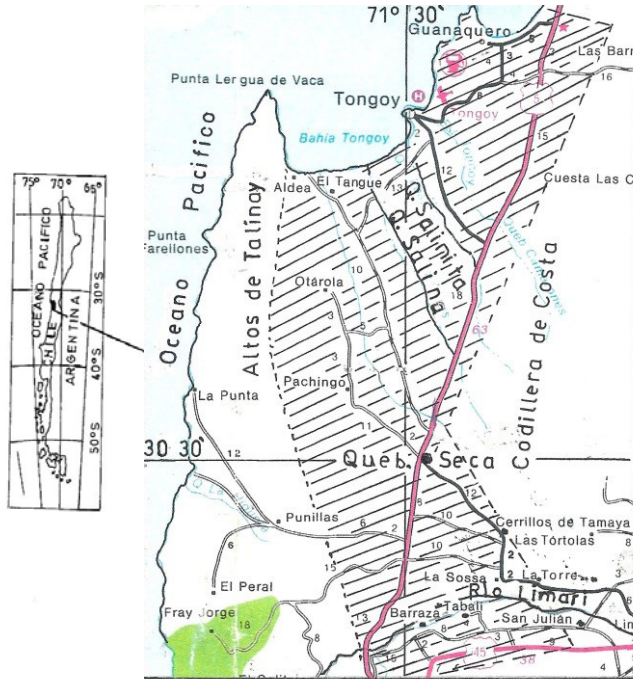
Se ha considerado que los Altos de Talinay son un bloque tectónico activo separado de la cordillera de la Costa que interrumpe la morfología lineal del litoral (Saillard *et al.* 2012).

En general, las investigaciones del margen continental han tenido un carácter local; con excepción del trabajo de Armijo y Thiele (1990) quienes intentaron relacionar rasgos morfoestructurales del margen continental con la subducción de la península de Mejillones, situación similar a la ocurrida en el sector de la bahía de Tongoy, la cual presenta una gran falla normal que produjo el acantilado costero, la falla de Mejillones y el Puerto Aldea respectivamente. La causa sería un cambio brusco en el ángulo del manto de la placa subductante, el cual se verifica por debajo de la cordillera de la Costa.

Niemeyer *et al.* (1996) postulan que la deformación extensional en el presente es un fenómeno compartido por todo el margen continental, comprendido entre cordillera de la Costa y el frente de subducción.

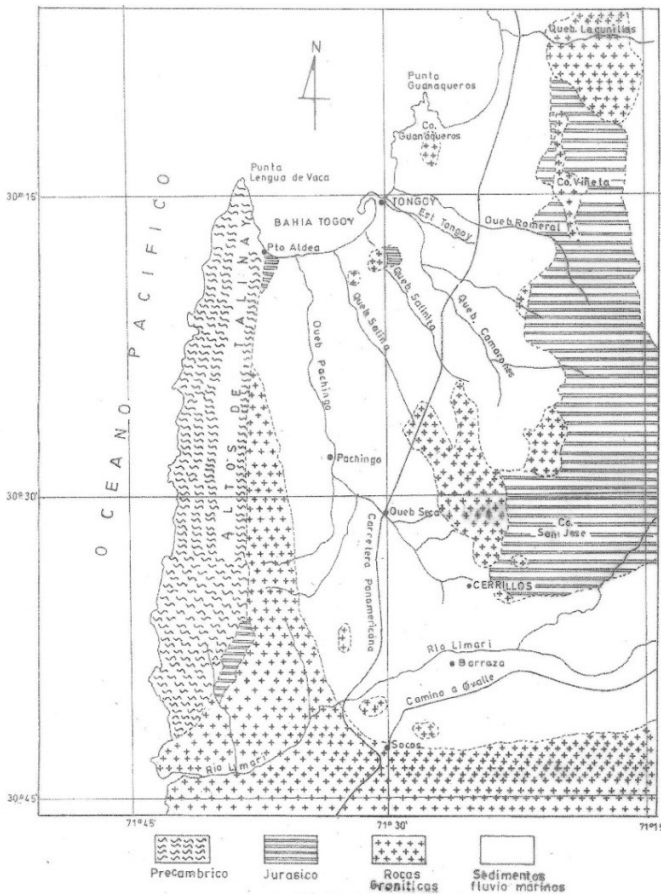
**Marco morfológico y geológico**

La zona de estudio se encuentra ubicada entre las latitudes 30°03'-30°45' S y las longitudes 71°45'-71°10' W (Figura 1). Esta zona se compone de las siguientes unidades morfológicas: a) en el sector oeste se localiza una cadena montañosa con dirección norte-sur paralela a la costa denominada Altos de Talinay, compuesta principalmente por un complejo precámbrico de rocas metamórficas, constituido por gneis, esquistos, filitas y rocas graníticas en el sur; b) hacia el este de la unidad anterior se encuentra una plataforma fluvio-marina de forma alargada en la cual existen una serie de quebradas con dirección norte-sur y, c) el límite este de esta plataforma lo constituye una cadena montañosa que comienza en el cerro San José en el sur, para terminar en el cerro La Viñeta al norte. La mayor parte de esta estructura corresponde al batolito que conforma la cordillera de la Costa, compuesto por rocas graníticas de edad Mesozoica. En la zona costera destacan las rocas del cerro Guanaqueros, las de la península de Tongoy y aquéllas que aparecen al interior de las quebradas Salina y Salinita (Figura 2), las que también pertenecen al batolito indicado.



**Figura 1.** Ubicación de las áreas de estudio, cuenca de Tongoy y parte oeste de la cuenca Limari.

Los sedimentos de la plataforma central están constituidos principalmente por sedimentos fluvio-marinos apoyados sobre rocas graníticas. Dicha plataforma se acuña hacia el sur, inclinándose con una suave pendiente hacia el norte, donde existen varias terrazas. La plataforma presenta quebradas, siendo las más importantes la de Pachingo y la de Camarones, por sus características hidrogeológicas. Adicionalmente se encuentran las de Salina, Salinita y Romeral. La mayor parte de los sedimentos de la plataforma pertenecen al Plioceno superior, los cuales incluyen gravas, arenas y arcillas marinas fosilíferas. En el curso inferior de las quebradas mayores existen sedimentos conformados por gravas y arenas no consolidadas, los que componen depósitos costeros que se ubican en la terraza inferior de la bahía de Tongoy (Meinardus 1961).



**Figura 2.** Unidades geológicas del área de las cuencas de Tongoy y parte oeste de la de Limari.



El área sur de la zona estudiada está limitada por las siguientes localidades: al norte, por el pueblo de Quebrada Seca; al sur, por los pueblos de Barraza y Tabali; al oeste, por el macizo Altos de Talinay y al oeste, por los pueblos de Cerrillos de Tamaya y San Julián. Esta zona está compuesta por una extensa terraza cuya altura varía entre los 300 msnm, y está constituida por depósitos aluviales de hasta 300 m de espesor (Thomas 1967) representados principalmente por conglomerados gruesos y bolones poco cementados con intercalaciones de numerosos lentes de areniscas. Esta observación concuerda con profundidades determinadas por sísmicas de Meinardus (1961) y por el modelo gravimétrico determinado en ese estudio.

### **Tectonismo**

Existen varias hipótesis sobre el origen de la tectónica que involucra la bahía de Tongoy y áreas anexas; la más actual es la descrita por Saillard *et al.* (2012), la cual está basada en dataciones U-Th de las rocas del área. Esta información sostiene que la bahía de Tongoy antiguamente estaba inundada por el océano Pacífico y que las rocas del macizo Altos de Talinay y el cerro Guanaqueros correspondían a islas durante el Pleistoceno medio. La datación de los depósitos del río Limarí indican edades miocenas-pleistocenas, por lo tanto el río Limari ya existía cuando la bahía de Tongoy estaba cubierta por el océano Pacífico. Al analizar comparativamente las zonas de desembocadura planteada y con la actual, la hipótesis tiene mucho sentido, considerando los esfuerzos del agua para llegar al mar, la primera, un vertimiento directo y la segunda atravesando el macizo rocoso de Altos de Talinay.

La tectónica indica que a medida que fue transcurriendo el tiempo y como producto de cambios eustáticos en el nivel del mar y ascenso tectónico de la corteza terrestre, debido al proceso de subducción, el océano fue retrocediendo. Este hecho permitió la generación de terrazas marinas, las cuales en algún tiempo geológico cortaron el flujo del río en el antiguo curso, lo que ocasionó el estancamiento del agua en la zona de Quebrada Pachingo. Este tectonismo y retroceso generaron que el río buscara una nueva trayectoria cambiando su curso superficial, iniciándose el proceso de erosión para atravesar los Altos de Talinay (Ota *et al.* 1995).

Los Altos de Talinay están compuestos por un intrusivo Jurásico que presenta sectores con diques, rocas cataclásticas y miloníticas, lo cual habría facilitado la erosión del macizo y posterior entrada del río Limari. Esta hipótesis se sustenta aún más, ya que justo entre la unión del intrusivo y el río, existe un dique y una falla, que se hace normal al sur del río, además de otras, una importante falla que determinó la dirección del río a través del macizo rocoso.

Otro antecedente de gran importancia es la morfología del basamento rocoso, determinado en este estudio, el cual indica la existencia de profundidades al basamento entre 550 y 70 m. Estos espesores del relleno sedimentario, producto del retroceso del océano hacia el norte, suponen una erosión subterránea generada por el antiguo curso del río Limarí en la zona. Dicho estudio indica un

levantamiento del basamento entre la actual cuenca del río y la zona de Quebrada Pachingo, el cual habría generado el aislamiento fluvial de esta zona.

### Marco hidrogeológico

El sistema hídrico entre las zonas de Tongoy y el pueblo de Cerrillos de Tamaya está compuesto principalmente por los aportes del río Limarí, que en algunos casos afloran en la Quebrada Pachingo. La característica general de la tectónica en la zona, sustenta que el río Limarí habría escurrido superficialmente en la antigüedad por la Quebrada Pachingo (Bruggen 1950, Taylor 1947, Borgel 1961, Saillard *et al.* 2012). Las quebradas Romeral, Camarones, Salina y Salinitas no estarían consideradas como tributarias de la Quebrada Pachingo, debido a la existencia subterránea de un cordón granodiorítico que las separa, con dirección norte-sur, el cual termina en los afloramientos ubicados en el sector de la mina "La Niña".

En el sector de la bahía de Tongoy se pueden identificar las siguientes unidades hidrogeológicas:

- a) Rocas intrusivas ubicadas en la cabecera de las quebradas con permeabilidades muy bajas.
- b) Depósitos coluviales que se localizan en los altos de las quebradas y forman conos de deyección que sirven como vías de descenso de aguas meteóricas en niveles más bajos. Depósitos que presentan una fracción clástica mayormente compuesta por gravas medias a gruesas, arenas y ripios finos en una matriz de arena media a fina con limos y arcillas.
- c) Depósitos eólicos en el sector costero que sirven como vía de descenso de aguasmeteóricas hacia niveles más bajos, compuestos por arenas bien graduadas con alta esfericidad.
- d) Depósitos sedimentarios marinos semiconsolidados ubicados en los sectores altos de la cuenca, los cuales presentan una gran variedad de facies. En el área de estudio, básicamente es un potente estrato de coquina, que engrana con depósitos continentales antiguos de origen aluvial. La unidad se encuentra parcialmente saturada estimándose una permeabilidad variable entre 0.1 y 1 (m/día).
- e) Relleno fluvial emplazado de forma ininterrumpida a lo largo de cada quebrada, cuyo espesor disminuye hacia el sector alto de ellas. Además de depósitos que están compuestos por gravas y ripios mal graduados, arenas y limos con buena estratificación. Dicha unidad es capaz de almacenar y transmitir cantidades importantes de agua subterránea con permeabilidades variable que son estimadas entre 1 y 10 (m/día).

## Marco Geofísico en la Región Tongoy-Limari

### Gravedad

Los primeros estudios del campo potencial de la gravedad en el área de la bahía de Tongoy, corresponden a un perfil realizado por la costa entre los afloramientos rocosos existentes entre la península de Tongoy y aquellos ubicados en el sector de Puerto Aldea (Meinardus 1961). Dicho trabajo tomó como plano datum el nivel medio del mar en el área, lo que simplificó el cálculo para obtener el modelo bidimensional de la bahía de Tongoy. El cálculo de la anomalía de Bouguer fue con un contraste de densidad de  $0.6 \text{ gr/cm}^3$ , lo que dio una anomalía de 11.5 mGal equivalente a una profundidad de 460 m. Dicho valor se encuentra frente a la Quebrada Pachingo.

Con el fin de investigar con mayor detalle la morfología del basamento subterráneo, asociado al recurso hídrico de las cuencas del río Limarí y de la Quebrada Pachingo, se realizó un levantamiento gravimétrico en dichas zonas, para lo cual los datos gravimétricos fueron referidos a una estación ubicada en la entrada a la localidad de Los Vilos, perteneciente a la Red Nacional de Gravedad de Chile y ligada a la Red Internacional Estandarizada de Gravedad de 1971 (IGSN 71). Adicionalmente se utilizaron dos estaciones referenciales de terreno para los loops locales (Tabla 1).

Estación	Gravedad	Altura	Coordenada UTM	
	Mgal	m	Este (m)	Norte (m)
Los Vilos	979504.24	38.5	264294.97	6466879.34
PR Tongoy (Pto. N°1)	979363.86	120.0	266476.52	6639649.49
PR Quebrada Seca (Pto. N° 294)	979394.19	118.0	261447.11	6621295.59

**Tabla 1.** Estaciones gravimétricas referidas a la Red Nacional de Gravedad.

Parte de los perfiles gravimétricos fueron realizados en la plataforma de la bahía de Tongoy. El resto de ellos se ubicaron en el sector de la cuenca del río Limarí, entre el macizo Altos de Talinay y la cordillera de la Costa (Figura 3).

Con la finalidad de considerar los efectos regionales de la zona, los perfiles fueron ligados en sus extremos a afloramientos rocosos.

Las estaciones gravimétricas se midieron cada 500 m y fueron referenciadas con un GPS MAP64s de Garmin. La ubicación de las estaciones fue georeferenciada con una precisión de  $\pm 25 \text{ m}$  en la horizontal y en altura de  $\pm 3 \text{ m}$ . Las cotas de las estaciones se determinaron con altimetría, minimizando el error mediante la

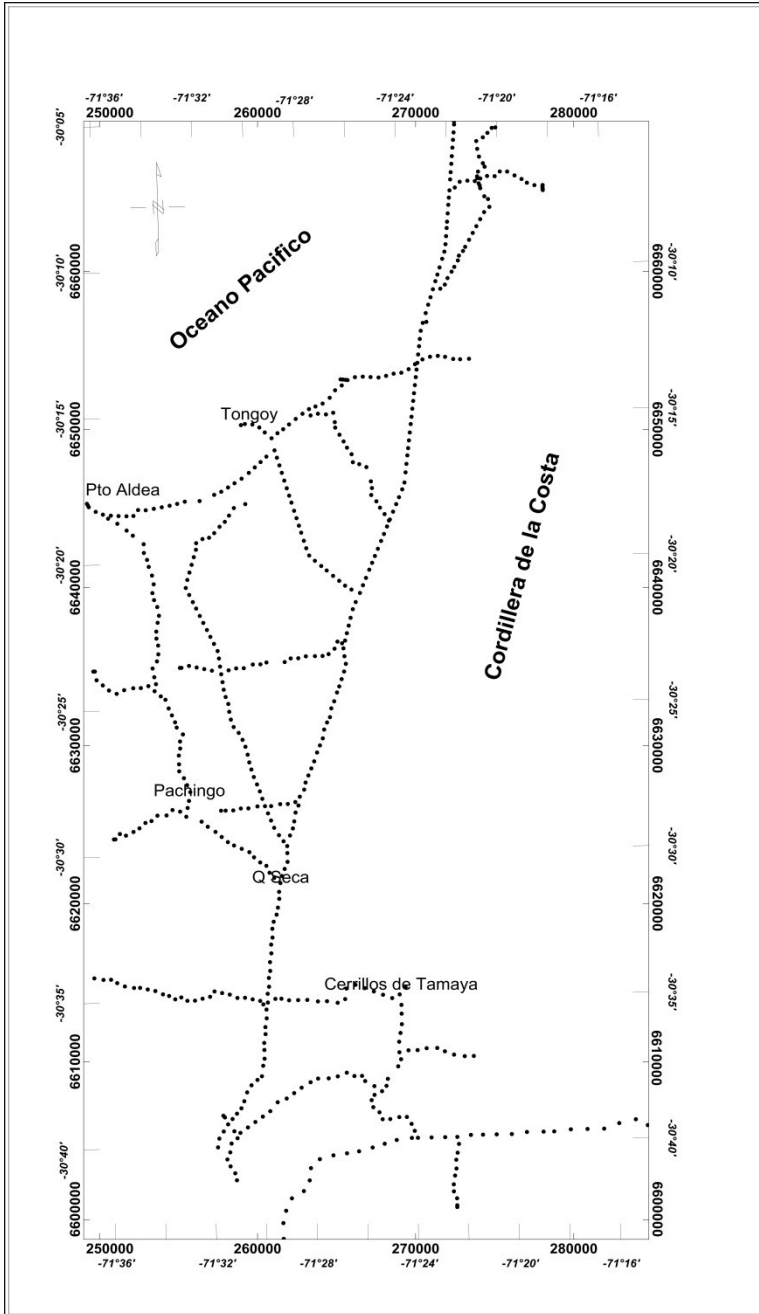


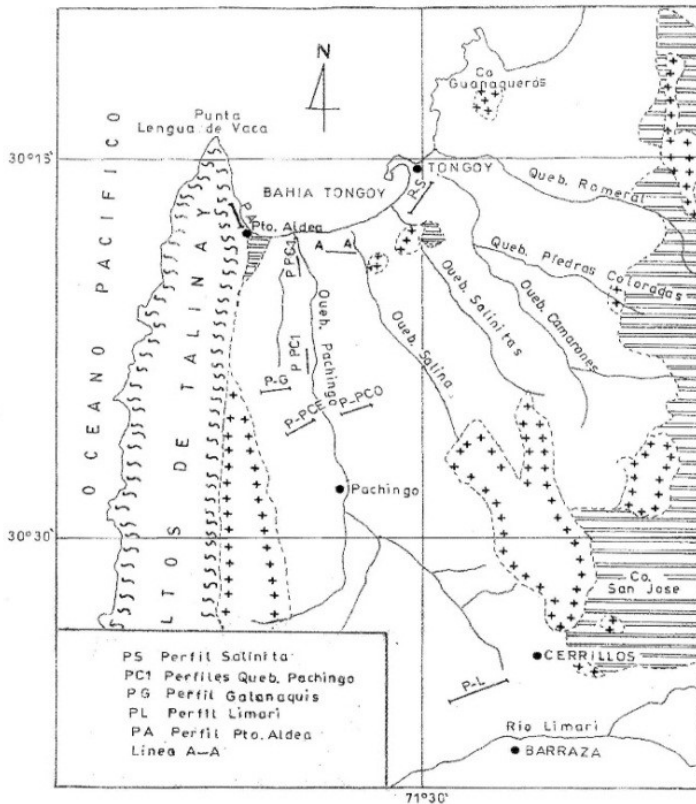
Figura 3. Ubicación de líneas gravimétricas en los sectores de la cuenca de Tongoy y Limarí.

realización de circuitos que no duraran más de 3 horas. La deriva instrumental no fue superior a 0.07 mGal, estimándose que el error máximo de la anomalía de Bouguer por estación no superara los 0.3 mGal.

En la obtención de la anomalía de Bouguer se consideraron los siguientes valores medios para la densidad: relleno sedimentario 2.1 gr/cm<sup>3</sup> y roca basal 2.6 gr/cm<sup>3</sup>. Los valores de las reducciones fueron las siguientes: Latitud C1=0.7476 mGal/m, Altura Ch =0.3086 mGal/m, Bouguer CB= 0.2010 mGal/m.

