

The cover of the journal 'Revista Geofísica' features a photograph of a field geophysics team. Three individuals are visible: one on the left in a white shirt and blue hat, one in the center in a blue jacket and grey pants, and one on the right in a red and black jacket and white hat. They are working with geophysical equipment, including a GNSS receiver on a tripod and a red and white pole. The background shows a vast, mountainous landscape under a clear sky. The title 'REVISTA' is positioned above the main title 'GEOFÍSICA', which is in large white letters. A red banner at the bottom contains the issue information and the logo of the Instituto Panamericano de Geografía e Historia (IPAGH).

REVISTA

GEOFÍSICA

número 68 • enero - diciembre 2018



INSTITUTO PANAMERICANO DE
GEOGRAFÍA E HISTORIA

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

PRESIDENTE	Lic. Israel Sánchez	<i>Panamá</i>
VICEPRESIDENTE	Mag. Alejandra Coll	<i>Chile</i>
SECRETARIO GENERAL	Mag. 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	Geól. 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

REVISTA

GEOFÍSICA

número 68 • enero - diciembre 2018



INSTITUTO PANAMERICANO DE
GEOGRAFÍA E HISTORIA

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

<https://revistasipgh.org/index.php/regeofi>

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)

Canje electrónico, 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

Correo electrónico: publicaciones@ipgh.org / <https://revistasipgh.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: Río La Burra, en la Precordillera Central de San Juan, Argentina. Fotografía: Laura Perucca.

Cover: La Burra River, in the Central Precordillera of San Juan, Argentina. Photography: Laura Perucca.

© 2020 Instituto Panamericano de Geografía e Historia.

Revista Geofísica, núm. 68, enero-diciembre 2018, 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, publicaciones@ipgh.org. Editor responsable: M.Sc. Juan Esteban Hernández-Quintero, geofisica_editor@ipgh.org. Reserva de Derechos al Uso Exclusivo núm. 04-2019-010811434800-203, otorgado por el Instituto Nacional del Derecho de Autor, ISSN (en línea): 2663-4015. 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, Alcaldía Miguel Hidalgo, C.P. 11860, Ciudad de México, México. Fecha de última modificación: 08 de diciembre de 2020.

Se autoriza cualquier reproducción parcial o total de los contenidos e imágenes de la publicación, incluido el almacenamiento electrónico, siempre y cuando sea para usos estrictamente académicos y sin fines de lucro, citando la fuente sin alteración del contenido y otorgando los créditos autorales.

REVISTA
GEOFÍSICA

número 68

enero-diciembre 2018

CONTENIDO

Nota Editorial	5
Editorial Note	7

Artículos inéditos de investigación

Gravedad en la estructura andina Segmento 18°-42° S	11
<i>Manuel Araneda</i>	
<i>María Soledad Avendaño</i>	
<i>María Inés Pastorino</i>	
<i>Álvaro Araneda</i>	
Procesos gravitacionales en zonas de ladera, aplicándolos a modelos de predicción real con Archivos Raster y SIG, Alcaldía Álvaro Obregón, Ciudad de México	41
<i>Oscar Daniel Rivera González</i>	
Modernización con bajo presupuesto de la estación hidrométrica de Guaqui, lago Titicaca	61
<i>Bismarck Jigena Antelo</i>	
<i>Luis Miguel Carrasco Nattes</i>	
<i>Juan Jose Muñoz Pérez</i>	
<i>Manuel Berrocoso Dominguez</i>	
<i>Renato Mamani Velázquez</i>	
Análisis morfotectónico y gravimétrico en un valle intermontano de la Precordillera Central de San Juan, Argentina	81
<i>L.P. Perucca</i>	
<i>F. Audemard M.</i>	
<i>J.M. Alcacer Sánchez</i>	
<i>M. Rothis</i>	
<i>M. Vargas</i>	
<i>F. Haro</i>	
<i>F. Tejada</i>	
<i>P. Blanc</i>	
<i>N. Vargas</i>	
<i>G. Lara</i>	
<i>M. Onorato</i>	

Investigación geofísica en la fosa de Santa Lucía, Uruguay 101

Jorge Eduardo de los Santos Gregoraschuk

Julián Andrés Ramos Cavallo

Fernando Corbo Camargo

Manuel Araneda Cabrera

Álvaro Araneda Avendaño

Alfonso Nicolás Flaquer Barrios

Reporte Técnico

**Caracterización y estadística de señales volcánicas en los Andes,
casos de estudio volcanes Reventador y Cotopaxi en Ecuador** 119

Hugo Ortiz

Reseña

4th Iberoamerican Seminar on Forensic Geosciences 127

Ana Luz Caccavari Garza

Instructivo para autores 130

Nota editorial

El Instituto Panamericano de Geografía e Historia (IPGH) como institución descentralizada de la Organización de Estados Americanos (OEA), tiene entre sus objetivos fundamentales el intercambio del conocimiento entre especialistas en geografía, historia, geodesia, y geofísica.

En este ámbito, se presenta el ejemplar correspondiente al número 68 de la *Revista Geofísica*. En el formato de publicación de ésta, se presentan cinco artículos científicos originales provenientes de distintas regiones de América y abordando temáticas en distintos escenarios de esta región.

En concordancia con la Agenda Panamericana 2010-2020, la aplicación de diversas técnicas de la geofísica tales como la gravimetría, la prospección eléctrica, o la adquisición de datos hidrometeorológicos aportan esquemas originales para el estudio de fenómenos asociados a riesgos y peligros en el ámbito de esta disciplina.

Los procesos gravitacionales en zonas de ladera, aplicado a modelos de predicción en la Ciudad de México, da cuenta de las nuevas aplicaciones de datos gravimétricos en problemas urbanos, en contraste el estudio de la gravedad en la estructura andina o bien en el estudio del sector sudeste de la Fosa Tectónica del río Santa Lucía, Uruguay, mediante gravimetría y sondeos magnetotélúricos.

Por otro lado, se presenta el análisis morfotectónico y gravimétrico en la Precordillera Central de San Juan (Argentina), como otra aplicación de esta técnica de métodos potenciales. De igual manera, la forma de adaptarse con bajo presupuesto en el diseño de una estación hidrométrica en el lago Titicaca, se presenta como un tema técnico específico.

La caracterización y estadística de señales volcánicas en los Andes, en los volcanes Reventador y Cotopaxi reflejan la dinámica de los proyectos que ha apoyado el instituto recientemente.

Es muy importante conservar y reconocer el gran potencial de algunos de los métodos geofísicos aplicados a estudios específicos, tal como las experiencias en Argentina, Chile, México y Uruguay en el uso de la gravimetría; en contraste, en otras regiones de las Américas, ha venido a menos su utilización. Los artículos presentados en este ejemplar, sobre este tema, aportan de una forma muy efectiva, alternativas y usos de las técnicas geofísicas utilizadas en el entorno panamericano.

En el apartado de Reportes Técnicos, se abordan metodologías novedosas en el tema de riesgos y peligros relacionados con volcanes activos; la cuál es una temática a escala continental.

Además de las metodologías de gran tradición mencionadas en este número se abordan nuevos derroteros para estudiar y resolver casos muy puntuales, como es la aplicación de la exploración geofísica somera en las ciencias forenses, un tema de actualidad y de un servicio de gran importancia en la sociedad moderna. La reseña presentada en este ejemplar, da la pauta para conocer su desarrollo en los últimos años en varios Países Miembros del IPGH.

En suma, la *Revista Geofísica* mantiene su espíritu de colaboración panamericana, para alcanzar los objetivos esenciales desde su misma creación.

J. Esteban Hernández-Quintero
Editor

Editorial Note

The Panamerican Institute of Geography and History (PAIGH) as a decentralized institution of the Organization of American States (OAS), has among its fundamental objectives the exchange of knowledge between specialists in geography, history, geodesy, and geophysics.

In this area, the issue corresponding to number 68 of the *Geophysics Journal* is presented. In its current format, five original scientific articles are presented from different regions of the Americas describing different scenarios in this region.

In accordance with the 2010-2020 Panamerican Agenda, the application of various geophysical techniques such as gravimetry, electrical prospecting, or the acquisition of hydrometeorological data provide original schemes for the study of phenomena associated with risks and hazards associated with this discipline.

Gravitational processes in hillside areas, applied to prediction models in Mexico City, describe new applications of gravimetric data in urban problems, in contrast to the study of gravity in the Andes structure or in the study of the sector Southeast of the Santa Lucía River Valley in Uruguay, by gravimetry and magnetotelluric soundings.

On the other hand, the morphotectonic and gravimetric analysis in the Central Precordillera of San Juan (Argentina) is presented, as another application of such potential method. In the same way, how to adapt with a low budget in the design of a hydrometric station on Titicaca lake, is presented as a specific technical issue.

The characterization and statistics of volcanic signals in the Andes, specially in Reventador and Cotopaxi volcanoes reflect the dynamics of the projects that the institute has recently supported.

It is very important to conserve and recognize the great potential of some of the geophysical methods applied to specific studies, such as the experiences in Argentina, Chile, Mexico and Uruguay in the use of gravimetry; In contrast, in other regions of the Americas, its use has diminished. The articles presented in this issue, on this topic, provide in a very effective way, alternatives and uses of the geophysical techniques used in the Panamerican environment.

In the technical reports section, new methodologies are addressed on the subject of risks and dangers related to active volcanoes; which is a theme on a continental scale.

In addition to traditional methodologies mentioned in this issue, new paths are addressed to study and solve specific cases, such as the application of shallow geophysical exploration in forensic sciences, a current topic and a service of great importance in the modern society. The review presented in this issue gives the guideline to know its development in recent years in several PAIGH Member Countries.

In short, *Geophysics Journal* maintains its spirit of Panamerican collaboration, to achieve the essential objectives from its very beginning.

J. Esteban Hernández-Quintero

Editor

Artículos inéditos de
investigación

Gravedad en la estructura andina segmento 18°-42° S

Manuel Araneda¹
María Soledad Avendaño²
María Inés Pastorino³
Álvaro Araneda⁴

Recibido enero de 2017; aceptado en diciembre de 2017

Abstract

New data of the gravity potential field in Central Andes between latitudes 18°-42° S associated with existing geophysical and geological data allow to partially clarifying the crustal structure of the mountain range and its thickening. Structural evidences of the crust are known through seismic and gravimetric data, and geological projections. This structure and its composition change considerably from east to west, at the back-arc east area; Moho discontinuity is clearly recognized, however, measurements of the active seismic at the highlands and the western range are observed only with weak Moho presence. This does not occur in the data analysis of broadband seismology data, which indicates an approximate discontinuity of 70 km. On the other hand, west from this structure along the coast, the oceanic Moho develops at an approximate depth of 40 km, which decreases from north to south according to the height and width of the Andes structure.

The petrological properties of the rocks comprising the deep crust may change due to several processes that through the analysis show variations of the classic Moho discontinuity that not necessarily correspond to a crust-mantle petrological boundary. The tectonic shortening at the back-arc is the dominant process that contributes to the formation of the Central Andes root. Additionally at the forearc and arc, hydration of the mantle wedge produces, partially, a crust thickening which is translated into a change in the regional gradient of the gravity potential field. This gradient is observed in east-west and north-south strike, which values in east-west strike vary between 2.9×10^{-5} ms⁻² per kilometer at Arica-Iquique area and 1.01×10^{-5} ms⁻² gr/cm³ per kilometer at Valdivia-Puerto Montt area. This gradient is gradual in north-south strike. At the same time,

.....
¹ Servicios Geofísicos en Minería e Ingeniería, (SEGMI). Correo electrónico: segmi@netexpress.cl

² Servicios Geofísicos en Minería e Ingeniería, (SEGMI). Correo electrónico: segmi@netexpress.cl

³ Universidad Nacional de Tucumán, Argentina. Correo electrónico: mpastorino196@gmail.com

⁴ Servicios Geofísicos en Minería e Ingeniería, (SEGMI). Correo electrónico: aaraneda@segmi.cl

Bouguer anomaly varies in the same proportion, with the highest variations of $380 \times 10^{-5} \text{ ms}^{-2}$ in Antofagasta area and $-50 \times 10^{-5} \text{ ms}^{-2}$ in Puerto Montt area.

Key words: *Gravity, seismologic, tectonics, structural model.*

Resumen

Nuevos datos del campo potencial de la gravedad en los Andes Centrales entre las latitudes 18° - 42° S, asociados a datos geofísicos y geológicos existentes, permiten en parte clarificar la estructura cortical del cordón montañoso y su engrosamiento. Evidencias estructurales de la corteza son reconocidas mediante datos sísmicos, gravimétricos y proyecciones geológicas. Dicha estructura y su composición cambian significativamente de este a oeste, en la parte este del retroarco, la discontinuidad de Moho se reconoce claramente, sin embargo, las mediciones de la sismica activa en el altiplano y cordillera occidental se observan solamente llegadas débiles del Moho, esto no sucede en el análisis de los datos de la sismología de banda ancha, los cuales indican una discontinuidad aproximada a los 70 km. Por otra parte, al oeste de esta estructura a lo largo de la costa, el Moho oceánico se desarrolla a una profundidad aproximada de 40 km, la cual disminuye de norte a sur de acuerdo a la altura y ancho de la estructura andina.

Las propiedades petrológicas de las rocas que conforman la corteza profunda, pueden cambiar por diversos procesos que mediante el análisis, presentan variaciones de la clásica discontinuidad del Moho que no necesariamente corresponden a un límite petrológico corteza-manto. El acortamiento tectónico en el retroarco es el proceso dominante que contribuye a la formación de la raíz de los Andes Centrales. Adicionalmente, en el antearco y arco, la hidratación de la cuña del manto produce en parte un engrosamiento cortical lo cual se traduce en un cambio en el gradiente regional del campo potencial de la gravedad. Este gradiente se observa en la dirección este-oeste y de norte a sur, cuyos valores en la dirección este-oeste varían entre los $2.9 \times 10^{-5} \text{ ms}^{-2}$ por kilómetro en el sector de Arica-Iquique y $1.01 \times 10^{-5} \text{ ms}^{-2}$ por kilómetro en el sector de Valdivia-Puerto Montt. Este gradiente es gradual en el sentido norte-sur. Al mismo tiempo la anomalía de Bouguer varía en el mismo sentido, siendo las mayores variaciones de $380 \times 10^{-5} \text{ ms}^{-2}$ en el sector de Antofagasta y de $-50 \times 10^{-5} \text{ ms}^{-2}$ en el sector de Puerto Montt.

Palabras clave: *Gravedad, sismología, tectónica, modelo estructural.*

Introducción

Desde el comienzo de la teoría de la tectónica de placas, los Andes han sido citados como el mayor ejemplo de un orógeno activo formado por la subducción de la litósfera oceánica bajo un margen continental. En este caso se estudiará el segmento ubicado entre las latitudes 18° S a 42° S y entre el macizo andino y el borde costero del Pacífico sur, Figura 1. No obstante de la continuidad

espacial de la cordillera con una longitud aproximada de 7 000 km al borde oeste de Sudamérica y la unicidad de los procesos responsables para su formación, del margen andino, el cual está notablemente marcado por un fuerte rumbo segmentado en aproximadamente 200 Ma, una ininterrumpida convergencia océano-continente y particularmente por un proceso orogénico muy compresivo durante el Cenozoico tardío (Mpodozis y Ramos, 1989; Sobolev y Babeyko, 2005) han producido un margen cimentado, bien caracterizado por variaciones sistemáticas en: acoplamiento de la topografía, morfoestructural, tectónica, distribución de cuencas, volcanismo, geometría de la subducción, potencia de la estructura litosférica e historia geológica (Gansser, 1973; Jordan *et al.*, 1983; Isacks, 1988; Mpodozis y Ramos, 1989; Cahill y Isacks, 1992; Dewey y Lamb, 1992; Kley y Monaldi, 1998; Gutscher, 2002; Jacques, 2003; Stern, 2004).



Figura 1. Zona de estudio en América del Sur.

Propios de estos cambios de rumbo, el margen andino puede descomponerse en varios segmentos de primer orden de acuerdo a los aspectos considerados en el margen de los cuales se desprenden diferentes definiciones, pero pensando en una definición unificada de la segmentación de los Andes. La morfología de margen andino dominado por la meseta del altiplano corresponde a la segunda más grande de la Tierra. Contrasta con la meseta del Tibet, la cual nació de la colisión entre dos continentes durante los últimos 500 Ma (Tapponnier *et al.*, 1986).

El altiplano americano ha sido construido en un tiempo relativamente breve, aproximadamente en los últimos 25 Ma, mediante la interacción de la placa sudamericana con la placa oceánica de Nazca (Isacks, 1988 y Mc Quarie, 2002).

La meseta del altiplano está ubicada en la parte central de margen andino con una altura media de 4 000 msnm y un ancho aproximado de 420 km, con un eje simétrico paralelo a la dirección de convergencia (Gephard, 1994). Los Andes Centrales de acuerdo a su morfología se pueden dividir en tres segmentos; Norte: con una altura media de 4 000 metros y ancho de 400 km, Central: con altura media de 2 000 metros y ancho de 100 km y sur: con altura media de 1 500 metros y ancho menor a 100 km.

La causa de esta segmentación aún no está completamente entendida. Es obvio que existe una correspondencia entre los límites de la segmentación andina con la subducción de la dorsal oceánica y la variación del rumbo de la placa subducta junto con la significativa correlación entre la edad de la placa de Nazca en la fosa y la morfología del erógeno. Esto ha motivado la aceptación general que la segmentación es originalmente controlada por medio de configuración de la placa de Nazca (Jordan *et al.*, 1983; Lamb y Davies, 2003).

A pesar de la evidente relevancia que la placa oceánica ha tenido para el estudio de la geodinámica del margen es necesario notar que estos segmentos y sus contornos son características geológicas que tienen mucho tiempo en el margen andino 10^8 Ma (Gansser, 1973; Kley y Monaldi, 1998). La segmentación de los Andes es producto de un largo tiempo en el margen continental, el cual no puede ser explicado en términos de la configuración corriente de la placa oceánica porque tal configuración cambia en periodos de tiempos cortos los procesos de reorganización (10^6 - 10^7 Ma) (Pardo-Casas y Molnar, 1987; Tebbens y Cande, 1997).

Tectonismo y geología de los Andes

La Cordillera de los Andes es una cadena montañosa que tiene 8 000 km de longitud y se extiende a lo largo del margen continental oeste de Sudamérica. Es el resultado de la convergencia de la placa oceánica hacia la placa Sudamericana. Esta relación de convergencia tiene una tasa aproximada de 10 cm/año para los últimos 3 Ma, la cual ha sido determinada desde las anomalías magnéticas oceánicas (Somoza, 1998). Sin embargo, con el advenimiento del sistema GPS,

disminución en la relación de convergencia.

La estructura andina tiene una compleja historia que comienza en el Paleozoico con la acreción de los bloques micro-continentales del pacífico hacia el oeste del margen de Gondwana. En ese período, la costa suroeste de Gondwana se puede observar en las sierras pampeanas. La acreción de los terranes con una nueva zona de subducción formada a lo largo del margen oeste perteneciente al Paleozoico inicial del ciclo tectónico en la evolución de los Andes, permite un gran prisma de acreción preservado a lo largo del margen del Pacífico de Chile al sur de latitud 25° S (Herve, 1988).

En el segundo ciclo del tectonismo de Gondwana, el arco magmático compuesto por granitoides y rocas volcánicas riolíticas fue desarrollado en este prisma acrecionario y en áreas adyacentes del este. El último estado evolucionario del ciclo tectónico andino (Mesozoico al Cenozoico) está caracterizado por un mayor cambio paleogeográfico. Con posterioridad la erosión en el proceso de la subducción, removió una gran cantidad de materiales acumulados en el antearco del Paleozoico.

El Mesozoico-Cenozoico de los Andes contrastando con el Paleozoico, careció de evidencias para una mayor coalición para formar terranes y parece estar relacionado a la erosión tectónica del margen continental. La particular característica de la evolución del Mesozoico del orógeno Andino es la gran longitud del rumbo de la segmentación tectónica. Existen diferencias en la evolución geológica, estilos estructurales y conducta de la relación del arco magmático de varios segmentos, estos cambios en la naturaleza de las cuencas trans-arcos (Mpodozis y Ramos, 1989). Entonces esto debe ser muy importante en el control sobre la segmentación tectónica. De esta forma los Andes ofrecen una gran oportunidad para entender y estudiar el acoplamiento de la subducción y la orogénesis continental. La Figura 2 muestra un esquema generalizado de las unidades geotectónicas de Sudamérica.

Modelos previos en los Andes Centrales

Muchos modelos para explicar la teoría de placas de Nazca-Americana asociadas al edificio montañoso de los Andes han existido y siguen existiendo ya que la información disponible no es suficiente para tener un cuadro realista. Aún así mucha de la información es bastante consistente y los modelos se van acercando a la realidad existente. Dentro de estos avances el clásico artículo de Dawey y Bird (1970) proporciona muchas conclusiones que se han sustentado en el tiempo por ejemplo la adicción del magma a la corteza y el acortamiento cortical debido a la inversión de fallas lo cual generalmente es reconocida como los procesos más importantes en la constitución del espesor de la corteza y por consecuencia al edificio de los Andes Centrales. Por otra parte Rutland (1971) sugirió que la erosión tectónica, por medio de la subducción, de la corteza



Figura 2. Esquema generalizado de las unidades geotectónicas de Sudamérica.

oceánica bajo la Americana producía una eventual adición de este material hasta la base de la corteza oeste, la cual podría ser importante en la formación de los Andes Centrales. Modelos de diferentes autores ponen énfasis sobre estos procesos como agentes del engrosamiento cortical. Adicionalmente a estos mecanismos la expansión termal también pueden causar significativos levantamientos sin que la corteza se adelgace pero si en el manto subyacente (la litosfera no está suficientemente caliente), (Froidevaux y Isacks, 1984).