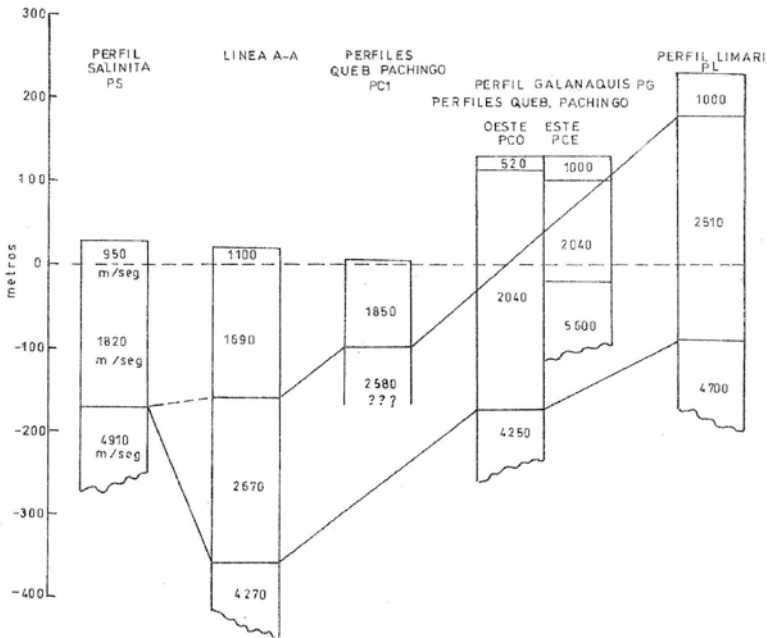
*Sísmica de refracción*

Los antecedentes sísmicos se basan en exploraciones realizadas por el Instituto de Geofísica y Sismología de la Universidad de Chile (Meinardus 1961), dichos estudios se ubican en la parte norte de la bahía de Tongoy y muestran una tendencia de los perfiles sísmicos paralela a la costa (Figura 4).



**Figura 4.** Ubicación de los perfiles sísmicos en la zona de Tongoy y parte oeste del Limari (Meinardus 1961).

Los resultados de las experiencias sísmicas permitieron determinar la estratigrafía con sus respectivos espesores (Figura 5). Destaca que la relación de velocidades con el tipo de suelos es aproximada, ya que no existen sondajes de validación; sin embargo, es una buena aproximación para explicar la litología presente y su relación con la hidrogeología de la zona.



**Figura 5.** Correlación de las velocidades de los perfiles sísmicos con sus respectivas velocidades (Meinardus 1961).

## Resultados

De acuerdo a observaciones del terreno, el nivel freático en el sector de la Quebrada Pachingo se encuentra superficialmente, debido a la existencia de afloramientos de agua en la zona. Este hecho no impide que el recurso hídrico se almacene en profundidades mayores.

La estratigrafía determinada por la sísmica, no limita que el recurso hídrico circule a través de dichos suelos, salvo en aquellas velocidades que sobrepasan

los 4,000 m/seg y representan a la roca sana, la cual está presente en toda el área menos en un sector de la Quebrada Pachingo; debido a que las longitudes de los perfiles sísmicos no permitieron investigar a profundidades mayores de 400 m.

Del análisis de la morfología del basamento subterráneo, determinado por gravimetría, se establece la existencia de dos cuencas subterráneas de considerables dimensiones, separadas por un alto en el basamento rocoso (Figura 6). La primera cuenca ubicada en la plataforma de la bahía de Tongoy, en el norte del área de estudio (color azul), cuyo eje principal tiene dirección norte-sur y una profundidad promedio al basamento de 550 m. La segunda cuenca ubicada en el área suroeste de la zona de estudio, sectores de Barraza/Soco, cuyo eje principal tiene una dirección este-oeste y una profundidad promedio aproximada al basamento de 500 m.

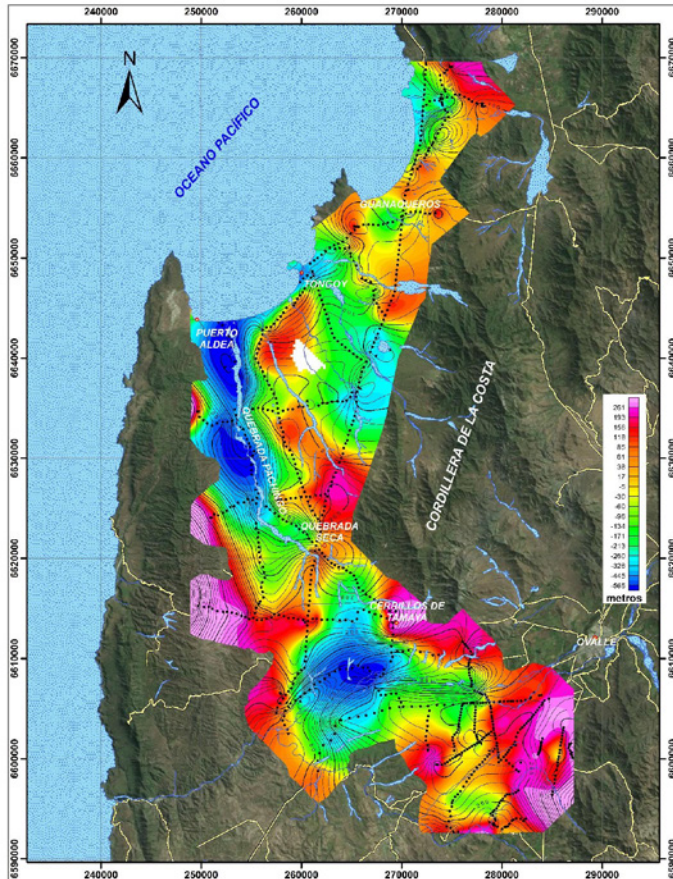
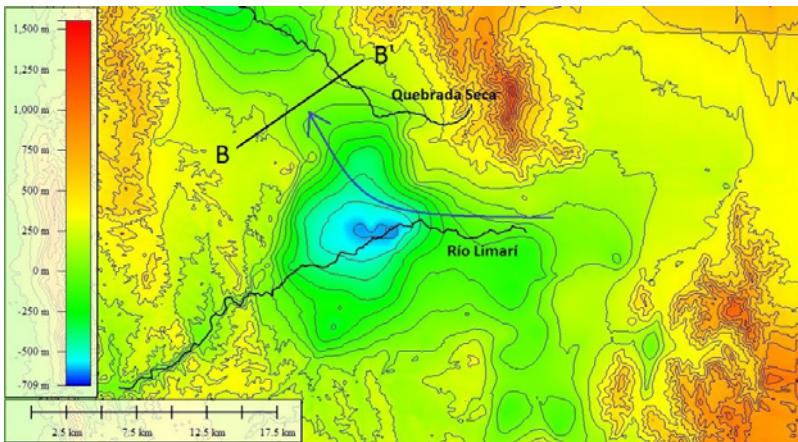


Figura 6. Modelo Morfológico del basamento subterráneo de la cuenca de Tongoy, Limarí oeste.

Se postula que el área de la Quebrada Pachingo es una de las zonas de mayor interés desde el punto de vista hidrogeológico, considerando que ésta tiene una alimentación hídrica subterránea constante, proveniente del río Limarí. Hipótesis basada en la similitud existente entre las distancias al basamento rocoso de la zona, en la que se intersecta el río Limarí con el macizo Altos de Talinay y el alto del basamento existente entre la Quebrada Pachingo y, el actual cauce del río Limarí. Este hecho indica un equilibrio hidráulico entre el sector del río Limari y la Quebrada Pachingo. Parte del recurso hídrico escurriría superficialmente hacia la costa atravesando los Altos de Talinay y, la otra parte, escurriría subterráneamente hacia el norte, pasando por el sector de la Quebrada Pachingo hacia la bahía de Tongoy.

Adicionalmente el análisis de los materiales encontrados en sondajes cercanos a la Quebrada Pachingo, demuestran la presencia de arenas, gravas y bolones desde los 48 hasta los 70 m de profundidad, hecho que indica la presencia de materiales pertenecientes al antiguo cauce superficial del río Limarí, con desembocadura en la bahía de Tongoy. Del estudio morfológico del basamento en el sector Quebrada Seca, se puede postular la existencia de un flujo subterráneo del río Limari, que escurriría por la zona donde el basamento se encuentra a una profundidad de 62 m (Figura 7).



**Figura 7.** La flecha azul indica el hipotético flujo subterráneo del río Limari que pasaría al sector de la Quebrada Pachingo.



## Conclusiones

Basados en los nuevos antecedentes gravimétricos se avala la hipótesis de que el río Limarí, en el Pleistoceno medio desembocó en la bahía de Tongoy, específicamente al este de la localidad de Puerto Aldea.

Existe un alto en el basamento o portezuelo que divide las zonas de Quebrada Pachingo y el actual cauce del río Limarí, que separa las dos grandes cuencas subterráneas que contendrían un recurso hídrico importante.

Existe un equilibrio hídrico entre la zona de la Quebrada Pachingo y la intersección entre el actual río Limarí con los Altos de Talinay, teniendo escorrentías superficiales hacia el oeste (océano Pacífico) y flujo subterráneo hacia el norte (Quebrada Pachingo). En la actualidad existen afloramientos de agua permanentes en ciertas zonas de la Quebrada Pachingo, hecho que indica un suministro constante del recurso de forma subterránea.

La morfología del basamento subterráneo obtenida mediante gravedad concuerda en parte con aquellas obtenidas por la sismica de refracción.

La hipótesis de la dinámica del tectonismo en el margen continental ha sido descrita en varias publicaciones (Bruggen 1950, Taylor 1947, Krebs *et al.* 1993, Niemeyer *et al.* 1996, Saillard *et al.* 2012), los cuales aportan hipótesis similares de la tectónica de la zona hasta hoy día. Esta tectónica es avalada por rasgos morfológicos obtenidos en esta publicación.

## Agradecimientos

Los autores agradecen a las empresas SEGMI e HIDROGESTIÓN por su contribución al mejoramiento de este artículo.

## Referencias

- Araneda, M.; Capelli, M., Araneda, A. 2016. "Modelo estructural de sector norte de la península de Mejillones, Chile", *Revista Geofísica*, Instituto Panamericano de Geografía e Historia, en prensa.
- Armijo, R., Thiele, R. 1990. "Active faulting in northern Chile; ramp stacking and lateral decoupling along a subduction plate boundary", *Earth and Planetary Science Letter*. vol. 98, pp. 40-61.
- Benado, D.E., 2000. "Estructuras y estratigrafía básica de terrazas marinas en el sector costero de Altos de Talinay y bahía Tongoy, influencia neotectónica", *Memoria*, Universidad de Chile, p. 78.
- Borgel, R., 1961. "El interfluvio Elqui-Limarí", *Descripción morfométrica y morfográfica del sector litoral*. Instituto de Geografía, Universidad de Chile.
- Bruggen, J., 1950. *Fundamentos de la Geología de Chile*. Instituto Geográfico Militar, Santiago, Chile.

- Krebs, W.; Aleman, A.; Padilla, H.; Rosenfeld, L. y Niemeyer, H. 1992. "Age and Paleogeographic significance of the caleta Herradura diatomite. Peninsula de Mejillones, Antofagasta Chile", *Revista Geológica de Chile*, vol. 19, pp. 75-81.
- Meinardus, H., 1961. Exploraciones geofísicas en el área de Tongoy. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Instituto de Geofísica y Sismología, Publicación núm. 2, Ed. Universitaria S.A., pp. 205-215.
- Niemeyer, H.; González, G. y Martínez-de-los Ríos, E. 1996. "Evolución tectónica Cenozoica del margen continental activo de Antofagasta, Chile", *Revista Geológica de Chile*, vol. 23, núm. 2, pp. 165-186.
- Ota, Y.; Miyachi, T.; Paskoff, R. y Kobs, M. 1995. Plio-Quaternary Mariric terrace and their deformation along the Altos de Talinay, North central Chile, *Revista Geológica de Chile*, vol. 20, pp. 89-102.
- Saillard, M.; Riotte, J.; Regard, V.; Violette, A.; Herail, G.; Audin, L. and Riquelme, R. 2012. "Beach ridges U-Th dating in Tongoy bay and tectonic implications for a peninsula by system, Chile". *Journal of South American Earth Science*, vol. 40, pp. 77-84.
- Taylor, G., 1947. "The Tongoy Area", Informe Inédito, Santiago, Chile.
- Thomas, H. 1967. *Geología de la Hoja de Ovalle*. Instituto de Investigaciones Geológicas, Chile B°23, p. 58.

## Relevamiento geofísico para la provisión de agua subterránea a Santa Rita de Catuna, provincia de La Rioja, Argentina

Manuel J. Mamani\*  
Daniel E. del Moral\*\*

*Recibido en enero de 2015; aceptado en enero de 2017*

### Abstract

The population of Santa Rita de Catuna city is of 1695 inhabitants; possibilities for developing in any aspect from the economic to the social, including the demographic, is limited by the availability of potable water. Under this scenario, it is imperative to know if there are possibilities to achieve water resources to a greater extent than currently exists. For its accomplishment, 30 exploratory geophysical polls (SEV) with Abem AC Terrameter equipment were carried out, one electrical tomography for the analysis of the immediate subsoil in the local University Facility, and several pseudosections; with the field data in the determined profiles validated with perforations, were carried out as well. The sites are in the city area, and in a line on the old road that leads to Milagro city, passing through the Colonia Ortiz de Ocampo city. The opening of the current electrodes was gradually increased (Schlumberger methodology) until finding increasing resistivity that denoted the presence of the rock structure (electric basement). Two profiles were made in the West East direction, the first one with the largest amount of SEV and the other, located to the South of the first, with three SEV surveys. The SEV sites were chosen where access was possible. Also, the contact of the mountain ranges with the plain was determined by the resistivity change. The results indicate the areas where the depth of the water collection stratum is greater and its exploitation is possible. Moreover, in those areas, the contamination by the waste water is lower.

*Key words: Geophysical Catuna La Rioja, Underground water.*

### Resumen

La población de la localidad de Santa Rita de Catuna es de 1,695 habitantes. Las posibilidades de crecer en cualquier aspecto, desde lo económico hasta llegar a lo social, incluyendo la demográfica, se encuentra limitada por la disponibilidad de agua potable. Bajo esa realidad lo inmediato y urgente es conocer si hay posibilidades de contar con el recurso hídrico en mayor medida del existente

.....  
\* Unidad de Geofísica, IANIGLA, CONICET, CCT Mendoza, Argentina, correo electrónico: mmamani@mendoza-conicet.gob.ar  
\*\* Universidad Nacional de La Rioja.

actualmente. Para su cumplimiento se realizaron, 30 Sondeos Eléctricos Verticales (SEV) con un equipamiento Abem AC Terrameter; tomografía eléctrica para el análisis del subsuelo inmediato en la Sede Universitaria; pseudosecciones, con los datos de campo de los perfiles así determinados y validado con perforaciones. Los sitios se ubicaron cubriendo el área que comprende la villa, y en una línea sobre el antiguo camino que conduce a la localidad de Milagro, pasando por la Colonia Ortiz de Ocampo. La abertura de los electrodos de corriente se incrementó gradualmente (metodología Schlumberger) hasta encontrar resistividad creciente que denotaba la presencia de la estructura rocosa (basamento eléctrico). Se realizaron dos perfiles en la dirección oeste-este, el primero con mayor cantidad de SEV y el otro al sur del primero con tres sondeos. Los sitios de emplazamiento de los SEV fueron elegidos donde había posibilidades de acceso. Asimismo, mediante el cambio de resistividad se determina el contacto de la sierra con la llanura. Los resultados indican áreas donde es mayor la profundidad del estrato de acopio de agua y es posible su explotación, además tiene menor contaminación por las aguas servidas.

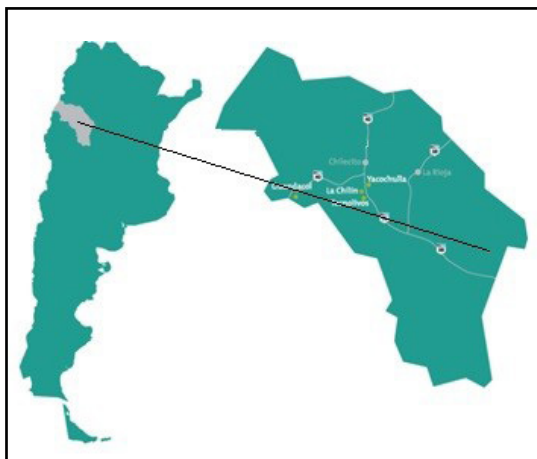
*Palabras Claves: Catuna, La Rioja, Geofísica, agua subterránea.*

## Introducción

En la región llamada Los Llanos de la provincia de La Rioja, al este y sureste de la ciudad capital, el tema mayormente recurrente es contar con agua para el desarrollo y satisfacer las necesidades básicas. La Villa de Santa Rita de Catuna ( $30^{\circ} 57' 11.55''$  S– $66^{\circ} 13' 12''$  O) (Figura 1) según el censo 1960 tenía 641 habitantes, en el año 2010 cuenta con 1,695 habitantes sobre el total de 7,145 del Departamento General Ocampo, las posibilidades de crecer en cualquier aspecto, se encuentra limitada por el recurso hídrico. Sabido es que no hay cauces con circulación superficial permanente, las posibilidades de precipitaciones lluviosas son escasas (300 mm anuales), el resultado es que hay déficit hídrico. En forma habitual los habitantes de la Villa se surten de la vertiente histórica ubicada en el costado oeste de la localidad, mientras el consumo por el aumento de la población se incrementa, y los caudales de esa fuente siguen siendo los mismos con un promedio de 14l/seg con sus variaciones de acuerdo al régimen de precipitaciones anuales. La calidad química de esta agua es de regular a buena. Asimismo los pobladores y vecinos, en tiempos pasados, tenían su propio pozo cavado, sin embargo debido al cambio en el régimen de lluvias, estos se han secado. En este contexto es importante conocer la disponibilidad de acuíferos nuevos.

La provisión de agua para riego utiliza un canal a cielo abierto que atraviesa la Villa por el costado norte proveniente del dique Anzulón, (construcción 1930-1938, 550 msnm–capacidad 33 Hm<sup>3</sup>) distante 12 km al NW de Catuna. Sin embargo el caudal tiene por destino final a la localidad de Milagro, ubicada 22 km al Este de Santa Rita de Catuna. Debido al exiguo volumen almacenado en la presa por las

escasas precipitaciones, el canal no transporta el caudal establecido en el diseño original. En su recorrido, parte de ese caudal es derivado para regar las tierras de La Colonia (500 Ha) ubicada 2 km al este de la Villa Santa Rita de Catuna. Al liberar agua de los menores niveles del dique, los contenidos salinos se incrementan, luego la calidad del agua es relativamente salobre (Figura 2).



**Figura 1.** Sitio de la zona de trabajo, al costado oeste del territorio nacional y al sureste de la provincia de La Rioja.

De modo que queda como alternativa para el crecimiento de la Villa la extracción del fluido que circula por el subsuelo, es de tener en cuenta que estos acuíferos están alimentados verticalmente por las aguas meteóricas o en forma horizontal por las aguas provenientes del vecino macizo granítico presente al oeste de la Villa. De esta forma hay dos posibilidades de extraer agua, una es tomar desde lo que se denomina el subálveo (acuífero libre) cercano a la superficie y el segundo modo desde estratos más profundos, ambos con beneficios y dificultades.

El primer modo tiene la posibilidad de que en cercanías de la sierra, hay circulación del fluido infiltrado aguas arriba, tiene la ventaja de ser aún no contaminada por el uso consuntivo de la población, y a muy poca profundidad, la desventaja es tener poco caudal. Mientras mayor sea la profundidad del basamento hidrogeológico, aumenta la potencia de material sedimentario apto para la circulación o almacenamiento (arenas y gravas), incrementándose la posibilidad de encontrar acuíferos con buena permeabilidad y recarga. El segundo modo es de estratos más profundos. Para descubrirlo, en ambos casos, es necesario hacer

estudios geofísicos (SEV) que indiquen la constitución física del subsuelo, y de esa forma, tener mayormente certeza para ubicar el estrato portador del agua, la profundidad a la que se encuentra y su posible explotación. En cuanto a identificar los espesores probables y profundidades del fluido, se realizaron en el resto de la superficie de la Villa, a) tomografía eléctrica que sirve, en este último caso, para el análisis del subsuelo inmediato; b) 30 Sondeos Eléctricos Verticales (SEV) con mayor penetración en la búsqueda de la información y para el relevamiento de los estratos profundos.

La Villa se encuentra inmersa en el ambiente de las Sierras Pampeanas y en el piedemonte este de la sierra de Los Llanos (Figura 2). Su composición consiste en rocas ígneas y metamórficas muy compactas (Stella Page *et al.* 2002) y por lo tanto resistentes a la erosión, la estructura general de las sierras consiste en bloques rígidos, elevados a lo largo de fallas de gran extensión y con vuelco hacia el lado en que la pendiente es menor. El rumbo general de estas fallas es de nort-sur, los grandes esfuerzos orogénicos que permitieron el ascenso de las sierras y como una consecuencia de aquellos movimientos la sierra se fracturó en bloques, otra consecuencia es que quedó flanqueado por una verdadera red de diaclasas o fracturas sin desplazamientos, abiertas en su mayoría. El rumbo principal es de NE a SO o de NO a SE o de este a oeste (Espeleta *et al.* 2006).

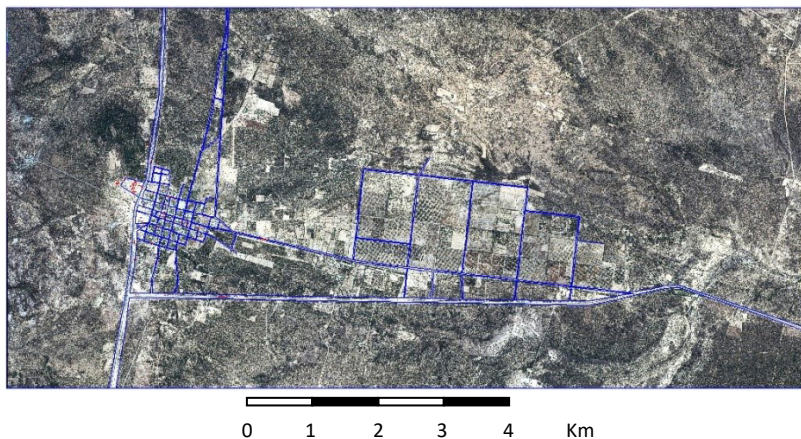
El conjunto de rocas de la primera edad (Precámbrico) es el sustrato en donde descansan los estratos de menor edad, estos son de edad Paleozoica, Terciaria y luego Cuartaria (M. Archangelsky 1996), que constituyen la columna sedimentaria en donde se alojan los fluidos, como el agua, y pueden circular aprovechando sus planos de sedimentación y la pendiente. El basamento cristalino tiene gran importancia en esta área —como fue observado en párrafos anteriores—, por su formación física es impermeable y no contamina con salinidad el agua que se desplaza.

Por otro lado el agua que también circula por las fracturas del basamento cristalino (diaclasas), en forma interna va a conservar la mayor parte la calidad debido a la escasa contaminación por sales y otros componentes, que sí es posible encontrar en el otro paquete del sedimentario sobreyacente al anterior descrito, donde la circulación se realiza por terrenos de variada constitución química, distintas permeabilidades y tiempos de transcurencia y permite cargarse de componentes que modifican los resultados químicos.

La emanación de agua se produce desde el basamento cristalino, que transcurre por las diaclasas del granito desde la zona de infiltración y en el caso de la extracción por molinos de viento, la profundidad del nivel del agua es no mayor de 5 metros desde la superficie (aunque estos dispositivos mecánicos tienen capacidad para extraer agua de mayor profundidad), esta es agua llamada del subálveo y transcurre a través del espesor sedimentario, la diferencia entre ellas va a ser visualizada en las conductividades del agua. Los estratos sedimentarios se van profundizando hacia el este. Hacia el norte de la localidad de Catuna, el perfil geológico varía ante la presencia de rocas sedimentarias correspondientes a la Formación Paganzo (Paleozoico) (Azcuy y Morelli 1970b, Salfity y Gorustovich

1983) arcillas rojizas y rocas de bajo metamorfismo de características esquistas, que apoyan en discordancia sobre el basamento cristalino granítico, afloramientos de estas formaciones rocosas han sido observadas en distintos puntos del área de estudio y seguramente se deben encontrar en toda el área de interés de este trabajo.

Finalmente en el sector llano (de menor altura topográfica y de menor pendiente) se desarrolla al este de la localidad de Catuna pasando por la Colonia y está conformado por una cobertura aluvial de origen Cuartario, por debajo de la misma se presentan sedimentos Terciarios (estratos de Los Llanos) que se desarrollan por encima del basamento cristalino, este se presenta a mayor profundidad a medida que nos dirigimos hacia el este, seguramente también las aguas de circulación se van profundizando y cargándose de sales que afectan la potabilidad.



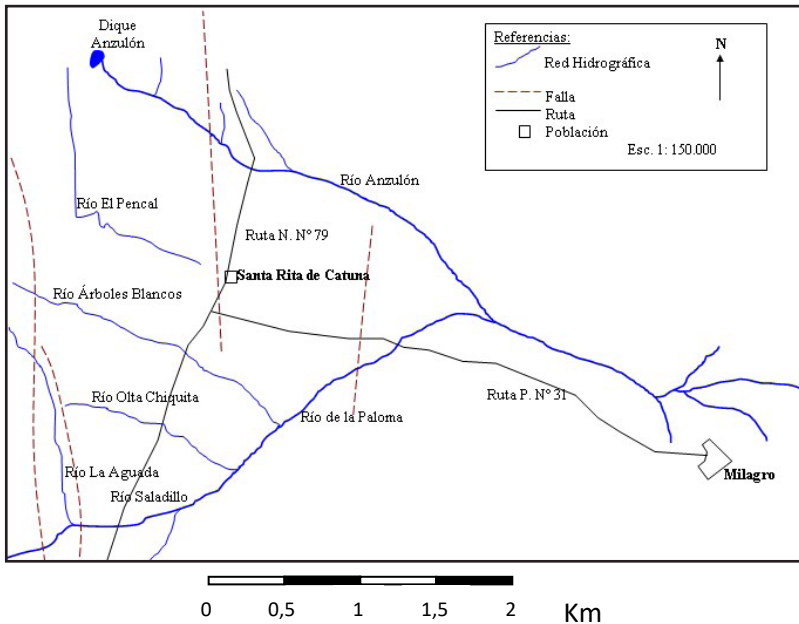
**Figura 2.** Villa San Rita de Catuna ( $30^{\circ} 57' 11, 55'' S-66^{\circ} 13' 12'' O$ ) Procesado desde imágenes IKONOS se observa la colonia Agrícola-1, la traza de la Villa, al costado oeste la ubicación de la Sede Extensión Académica de la Universidad Nacional de La Rioja-2. De sur a norte la ruta provincial 79-3 que lleva hacia el norte a Chemical y Olta, y al sur hasta Desiderio Tello y Ambil, y hacia el este la localidad de Milagros.

## Materiales y resultados

Se realizaron 30 SEV exploratorios por toda el área que comprende la Villa, y en una línea en el antiguo camino que conduce a localidad de Milagro pasando por la Colonia Ortiz de Ocampo, la abertura de los electrodos de corriente se desplazaron

hasta encontrar la elevada resistividad que denotaba la presencia de la estructura rocosa (basamento cristalino). De todos ellos se eligieron para graficar dos perfiles en la dirección oeste-este AA' (SEV: 1, 3, 4, 7, 8, 9, 10, 20, 26) y BB' (SEV: 24, 23 y 25). En la Figura 4 se indican los sitios de emplazamiento de los sondeos geofísicos.

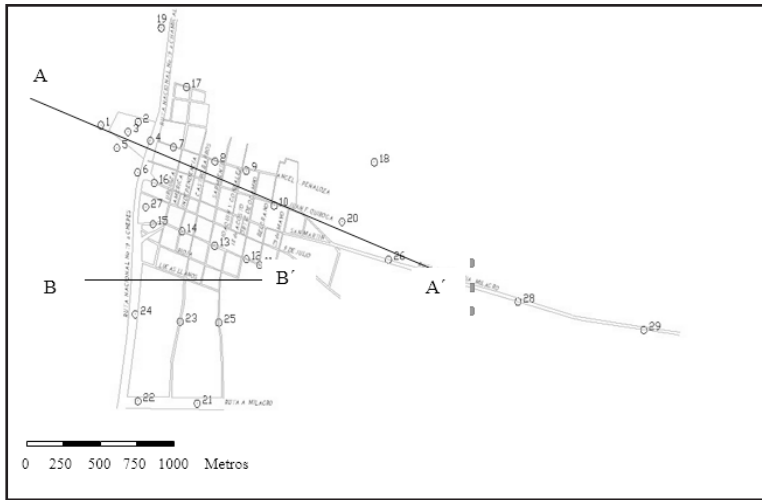
Los resultados y la interpretación de los sondeos se muestran en las Figuras 5 y 6, en ellas sí se visualiza que con la extensión de los conductores AB se logra la profundidad necesaria para relevar el estrato de las sedimentitas del estrato denominado Paganzo seguido luego por el basamento cristalino.



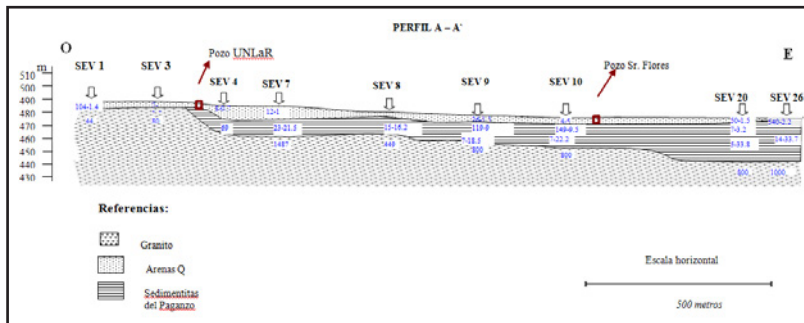
**Figura 3.** Red hidrográfica que indica los canales de la descarga pluviométrica en el área de la Villa Santa Rita de Catuna con indicación de las fallas de la estructura orogénica. (Bonder, G. 2009). Al norte el canal de desagüe el Dique de Anzulón, al sur el cauce del río de la Paloma sin circulación superficial.

El análisis de las imágenes satelitales Ikonos y Landsat determina la existencia de una fractura de rumbo aproximado N-S, observada claramente en la sierra de Los Llanos (Figura 6), hacia el SE hay una continuación de la misma que está representada por lineamientos de la vegetación arbustiva, indicador de un mayor desarrollo de suelo apto. Esta fractura sigue enmascarada por sedimentos hasta las surgencias.

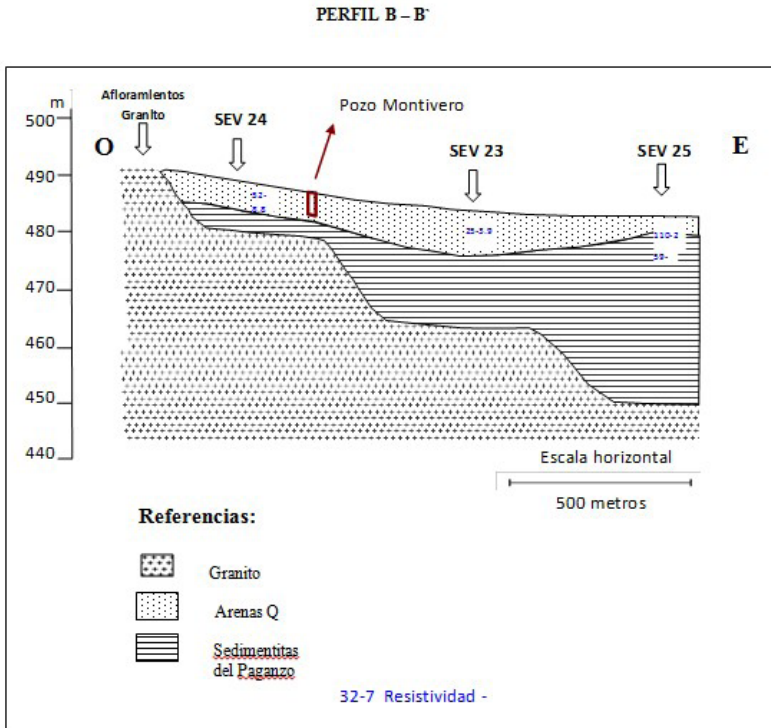




**Figura 4.** Ubicación de los sitios de los sondeos eléctricos verticales, mostrados sobre el plano de las calles de la Villa Santa Rita de Catuna, y los perfiles trazados. El superior corresponde al AA' y el inferior al BB'.



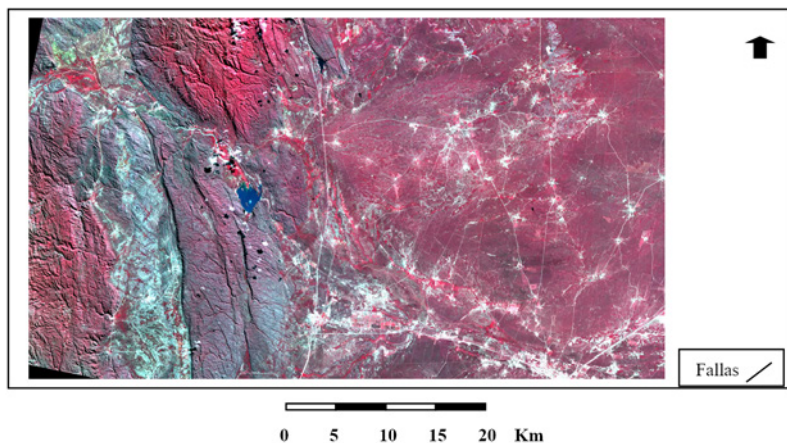
**Figura 5.** Perfil A-A' se observa la distribución en profundidad de los estratos componentes del subsuelo. Entre el SEV 3 y 4 se profundiza las arenas de edad Cuaternaria debido a su granulometría, se acumula agua y donde se recomienda realizar la perforación a los efectos de incrementar el volumen disponible. En la dirección este se profundiza el basamento cristalino (alta resistividad) y el nivel Paganzo adquiere resistividades menores. (SEV 20 y 26), esto trae como consecuencia que el agua desplazada tiene mayor salinidad y además se contamina debido a la infiltración de las aguas servidas de la población de Catuna (véase Figura 2).



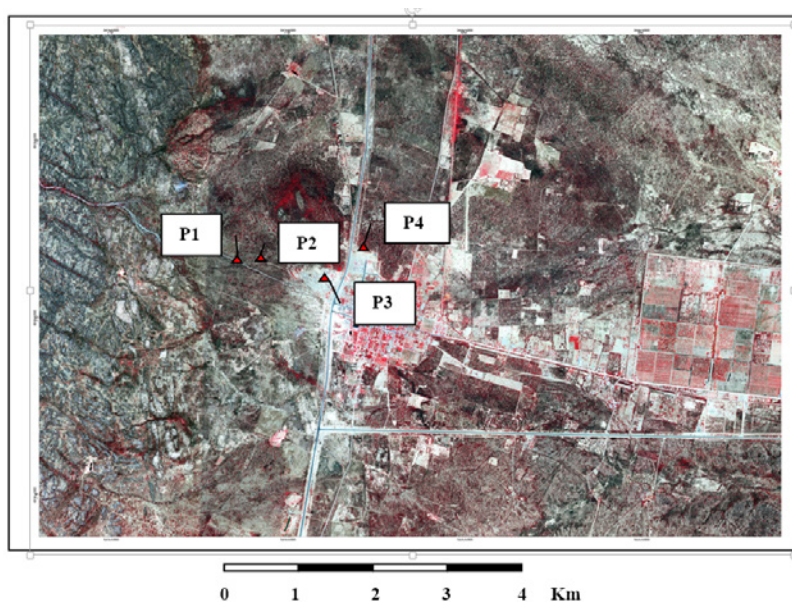
**Figura 6.** Perfil B-B'. En este corte oeste-este se destaca la rápida profundización del Granito a través de escalones con dirección norte-sur, sobryace el material sedimentario de distinta edad y granulometría, hay un estrato continuo que le atribuimos a tosca terciaria.

La fractura descrita precedentemente, también es detectada por los SEV, ya que en el SEV N° 1 se interpretó la presencia del basamento cristalino a 4.61 metros de profundidad, mientras que en el SEV 7 el basamento se encuentra a 21.6 metros de profundidad. Por tal motivo es que se deduce que la mencionada fractura atraviesa el predio de la Universidad aproximadamente por el centro. Esta estaría generando un escalón en el subsuelo quedando el bloque hundido hacia el este del mencionado predio. La fractura está ejerciendo control estructural originando una circulación selectiva del flujo subterráneo. Este escurrimiento aflora en las vertientes debido al ascenso del basamento hidrogeológico.

En el área de la Sede Universitaria, se realizaron además tomografías eléctricas a los efectos de determinar, con alta resolución, los canales de circulación de agua cercana a la superficie y facilitar la instalación de pozos cavados con molinos de viento o perforaciones. Con los datos experimentales colectados en el terreno se



**Figura 7.** Imagen Landsat ETM7 con la digitalización de las fracturas geológicas identificadas.

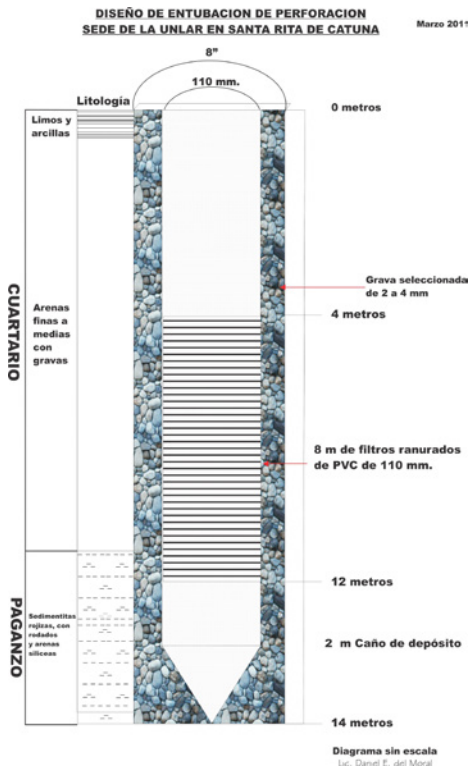


**Figura 8.** Imagen IKONOS con la ubicación geográfica de las perforaciones exploratorias realizadas en Santa Rita de Catuna.

construyeron pseudosecciones para visualizar las variaciones de la resistividad en vertical y horizontal. En las tareas de campo se utilizó un resistímetro ABEAM y conductores de 2 mm con electrodos de cobre para el MN y de hierro para el envío de la corriente (AB). Con el objetivo de validar los resultados y las interpretaciones de los SEV se realizaron perforaciones (Figura 8) de carácter exploratorio.

En la perforación N° 1 que se ubicó en el límite oeste de la Sede Universitaria, (labio elevado de la fractura) se detectó el basamento cristalino a los cuatro metros de profundidad, este dato es coincidente con los valores del SEV N° 1. La perforación N° 2 se encuentra en el límite Este del predio (labio hundido de la fractura), donde existe una potencia mayor de sedimentos Cuaternarios que pueden albergar agua subterránea (Figura 9).