Según Kono *et al.* (1989) existen tres modelos relevantes que se resumen a continuación:

- a) El modelo de James (1971b, 1973). Este propone que la subducción de la placa oceánica desde el Pacífico, se inició en el Terciario o Jurásico continuando a través del Cretácico y Terciario. Una suposición importante en su modelo es la migración de la actividad magmática hacia el este con el tiempo, esto se debe a que con una subducción permanente la profundidad de la isoterma del punto de fusión del manto es menor y el centro de la generación de magma se mueve aun más hacia el continente. El proceso más importante de la formación morfológica de los Andes Centrales es la acreción del magma en el lado oeste de la cordillera, con el centro de la actividad moviéndose

hacia el este con el tiempo. La formación de los Andes Este y del Altiplano es de una naturaleza común. La cordillera este fue formada por el plegamiento y fallamiento inverso, causado por el esfuerzo compresivo ejercido por el magma inserto en la corteza bajo la cordillera oeste y el Altiplano es llenado por sedimentos entre montañas formado por la erosión de terrenos altos hacia el este y oeste.

- b) Suárez *et al.* (1983) propusieron un modelo de la formación de los Andes Centrales basado principalmente en el estudio de la fuente de los terremotos generados al pie de la cordillera este y asociados a las fallas inversas ocurridas en el borde este del Altiplano, bajo el establecimiento del tectonismo compresional en la corteza continental. Este proceso se encargaría del acortamiento de la corteza hacia el oeste. Cuando un espesor alcanza un valor crítico más allá de la deformación, es impedida debido a que la corteza flotaría. La posición de esta falla hacia el este generaría un nuevo régimen de fallamiento inverso activo. Por medio de la repetición de este proceso en el tiempo continua el régimen de fallamiento inverso hacia el este. Suárez *et al.* (1983) concluyen que el acortamiento de la corteza por medio de la repetición de fallas inversas es la principal causa de la formación del espesor de la corteza que sostiene el Altiplano. La presente señal esta inferida desde un modelo por medio de la gravedad (Lyon-Caen *et al.*, 1985) el cual analiza una sección de este-oeste que se extiende desde Chile a Bolivia, concluyendo que la anomalía de Bouguer cerca de la cordillera este y la cuenca del Amazona pueden ser explicadas por medio de la flexura de la litosfera continental subductada bajo el altiplano desde el este.
- c) El modelo de Uyeda y Kanamori (1979) y Uyeda (1982) compara varias propiedades de zonas de subducción en la tierra y las caracteriza en dos grupos diferentes, dependiendo de su fuerte interacción entre dos placas activas Americana y del tipo Mariana. Aunque su estudio no significa una detallada descripción de un arco específico, el tipo chileno esta aparentemente basado en la situación de la costa oeste de Sudamérica y por lo tanto relevante para la formación de los Andes y el Altiplano. En una subducción tipo chilena, la litosfera joven, subductada bajo la litosfera continental que avanza hacia la fosa. Como la placa permanece aun caliente desde la formación de la dorsal oceánica, la densidad media de la placa no es tan grande y consecuentemente la placa permanece flotando.

La litosfera continental cabalga y fuerza la litosfera oceánica subductada, pero la placa flotante va hacia abajo dentro del manto con un ángulo pequeño. La interacción entre la litosfera continental y la litosfera oceánica es muy fuerte y grandes cabalgamientos (fallas inversas) y grandes terremotos producto de fallas inversas ocurren en la fosa. El régimen de esfuerzos compresivos prevalece en el continente de cabalgamiento causando pliegues y potencia en la corteza. La formación de las cuencas de retroarco está impedida por la potente fuerza compresiva de la corteza.

Los modelos descritos contienen importantes ideas, que en algunos casos aún se mantienen y son buenas para explicar algunas características de los Andes Centrales, aún cuando tienen inconsistencias en otros aspectos. Estos procedimientos deben ser vistos revisando nuevos datos geofísicos y geológicos relevantes obtenidos en los recientes años.

Fuente de la información

Dentro del sistema interdisciplinario de investigaciones geocientíficas, el grupo "Mobility of Active Continental Margin" y el Centro Colaborativo de Investigación 267 "Procesos de deformación de los Andes" de Alemania, han realizado investigaciones geofísicas se han realizado en dos segmentos de Chile continental entre las latitudes 20°-26° S y 37°-42° S. En ambos segmentos se configuraron redes sísmicas activas y pasivas como se observan en las Figuras 3 y 4 (Wigger *et al.*, 1994; Schmitz *et al.*, 1990; Krawczyk *et al.*, 2006). Importa mencionar que el perfil realizado en la latitud 21° S es solamente uno de los perfiles realizados entre la costa y los Andes Centrales. Es importante destacar las diferentes fuentes y organismos que aportaron contribuciones a este estudio entre ellas se pueden mencionar las siguientes: Proyect Integrated Geophysical of the Seismic Risk Zone of Southern Central Andes (38°-42° S), Fundación Volkswagen de Alemania, Prosección de la Gravedad en los Andes del Sur 29°-32° S y Gravedad en los Andes del Sur 32°-37° S patrocinado por el Instituto Panamericano de Geografía e Historia (IPGH), Empresa Nacional del Petróleo (ENAP), National Imagery Mapping Agency (NIMA), Instituto Brasileiro de Geología y Estadística (IBGE), Instituto Geográfico Militar (IGM), Servicios Geofísicos en Minería e Ingeniería (SEGMI), Instituto Geográfico Militar Argentino (IGMA).

Sísmica activa

La ejecución de la sísmica activa en los Andes Centrales se puede dividir en dos etapas. La primera efectuada durante el período 1994-1999 entre las latitudes 20°-25° S, norte de Chile, y la segunda entre 2000-2003 entre las latitudes 36°-39° S zona de Chile Central.

Los estudios sísmicos de los Andes Centrales revelan una corteza altamente estructurada tanto en la dirección vertical como horizontal con extensivas capas de altas y bajas velocidades en la corteza superior e inferior (Wigger *et al.*, 1994; Patzwahl *et al.*, 1999; Schmitz *et al.*, 1990).

En la primera etapa dan cuenta de la ejecución de un perfil transversal que cruza los Andes Centrales, aproximadamente en la latitud 21° S (Figura 5), desde el este al oeste incluyendo el antearco del Chaco caracterizado por 38-40 km de espesor, corteza tipo craton. Su espesor aumenta hacia el oeste a 55-60 km y alrededor de 60-70 km bajo la cordillera este y más al este en el Altiplano respectivamente. Bajo la cordillera una discontinuidad de alta velocidad (6.8-7.0 km/seg) alrededor de 25 a 30 km es detectada. Esto es interpretado como

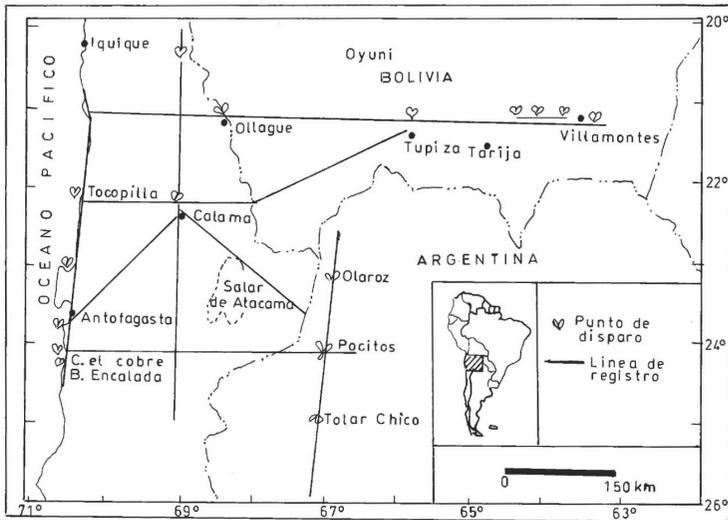


Figura 3. Ubicación de los perfiles sísmicos y puntos de disparos en los Andes Centrales del sur.

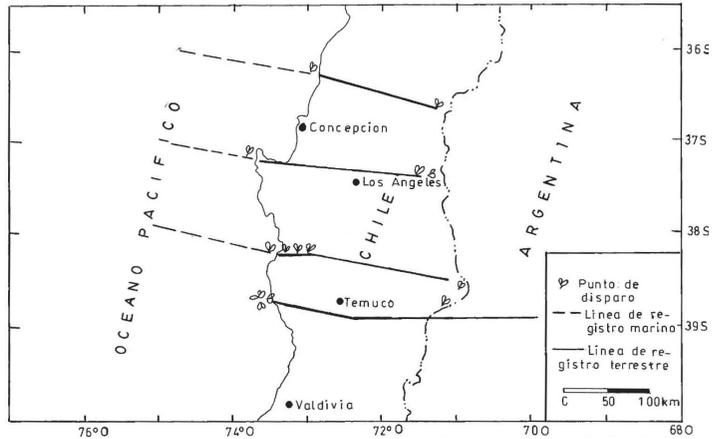


Figura 4. Ubicación de perfiles sísmicos y puntos de disparos en los Andes Centrales del sur.

la base de la corteza superior llegando a 30 km de espesor, la cual es cabalgante hacia el este sobre la corteza del escudo brasileño. Bajo el este del altiplano solamente llegadas débiles reflejadas fueron detectadas desde una profundidad aproximada de 70 km indicando una estructura y cambios composicional en profundidad hasta la raíz de los Andes (Schmitz *et al.*, 1994; Wigger *et al.*, 1994).

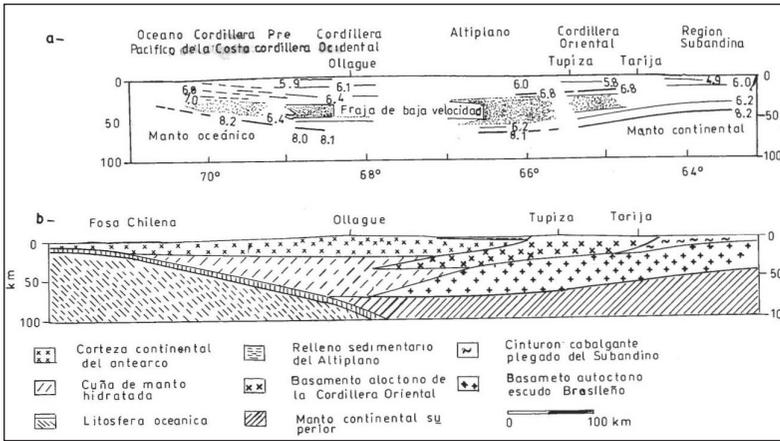


Figura 5. Perfil a lo largo del paralelo 21° S, a) líneas de igual velocidad comprobadas por observaciones directas (Wigger et al., 1994), b) Modelo interpretado.

Los patrones sísmicos llegan a ser más complicados en el oeste del altiplano y el oeste de la cordillera donde no se pudieron registrar llegadas claras desde niveles inferiores de 50-60 km en la corteza. El promedio derivado de velocidades bajo los 50-60 km es bajo comparado con los 6.0 ± 2 km/seg de acuerdo con los resultados obtenidos con estudios regionales obtenidos en el altiplano boliviano (Beck et al., 1996; Zandt et al., 1996; Yuan et al., 1999). El comienzo de un gradiente positivo de velocidades hasta la profundidad de 50-60 km puede ser interpretado como la parte superior de una zona de transición corteza-manto. Tal zona de transición tendría una potencia de 10 km con una velocidad limitada de 6.5 a 7.5 km/seg reducida a la típica rama PmP.

La evidencia de la fuerte atenuación de las ondas sísmicas bajo la cordillera oeste puede ser una razón adicional para que desaparezcan señales claramente detectables desde el límite corteza-manto (Haberland y Rietbrock, 1998). Estudios basados en las fases de las ondas convertidas P y S muestran que el límite corteza-manto existe bajo la cordillera oeste (Yuan et al., 1999) pero esto puede ser formado por una transición en el espesor de 5-10 km lo cual es dificultoso detectar por reflexiones críticas.