En la Figura 10 están representadas las otras perforaciones exploratorias que se realizaron en la zona. Las perforaciones P3 y P4 fueron con resultados negativos desde el punto de vista hidrogeológico, ya que no se detectaron acuíferos de interés para ser explotados.



**Figura 9.** Gráfico del diseño de entubación de perforación de la Sede Universitaria.

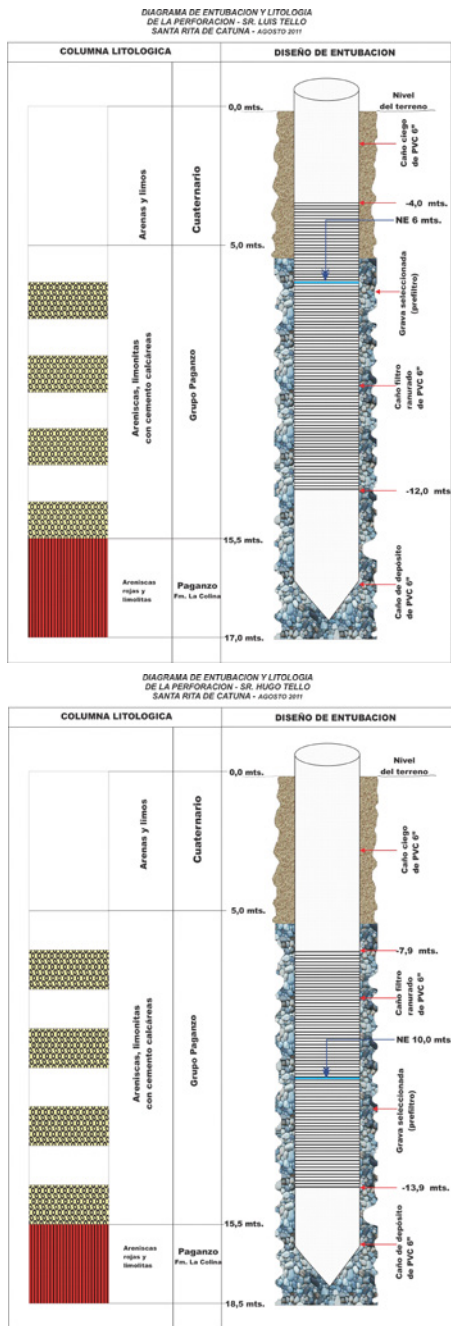
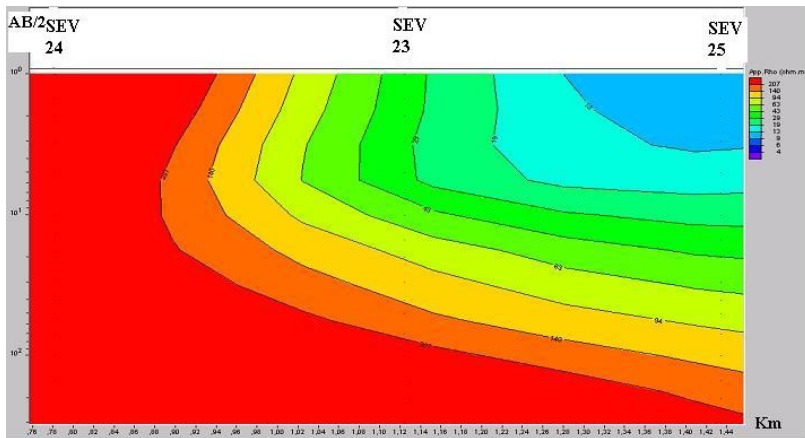


Figura 10. Diseño de entubación de las perforaciones exploratorias P3 y P4.

## Resultados

### Pseudosecciones

Con los resultados del procesamiento de los SEV se construyeron pseudosecciones en una sola figura indicativa, mediante un arreglo en dos dimensiones de un perfil de resistividad que indica la variación aparente lateral y vertical, con datos a igual profundidad. Un punto de estas figuras es un promedio de la resistividad en un entorno del mismo (Figuras 11 y 12). Allí se observan, desde la profundidad indicada por la resistividad (a 100 ohm m), el contacto del estrato sedimentario con el basamento cristalino. También es destacable los sectores de mínimas resistividades (a 10 ohm m) indicando la morfología, en el subsuelo, el espesor del total sedimentario. Es observable también sectores de la gráfica de baja resistividad, el primero de ellos (AA) entre los SEV 3, 4 y 7 y luego bajo el SEV 10. Este sector de baja resistividad coincide con la traza de las fallas indicadas anteriormente. Analizando en particular ese total sedimentario, es de destacar que esos estratos saturados sirven como depósitos del agua desde donde mediante una perforación existen las posibilidades de extraer agua y de buena calidad.

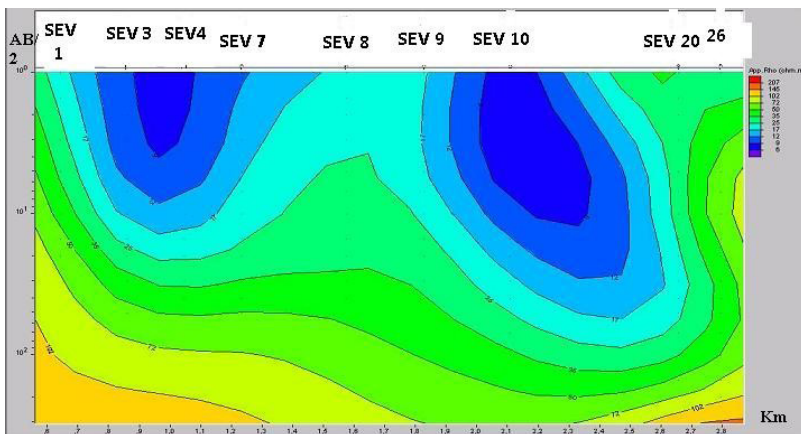


CATUNA.LA RIOJA.PERFIL BB'. Seudosección de resistividades de campo

**Figura 11.** En la escala vertical las aperturas de los electrodos de envío de corriente AB desde 1 (margen izquierdo superior) -300 m; en el eje horizontal inferior las distancias entre los SEV involucrados. En isolinéas las resistividades según la paleta de colores ubicadas en el costado derecho superior. Se observa el contacto entre el espesor de relleno sedimentario (<math>\rho</math>) y el crecimiento del mismo hacia el oeste indicando el basamento eléctrico (color rojo).

Esta situación se repite en el perfil transversal BB', la baja resistividad comienza entre los SEV 23 y 25, y el contacto con el basamento entre los SEV 23 y 24 (color rojo), observando los sitios de emplazamiento de los sondeos los sectores de mayor conductividad son continuados entre los dos perfiles asegurando la coherencia en los resultados. La figura que representa el perfil DD', (submeridiano), comprende los sitios 19, 17, 7, 14, 23 y 21, únicamente debajo el SEV 19 se encuentra el sector de menor resistividad, en los otros resultados la corriente enviada por los electrodos AB, denota la presencia de estratos que se corresponden con el basamento.

Analizando los perfiles, se puede concluir parcialmente que la traza de los fallamientos también indicados por la carta geológica, está mejor definida e indicada por los resultados de estos sondeos exploratorios, y atraviesa el área de la Villa por el costado oeste y entre los sitios 19 y se continúa entre el 23 y el 24.

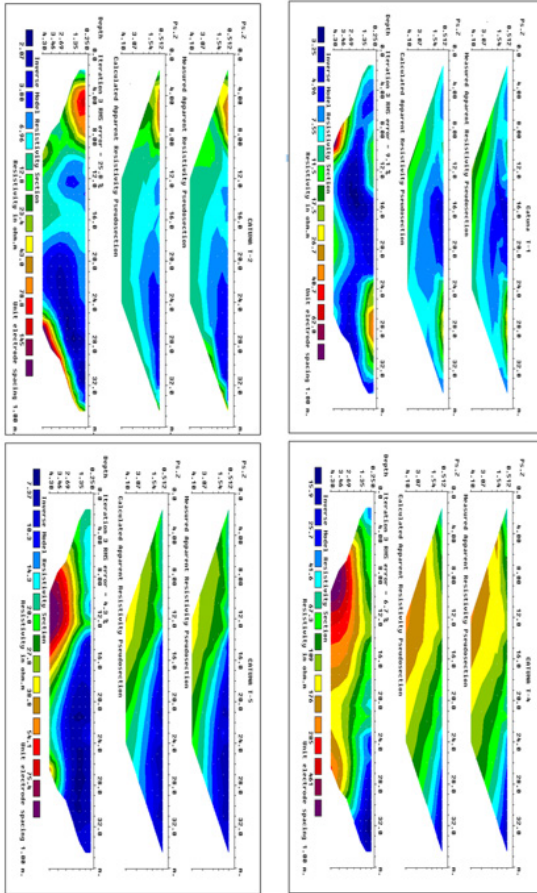


CATUNA.LARIOJA.PERFIL AA'.Seudosección de resistividades de campo

**Figura 12.** Se observan las zonas de menor resistividad debajo de los SEV 3-4, y 10, coincidente con lo indicado en el perfil AA' donde la interpretación realizada indican la presencia de arenas donde es posible la presencia de depósitos de agua. En estos sitios se recomendó realizar una perforación en busca de agua subterránea.

*Tomografía eléctrica TE (alta resolución)*

Es reciente el uso de la tomografía en la geofísica para la búsqueda arqueológica, cables enterrados, etc., que se encuentren a poca profundidad. La tomografía es reservada para representar, mediante imágenes, los valores de propiedades físicas, como la resistividad aparente medidas desde la superficie de donde se encuentre



**Figura 13.**

En los resultados de los cuatro sitios explorados T<sub>1</sub> y realizados en la Sede Universitaria, se muestra la secuencia del procesamiento desde la resistividad aparente, la pseudosección y el modelo final, luego de las iteraciones y el porcentaje de error. Se describe el código de colores: la paleta adoptada indican las resistividades, van en aumento desde el azul hacia el rojo. En este caso, se extendieron 36 y 24 electrodos separados a 1 metro de distancia entre ellos, indicados en el eje de las abscisas superior. En el eje de las ordenadas, a la izquierda de la figura, la profundidad de estudio, según este distanciamiento, alcanza 4,30 m y 3,46 m respectivamente. Se puede interpretar que desde una resistividad de 40 ohm metro hacia menores valores indican estratos húmedos, con posibilidades de saturación de agua, los colores cercanos al rojo, indican basamento eléctrico que este caso puede deberse a la formación Proganzo o en otros casos al basamento cristalino, a partir de cual no es posible tener estratos saturados con agua, debido a la porosidad y a la prácticamente nula permeabilidad.



el objeto. Para ello se utilizan dispositivos geoeléctricos que sirven luego para generar imágenes del subsuelo, donde se representa la resistividad verdadera de los sitios en estudio. La relación entre la resistividad aparente y la resistividad verdadera, es compleja. Para determinar esta última se tomó como base los valores de la resistividad aparente, y se aplica la técnica de la "inversión" (Loke 2004).

El procedimiento de generación de una tomografía eléctrica mediante inversión, parte de los datos de resistividad aparente medidos, representados en forma de pseudoperfil. A continuación se genera un modelo hipotético de resistividades verdaderas del subsuelo y resolviendo lo que se define como "cálculo del problema directo", se llega al modelo de resistividades aparentes que se derivaría del mismo. Estas resistividades aparentes se comparan con las realmente medidas, y se calcula el error cometido. A través de él se modifica el modelo hipotético real de resistividades verdaderas, y se repite el proceso anterior. De este modo, tras una serie de iteraciones, se consigue un modelo de resistividades verdaderas del subsuelo que da explicación a las resistividades aparentes medidas. En este caso el procesamiento se realizó con el software IPI2Win (Bobachev *et al.* 1998, 1999-2000) que genera modelos compatibles con el perfil real, es de destacar que sobre esos modelos resultantes, debe necesariamente incorporarse la experiencia y el conocimiento del intérprete con el aporte de los antecedentes geológicos de la región.

El equipamiento utilizado es el mismo que para los sondeos eléctricos verticales (ABEAM), la diferencia radica en un arreglo específico de ubicación de los electrodos. Sobre una sola línea se colocan los electrodos conectados mediante conductores a una consola y partir de allí se van realizando las mediciones modificando las aberturas de AB y de MN. El espaciamiento fue de 1 m en la longitud total de 24 m en un caso y 36 m en otros, este arreglo de espaciamientos y longitudes tiene que ver con la profundidad de investigación y la resolución de detalles que es posible observar en el subsuelo inmediato.

Los resultados del procesamiento de la TE, permite discriminar detalles, pero con menor profundidad de investigación, comparado con un SEV. En el caso que nos ocupa, la ejecución de las tomografías se realizó dentro del predio de la Extensión Académica de Catuna, para la búsqueda de la circulación de agua en el subálveo, se destacan los volúmenes de terreno donde hay humedad (color azul, véase Figura 13) que puede llegar a la saturación con agua. En estos sitios es esperable que una perforación tenga resultados positivos, sin descuidar que esta interpretación proviene desde datos indirectos como se puede apreciar desde la metodología utilizada.

La validación de estos resultados se encuentra en los dos pozos cavados donde se instalaron molinos de viento con capacidades de extraer agua desde los 4.5 m con un caudal que supera los 1000 lt/h.

## Conclusiones

Los resultados de las metodologías utilizadas (SEV, tomografía eléctrica, pseudosecciones eléctricas y validación con perforaciones) han servido para determinar la profundidad de los depósitos de agua dulce, y como queda de manifiesto se encuentran muy cercanos a la vertiente que sirve para proveer el consumo humano de la Villa. Realizando perforaciones de baja profundidad (28 m) de bajo costo por el tipo de suelo, además menor contaminación por el uso consuntivo y las cercanías al sitio poblado, sirven para incrementar la radicación de la población y evitar el desgrane de la misma por falta de agua, mejorando asimismo la calidad de vida de los habitantes. Conviene extraer el agua en el sector oeste de la Villa, evitando el aumento de salinidad en el transcurso de la dirección opuesta y la disminución del relleno cuaternario (5 a 7 metros).

## Bibliografía

- Archangelsky, Miguel, 1996, *El sistema Pérmico en la Republica Argentina y en la República Oriental del Uruguay*, Academia Nacional de Ciencias de Córdoba, Argentina.
- Azcuy C. L. y Morelli, J. R. 1970, "Geología de la comarca Paganzo Amana, el Grupo Paganzo, formaciones que lo componen y sus relaciones", *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, vol. XXV, núm. 4, pp. 405-429.
- Bobachev A.A.; Bolshakov D.K.; Ivanova S.V.; Modin I.N.; Pervago E.V.; Safronov V.S. and Shevnin, 1998, V.A. Pipelines' Studies -- New Problem for Geophysics. Proceedings of 4th EEGS-ES Meeting in Barcelona, Spain, 4 p. MSU, Geological faculty, 119899 Moscow, MSU.
- Bobachev, A.; Modin, I.N. y Shevnin V., "1990-2000, Programa desarrollado por el Department of Geophysics", Geological Faculty, Moscow State University y Geoscan-M. Ltd.
- Bonder Guillermo, 2009, "Estudio hidrogeológico a través de métodos eléctricos en Villa Santa Rita de Catuna. La Rioja, Argentina", Universidad Nacional de Córdoba, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Geología, Trabajo Final Director Interno: Profesor Geólogo Frontera, Héctor, Director Externo: Ingeniero Mamani, Manuel.
- Ezpeleta, M.; Dávila, F.M. y Astini, R.A. 2006, "Estratigrafía y Paleoambiente de la Formación Los Llanos (La Rioja): una secuencia condensada Miocena en el antepais fragmentado andino central", *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, vol. 61, núm. 2.
- Limarino Carlos O.; Spalletti Luis A. y Colombo Pinol Ferrán, 2010, "Evolución paleoambiental de la transición glacial-postglacial en la Formación Agua Colorada (Grupo Paganzo), Carbonífero, Sierra de Narváez, NO argentino", *AndGeo [online]*, 2010, vol. 37, núm. 1, pp. 121-143 [citado 2015-05-11].

- Loke M. H., 2004, Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys (PDF). Retrieved 2007-06-11.
- Salfity J. y S. Gorustovich, 1983, "Paleogeografía de la cuenca del Grupo Paganzo (Paleozoico superior)", *Asociación Geológica Argentina*, vol. XXXVII, núm. 3-4, pp. 84-106.
- Page Stella; Litvak Vanesa D. y O. Limarino Carlos, 2002, "Nueva edad en el basamento de la Sierra de Los Llanos, La Rioja: Intrusividad Pampeana en el arco famatiniano, Nota Breve", *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, vol. 57, núm. 3, pp. 345-348.



# Reportes técnicos



## El radar de penetración terrestre como una herramienta de geofísica somera, aplicado a la exploración arqueológica

Walter Antonio Flores García\*

*Recibido en junio de 2017; aceptado en diciembre de 2017*

### Abstract

In the case of remote sensing of archaeological sites, GPR is rapidly becoming the most versatile geophysical tool that can help reduce the need for archaeological excavations without a preamble rather than empirical knowledge. However, GPR data are not trivial and processing them properly or extracting the information needed to solve a problem is not always easy. Therefore, when using a qualitative interpretation, it becomes essential to integrate processes that give us results that contribute characteristics that can not be visible in an individual process, as is the case of time domain radargrams and their analysis trace (individually known as A-scans). In the present work, it is proposed to study the traces in the frequency domain and to identify contrasting and interesting details, taking into account the average behavior of the bandwidth in which the central frequency of the antenna used works.

Using the spectrograms that were used in this work, it was possible to know the behavior of a trace (previously selected) throughout its travel time, thanks to a sweep employed to the trace by means of the short transform of Fourier that was applied to it.

*Key words: GPR, archeology, processing, radargrams, traces.*

### Resumen

En el caso de la detección remota de sitios arqueológicos, el GPR (Radar de Penetración Terrestre) se está convirtiendo rápidamente en la herramienta geofísica más versátil que puede ayudar a reducir la necesidad de excavaciones arqueológicas sin un preámbulo más que el conocimiento empírico. Sin embargo, los datos de GPR no son triviales y procesarlos adecuadamente o extraer la información necesaria para resolver un problema no siempre es sencillo. Por lo que, al recurrir a una interpretación cualitativa, se vuelve imprescindible integrar procesos que nos arrojen resultados que aporten características que no puedan ser visibles en un proceso individual, como es el caso de los radargramas en el dominio del tiempo y su análisis traza por traza (de manera individual también conocidos

.....  
\* Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Circuito de la Investigación Científica, 04510 Ciudad de México, correo electrónico: walterf1908@gmail.com

como A-scans). En el presente trabajo se propone estudiar las trazas en el dominio de la frecuencia e identificar detalles contrastantes y de interés, tomando en cuenta el comportamiento promedio del ancho de banda en el que trabaja la frecuencia central de la antena empleada.

Con ayuda de los espectrogramas que se emplearon en este trabajo fue posible conocer el comportamiento de una traza (seleccionada previamente) en todo su tiempo de viaje, gracias a un barrido mediante la transformada corta de Fourier que se le aplicó.

*Palabras clave: GPR, arqueología, procesado, radargrama, traza.*

## Introducción

Mediante técnicas indirectas como los métodos geofísicos, es posible el estudio de zonas de interés, tal como la identificación y delimitación de estructuras enterradas que se localizan en estratos someros del subsuelo. La aplicación de la geofísica en zonas someras tales como la arqueología, nos permite estudiar distintas propiedades y parámetros físicos como la susceptibilidad magnética, la densidad, resistividad, entre otras, a través de contrastes de parámetros entre el medio encajonante y el objetivo a localizar.

Dado que los objetivos de la Arqueología son considerados de carácter somero, es decir, situado a profundidades variables desde escasos metros hasta algunas decenas de metros, las mediciones indirectas son muy utilizadas en este campo de estudio.

Una de las premisas que se mantiene en la prospección de sitios arqueológicos es, dentro de lo posible, la no invasión de zonas de patrimonio, dicha premisa continúa siendo uno de los pilares fundamentales de la exploración indirecta de la Arqueología.

Entre tanto, las investigaciones realizadas en México demuestran aplicaciones del georadar ampliamente documentadas como técnica no invasiva y de alta resolución, optimizando la gran versatilidad que lo caracteriza. Los campos de estudio de esta técnica electromagnética incluyen investigaciones arqueológicas (Barba *et al.* 2015, Argote 2008); estimación de parámetros petrofísicos (Centeno 2016), entre otras aplicaciones que primordialmente se emplean en la industria geotécnica e ingeniería civil.

En este trabajo se propone el análisis de señales en el dominio del tiempo y frecuencia que nos revele otros aspectos de las ondas como la magnitud de cambio de los componentes de la señal en el tiempo o el espacio, esto con la idea de obtener una mayor información en la interpretación, contextualizando la zona de estudio y su entorno geológico.



### Técnica de alta resolución somera: GPR

La técnica de GPR se fundamenta en las ecuaciones de Maxwell, las cuales relacionan el campo eléctrico y el campo magnético con las fuentes que los producen a partir de una serie de parámetros constantes para cada medio, estas constantes describen el comportamiento de las ondas electromagnéticas en diferentes materiales.

La forma en que el campo electromagnético interactúa con el medio de propagación, determina el comportamiento de la señal emitida, presentando efectos de reflexión, transmisión, atenuación y dispersión (Elizondo 2005).

Dada la resolución a profundidad que este equipo maneja, es posible mapear objetos anómalos que emitan contrastes electromagnéticos. Cuando el trazado de rayos llega a una interface contrastante entre dos materiales con propiedades electromagnéticas distintas (en función de parámetros electromagnéticos gobernados por la conductividad eléctrica,  $\sigma$ , constante dieléctrica,  $\epsilon$ , y permeabilidad magnética,  $\mu$ ), parte de ellas se reflejan, se refractan y otra porción es transmitida al interior del subsuelo atenuándose con el inverso de la distancia a profundidad.

La capacidad de esta técnica para prospectar de forma somera, la convierte en una herramienta de gran interés para la investigación arqueológica, ya que se pueden planear estrategias de excavación a partir de la información recuperada. Como consecuencia de esto, el GPR ha sido una de las técnicas con mayor crecimiento en la investigación arqueológica durante los últimos 25 años. El producto resultante de un levantamiento será una serie de planos horizontales a distintas profundidades llamados cortes de profundidad, similares a los obtenidos en una tomografía médica (Barba *et al.* 2015). En la exploración de radar, es posible contar con antenas bajo un ancho de frecuencias proporcional al tipo de estudio y objetivo al que se desea aplicar. En la actualidad se cuentan con dos tipos de antenas, monoestáticas y biestáticas (Figura 1). Mediante la primera de éstas pueden realizarse las siguientes formas de adquisición:

- Adquisición de datos mediante perfiles 2D
- Adquisiciones puntuales
- Adquisición de datos por sondeos

Con las antenas biestáticas, además de los métodos anteriores, también se pueden aplicar:

- Técnicas del punto medio común (CMP)
- Transiluminación o tomografía
- Sondeos en pozos

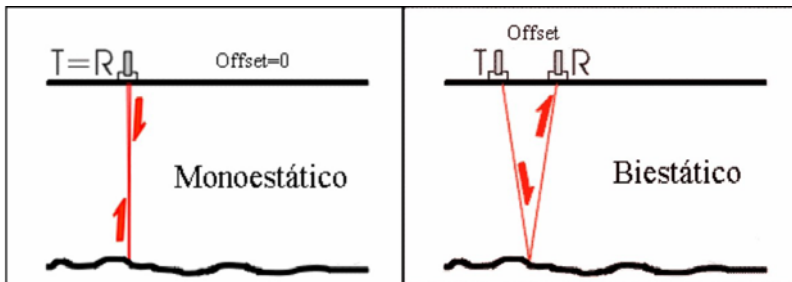
Las metodologías que se utilizaron en este trabajo fue la de adquisición mediante perfiles 2D y el punto común medio (CMP), la segunda de ellas fue

utilizada para estimar la velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas en la zona de estudio.

Con este parámetro fue posible establecer la profundidad de los perfiles 2D, igualmente realizados en la zona de estudio.

El concepto de sondeos de velocidades de CMP es equivalente al concepto de un CMP gather en la adquisición sísmica donde el objetivo es obtener numerosas reflexiones de un mismo punto de atribución. Los sondeos CMP se usan para obtener una estimación de la velocidad de la señal del radar en función de la profundidad en el suelo, variando la distancia de la antena en un lugar fijo y midiendo el cambio del tiempo de recorrido bidireccional a las reflexiones (Annan 2003).

Los datos se recogen en múltiples desplazamientos, ya que las antenas se mueven simétricamente a partir de la posición de desplazamiento cero. La calidad de los datos de salida mejora significativamente con un gran número de desplazamientos y muestras. Sin embargo, al utilizar una gran cantidad de desplazamientos y apilamiento, la adquisición de datos puede llevar mucho tiempo. (Russian 2006).

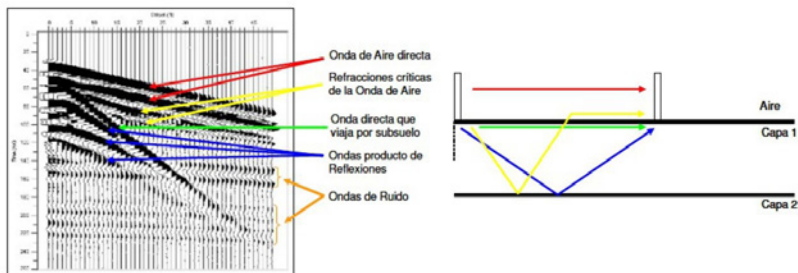


**Figura 1.** Esquema representativo de un levantamiento monoestático y biestático. Modificado de Pérez (2007), Luca Bardello (2003).

Los tiempos de llegada de la reflexión deben tener una dependencia hiperbólica (de primer orden) en la separación de la antena (Annan 2003).

Es posible obtener una gran cantidad de apilaciones de CMP a una sola traza, dando como resultado una sección apilada corregida con una relación señal-ruido significativamente mejorada (véase Figura 2). El método de análisis de velocidad utilizado comúnmente se basa en calcular el espectro de velocidad.

Las velocidades de apilamiento se interpretan a partir de los espectros de velocidad eligiendo la función de dicho parámetro que reproduzca la mayor coherencia en tiempos con amplitudes de eventos significativos (Manual del usuario, RADAN 6.5 GSSI 2007).



**Figura 2.** Esquema representativo de un levantamiento monoestático y biestático. Modificado de Pérez (2007), Luca Bardello (2003).

### Representaciones Tiempo-Frecuencia

Debido a su sencillez y similitud en cuanto a concepto y estrategia de cálculo con los métodos espectrales clásicos, las representaciones Tiempo-Frecuencia lineales son ampliamente utilizadas en el análisis de señales geofísicas (Elizondo, 2005).

Entre las principales exponentes de este tipo de representaciones se encuentran la Transformada Corta de Fourier, la Transformada de Gabor y la Transformada Wavelet. La contribución de este trabajo se centrará en la Transformada Corta de Fourier.

### Transformada de Fourier

La transformada de Fourier puede ser vista como un prisma matemático que descompone una función en las frecuencias que le forman, de una manera análoga sucede en la naturaleza mediante un prisma de cristal con la luz que lo atraviesa.

Sin embargo, el análisis de Fourier presenta un gran problema al pretender determinar el instante en que ocurre un evento en particular, por lo que se hizo necesario el mejoramiento en los procesos que involucran a la investigación de señales en las distintas disciplinas de la ciencia e ingeniería.

En la implementación de estas actualizaciones a los estudios previos realizados por Fourier, aparece en 1946, Denis Gabor, quien adapta la transformada de Fourier para permitir el análisis en el tiempo, aplicando la misma a pequeñas secciones de la señal; desarrollando una técnica conocida como el ventaneado (Burke 1997). Este procedimiento no resuelve todas las dificultades por lo que en algunas ocasiones se tiene la necesidad de efectuar análisis más detallado, debido a que la misma ventana se aplica para todas las frecuencias (Cortés *et al.* 2007).

*Transformada corta de Fourier (STFT)*

La forma de seccionar la señal se realiza mediante una función  $h(t)$  tiempo-ventana que será desplazada, cuyo ancho corresponde a la longitud de cada segmentación de la señal. Con la función ventana, delimitamos la señal alrededor de un instante de tiempo  $\tau$  y calculamos su transformada de Fourier, luego trasladamos la función ventana hasta que no se superponga con la anterior, cubriendo una nueva porción de la señal a la que volvemos a calcular su transformada de Fourier. Este proceso es reiterado hasta que se ha cubierto la totalidad de la señal y dicho proceso puede representarse de la siguiente manera:

$$STFT(t, \omega) \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)h^*(\tau - t)e^{-i\omega\tau} dt \quad (1)$$

Donde  $f(t)$  representa a una señal de tiempo continuo. Si consideramos a  $h(t)$  como una función ventana de valores sólo reales, no complejos, de tal manera que  $h(-t) = h^*(t)$ , entonces nos queda:

$$STFT(t, \xi) \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)h(t - \tau)e^{-i\xi\tau} dt \quad (2)$$

La expresión anterior calcula el producto interno entre la señal y la función tiempo-ventana desplazada y calculada (Acevedo 2009).

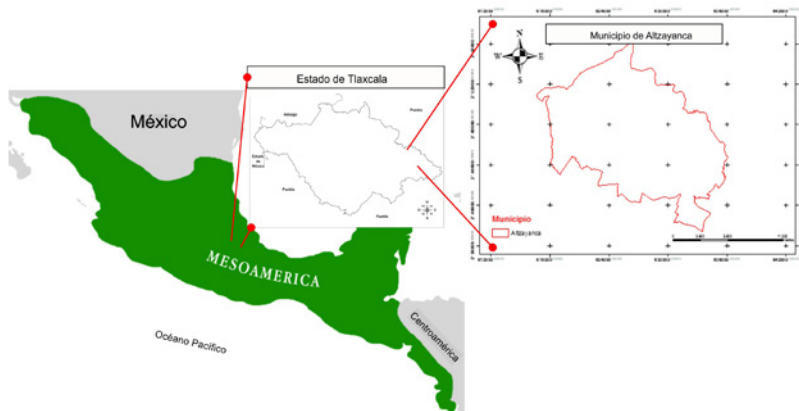
De esta forma, se logra una representación tiempo-frecuencia de la señal, que permite conocer no sólo el valor de sus componentes en frecuencia, sino también su ubicación temporal. Sin embargo, el inconveniente surge dado que una vez que se escoge un determinado tamaño para la ventana de tiempo, dicha ventana es la misma para todas las frecuencias. Muchas señales requieren un acercamiento más flexible, de modo tal que sea posible variar el tamaño de la ventana para determinar con mayor precisión el tiempo o la frecuencia, a esto hace mención el principio de incertidumbre de Heisenberg.

**Localización de la zona de trabajo**

En el área de estudio se han encontrado evidencias que corresponden a zonas arqueológicas, los rasgos que fueron posibles de observar en campo se dirigen a un montículo en el que al centro se localiza un túnel de saqueo, localizado en la parte central de un polígono ocupado para el uso agrícola, además de esto también se identificaron en la zona, muestras físicas como puntas de flecha de obsidiana, bloques de piedra tallados por el hombre y restos de cerámica.

El estado de Tlaxcala es de los menos poblados del país, cuenta con 1,170 mil habitantes y una tasa de crecimiento promedio anual de 1.8, lo cual corresponde con la media nacional. El municipio de Atzayanca cuenta con un total de 15,935 habitantes, mientras que en Huamantla hay 84,979 habitantes.

El municipio colinda al norte y al este con el estado de Puebla; al sur con Huamantla y Cuapiaxtla; y al oeste con Huamantla y Terrenate. Una de las localidades con mayor hallazgo de restos arqueológicos, corresponde a la localidad de Xalasco que se encuentra a 18 kilómetros de Huamantla, siendo un sitio con hallazgos de restos arqueológicos los cuales tuvieron un periodo de ocupación entre el 100 y el 700 D.C.



**Figura 3.** Esquema representativo de un levantamiento monoestático y biestático. Modificado de Pérez (2007), Luca Bardello (2003).

Según los elementos que se han encontrado en diversas excavaciones, esta zona indica una relación económica e ideológica con Teotihuacan, como figurillas, alineación arquitectónica similar al patrón teotihuacano, obsidiana verde de la Sierra de las Navajas, cerámica utilitaria y ritual importada de la gran urbe y contactos con el sur de Puebla.

Las rutas de acceso principales son la carretera 136 en su tramo Apizaco-Huamantla y la autopista Puebla-Perote, además de caminos alternos y terracerías.

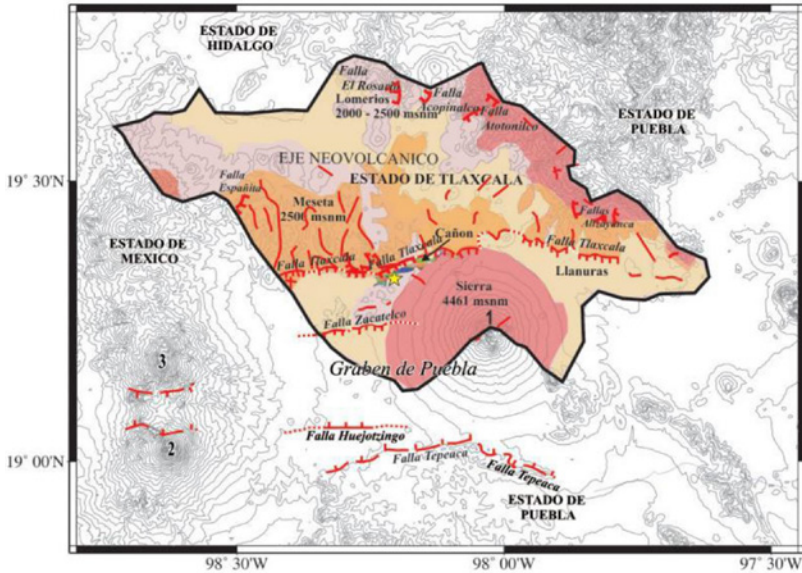
**Marco geológico**

El estado de Tlaxcala se ubica en la parte central de la República Mexicana, y se localiza dentro de la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM). Esta región describe un vulcanismo que está conformado principalmente de estratovolcanes, calderas y domos de composición andesítica (Mooser *et al.* 1996).

El estratovolcán, La Malinche se ubica en el límite entre la FVTM y la sierra Madre del Sur, al norte y noroeste de este gran estratovolcán, se observa un campo

volcánico reciente que rodea la zona urbana del municipio de Apizaco, compuesto de conos monogenéticos de composición basáltico-andesítica, emitiendo corrientes moderadas de lava, cubiendo parcialmente a rocas correspondientes al Plioceno, al noreste se encuentra la sierra de Tlaxco, donde sus elementos principales son un conjunto de volcanes erosionados alineados en la dirección NW a SE, algunos de estos muestran grandes cráteres y calderas cuyas emisiones lávicas y piroclásticas contribuyen al relleno de esta región (Angulo, 2013). Debido a estar en las proximidades del volcán La Malinche, la geología mencionada forma parte importante de la zona de trabajo.

El área de trabajo se encuentra dominada por rocas volcánicas del tipo andesitas y tobas andesíticas, en especial arenas y gravas formadas con este tipo de roca originadas en el Pleistoceno.



**Figura 4.** Mapa geomorfológico y tectónico del estado de Tlaxcala. La estrella indica la capital y los números representan a los volcanes La Malinche, Popocatepetl e Iztaccihuatl de manera consecutiva. Las líneas rojas son las fallas y lineamientos. (Lermo-Samaniego, Bernal-Esquía, 2006).

La morfología presente en la zona de estudio se debe a la actividad volcánica y a los procesos exógenos. Las topofomas que muestra la región de manera general, abarca: sierras, lomeríos, llanuras y mesetas. En los extremos norte y sur, se localizan los volcánes Huintetepetl y La Malinche (Martínez *et al.* 2007).

En la región se encuentran elementos como tobas, abanicos volcánicos, depósitos lacustres antiguos y modernos, así como también, depósitos aluviales.

Los depósitos tanto aluviales como lacustres se ubican en valles y planicies con elevaciones aproximadas a los 2,200 msnm (Angulo 2013).

Los trabajos realizados en campo consistieron en dos modalidades de adquisición de GPR, esto es, un perfil de CMP con la finalidad de identificar las velocidades de onda electromagnética en el subsuelo, la Figura 6 muestra el modelo adquirido en campo, su procesamiento y su interpretación de dichas velocidades obtenidas en un punto de atribución.

Posteriormente, se realizaron cuatro levantamientos 2D con antena de 270 MHz. El levantamiento con la técnica de CMP se adquirió con antena de 100 Mhz con 50 trazas m-1, cada traza contiene 512 muestras en una longitud de 15 metros. Mientras que los perfiles 2D se realizaron con longitudes de 32.4 m, 42.40 m, 14.64 m y 31.28 m con una resolución horizontal de 2 cm en cada uno (véase Figura 7).

En la Figura 5 se muestra un esquema representativo del flujo de trabajo empleado en el procesado de los radargramas adquiridos en Altzayanca, Tlaxcala.

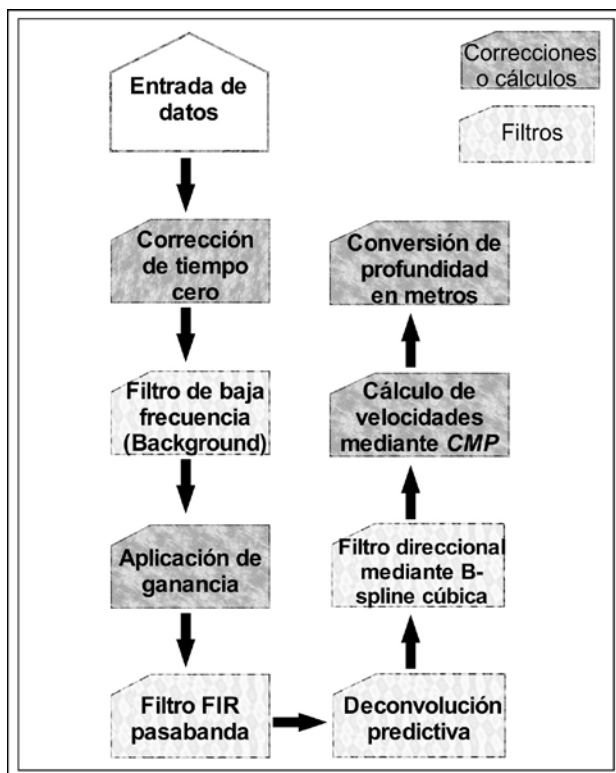
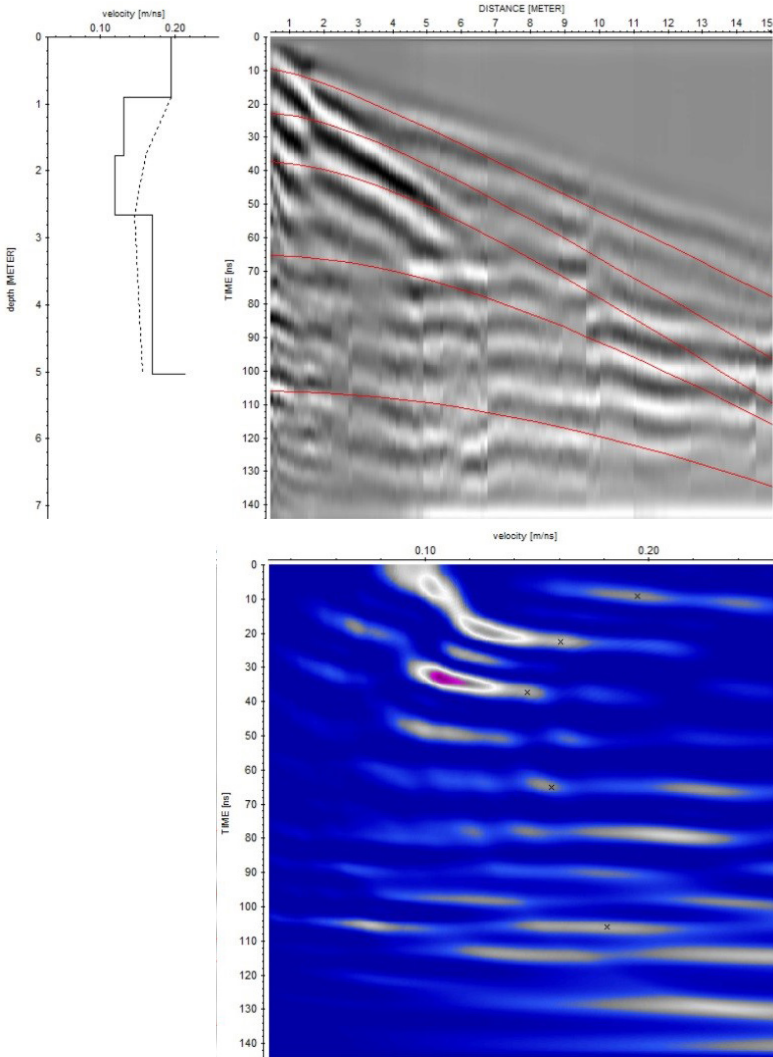


Figura 5. Diagrama de flujo en el procesado de radargramas.