El patrón sísmico en el antearco es completamente diferente que las observaciones del arco y el retroarco. En la precordillera una discontinuidad con una velocidad que aumenta a 7.5 km/seg a una profundidad de alrededor de 65-70 km es observada (Wigger et al., 1994; Schmitz et al., 1990). Este aumento de velocidad es comúnmente interpretado como el reciente límite corteza/manto en el antearco. Hacia el oeste la velocidad promedio aumenta desde 6.3 km/seg en la precordillera a 6.6 km/seg en la cordillera de la costa. La base de las altas velocidades intercorticales, de 20-25 km de profundidad bajo

la costa (7.2 km/seg) y 35-40 km de profundidad bajo la precordillera (6.8-7.2 km/seg) son atribuidas al material inferior de la corteza proveniente de corteza continental inicial (Wigger *et al.*, 1994; Patzwahl *et al.*, 1999; Schmitz *et al.*, 1990).

La segunda etapa comprendió la ejecución de medidas sísmicas de refracción en tierra y mar a través del proyecto denominado SPOC en el área comprendida entre las latitudes 36°-39° S (Figura 6). En este sector fueron realizadas cuatro transectas. El perfil que permitió mayor información fue aquel realizado en la latitud 38° S ya que se utilizaron OBS/OBH en el mar cuya operación estuvo a cargo de IFM-GEOMAR de Alemania. En la interpretación de sísmica de refracción y reflexión de ángulo ancho fue modelado mediante el programa ray-tracing (Zelt y Smith, 1992).

Los registros de la exploración en tierra están restringidos a las estructuras de la corteza continental entre la cordillera de la Costa y la cordillera Principal. Los resultados indican que la corteza oceánica es aproximadamente 6-7 km de espesor y el Moho oceánico observado en alrededor de 40 km de profundidad bajo la cordillera de la Costa.

Las principales características de estos modelos son de la corteza continental entre el antearco del litoral y la cordillera Principal. La corteza continental se caracteriza por la velocidad P las cuales generalmente aumentan de oeste a este. La corteza continental superior de aproximadamente 10-15 km y la corteza inferior de aproximadamente 25 km más hacia el este fueron determinadas por la transecta SPOC-norte. Los espesores de la corteza continental fueron resueltos solamente con la transecta SPOC-norte. A lo largo de la transecta SPOC el Moho continental no fue detectado. Estos resultados muestran que el Moho continental yace a una profundidad aproximada de 40 km bajo la cordillera Principal y es más superficial hacia el oeste en aproximadamente 30 km de profundidad bajo el valle longitudinal, bajo la zona de falla de Lanalhue.

Resistividad eléctrica

Esta metodología está centrada en algunas zonas de los Andes Centrales por lo tanto están acotadas a las áreas de estudio, las cuales han sido interpretadas como el reflejo de la presencia de material fundido o fluido. Una de las zonas de baja resistividad fue detectada a 40 km de profundidad en el altiplano y en la cordillera este a 20-30 km (Schwarz y Krüger, 1997). Este descubrimiento fue confirmado por nuevas medidas magnetotelúricas en el sur del altiplano a lo largo del paralelo 21° S. Bajo la cordillera oeste el cuadro es totalmente diferente en el norte y sur del 22° al sur del 22° la profundidad es de alrededor de 25 km la que se caracteriza por una resistividad extremadamente baja (< 1 Ohm-m).

Estas resistividades pueden ser correlacionadas con regiones de bajas velocidades de las ondas longitudinales y una fuerte atenuación de P y S (Schwarz y Krüger, 1997; Haberland y Riethrock, 1998). Adicionalmente al norte 20°-21° S esta zona de baja resistividad es desplazada desde la cordillera oeste

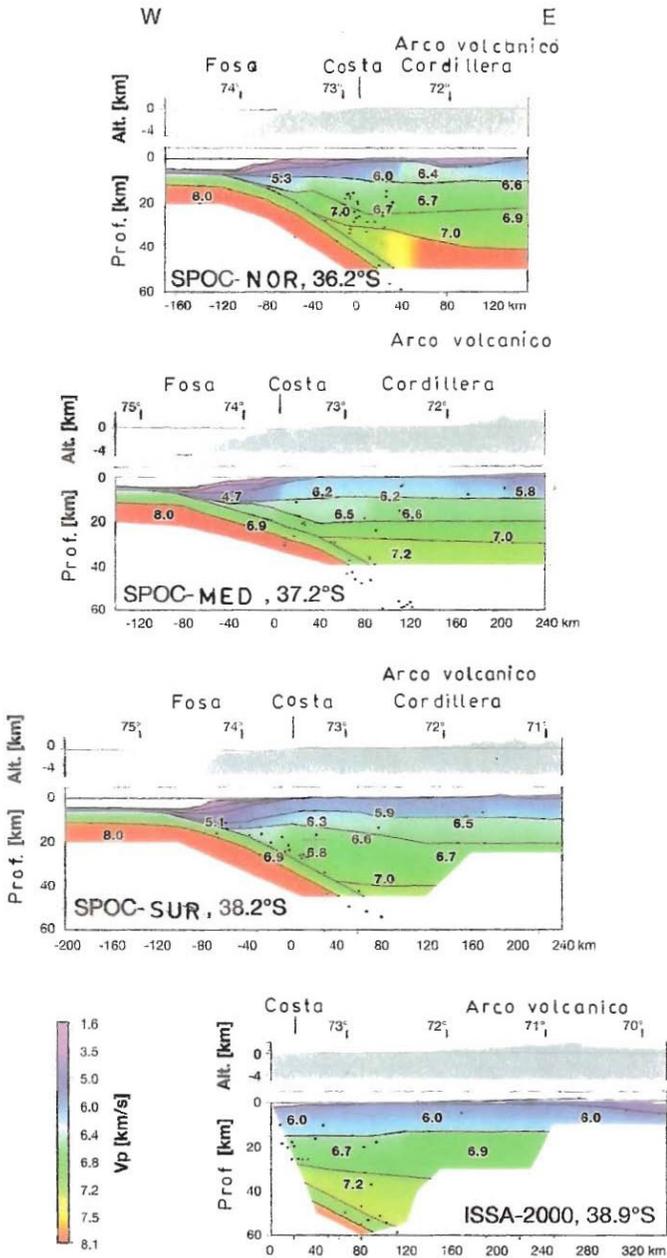


Figura 6. Perfiles sísmicos de refracción en Chile central entre el 36°-39°S realizados en los proyectos ISSA y SPOC (Krawczyk et al., 2006).

hacia el oeste dentro de zona de la fisura de la falla oeste (Calama) (Echternacht *et al.*, 1997). En todas las secciones de la fisura oeste la precordillera está caracterizada por valores de alta resistividad, valores que van al menos a 100 km de profundidad. Sin duda existen otros parámetros que influyen en la formación de los Andes Centrales (geotermia, procesos químicos) pero a menor escala.

Gravedad

La gran anomalía de Bouguer negativa de alrededor de $-450 \times 10^{-5} \text{ ms}^{-2}$ en el altiplano es la característica más destacada en los Andes Centrales, Dragicevic, 1970; Götze *et al.*, 1995; Götze *et al.*, 1990; Kösters *et al.*, 1997. La tendencia regional es atribuida al establecimiento profundo del Moho. La naturaleza diferente de la estructura de la corteza de la cordillera de la Costa por un lado y la cordillera Principal por otro lado, es resuelto por la diferencia de los gradientes gravimétricos sobre los flancos oeste y este del mínimo de gravedad y puede ser relacionado a heterogeneidades intracorticales y la subducción de la placa. El campo residual gravimétrico es calculado suponiendo un contraste de la densidad constante entre la corteza y el manto superior. Sin duda existen otros trabajos de gravedad relacionados con la tectónica de los Andes Centrales (Couch *et al.*, 1981) el cual analiza las estructuras del margen continental, Chile-Perú y (Kono *et al.*, 1989) quien estudia la estructura montañosa de los Andes Centrales mediante un modelo gravimétrico.

El comienzo de las actividades gravimétricas en el norte de Chile se inició durante el año 1993 bajo el alero del "Sonderforschungsbereich 267 SFB" (Proyecto especial de investigación 267) titulado "Procesos de deformación en los Andes Centrales de la Universidad Libre de Berlín y Técnica de Berlín". Este proyecto fue iniciado en estrecha colaboración con la Universidad de Chile y Universidad Católica del Norte, Antofagasta. El objetivo fue la construcción de una base moderna de datos gravimétricos en los Andes del sur entre las latitudes 18° - 42° S, referidos a la Red Internacional. En este proceso se tomaron más de 44 840 datos de gravedad, coleccionando datos existentes y nuevos tomados durante la campaña propuesta para realizar una interpretación interdisciplinaria de datos gravimétricos con la ayuda de toda la información geocientífica (Araneda *et al.*, 1994, 1999b).

Interpretación de la gravedad

Es común utilizar la anomalía de Bouguer en áreas continentales la cual es reemplazada en el mar por la anomalía de Aire Libre por lo tanto existe una alta correlación entre la topografía de las zonas profundas y el campo gravimétrico. Ese campo al interior de la costa disminuye a un regional mínimo equivalente a $-400 \times 10^{-5} \text{ ms}^{-2}$ en los Andes Centrales, principalmente relacionado al engrosamiento cortical causado por la compensación isostática y procesos tectónicos. La Figura 7 muestra un mapa de la anomalía de Bouguer obtenida en

tierra y la Figura 8, muestra la anomalía isostática la cual usa el modelo de Vening Meinsz cuyos parámetros son los siguientes: densidad cortical= 2.67 gr/cm³, densidad del manto= 3.2 gr/cm³, densidad del agua= 1.03 gr/cm³, espesor de la corteza a nivel del mar= 35 km y rigidez cortical= 1e23 Nm. El efecto gravitatorio de este modelo fue calculado usando la técnica de la serie rápida de Fourier y sustrayéndola de la anomalía de Bouguer en la estación nivelada. La anomalía resultante es el residual isostático.

Correcciones

El cálculo de las anomalías gravitacionales estuvo basado en las siguientes ecuaciones:

$$\text{Anomalía de Bouguer: } AB = g_{\text{obs}} - \delta g_{\text{top}} + \delta g_{\text{BPL}} - \chi_h$$

$$\text{Anomalía Aire Libre: } AL = g_{\text{obs}} - \chi_h$$

G_{obs} = gravedad absoluta en estación medida

δg_{top} = corrección topográfica (densidad 2.67 gr/cm³)

δg_{BPL} = corrección de Bouguer (densidad 2.67 gr/cm³)

χ_h = gravedad normal en la estación a nivel h calculada

La gravedad normal fue calculada de acuerdo a la fórmula internacional de 1967. Para la reducción topográfica se utilizó el método desarrollado por Ehrismann *et al.* (1966) adoptado en condiciones especiales para ser usado en los Andes Centrales. En el cálculo de la corrección topográfica fue usada una grilla basada en el modelo gtopo 30 del USGS (modelo digital de elevación).