Con estos parámetros fue posible estudiar la variación de las ondas emitidas por el GPR, esperando identificar rasgos someros que señalan erosiones antropogénicas en las primeras capas del terreno como también reflectores que se asocian a materiales cerámicos o de construcción por antepasados en dicha área de estudio.



**Figura 6.** Datos y procesamiento de CMP que indican la velocidad en m ns-1 de lado izquierdo, los datos adquiridos en la parte central de la imagen y los datos procesados en la parte derecha de la imagen.

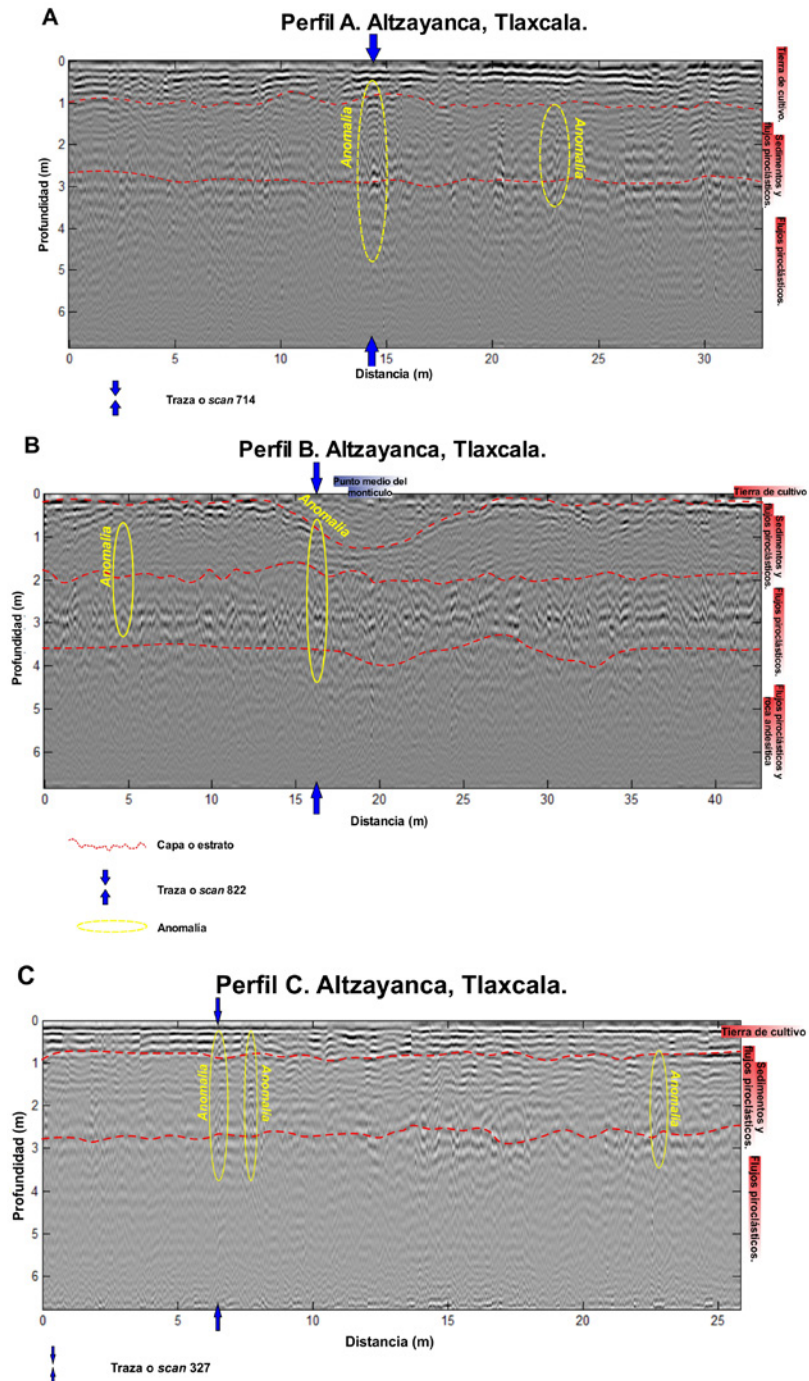


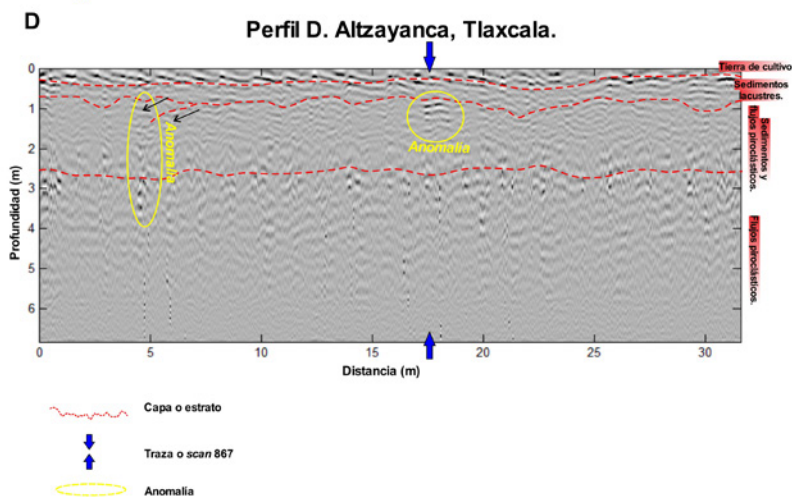
A continuación, se muestran los perfiles de GPR y su localización de levantamiento, los cuales se realizaron de manera tangente al montículo central donde se esperaba encontrar anomalías antropogénicas como anteriormente se mencionó.



**Figura 7.** Localización y trayectorias de los perfiles 2D A, B, C y D de GPR en el montículo.

Por último se realizaron análisis mediante la respuesta de tiempo-frecuencia con el fin de observar si la frecuencia central de la antena responde dentro de su ancho de banda nominal y a su vez, como ésta varía a través del tiempo de viaje en zonas con contrastantes ocasionadas principalmente por contactos geológicos, fuentes antropogénicas relacionadas con objetos de construcciones prehispánicas, zonas con material erosionado por el hombre durante la prehistoria, etc.





**Figura 8.** Perfiles 2D (A, B, C y D) de GPR correlacionados con el perfil de CMP. Realizados en un montículo de restos arqueológicos en una zona de cultivo de Tlaxcala, adquiridos con antena de 270 MHz. Se identificaron con líneas punteadas en rojo los límites geológicos, los círculos amarillos representan algunas de las anomalías más representativas de los radargramas, mientras que las flechas en azul representan a las trazas que se analizaron en los espectrogramas.

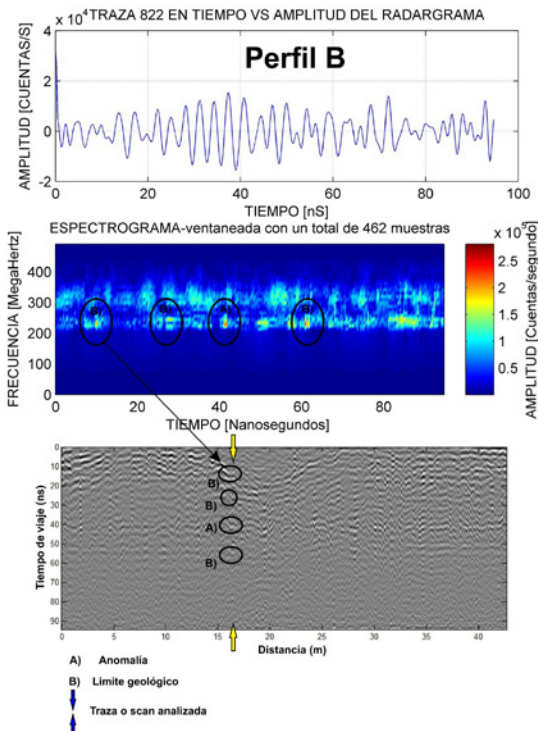
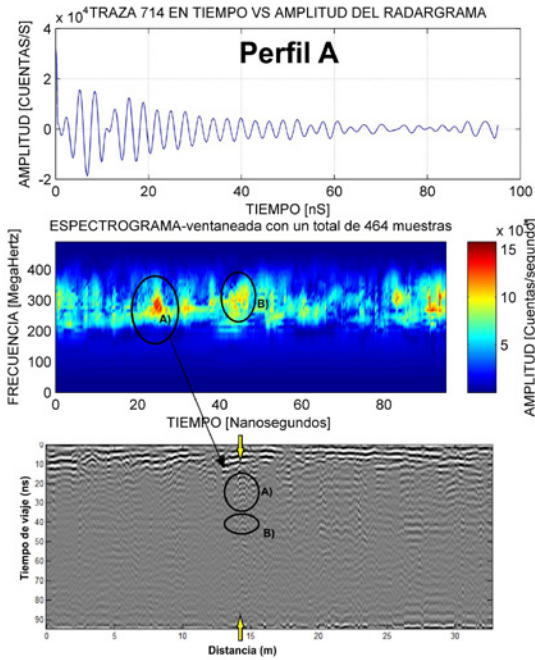
**Conclusiones**

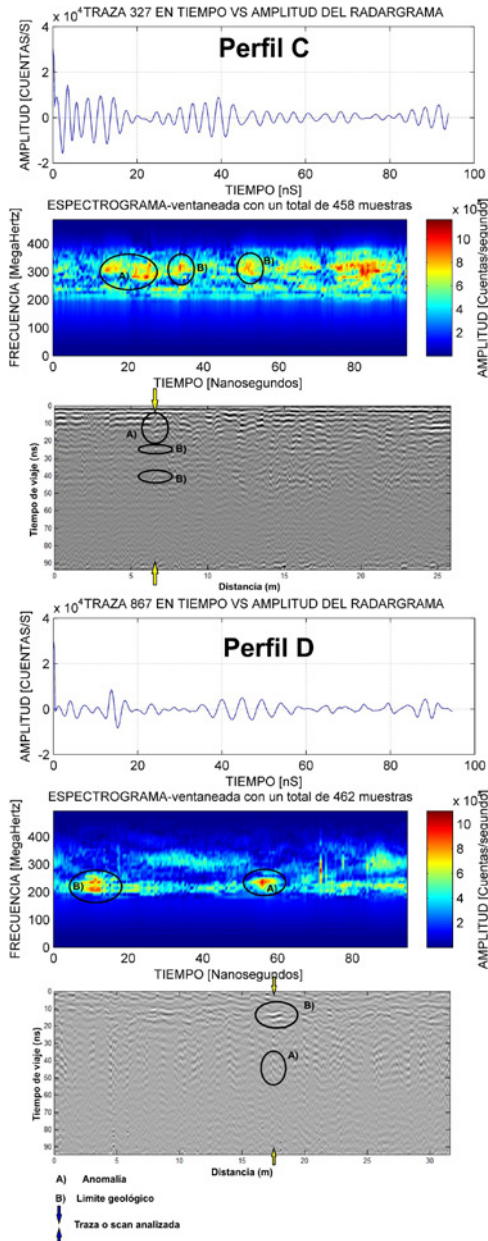
Con el análisis desarrollado en este trabajo fue posible identificar zonas en las que existen contrastes de manera puntual, entre ellas las de carácter geológico (como es el caso de contactos o límites geológicos) y también anomalías relacionadas con objetos o artefactos que se diferencian con el medio, las cuales son afines a la exploración arqueológica.

Una de las aportaciones que se obtuvieron en este trabajo fue la de analizar las trazas individuales de GPR (A-scan) en el dominio de la frecuencia, esto con el afán de observar grandes amplitudes que nos indicaran cambios de impedancia que en el tiempo/espacio no son posibles de identificar.

De igual manera el análisis tiempo frecuencia nos permitió observar en que ancho de banda trabajó la antena, tomando como referencia su frecuencia central. En la región de frecuencia se observaron que los rangos de información principal están entre los 170 Mhz y los 400 Mhz.

Una de las alternativas que se pueden aplicar al análisis aquí presentado, es realizar pruebas mediante otros exponentes del estudio tiempo-frecuencia como la transformada de Gabor, la transformada Wigner Ville y la transformada ondicular donde este último proporcionará el espectro de potencia en bandas de longitudes de onda, pero para toda la serie de datos, suavizando cualquier característica de longitud de onda local.





**Figura 9.** Análisis espectral de 4 trazas representativas de los perfiles A, B, C y D obtenido por medio de la transformada corta de Fourier. En ella se pueden ver los términos de interferencia identificados con círculos negros. Las figuras se dividieron por perfiles, la primera ventana representa a la traza individual en tiempo (A-scan) vs amplitud, la segunda ventana es dicha traza en tiempo-frecuencia-amplitud y finalmente la tercera ventana indica el radargrama de origen.

Con el flujo de procesamiento empleado fue posible obtener imágenes resolutivas que permitieron visualizar rasgos en los primeros 3.5 metros de profundidad donde principalmente se observaban las primeras capas de sedimento lacustre como también la tierra utilizada para el cultivo. Cabe mencionar que la zona de estudio implicaba un difícil acople de la antena con el terreno debido a los surcos de cultivo, por lo que se recomienda mantener una buena fricción de dicho módulo con el terreno para evitar entrada de aire en los registros.

### Agradecimientos

Agradezco de manera especial el apoyo de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) por las facilidades otorgadas, el apoyo en campo, así como el conocimiento y experiencia geofísica de la zona compartido en este trabajo, puntualmente a los ingenieros: Sandra Estévez Robles, Valeria Peña Gaspar, Juan Pablo Aguirre Díaz, Manuel Ortiz Osio y Alejandro García Serrano; a la doctora Denisse Argote por el contexto y experiencia arqueológica del lugar.

### Referencias

- Acevedo L., 2009, *Computación paralela de la Transformada Wavelet; aplicaciones de la Transformada Wavelet al álgebra lineal numérica*, Departamento de Sistemas Informáticos, Universidad Politécnica de Valencia, pp. 14-15, 127.
- Angulo J., 2013, *Microzonificación y escenarios sísmicos para la ciudad de Apizaco, Tlaxcala*, Universidad Nacional Autónoma de México, pp. 30-35, 105.
- Annan A. P., 2003, "Ground Penetrating Radar Applications Principles", *Procedures, Sensors & Software Inc.*, pp. 169, 278.
- Barba L.; Muñoz I. y Blancas J., 2015, *El uso de técnicas geofísicas para determinar sistemas constructivos y materiales presentes en los túmulos del período formativo en el valle de Apa, Arica, Chile*, Departamento de Antropología, Universidad de Tarapacá, Arica, Chile, p. 156.
- Burke B., 1997, "The world according to wavelets", *American Scientist*, vol. 85, no. 1, January-february, 1997, pp. 85-86.
- Centeno F., 2016, *Estimación de parámetros petrofísicos de materiales granulares, aplicando una inversión de amplitud, a partir de señales EM de alta frecuencia*, pp. 160, 261.
- Cortés J.; Medina F. y Chaves J., 2007, "Del análisis de Fourier a las wavelets análisis de Fourier", *Scientia et Technica*, año XIII, no. 34, mayo de 2007, Universidad Tecnológica de Pereira, ISSN 0122-1701, pp. 151-152, 156.
- Elizondo M., 2005, *Análisis de señales de GPR mediante la transformada de Wigner-Ville aplicado a un caso de ingeniería civil*, Universidad Nacional Autónoma de México, pp. 44, 115.

- Geophysical Survey Systems, Inc. 2007, *Radan 6.5 User's Manual*, Salem, New Hampshire 03079. 139, pp. 16,72.
- Martínez M.; Gutiérrez C.; Reyes J.; Mata I.; Sánchez L. y Ortiz G., 2007, *Estudio Hidrológico de la Porción Alfa del Acuífero Alto Atoyac Apizaco, Tlaxcala*, Instituto Mexicano de Tecnología y del Agua.
- Pérez R., 2007, *Uso del georadar como herramienta para la ubicación de utilidades y vacíos en zonas urbanas y aplicación de los perfiles de resistividad y polarización inducida en prospección minera*, Departamento de Ciencias de la Tierra, Coordinación de Ingeniería Geofísica, Universidad Simón Bolívar, pp. 8, 96.
- Russian C., 2006, *Correlación de facies y caracterización de fracturas utilizando GPR en el acuífero Arbuckle-Simpson*, Oklahoma, pp. 40, 81.
- Samaniego J. y Bernal E., 2006, "Zonificación sísmica del Estado de Tlaxcala, México", *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, número especial de Geología Urbana, tomo LVIII, núm. 2, Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, pp. 215-221.





## Reseña de las estancias de trabajo paleomagnético en Nicaragua y México: adiestramiento para la resolución de problemas en tectónica de placas

Luis Manuel Alva-Valdivia\*  
Bernardo Ignacio García-Amador\*\*  
Greybin Josué Borge-Castro\*\*\*  
Elliet Pérez-Romero\*\*\*  
Xochilt Esther Zambrana-Areas\*\*\*

*Recibido en octubre de 2017; aceptado en noviembre de 2017*

### Abstract

This work describes the short stays training for field and laboratory work developed as part of a project with the objective of teaching about the solution of tectonic problems based on paleomagnetic and rock magnetic studies, both in Nicaragua and Mexico. This part of the project was performed with researchers from two pioneering geosciences institutions in each country: Instituto de Geofísica, UNAM, Mexico, and Instituto de Geología y Geofísica, UNAN Nicaragua. During the stays several activities of training, integration and exchange of knowledge were proposed and deployed, starting from field work, experimentation in laboratory and discussion of the first results obtained. The academic shared experience of the short stays has resulted in the current collaboration between both institutions and their researchers, as well as the approach of future stays addressing new challenges in geosciences.

*Key words: Academic stays, paleomagnetism, rock magnetism, tectonics, Nicaragua, México.*

### Resumen

Este trabajo describe las estancias cortas de trabajo de campo y laboratorio desarrolladas como parte de un proyecto con el objetivo de enseñar la solución de problemas tectónicos, con base en estudios de paleomagnetismo y magnetismo de rocas tanto en Nicaragua como en México. El proyecto se llevó a cabo con investigadores de dos instituciones de geociencias pioneras en cada país: Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), México; e Instituto de Geología y Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua (UNAN), Nicaragua. Durante las estancias se plantearon y desplegaron diversas actividades de adiestramiento, integración e intercambio de conocimiento, desde trabajo de

.....  
\* Laboratorio de Paleomagnetismo, Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).

\*\* Posgrado en Ciencias de la Tierra, Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).

\*\*\* Instituto de Geología y Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua (IIGG-CIGEO, UNAN).

campo, experimentación en laboratorio y discusión de los primeros resultados obtenidos. La experiencia académica compartida de las estancias ha resultado en la actual colaboración entre ambas instituciones y sus investigadores, así como el planteamiento de futuras estancias abordando nuevos retos en las geociencias, esta etapa fue patrocinada por el proyecto “Estudio Paleomagnético de Nicaragua: evolución tectónica y geodinámica del Cretácico al Mioceno” (Luis Alva Valdivia).

*Palabras clave: Estancias académicas, paleomagnetismo, magnetismo de rocas, tectónica, Nicaragua, México.*

## Introducción

Los estudios de paleomagnetismo y magnetismo de rocas, representan algunas de las herramientas por excelencia para la resolución de problemas en la “tectónica de placas” (Schettino, 2015). El entendimiento de la tectónica en una región definida, involucra el conocimiento de sus causas y consecuencias, como pueden ser la observación probabilística de los fenómenos geológicos naturales, también conocidos como riesgo geológico (la actividad volcánica y sísmica, los deslizamientos de talud, etc.), hasta la ubicación estratégica de los recursos naturales (yacimientos de hidrocarburos, fuentes geotérmicas, yacimientos minerales, etc.), por mencionar algunos aspectos relevantes.

En México y Nicaragua ha sido imprescindible reconocer los rasgos tectónicos regionales a través del tiempo y del espacio, debido a que existen diversas problemáticas sin resolver en ambos países y áreas circundantes (Morán-Zenteno *et al.* 2017; Rogers *et al.* 2007). Entre algunas de estas incógnitas se observan aspectos primordiales como es, el entender la deformación intraplaca o ahondar en la evolución cinemática de los fragmentos de corteza que ahora constituyen ambos países, así como la relación espacio-temporal que existe entre estas dos porciones de territorio tomando en cuenta sus causas y consecuencias. Por otro lado, la escasez de estudios paleomagnéticos en Nicaragua como fuente de información cuantitativa sobre la evolución tectónica de la región, representa una oportunidad para el entendimiento de dicha problemática.

Tomando como premisa la escasez de estudios paleomagnéticos (y de magnetismo de rocas) en Nicaragua (Elming *et al.* 2001); se ha desarrollado un proyecto entre dos instituciones de geociencias y sus respectivos investigadores: Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México (IGF-UNAM), e Instituto de Geología y Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua (IGG-UNAN); con el principal objetivo de aprender el uso del paleomagnetismo y magnetismo de rocas como herramientas fundamentales para la resolución de problemas geológicos en ambos países. Para lograr esto, se diseñó un plan de trabajo integral que incluyó el planteamiento de la problemática y su metodología de investigación, previa al trabajo de campo, hasta la obtención directa de muestras en campo, tanto en Nicaragua como en México, así como un

posterior análisis en el laboratorio. Sin dejar de mencionar la interacción académica y cultural que los investigadores de ambos países lograron a lo largo del proyecto, gracias también apoyo del Instituto Panamericano de Geografía e Historia (IPGH).

Cabe mencionar que las estancias de trabajo paleomagnético tuvieron como fundamento el planteamiento para la resolución de problemas enfocados en la tectónica regional y local; sin embargo, también se buscó ahondar en otras aplicaciones del paleomagnetismo, como las variaciones temporales del campo geomagnético, realizando estudios de paleointensidad e incluso aplicaciones en arqueología, conocida como arqueomagnetismo.

Tomando en cuenta los objetivos planteados. A continuación, se da una breve descripción de las problemáticas abordadas en cada país.

### **Problemática en Nicaragua**

Entender la evolución tectónica previa al Eoceno de la porción occidental de la actual placa del Caribe, esto es, la porción de Centroamérica; que actualmente representa uno de los mayores retos para la reconstrucción de la tectónica de placas a nivel global (Boschman *et al.* 2014, Keppie 2013, Pindell y Kennan 2012, Ratschbacher *et al.* 2009). La complejidad de esta región de la Tierra, parte de la carencia de indicadores cinemáticos previos al Eoceno para reconocer el desplazamiento de los bloques corticales, por ejemplo, anomalías magnéticas del piso oceánico, registro de fallas transformantes y laterales, registro extensional y compresional del continente, paleomagnetismo. Sin embargo, existen evidencias de unidades geológicas de composición y edad afin a la parte sur de México, como se presenta en la estratigrafía y estructuras estudiadas en Honduras (Rogers *et al.* 2007). Estos estudios han provocado la propuesta de varias hipótesis acerca de la correlación geológica de las unidades tanto en Centroamérica como en el sur de México sobre la evolución tectónica y cinemática del fragmento de corteza continental que representa Centroamérica (Silva-Romo 2008).

La región comprendida dentro de los límites geográficos de Nicaragua, tema central de este estudio, contiene un interesante registro de la evolución tectónica de Centroamérica, esto debido a que existen unidades geológicas sin deformación y con edades entre el Cretácico hasta el Mioceno (Hodgson 2000), como es el caso del Batolito de Dipilto; representando así un área potencial para estudios paleomagnéticos, mismos que permitirán añadir información cinemática del fragmento cortical de Centroamérica.

### **Problemática en México**

La región comprendida entre los estados de Oaxaca y Puebla, en el sureste-centro de México, contienen un rico registro geológico que define la evolución tectónica y paleogeográfica del pre-Paleozoico al Mesozoico temprano, y que principalmente constituyen los bloques corticales (i.e. basamentos) que componen gran parte de México (Keppie y Ortega-Gutiérrez 2010, Nance *et al.* 2006, Ortega-Gutiérrez *et al.* 1999).

La definición de la paleoposición de las unidades geológicas en esta región ha implicado un gran reto en las últimas décadas; sin embargo, los estudios geológicos más recientes han abierto posibilidades para el entendimiento de la evolución tectónica de esta región de México.

Al estudiar la formación La Mora, en las cercanías de Huajuapán de León, Oaxaca (Silva-Romo *et al.* 2015), encontraron que esta unidad sedimentaria de planicie de inundación tiene una edad máxima de depósito de  $210 \pm 12$  Ma, la cual posiciona a estas rocas en el Triásico tardío a Jurásico temprano. Por otro lado, los autores proponen que dicha formación representa un paleo-río que conectaba el microcontinente Oaxaquia-Acatlán con el bloque cratónico de Amazonia, previa a la apertura de Pangea, y que este representaría un cauce del abanico submarino Tolimán, observado en México (Ortega-Flores *et al.* 2014). La oportunidad de obtener datos paleomagnéticos de La Mora, unidad contenida dentro del microcontinente de Oaxaquia-Acatlán, representa información de gran importancia para definir la paleo-posición de este bloque cortical con respecto al cratón Amazonia, así como su evolución geodinámica a partir del Triásico tardío. Asimismo, algunas unidades geológicas aledañas y estratigráficamente relacionadas con la formación La Mora, como la formación Diquiyú y el intrusivo de Chilixtlahuaca, de edad Jurásica (Campos-Madrigal *et al.* 2013, Morán-Zenteno *et al.* 1993), también representan un registro potencial para entender más sobre la temporalidad y geodinámica de la región.

### Actividades realizadas

Del trabajo realizado en Nicaragua, con el apoyo del IGG-UNAN, se obtuvieron muestras de siete flujos de lava, de composición basáltica y andesítica, provenientes del volcán Masaya y Momotombo, así como del cráter de Asososca; 16 sitios de rocas intrusivas, de composición granodiorítica, tonalítica y gabrónica, provenientes de la región de Nueva Segovia; y dos sitios de muestreo a detalle en rocas sedimentarias, específicamente en calciturbiditas de grano fino, en la región de Rivas al sur de Nicaragua. Los especímenes fueron perforados usando una nucleadora con motor a gasolina, y una barrena de 2.5 cm de diámetro con una corona de diamante industrial, enfriada con agua (Figura 1b). Con la cual se obtuvieron 292 especímenes de entre ocho y 12 cm de largo, orientados en campo, usando una brújula tipo Brunton azimutal, y un orientador de precisión modelo Pomeroy, obteniendo la orientación magnética, y solar cuando fue posible. Las muestras que no fueron orientadas se tomaron de bloques provenientes de flujos de lava de tipo AA, los cuales fueron cortados en el IGG-UNAN, con una cortadora de roca de disco de corona de diamante, y perforados al tamaño estándar de 2.5 cm de diámetro, para el análisis de paleointensidad. Asimismo, se colectaron muestras de depósitos piroclásticos en los alrededores de las ciudades de Managua y Masaya, obteniendo muestras en 11 sitios; las cuales fueron colectadas siguiendo los datos reportados en la literatura (i.e. Geilert *et al.* 2012; Kutterolf *et al.* 2007). Cada muestra se obtuvo directamente, de diferentes niveles de cada capa encontrada,

procurando descubrir cada estrato con una pala y una espátula a fin de coleccionar una zona con menos intemperismo, el tamaño de las capas oscila de los 0.2 a los 1.9 metros. Se seleccionaron capas que presentaban una granulometría superior a los 4 mm (Figura 1a).

El trabajo de campo en colaboración con los investigadores del IGG-UNAN jugó un papel importante en el desarrollo del proyecto paleomagnético en Nicaragua, debido a que se lograron abordar y discutir temas geológicos y geofísicos de ambas partes, que, al ser tratados directamente en campo, permitieron un entendimiento y resolución de parte de la problemática geocientífica que se propone y visualiza en el proyecto que está en marcha. Asimismo, la convivencia interpersonal durante el trabajo de campo con los investigadores reforzó la enseñanza del paleomagnetismo con sus distintas aplicaciones para el desarrollo de las geociencias en Nicaragua.



**Figura 1.** Fotos que muestran la obtención de muestras para estudios paleomagnéticos, a) Colección de muestra de depósitos piroclásticos, b) Obtención de muestras de rocas intrusivas con perforadora de combustión.

Durante la estancia realizada por los colegas nicaragüenses en México se realizaron múltiples actividades, como: participación en clases con estudiantes del posgrado de Ciencias de la Tierra; aprendizaje para el uso de equipos del laboratorio de paleomagnetismo y magnetismo de rocas; análisis de resultados; y participación en trabajos de campo (técnicas de campo para la identificación de afloramientos geológicos con fines de estudio paleomagnético y el muestreo de los mismos), como se muestra en la Figura 1. En dicho trabajo de campo, se recolectaron muestras de tres formaciones geológicas ubicadas en Huajuapán de León en el estado de Oaxaca, entre el complejo Acatlán y la formación Ayuquila, donde se muestrearon 19 sitios de la formación sedimentaria La Mora (muestreo paleomagnético a detalle), dos sitios para la formación volcánica Diquiyú, así como ocho sitios del intrusivo granítico Chilixtlahuaca. Asimismo, se realizó el muestreo

en algunos flujos del campo volcánico Chichinautzin ubicados en la faja volcánica Trans-Mexicana, específicamente al sur de la Ciudad de México, dentro del estado de Morelos.

Las muestras fueron recolectadas y transportadas al Laboratorio de Paleomagnetismo del Instituto de Geofísica (UNAM). De dichas muestras se pretenden obtener resultados de propiedades magnéticas, análisis de paleodirecciones (i.e. paleolatitud y rotaciones) y estudios de paleointensidad (de ser factible); con la finalidad de entender la dinámica cortical de las unidades geológicas más antiguas (Triásico–Jurásico), reconociendo así la evolución tectónica de la región. Cabe mencionar que dichas metas también han sido planteadas para las muestras colectadas en Nicaragua. Asimismo, las muestras volcánicas obtenidas de Chichinautzin, serán objeto de análisis para estudiar las variaciones del campo geomagnético menores a 5 Ma.

Entre las actividades realizadas por los investigadores nicaragüenses durante su estancia en México se pueden mencionar:

1. Charlas presenciales del curso de Paleomagnetismo con estudiantes del Posgrado en Ciencias de la Tierra impartidas por el doctor Luis M. Alva Valdivia del Instituto de Geofísica.
2. Lectura y discusiones de artículos científicos de la geología de México y Centroamérica con el maestro en ciencias Bernardo Ignacio García Amador.
3. Procesamiento y análisis de muestras Paleomagnéticas en el Laboratorio de Paleomagnetismo con el maestro en ciencias José Antonio González Rangel, lo que incluyó:
  - a. Marcar y cortar muestras paleomagnéticas.
  - b. Medición de magnetización remanente natural (NRM) con el magnetómetro de giro JR5 y JR6 de AGICO.
  - c. Desmagnetización por campos magnéticos alternos para muestras de origen sedimentario, plutónico y volcánico, tanto de México como de Nicaragua.
  - d. Mediciones de susceptibilidad magnética con altas y bajas frecuencias.
  - e. Observaciones de desmagnetización por temperatura con el desmagnetizador térmico TD-48 y TD-24.
  - f. Procesamiento e interpretación paleomagnética de los resultados.
4. Muestreo de rocas en campo en las inmediaciones de Huajuapán de León, Oaxaca, con la enseñanza práctica de:
  - a. El equipo de campo que se utiliza en paleomagnetismo y su manejo (nucleadora de motor de gasolina, brújula tipo Brunton azimutal, y un orientador de precisión modelo Pomeroy).
  - b. Perforar con la nucleadora y la parte del afloramiento donde perforar en las rocas.
  - c. Orientación magnética y solar cuando fue posible.
  - d. Marcado de muestras en campo.

- e. Registro de todos los datos mencionados, así como detalles del afloramiento en la libreta de campo.

Los resultados alcanzados en la estancia realizada en México muestran que los investigadores lograron conocer los principios básicos del paleomagnetismo y discutir sobre su importancia e impacto en las Ciencias de la Tierra y su aplicación en otras áreas del conocimiento, por ejemplo, la arqueología. Asimismo, mantuvieron espacios de relación académica con estudiantes de maestría y doctorado que les permitieron adquirir nuevas experiencias en las diversas aplicaciones del paleomagnetismo y magnetismo de rocas en las geociencias.

Por otro lado, a través de los trabajos de muestreo en campo en las inmediaciones de Huajuapán de León, Oaxaca, se logró fortalecer el conocimiento de las estrategias del paleomagnetismo para el trabajo de campo a fin de resolver problemas geológicos, como el planteado para la formación La Mora y Diquiyú, de edad Triásico-Jurásico y de origen aluvial y volcánico (respectivamente), o del intrusivo de Chilixtlahuaca, de edad Jurásica; esto a través de la preparación y discusión de las áreas de trabajo, con bibliografía previa, elaboración de mapas de muestreo, así como del planteamiento de las hipótesis del problema para el área de estudio; aspectos que no se habían podido concretar en las campañas de campo en Nicaragua. No obstante, y con la finalidad de abarcar todas las estrategias de muestreo en cada tipo de roca, el trabajo realizado en el campo volcánico de Chichinautzín, incorporó la experiencia de trabajar con la obtención de muestras de flujos volcánicos, enriqueciendo así el adiestramiento de las metodologías paleomagnéticas para el trabajo de campo.

### **Resultados esperados**

De las muestras obtenidas en las rocas volcánicas (i.e. flujos de lava y depósitos piroclásticos), intrusivas y sedimentarias, se pretende llevar a cabo diversos experimentos de laboratorio que se pueden subdividir en dos secciones, dependiendo del tipo de roca y área de estudio:

1. Estudios de propiedades magnéticas, que tienen la finalidad de conocer los rasgos termomagnéticos, tamaño de grano y dependencia del mismo con su estado de dominio magnético, así como relaciones estratigráficas y regionales en función de la susceptibilidad magnética, las diferentes fases mineralógicas y su relación con la mineralogía magnética, el análisis del aporte coercitivo de cada componente mineralógica, entre otros estudios.
2. Los estudios de paleodirecciones y paleointensidad, que con base en pruebas experimentales se seleccionarán especímenes adecuados para llevar cabo los procesos de desmagnetización por campos alternos y temperatura ("lavado magnético"), a fin de obtener las direcciones de la magnetización remanente característica (ChRM) para cada sitio de estudio, y proceder al estudio de la paleointensidad de acuerdo a los criterios establecidos en cada metodología,

(i.e. Thellier-Thellier y el protocolo de Multi-espécimen). Lo anterior en conjunto permitirá elaborar un marco para la evolución tectónica de la región, así como establecer datos para el registro de variación secular del campo geomagnético en la zona.



**Figura 2.** a) Mediciones en Magnetómetro de giro JR5 en el Laboratorio de Paleomagnetismo, b) Obteniendo muestras con la perforadora de rocas en campo, Huajapan de León, c) Corte de muestras en el laboratorio, d) Orientación de las muestras en campo, Huajapan de León.

Los resultados del trabajo de campo realizado en México y Nicaragua, están principalmente enfocados a la realización del análisis de datos de las mediciones de laboratorio, así como de su interpretación y discusión. Esto es, tanto del paleomagnetismo como de las propiedades magnéticas, y específicamente de las muestras obtenidas de las rocas tanto sedimentarias (formación La Mora, Rivas y Brito), volcánicas (formación Diquiyú, piroclastos de los volcánes Momotombo y Masaya) e intrusivos (granito Chilixtlahuaca, batolito de Dipilto). Además, se plantea estudiar la anisotropía de susceptibilidad magnética (AMS) tanto de la formación La Mora como del intrusivo Chilixtlahuaca, a fin de reconocer las direcciones de las paleocorrientes en las rocas sedimentarias y la posible deformación en el intrusivo. Lo anterior en conjunto permitirá elaborar un marco geológico de la evolución tectónica para esta región de México.



Los resultados obtenidos de los experimentos, cálculos e interpretación de los datos, serán analizados en conjunto con los colegas nicaragüenses, tanto de las unidades en México como en Nicaragua, permitiendo fortalecer la transmisión de conocimiento del método de paleomagnetismo, a fin de enriquecer esta rama de las geociencias en el desarrollo de problemas geocientíficos en Nicaragua.

## Conclusiones

El trabajo de campo realizado en Nicaragua, en colaboración con los investigadores del IGG-UNAN, resultó en una campaña fructífera de enseñanza-aprendizaje. Las muestras obtenidas en campo son potencialmente de gran utilidad para estudios geocientíficos de la región. Sin embargo, aún es necesario completar el análisis de resultados de esta primera campaña de muestreo, a fin de concluir con los estudios paleomagnéticos y de propiedades magnéticas. Para esto sugerimos se realice este análisis final por medio de trabajo conjunto de los dos grupos participantes, compartiendo y discutiendo los resultados de las rocas muestreadas en ambos países. Esto permitirá completar la enseñanza para los investigadores del IGG-UNAN, específicamente en la interpretación final de la problemática del paleomagnetismo para el estudio de la evolución tectónica de las regiones en estudio.

La estancia realizada en México por los colegas nicaragüenses tanto en las campañas de campo, el trabajo de laboratorio, así como en las charlas presenciales, fue fructífera y enriquecedora, sin dejar de mencionar que las muestras obtenidas son potencialmente de gran utilidad para estudios geocientíficos en ambas regiones.

La experiencia de trabajo e intercambio académico dentro de este proyecto financiado por el IPGH (Estudio Paleomagnético de Nicaragua: evolución tectónica y geodinámica del Cretácico al Mioceno), ha sido valiosa tanto para la parte nicaragüense como para la mexicana, la interacción académica y cultural ha permitido fortalecer y estrechar los lazos de colaboración científica entre ambas instituciones, fomentando el desarrollo para la resolución de problemas geocientíficos.