Problemas logísticos y la gran área de investigación no siempre permitieron repetir las lecturas en estaciones consideradas como bases para determinar la deriva instrumental. Sin embargo aun cuando los circuitos fueron dificultosos la deriva instrumental de los gravímetros LaCoste Romberg modelo G no excedieron de 0.1x10⁻⁵ ms⁻² por día. En cuanto a las coordenadas de las estaciones fue utilizada la cartografía escala 1:50 000 y GPS navegador, con este sistema el error de posicionamiento no excedió de 50 metros en el sector norte y central de la investigación.

El otro parámetro muy importante fue la determinación de las alturas de cada estación. En este sentido gran parte de las estaciones fueron tomadas sobre líneas de nivelación del Instituto Geográfico Militar (IGM) y el resto mediante el sistema altimétrico, para ello se utilizó altímetro tipo Wallace y Tiernan FA181, esta fue realizada mediante la manera usual que se emplea en las medidas gravimétricas, repitiendo las medidas en puntos bases y reiterando las medidas cuanto sea posible. Además los perfiles de varios días fueron combinados con el objeto de eliminar los errores sistemáticos. El error estimado muestra que en los peores casos la precisión fue menos de 12 metros dando un error de la anomalía de Bouguer de cerca de 3x10⁻⁵ ms⁻² la cual es menor que 1% de la anomalía regional.

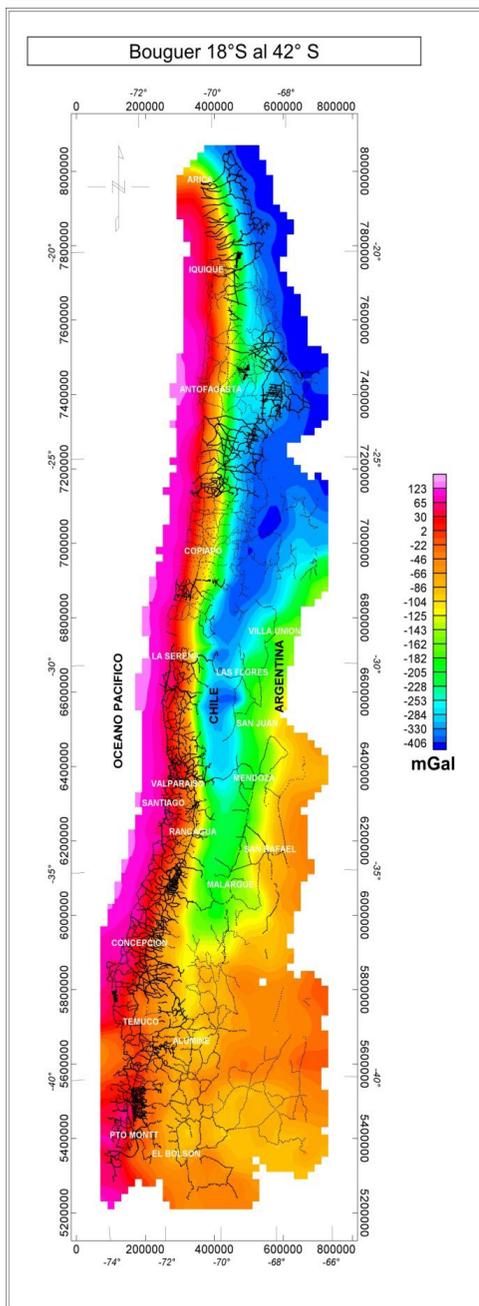


Figura 7. Anomalia de Bouguer.

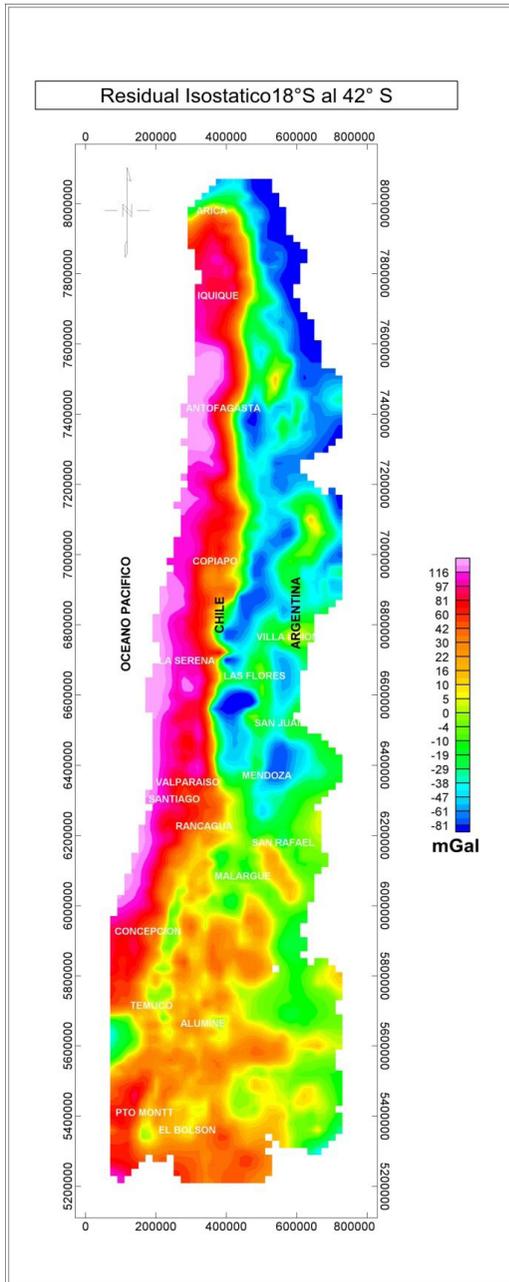


Figura 8. Residual Isostatico.

La toma de datos gravimétricos se realizó durante tres periodos de tiempo, año 1987-1989, entre las latitudes 19°-26° S, norte de Chile-Argentina y sur de Bolivia; latitudes 36°-42° sur de Chile-Argentina, 1995-2001 y latitud 27°-35° S zona central de Chile entre los años 2003 y 2005.

Resultados

Estudios geofísicos y geológicos revelan claramente la asimetría estructural en la evolución del edificio de los Andes Centrales.

La anomalía de Bouguer y residual isostático mostrado en las Figuras 7 y 8 revelan claramente las anomalías asociadas a la mega estructura de los Andes Centrales, sector central y borde costero con el océano Pacífico. Estas estructuras están asociadas a valores de la anomalía de Bouguer de oeste a este cuyos valores son los siguientes: $-20 \times 10^{-5} \text{ ms}^{-2}$ a $+130 \times 10^{-5} \text{ ms}^{-2}$ zona costera, $-21 \times 10^{-5} \text{ ms}^{-2}$ a $-140 \times 10^{-5} \text{ ms}^{-2}$ zona central y $-141 \times 10^{-5} \text{ ms}^{-2}$ a $-340 \times 10^{-5} \text{ ms}^{-2}$ zona andina.

Los resultados de la interpretación de la anomalía de Bouguer dada en perfiles de norte a sur Figura 9, presentan información en cuanto a espesores de corteza, involucrando varias regiones de los Andes, Tabla 1, Figuras 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16 y 17. Las densidades consideradas en la interpretación de los perfiles gravimétricos corresponden a los modelos tomados por los respectivos autores, en el caso de esta presentación fueron los siguientes; corteza superior $\rho = 2.67 \text{ gr/cm}^3$, corteza inferior $\rho = 2.91 \text{ gr/cm}^3$ y manto $\rho = 3.2 \text{ gr/cm}^3$.

Tabla 1

	<i>Costa</i>	<i>Los Andes</i>	<i>Sector argentino</i>	<i>Latitud</i>
Perfil Arica	30 km	66 km	50 km	18.5° S
Perfil Copiapó	25 km	55 km	~30 km	27.3° S
Perfil Illapel	30 km	60 km	~35 km	31.5° S
<i>Perfil Transcontinental</i>				
Perfil Santiago	35 km	67 km	31 km	33.5° S
Perfil Talca	20 km	50 km	~35 km	35.5° S
Perfil Concepción	32 km	45 km	~35 km	36.7° S
Perfil Lebu	28 km	38 km	~33 km	37.6° S
Perfil Temuco	22 km	40 km	~38 km	38.7° S

Conclusiones

De datos sísmicos y geológicos se pueden distinguir tres regiones principales en los Andes: 1) corteza tectónicamente gruesa al este del retroarco (cordón subandino al este del altiplano), 2) una potencia delgada en el retroarco al

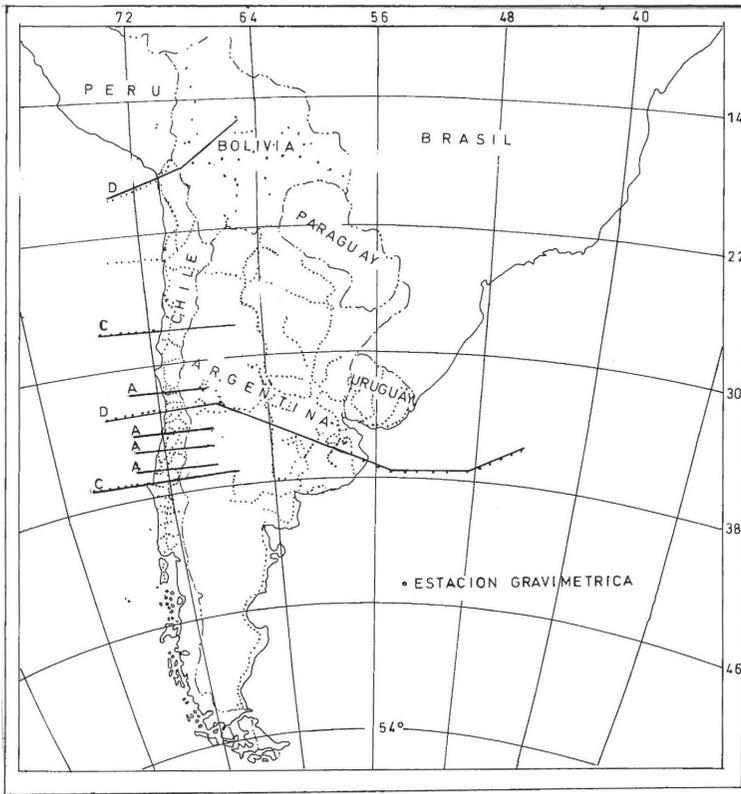


Figura 9. Ubicación de perfiles gravimétricos en el sector oeste de Sudamérica y transcontinental.

oeste del altiplano y región del arco, cordillera oeste, 3) corteza fría del antearco (precordillera a cordillera de la costa la cual es delgada en términos geofísicos (Giese, 1999). Pero cual es el presente geológico, solamente existe la débil evidencia de acortamiento (delgado) (Scheuber *et al.*, 1994, Schmitz *et al.*, 1994, Wigger *et al.*, 1994).

Como el grosor de la corteza es determinado por datos geofísicos, la discusión de los procesos del engrosamiento o adelgazamiento de la corteza tiene que considerar no solamente los procesos de tectonismo y magmatismo sino también otros procesos los cuales en algunos casos son de difícil obtención pero son importantes para obtener mejores modelos del estado petrofísico de los materiales constituyentes (rocas). La fase de transformaciones descrita anteriormente, cambios de velocidad y densidades no consideran que se produzcan en las rocas del manto-rocas de la corteza sino también rocas corticales-manto rocas.