## Referencias

- Boschman, L.M.; van Hinsbergen, D.J.J.; Torsvik, T.H.; Spakman, W. and Pindell, J.L., 2014. Kinematic reconstruction of the caribbean region since the early jurassic, *Earth-Science Reviews*, no. 138, pp. 102–136, doi:10.1016/j.earscirev.2014.08.007.
- Campos-Madrigal, E.; Centeno-García, E.; Mendoza-Rosales, C.C. y Silva-Romo, G., 2013. "Sedimentología, reconstrucción paleoambiental y significado tectónico de las sucesiones clásticas del Jurásico Medio en el área de Texcalapa, Puebla-Huajuapán de León, Oaxaca: Revisión de las formaciones Ayuquila y Tecamazúchil", *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, núm. 30, pp. 24–50.

- Elming, S.A.; Layer, P. and Ubieta, K., 2001. A palaeomagnetic study and age determinations of tertiary rocks in Nicaragua, Central America, *Geophysical Journal International*, no. 147, pp. 294-309, doi:10.1046/j.0956-540X.2001.01526.x.
- Geilert, S.; Freundt, A.; Wörner, G. and Kutterolf, S., 2012. "Geochemical differences between along-arc and across-arc volcanics in west-central Nicaragua", *Journal South American Earth Sci.*, no. 35, pp. 38-50, doi:10.1016/j.jsames.2011.11.004.
- Hodgson, G., "Introducción al Léxico Estratigráfico de Nicaragua", inédito. Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, Managua, pp. 1-184.
- Keppie, F., 2013. The Rationale and Essential Elements for the New "Pirate" Model of Caribbean Tectonics. *Geosci. Canada* 40, 9-16.
- Keppie, J.D. y Ortega-Gutiérrez, F., 2010. "1.3-0.9 Ga Oaxaquia (Mexico): Remnant of an arc/backarc on the northern margin of Amazonia". *J. South Am. Earth Sci.*, no. 29, pp. 21-27, doi:10.1016/j.jsames.2009.07.001.
- Kutterolf, S.; Freundt, A.; Pérez, W.; Wehrmann, H. and Schmincke, H.U., 2007. "Late Pleistocene to Holocene temporal succession and magnitudes of highly-explosive volcanic eruptions in west-central Nicaragua". *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, no. 163, pp. 55-82, doi:10.1016/j.jvolgeores.2007.02.006.
- Morán-Zenteno, D.J.; Caballero-Miranda, C.; Silva-Romo, G.; Ortega-Guerrero, B. and González-Torres, E., 1993. Jurassic-Cretaceous paleogeographic evolution of the northern Mixteca terrane, southern Mexico. *Geofísica Int.*, no. 32, pp. 453-473.
- Morán-Zenteno, D.J.; Martiny, B.M.; Solari, L.; Mori, L.; Luna-González, L. y González-Torres, E.A., 2017. "Cenozoic magmatism of the Sierra Madre del Sur and tectonic truncation of the Pacific margin of southern Mexico". *Earth-Science Rev. In Press*, doi:10.1016/j.earscirev.2017.01.010.
- Nance, R.D.; Miller, B. V.; Keppie, J.D.; Murphy, J.B. and Dostal, J., 2006. Acatlán Complex, southern Mexico: Record spanning the assembly and breakup of Pangea, *Geology*, no. 34, pp. 857-860, doi:10.1130/G22642.1.
- Ortega-Flores, B.; Solari, L.; Lawton, T.F. y Ortega-Obregón, C., 2014. "Detrital-zircon record of major Middle Triassic–Early Cretaceous provenance shift, central Mexico: demise of Gondwanan continental fluvial systems and onset of back-arc volcanism and sedimentation". *Int. Geol. Rev.*, no. 56, pp. 237-261, doi:10.1080/00206814.2013.844313.
- Ortega-Gutiérrez, F.; Elías-Herrera, M.; Reyes-Salas, M.; Macías-Romo, C. and López, R., 1999. Late Ordovician-Early Silurian continental collisional orogeny in southern Mexico and its bearing on Gondwana-Laurentia connections, *Geology*, no. 27, pp. 719-722, doi:10.1130/0091-7613(1999)027<0719:LO ESCC>2.3.CO;2.
- Pindell, J.L., y Kennan, L., 2012. "Tectonic evolution of the Gulf of Mexico, Caribbean and northern South America in the mantle reference frame: an update", in James, K.H.; Lorente, M.A. y Pindell, J.L. (eds.), Geological Society of London, Special Publications, pp. 1-55, doi:10.1144/SP328.1.

- Ratschbacher, L.; Franz, L.; Min, M.; Bachmann, R.; Martens, U.; Stanek, K.; Stübner, K.; Nelson, B.K.; Herrmann, U.; Weber, B.; López-Martínez, M.; Jonckheere, R.; Sperner, B.; Tichomirowa, M.; McWilliams, M.O.; Gordon, M.; Meschede, M. and Bock, P., 2009. "The North American-Caribbean Plate boundary in Mexico-Guatemala-Honduras", *Geol. Soc. London, Spec. Publ.*, no. 328, pp. 219-293, doi:10.1144/SP328.11.
- Rogers, R.D., Mann, P. and Emmet, P.A., 2007. "Tectonic terranes of the Chortis block based on integration of regional aeromagnetic and geologic data", in *Geological Society of America Special Paper*, pp. 65-88, doi:10.1130/2007.2428(04).
- Schettino, A., 2015. *Quantitative Plate Tectonics*, doi:10.1007/978-3-319-09135-8.
- Silva-Romo, G., 2008. Guayape-Papalutla fault system: A continuous Cretaceous structure from southern Mexico to the Chortis block Tectonic implications. *Geology*, no. 36, pp. 75-78. doi:10.1130/G24032A.1
- Silva-Romo, G.; Mendoza-Rosales, C.C.; Campos-Madrigal, E.; Centeno-García, E. and Peralta-Salazar, R., 2015. "Early Mesozoic Southern Mexico–Amazonian connection based on U–Pb ages from detrital zircons: The La Mora Paleo-River in the Mixteca Terrane and its paleogeographic and tectonic implications", *Gondwana Res.*, no. 28, pp. 689-701, doi:10.1016/j.gr.2014.06.005.



# Reseña



## El mito y el electrodo

Magdalena Castro\*

*Recibido en octubre de 2015; aceptado en enero de 2016*

Existen pocas ciudades de Mesoamérica que pueden ser descritas bajo diferentes realidades, tantas como sus diversos periodos constructivos. Ese es el caso de Chichén Itzá, La Boca del Pozo de los Itzáes. Basta citar los diversos nombres, variantes lingüísticas del idioma maya, bajo los cuales se le ha nombrado a lo largo de su historia, para apenas así entender las influencias que hubo en la construcción de la que se consideró la Nueva Tollan: Ucyabanal, Chich'en, U Chich heen, Chi che'en itz ha'.

De casta guerrera, sacerdotal y comercial Chichén Itzá, tiene claroscuros que la describen polifacética y que el tiempo impiadoso no ha podido sepultar. Inspiración de almas bélicas que la bañaban en aguas de sangre bajo una visión mítica-cósmica, que posicionó a sus hijos como los más temidos del norte de Yucatán. Una ciudad que era y es el destino de grandes peregrinajes y que hoy todavía lucha y se defiende con sus fauces de serpiente, de jaguar, para no ser tragada por la selva perenne y abundante que la rodea. Una Chichén indomable que se viste con hipil de flores policromas y aretes de filigrana puuciana, que es más que la apoteosis de los solsticios y equinoccios que la convierten cada año en la ciudad festiva de la gente "new age".

Pero, también en su vena mineral corre la ciencia, la exactitud matemática que los antiguos hombres entrelazaron con la armonía del universo y lo hicieron objeto piramidal. La magia del lenguaje cósmico. Y es justo en esta evocación de tiempo y espacio donde uno puede imaginar cómo se cruzan en un xaibé, una intersección de caminos, el conocimiento de los hombres de ciencia ancestrales que observaron y crearon un sistema vigesimal, que dio valor a la nada, con los otros hombres de ciencia, los actuales, los que usan computadoras, los que se comunican a distancia por internet, los que usan sistemas de procesamiento de datos. Los hombres mentales, los aprendices de Cardano, de Erdős, de Pitágoras, de Galileo Galilei, de Euler y un sinfín de etcéteras. Las matemáticas y su gran característica intemporal, eficaz del todo, a través de los tiempos.

En reciente charla con Marcus Du Sautoy, en su paso por la Ciudad de México, hablaba sobre el arte de las matemáticas y las matemáticas del arte, un xaibé, indiscutiblemente. Entonces, se apilaron en mi mente imágenes y conceptos de los geofísicos de la UNAM que estaban "interviniendo", en ese momento, con su método de prospección terrestre la pirámide de Kukulcán. Yo estaba experimentando un estado mágico, que se describía entre el significado de un símbolo arqueológico y la técnica de una tomografía de resistividad eléctrica, ni

.....  
\* Correo electrónico: [magdalenacastro85@gmail.com](mailto:magdalenacastro85@gmail.com)

qué decir de todo esos conceptos tales como GPS, electrodo, secuencia, palabra tantas veces escuchada; “la colmena” como le llamé a la gráfica de ajustes de error, que caminaba en la pantalla de la computadora bajo una línea funcional, puntos negros que volaban como abejas acercándose al panal. El Voxler, de miles de pesos, y lo que después queda grabado en la memoria, la escala de color, con la variedad de un arcoíris, describiendo la figura de lo que hay abajo. Lo que no se ve, se toca gracias a lenguajes matemáticos manejados en su esencia de valor fundamental, único. Ciencia y belleza, belleza y ciencia.

Chichén ahora muestra lo que contiene en su vientre materno calizo de aguas dulces, mansas, en la que se bañan sus secretos milenarios. La madre que cobija a sus hijos de sangre: los artesanos que la inundan día a día bajo sistemático desorden. Chichén la de las venas de terraplén sutilmente cenagoso.

La ciudad de las mil lenguas, la huésped que recibe a turistas y a hombres de ciencia, la que exigió a los geofísicos derechos de admisión a través de ceremonia chamánica. La que sonreía cuando puso a prueba las escalas de secuencia científica, la que movió electrodos, la mujer caprichosa que no cede, la que contiene arrugas de montaña escarpada, la madre, la hija, la compañera que reta a la selva en el tiempo perenne. La Chichén Itzá que huele a orégano y cacao, la del pavo asado, la del *papak tsul*, la de los panuchos, la de la sopa de lima. La Chichén de los cuatro lados cósmicos, *K'in* al oriente y su rojo achiote; *Chi k'in*, al del poniente y el relleno negro; *Xaman*, al norte y su blanco de agua de horchata y *Nohol* al sur y su amarillo de miel de colmena.

La Chichén Itzá que habla de arriba a abajo y de abajo a arriba. La siempre mágica. La obsesión geofísica.



## **Descripción de la *Revista Geofísica***

La *Revista Geofísica* es una publicación científica de periodicidad anual que contiene artículos originales principalmente de interés para la comunidad especializada en el área de geofísica. La Revista publica artículos de investigación, reportes técnicos de alta calidad, reseñas de libros acerca de Sismología, Vulcanología, Ciencias Espaciales, Hidrología y Exploración Peleomagnetismo y Tectónicas, Oceanografía Física.

## **Sistema de arbitraje**

Los manuscritos recibidos por el editor en jefe de la *Revista Geofísica* son evaluados por dos miembros de Comité Editorial, pudiendo requerirse la opinión de un tercer miembro si es el caso. En una segunda evaluación académica más rigurosa se utiliza el método de doble-ciego para la aceptación definitiva del artículo.

## **Instructivo para autores**

Los lineamientos generales para presentar trabajos para su publicación, son los siguientes:

- Todo artículo sometido debe ser original, y no publicado, ni considerado para publicación en otra revista.
- La extensión máxima de los artículos debe ser de 50 páginas formadas y las llamadas de nota de 10 páginas.
- Los artículos podrán ser escritos en cualquiera de los cuatro idiomas oficiales del Instituto: español, inglés, francés y portugués. En el caso de artículos escritos en inglés, francés o portugués, evitar corte de palabras.
- El nombre de los autores, la institución a la que pertenecen, sus direcciones postal y electrónica se incluirán a pie de página al inicio del artículo.
- Cada artículo debe ser precedido por un resumen corto (máximo 110 palabras), el cual debe permitir al lector tener una idea de la importancia y campo que abarca el artículo, debe presentarse al menos en español e inglés.
- Inmediatamente después del resumen, se escribirán no más de seis palabras clave representativas del contenido general del artículo y características de la terminología usada dentro de un campo de estudio.
- Dentro del texto, si se trata de una cita textual que abarque como máximo dos líneas, se citará el autor, se transcribirá entre comillas y enseguida entre paréntesis se apuntará el año y número de página(s). Si la cita abarca más líneas, se transcribirá el párrafo o párrafos con una sangría, según se indica en la plantilla, sin encomillar.
- Las fotografías, figuras, gráficas, cuadros y tablas deberán ser presentadas listas para ser reproducidas y su colocación dentro del texto se indicará claramente.

- Los artículos deben ser colocados en la plantilla correspondiente la cual debe ser solicitada al editor responsable o al Departamento de Publicaciones en la Secretaría General.
- Se incluirá la Bibliografía consultada al final del artículo respetando el siguiente formato:

Apellido e inicial(es) del Nombre(s) de autor(es), año. Título del artículo. *Título del libro completo o de la revista abreviado*, vol. (núm.), páginas consultadas, en el caso de tesis o libros colocar aquí Editorial, Ciudad y el número de páginas total, para revistas las páginas consultadas incluirlas separadas por un guión. La etiqueta se denomina "Bibliografía".

Ejemplo:

Kikuchi M. and Kanamori H., 1982. Inversions of complex body waves. *Bull. Seis. Soc. Ame.*, 72, 491-506.

Somerville P., Irikura K. Sawanda S., Wald Smith N. and Kowada A., 1999. Characterizing crustal earthquake slip model for the prediction of strong ground motion. *Seis. Res. Lett.*, 70 (1), 59-79.

Yépez E., Pineda, J.G., Peralta, J.A., Porta, A.V., Pavía-Millerm C.G. and Angulo- Brown, F., 1999. *Spectral Analysis of ULF Electric Signals Possibly Associated to Earthquakes. Atmospheric and Ionospheric Electromagnetic Phenomena Associated with Earthquakes*, Ed. M. Hayakawa (TERRAPUB), Tokyo, 115-121.

- Todos los autores deberán atenerse a estos lineamientos.
- Los artículos deben enviarse al Editor de la *Revista Geofísica*, quien los someterá a dictamen anónimo de dos especialistas e informará el resultado a los autores en un plazo no mayor de un año:

M.Sc. J. Esteban Hernández-Quintero  
 Jefe del Servicio Magnético, Instituto de Geofísica  
 Universidad Nacional Autónoma de México  
 Ciudad Universitaria  
 Coyoacán, 04360, Ciudad de México  
 Correo electrónico: geofisica\_editor@ipgh.org  
 Tel.: (+52-55) 5622-4149 / Fax: (+52-55) 5550-2486

- No se devolverá el material enviado.

## **Función editorial del Instituto Panamericano de Geografía e Historia**

El IPGH publica seis revistas, impresas y distribuidas desde México. Estas son: *Revista Cartográfica*, *Revista Geográfica*, *Revista de Historia de América*, *Revista de Arqueología Americana* y *Revista Geofísica*.

La Secretaría General invita a todos los estudiosos y profesionales de las áreas de interés del IPGH: cartografía, geografía, historia, geofísica y ciencias afines, a que presenten trabajos de investigación para publicarlos en nuestras revistas periódicas.

Si requiere mayor información, favor de comunicarse con:

Guadalupe Romero Mayoral  
Departamento de Publicaciones  
Secretaría General del IPGH  
Ex-Arzobispado 29 / Colonia Observatorio / 11860 Ciudad de México  
Tels.: (+52-55) 5277-5888 / (+52-55) 5277-5791 / (+52-55) 5515-1910  
Correo electrónico: [publicaciones@ipgh.org](mailto:publicaciones@ipgh.org)

Edición del  
Instituto Panamericano de Geografía e Historia  
realizada en su Departamento de Publicaciones  
Ex-Arzobispado núm. 29 , Col. Observatorio  
Ciudad de México, México  
Tels.: 5277-5888, 5277-5791, 5515-1910  
publicaciones@ipgh  
2018

ESTADOS MIEMBROS  
DEL  
INSTITUTO PANAMERICANO DE GEOGRAFÍA E HISTORIA

**Argentina**

EL IPGH, SUS FUNCIONES Y SU ORGANIZACIÓN

**Belice**

**Bolivia**

**Brasil**

**Chile**

**Colombia**

**Costa Rica**

**Ecuador**

**El Salvador**

**Estados Unidos  
de América**

**Guatemala**

**Haití**

**Honduras**

**México**

**Nicaragua**

**Panamá**

**Paraguay**

**Perú**

**República  
Dominicana**

**Uruguay**

**Venezuela**

El Instituto Panamericano de Geografía e Historia (IPGH) fue fundado el 7 de febrero 1928 por resolución aprobada en la Sexta Conferencia Internacional Americana que se llevó a efecto en La Habana, Cuba. En 1930, el Gobierno de los Estados Unidos Mexicanos construyó para el uso del IPGH, el edificio de la calle Ex Arzobispado 29, Tacubaya, en la Ciudad de México.

En 1949, se firmó un convenio entre el Insituto y el Consejo de la Organización de los Estados Americanos y se constituyó en el primer organismo especializado de ella.

El Estatuto del IPGH cita en su artículo 1o. sus fines:

1) Fomentar, coordinar y difundir los estudios cartográficos, geofísicos, geográficos e históricos, y los relativos a las ciencias de interés para América.

2) Promover y realizar estudios, trabajos y capacitaciones en esas disciplinas.

3) Promover la cooperación entre los Institutos de sus disciplinas en América y con las organizaciones internacionales afines.

Solamente los Estados Americanos pueden ser miembros del IPGH. Existe también la categoría de Observador Permanente, actualmente se encuentran bajo esta condición: España, Francia, Israel y Jamaica.

El IPGH se compone de los siguientes órganos panamericanos:

1) Asamblea General

2) Consejo Directivo

3) Comisión de :	Cartografía	(Costa Rica)
	Geografía	(EUA)
	Historia	(México)
	Geofísica	(Ecuador)

4) Reunión de Autoridades

5) Secretaría General (México, D.F., México)

Además, en cada Estado Miembros funciona una Sección Nacional cuyos componentes son nombrados por cada gobierno. Cuentan con su Presidente, Vicepresidente, Miembros Nacionales de Cartografía, Geografía, Historia y Geofísica.



---

**Hipotético peligro sísmico en la estructura Falla San Ramón, Chile Central.** *Manuel Araneda C., Álvaro Araneda A., María Soledad Avendaño R.* • **Validación de la presión en Santiago como índice para estimar la actividad del anticiclón del Pacífico Sur.** *Arnobio Germán Poblete, Paola Belén Monroy* • **Marco tectónico y su correlación con la hidrología las cuencas de Tongoy y Limari, Chile.** *Manuel Araneda C., Álvaro Araneda A., Eugenio Celedon C.* • **Relevamiento geofísico para la provisión de agua subterránea a Santa Rita de Catuna, provincia de La Rioja, Argentina.** *Manuel J. Mamani, Daniel E. del Moral* • **El radar de penetración terrestre como una herramienta de geofísica somera aplicado a la exploración arqueológica.** *Walter Antonio Flores G.* • **Reseña de las estancias de trabajo paleomagnético en Nicaragua y México: adiestramiento para la resolución de problemas en tectónica de placas.** *Luis Manuel Alva Valdivia, Bernardo Ignacio García Amador, Greybin Josué Borge Castro, Elliot Pérez Romero, Xochilt Esther Zambrana Areas* • **El mito y el electrodo.** *Magdalena Castro*

---