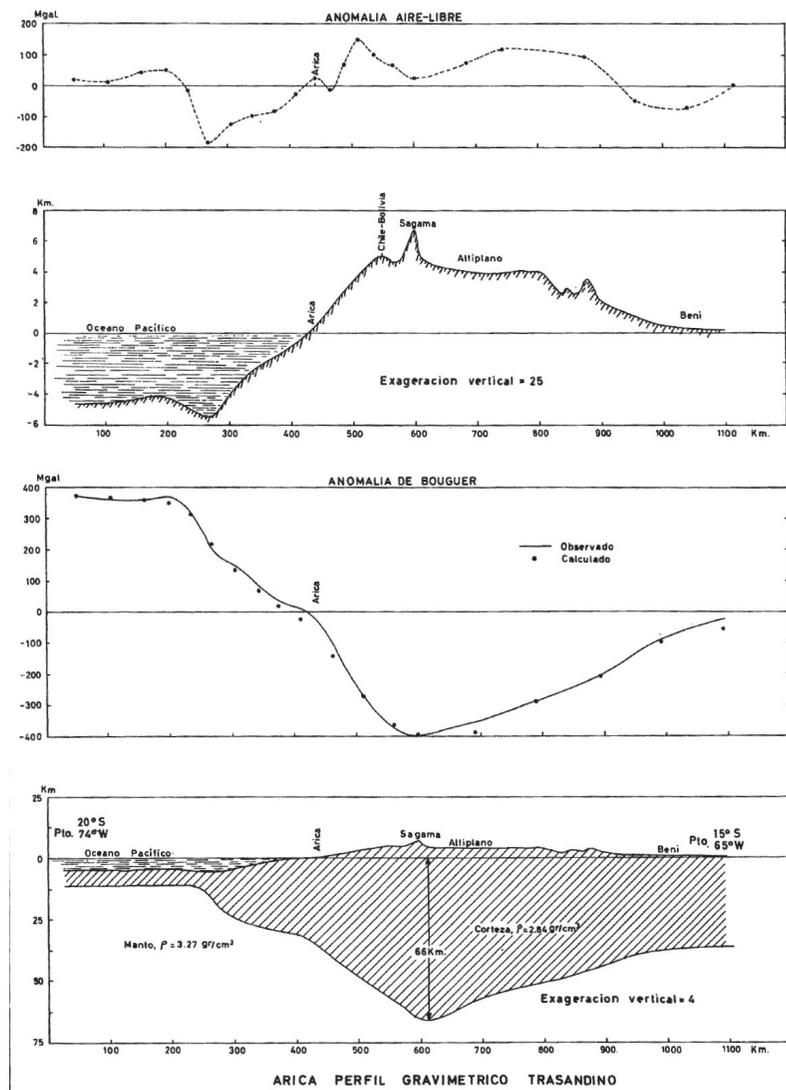


Figura 10. Perfil gravimétrico Arica a la latitud 18.5° S (Dragicevic, 1970).

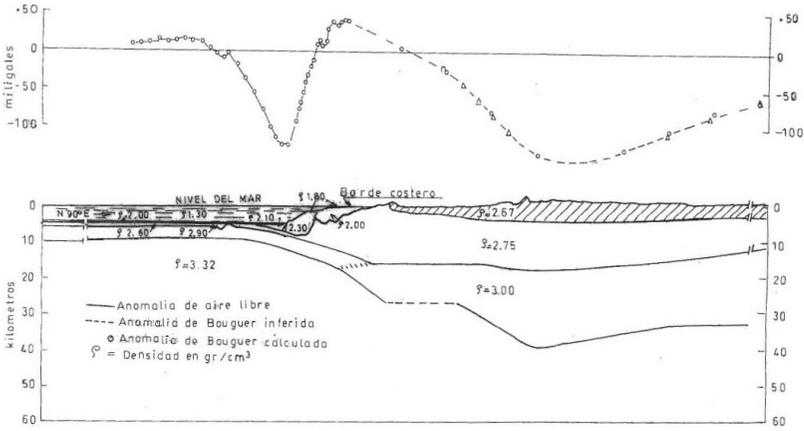


Figura 11. Lebu, Sección estructural de la corteza a la latitud 37° 45' S (Couch et al., 1981).

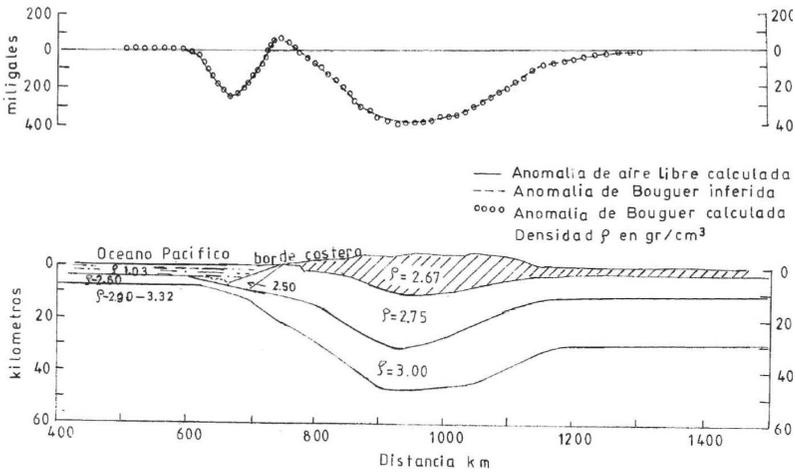
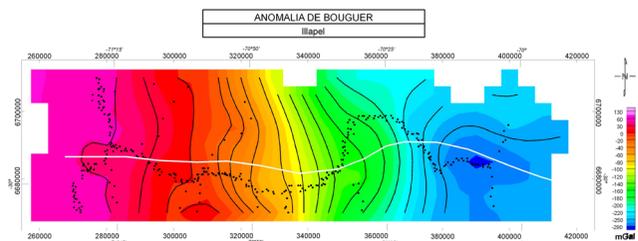


Figura 12. Copiapó, Sección estructural de la corteza a la latitud 27° S (Couch et al., 1981).

Se ha demostrado que el caso excepcional de engrosamiento de la corteza de los Andes requiere de nuevas interpretaciones de la reciente discontinuidad del Moho así como también la borrosa acústica de la discontinuidad de Paleo-Moho. Deformación delgada y cubierta son capaces de producir grandes engrosamientos corticales, profundamente enterrados pueden ser metamorfoseados en eclogitas los cuales geofísicamente tienen una conducta parecida a los materiales del manto (Giese et al., 1999).



PERFIL TOPOGRÁFICO LA SERENA - HITO PASO DEL AGUA NEGRA

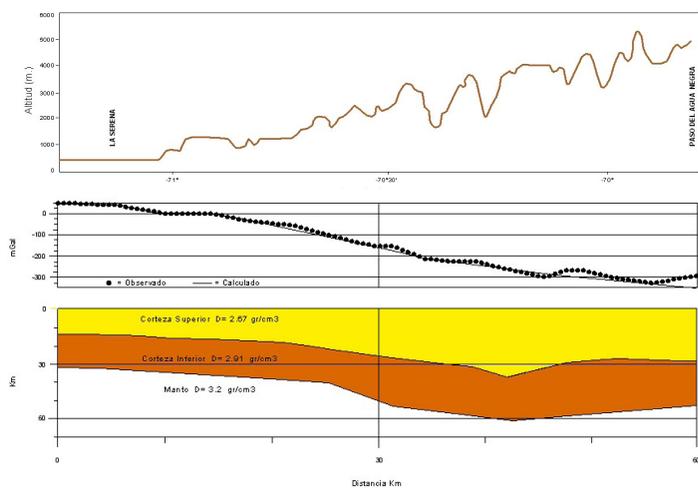


Figura 13. Sector Illapel latitud 31°10' S.

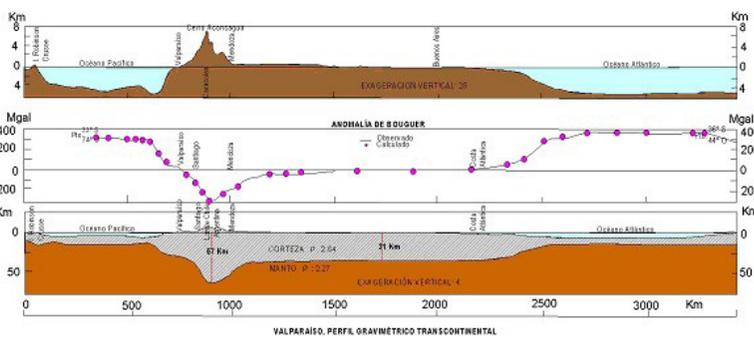


Figura 14. Sección Valparaíso Perfil transcontinental (Dragicevic, 1970).

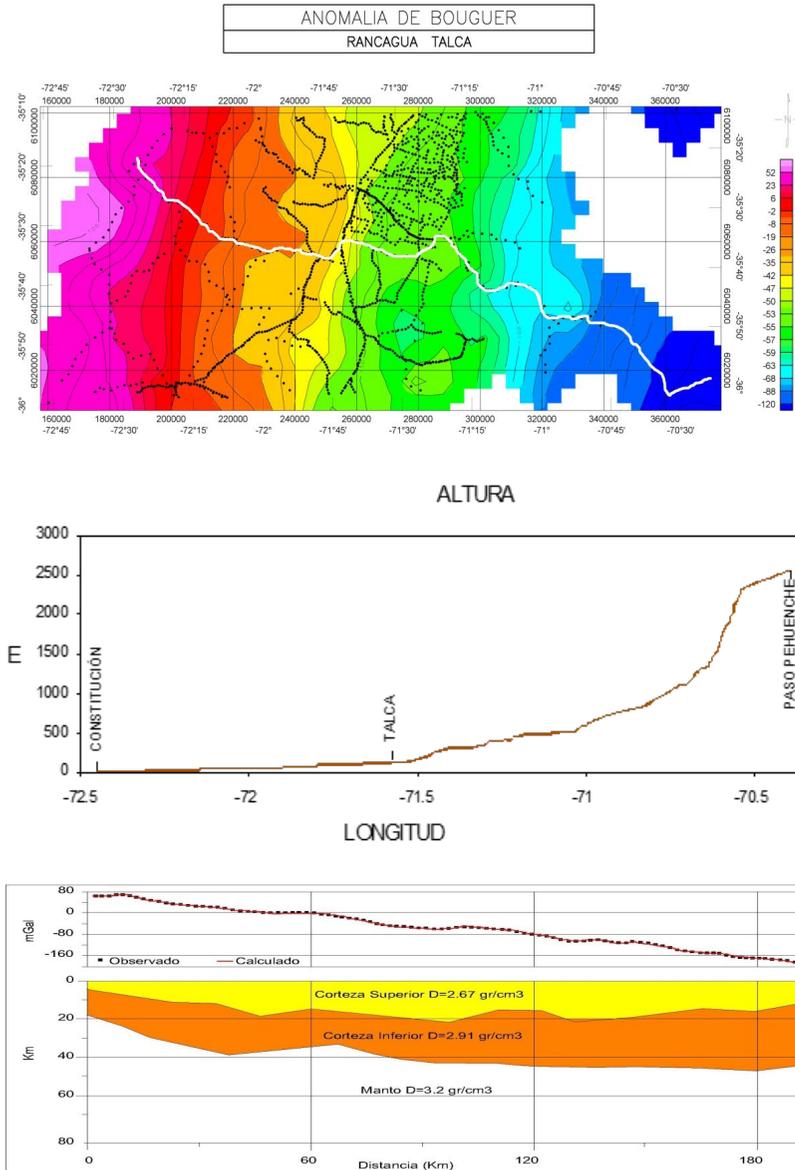


Figura 15. Sección Rancagua, Talca Latitud 35°30'S.

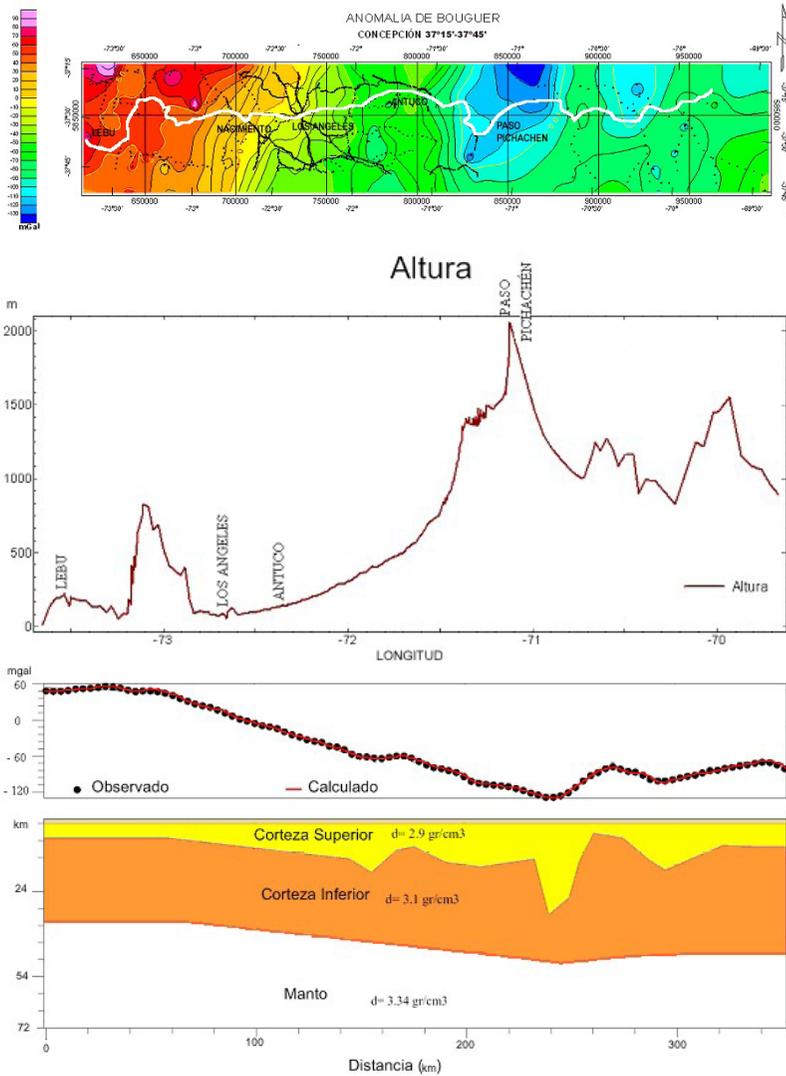


Figura 16. Sección Concepción, Latitud 37°15'S.

En la región del antearco los procesos de deshidratación de la placa inferior causa hidratación y metamorfismo en la cuña subyacente del manto asociada con la disminución de la densidad y velocidad sísmica V_p , típica de los valores corticales, tal proceso permite engrosamiento de una corteza falsa.

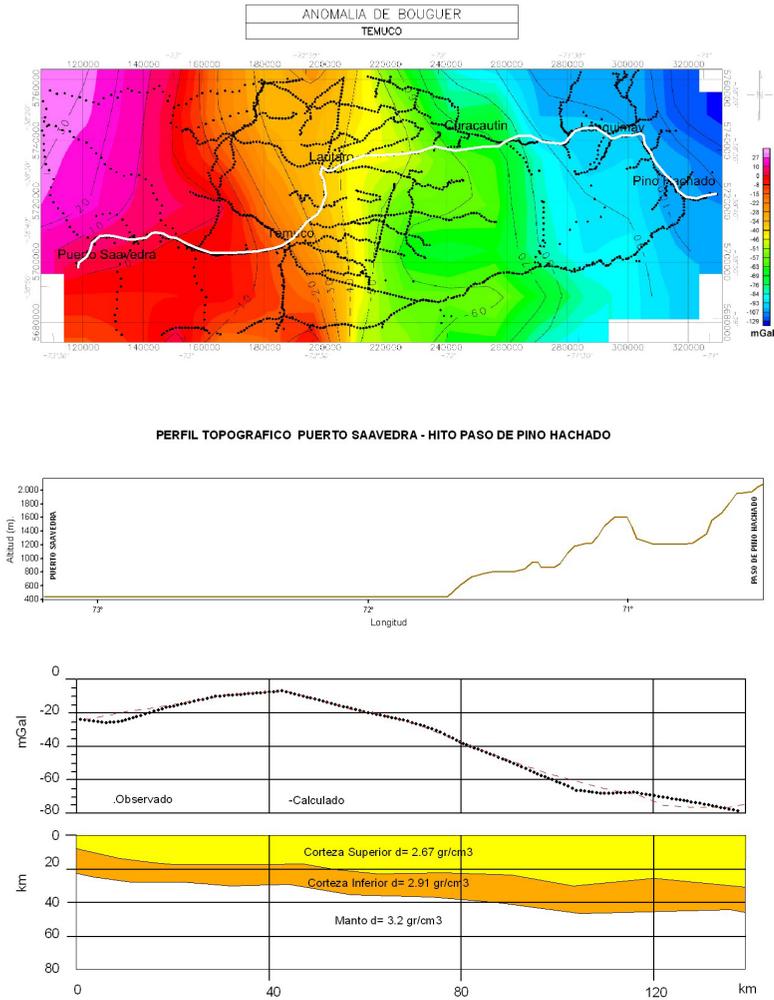


Figura 17. Sección Temuco, Latitud $38^{\circ}50' S$.

En la mayoría de los casos para determinar la estructura de los Andes se han considerado parámetros de densidades y velocidades pero no han considerado otros que de alguna forma inciden (presión, magmatismo, temperatura y propiedades geológicas). Esta incidencia y porcentaje de parámetros son normalmente de difícil obtención.

En el retroarco el grosor de la corteza es gobernado por el acortamiento tectónico. Sin embargo como este tipo de engrosamiento puede acumular solamente el 55% del total de grosor cortical en los Andes Centrales, el déficit de más de 40% del grosor de la corteza puede ser explicado por otros procesos. La adición magmática desde el manto dentro de la corteza puede contribuir solamente el 5% al grosor de la corteza. Una porción distinta del grosor de la corteza de 15% puede ser atribuida a procesos de hidratación de la cuña del manto en el antearco y tal vez también en el oeste del retroarco otro 5% puede ser atribuido a la erosión por subducción (Giese *et al.*, 1999).

Un total de 75%-85% de la raíz de la corteza de los Andes Centrales puede ser explicado por tectonismo (incluyendo erosión por subducción) magnetismo y procesos petrológicos. El déficit remanente de $\approx 20\%$ puede ser explicado por errores de estimación del diseño del modelo y o procesos desconocidos. La mayoría de estas faltas pueden estar centradas bajo la cordillera oeste y al oeste del altiplano donde la transición desde el espesor tectónico del retroarco de la corteza toma lugar en la corteza profunda razón por la cual se hace necesario realizar estudios más profundos en esta área (geofísica, tectónica, petrofísica, petrología) con el objeto de tener un conocimiento del comportamiento del acortamiento cortical (problema aun no resuelto en la región del altiplano y puna) y en entender cualitativamente los procesos de la subducción y erosión.

Como un esbozo realizado por (Kley y Manoldi, 1998) el acortamiento tectónico muestra considerables variaciones a lo largo del rumbo en el orógeno de los Andes Centrales. Cerca de los extremos norte y sur de las mesetas del altiplano/puna, una gruesa corteza es evidenciada por una negativa y larga anomalía de Bouguer asociada con una pequeña cantidad de acortamiento a lo largo de la latitud 21° S. Este acortamiento tectónico puede contribuir no más de un 30% del volumen de la presente raíz.

La anomalía de Bouguer (Figura 7), es un parámetro confiable que nos indica el engrosamiento de la corteza en los Andes Centrales, junto a este parámetro las velocidades sísmicas también aportan un índice real del comportamiento estructural de la corteza de los Andes Centrales.

Consecuentemente otros procesos deben haber estado operando para el engrosamiento de la corteza. Un flujo longitudinal especulativo de material dúctil a niveles de corteza inferior a lo largo del rumbo desde el norte y/o sur pueden haber contribuido al espesor cortical. Una estimación cuantitativa directa de tal contribución es dificultosa o aun imposible de obtener.

En conclusión, un estudio colaborativo en los Andes Centrales demuestra que la expresión "Discontinuidad del Moho", requiere de una clara diferenciación entre petrología y el límite geofísico corteza-manto que demuestren que existen diferentes procesos los cuales contribuyen a los procesos de la formación de las raíces de las montañas.

Agradecimientos

Este estudio contó con el patrocinio de la Empresa Servicios Geofísicos en Minería e Ingeniería (SEGMI) y en parte importante con la colaboración del Instituto Panamericano de Geografía e Historia (IPGH).

Referencias

- Araneda, M.; Avendaño, M.S.; Schmidt, S.; Götze, H.-J. y Muñoz, J., 1999b. Hoja Puerto Montt, Carta Gravimétrica de Chile, Sernageomin, Chile, p. 18.
- Araneda, M.; Götze, H.J.; Schmidt, S.; Goltz, G.; Alvers, M.; Riquelme, R.; Ugalde, H.; Ibbeken, H.; Kiefer, E. and Dörr, M., 1994. "MIGRA, A new update of the gravity database in Northern Chile", *Actas 7º Congreso Geológico Chileno*, tomo I, Concepción, Chile.
- Beck, S.; Zandt, G.; Meyers, S.C.; Wallace, T.C.; Silver, P.G. and Drake, L., 1996. "Cristal Thickness Variations in the Central Andes Geology", 24, pp. 407-410.
- Cahill, L.T. and Isacks, B., 1992. "Seismicity and Shape of the Subducted Nazca Plate", *Journal of Geophysical Research*, 97, pp. 17503-17529.
- Couch, R.; Witssett, R.; Huehne, B. and Briceño-Guarupe, L., 1981. "Structures of the Continental Margin of Peru and Chile", *The Geological Society of America Inc Memoir 154*, pp. 703-726.
- Dragicevic, M., 1970. *Carta Gravimétrica de los Andes Meridionales e Interpretación de las Anomalías de Gravedad de Chile Central*, Departamento de Geofísica y Geodesia, Universidad de Chile, Publicación 93, 42 p.
- Dewey, I.F. and Bird, I.M., 1970. "Mountain Belts and the New Global Tectonics", *J. Geophys. Res.*, 75, pp. 2625-2647.
- Dewey, J.F. and Lamb, S.H., 1992. *Active Tectonic of the Andes Tectonophysics*, 205, pp. 79-95.
- Echternacht, F.; Tauber, S.; Eisel, M.; Brasse, H.; Schwarz, G. and Haak, V., 1997. "Electromagnetic Study of the Active Continental Margin in Northern Chile", *Physics of the Earth and Planetary Interior*, 102(12), pp. 69-88.
- Ehrismann, W.; Müller, G.; Rosenbach, O. and Sperlich, N., 1966. "Topographic Reduction of Gravity Measurements by the Aid of Digital Computers", *Boll. Geofisica Teorica ed Applicata*, 8(29).
- Froidevaux, C. and Isacks, B.L., 1984. "The Mechanical State of the Lithosphere in the Altiplano-Pua Segment of the Andes", *Earth Planet. Sci. Lett.* 71, pp. 305-314.
- Gansser, A., 1973. "Facts and Theories on the Andes", *J. Geol. Soc.*, London, 129, pp. 93-131.
- Gephard, J., 1994. "Topography and Subduction Geometry of the Central Andes: Clues to the Mechanics of a Non-Collisional Orogen", *J. Geophys. Res.*, vol. 99, pp. 12279-12288.
- Giese, P.; Scheuber, E.; Schilling, F.; Schmitz, M. and Wigger, P., 1999. "Crustal Thickening Processes in the Central Andes and the Different Natures of the Moho-Discontinuity", *Journal of South American Earth Sciences*, 12, pp. 201-220.

- Götze, H.J.; Lahmeyer, B.; Schmidt, S.; Strunk, S. and Araneda, M., 1990. "A new gravity data base in the Central Andes 20°-26° S", *EOS Trans. Am. Geophys. Union*, 71(16), pp. 401, 406-407.
- Götze, H.-J.; Schmitz, M.; Gise, P.; Schmidt, S.; Wigger, P.; Schwarz, G.; Araneda, M.; Chong, G. and Viramontes, J., 1995. "Las Estructuras Litosféricas de los Andes Centrales Australes Basadas en Interpretaciones Geofísicas, una Revisión", *Revista Geológica de Chile*, 22(2), pp.179-192.
- Gutscher, M.A., 2002. "Andean Subduction Style and their Effect on Thermal Structure and Interplate Coupling", *Journal of South American Earth Sciences*, 15, pp. 3-10.
- Haberland, Ch. and Rietbrock, A., 1998. Q-Tomographie in den Zentralen Anden 58 Jahrestagung der Deutschen Geophysikalischen Gesellschaft Göttingen Tagungsband 174.
- Herve, F., 1988. "Late Paleozoic subduction and accretion in Southern Chile", *Episodos*, 11(3), pp. 183-188.
- Isacks, B., 1988. "Uplift of the Central Andean Plateau and Bending of the Bolivian Orocline", *Journal of Geophysical Research*, 93, pp. 3211-3231.
- James, D.E., 1971b. "Plate Tectonic Model for the Evolution of the Central Andes", *Geological Society of America Bulletin*, vol. 82, pp. 3325-3346.
- James, D.E., 1973. "The Evolution of the Andes", *Sci. Am.*, 229(2), pp. 60-69.
- Jaques, I., 2003. "A Tectonostratigraphic Synthesis of the Sub-Andean Basin: Implications for the Geotectonic Segmentation of the Andean Belt", *Journal of Geological Society London*, 160, pp. 687-701.
- Jordan, T.; Isacks, B.; Allmendinger, R.; Brewer, J.; Ramos, V. and Ando, C., 1983. "Andean Tectonics Related to Geometric of Subduction Nazca Plate", *Geological Society of America, Bulletin*, 94, pp. 341-361.
- Kendrick, E.; Bevis, M.; Smalley, R.; Brook, B.; Barriga, R.; Lauria, E. and Souto, L., 2003. "The Nazca-South America Euler Vector and its Rate of Change", *Journal of South America Earth Sciences*, 16, pp. 125-131.
- Kley, J. and Monaldi, C.R., 1998. "Tectonic Shortening and Crustal Thickness in Central Andes: How Good is the Correlation", *Geology*, 26(8), pp. 723-726.
- Kono, M.; Fukad, Y. and Yamamoto, A., 1989. "Mountain Building in the Central Andes", *Journal of Geophysical Research*, vol. 94, no. B4, pp. 3891-3905.
- Kösters, M., Götze, H.-J.; Schmidt, S.; Fritsch, J. and Araneda, M., 1997. "Gravity Field of a Continent-Ocean Transition Mapped from Land, Air and Sea", *EOS Transactions (AGU)*, 78, pp. 13-16.
- Krawczyk, C.; Mechie, J.; Lüth, E.; Tasárova, Z.; Wigger, P.; Stiller, M.; Brasse, H.; Helmut, P.E.; Araneda, M. and Bataille, K., 2006. "Geophysical Signatures and Active Tectonics at the South-Central Chilean Margin", in the *Frontiers in Earth Sciences*, ed. J.P. Brun, O. Oncken, H. Weisseert, C. Dullo, pp. 171-192.
- Lamb, S. and Davies, P., 2003. *Cenozoic Climate Change as a Possible Cause for the Rise of the Andes*. *Nature*, 425, pp. 792-797.

- Lyon-Caen, H.P.; Molnar, P. and Suarez, G., 1985. *Gravity Anomalies and Flexure of the Brazilian Shield beneath the Bolivian Andes*, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 75, pp. 81-92.
- Mc Quarie, N., 2002. "The Kinematic History of the Central Andean Fol-Thrust Belt, Bolivia: Implication for Building a High Plateau", *GSA Bulletin*, 114(8), pp. 950-963.
- Mpodozis, C. and Ramos, V., 1989. "The Andes of Chile and Argentina". In *Geology of the Andes and its Relation to Hydrocarbon and Mineral Resources*, G. Ericksen, M. Cañas Pnochet and J. Reinemund (eds.), Earth Science Serie, Circun-Pacific Council of Energy and Mineral Resources, Houston, Texas, pp. 59-89.
- Pardo-Casas, F. and Molnar, P., 1987. "Relative Motion of the Nazca (Farallon) and South America Plates since Late Cretaceous Time", *Tectonics*, 6, pp. 233-298.
- Patzwahl, R.; Mechie, J.; Schulze, A. and Giese, P., 1999. "Two Dimensional-Velocity Models of the Nazca-Plate Subduction Zone Between 19.50° S and 25° S from Wide-Angle Seismic Measurements During the CINCA 95 Project", *Journal of Geophysical Research*, 104, pp. 7293-7317.
- Rutland, R.W.R., 1971. *Andean Orogeny and Sea Floor Spreading*. *Nature*, 233, pp. 252-255.
- Sacks, L.S., 1983. "The Subduction of Young Lithosphere", *J. Geophys. Res.*, 88, pp. 3355-3366.
- Samoza, R., 1998. "Update Nazca (Farallon)-South America Relative Motions During the Last 40 My: Implications for the Mountain Building in the Central Andean Region", *Journal of South American Earth Sciences*, vol. 11, no. 3, pp. 211-215.
- Scheuber, E.; Bogdanic, T.; Jensen, A. and Reutter, K.-J., 1994. "Tectonic Development of the North Chilean Andes in Relation to Plate Convergence and Magmatism Since the Jurassic", in Reutter, K.J.; Scheuber, E.; Wigger, P. (eds.), *Tectonic of the Southern Central Andes*, Springer, Berlin, pp. 121-140.
- Schmitz, M.; Lessel, K.; Graeber, F.; Haberland, C.; Wigger, P.; Gise, P.; Schulze, K.; Araneda, M.; Bribach, J.; Grunewald, S.; Rower, P. and Ryberg, P., 1990. "The Crustal Structure beneath the Central Andes are and Forearc as Derived from Seismic Refraction Studies -the Pisco 94 Experiment in Northern Chile (21°-23° S)", *Journal of South American Earth Sciences*.
- Schmitz, M.; Araneda, M.; Asch, G.; Giese, P.; Lessel, K.; Rower, P.; Ryberg, T.; Schulze, A. and Wigger, P., 1994. "PISCO 94 Proyecto de Investigación Sismológica de la Cordillera Occidental. Parte II; Sísmica de Refracción", en *Congreso Geológico Chileno N° 7*, Actas vol. 2, pp. 1447-1450.
- Schwarz, G. and Krüger, D., 1997. "Resistivity Cross Section Through the Southern Central Andean Crust as Inferred from 2D Modeling of Magnetotelluric and Geomagnetic Deep Sounding Measurements", *Journal of Geophysical Research*, vol. 102, no. B-6, pp. 11957-11978.
- Sobolev, S. and Babeyko, A., 2005. *What Drives Orogeny in the Andes* *Geology*, 33. DOI: 10.1130/G21557.1
- Stern, C., 2004. "Active Andean Volcanics: Its Geologic and Tectonic Setting", *Rev Geol. Chile*, 31(2), pp. 161-206.
- Suarez, G.; Molnar, P.; Burchfiel, B.C., 1983. "Seismicity Fault Plane Solution Depth of Faulting and Active Tectonic of the Andes of Peru, Ecuador and Southern Colombia", *J. Geophys. Res.*, 88, pp. 10403-10428.

- Tabbens, S.; Cande, S., 1997. "Southeast Pacific Tectonic Evolution from Early Oligocene to Present", *J. Geophys. Res.*, 102, pp. 12061-12084.
- Tapponnier, P.; Peltzer, G. and Armijo, R., 1986. "On the Mechanics of the Collision between India and Asi" in Coward, M.C. and Ries, A.C. (eds.), *Collision Tectonics, Geol. Soc. Spec. Pub. Lon.* 19, pp. 115-157.
- Wigger, P.; Schmitz, M.; Araneda, M.; Asch, G.; Balduzuhn, S.; Gise, P.; Heinsohn, W.-D.; Martinez, E.; Ricaldi, E.; Röwer, P. and Viramonte, J., 1994. "Variation of the Crustal Structure of the Southern Central Andes Deduced from Seismic Refraction Investigations", in Reutter, K.J.; Sheuber, E.; Wigger, P. (eds.), *Tectonics of the Southern Central Andes*, Springer, Berlin, pp. 23-48.
- Uyeda, S. and Kanamori, H., 1979. "Bach-arc Opening and the Mode of Subduction", *J. Geophys. Res.*, 84, pp. 1049-1061.
- Uyeda, S., 1982. Subduction zone: An Introduction Comparative Subductology. *Tectonophysics*, 81, pp. 133-159.
- Yuan, X.; Sobolev, S.V.; Kind, R.; Oncken, O. and Andes Seismology Group, 1999, "New Constrains on Subduction and Collision Process in the Central Andes from Comprehensive Observation of P to S Converted Seismic Phases", *Science*.
- Zandt, G.; Beck, S.; Rupert, S.R., Ammon, C.J.; Rock, D.; Minaya, E.; Wallace, T.C. and Silver, P., 1996. "Anomalous Crust of the Bolivian Altiplano Central Andes Constraints from Broadband Regional Seismic Waveforms", *Geophysical Research Letter*, 23, pp. 1159-1162.
- Zelt, C.A. and Smith, R.B., 1992. "Seismic Traveltime Inversion for 2-D Crustal Velocity Structure", *Geophys. J. Int.*, 108, pp. 16-34.

Procesos gravitacionales en zonas de ladera, aplicándolos a modelos de predicción real con archivos raster y SIG, Alcaldía Álvaro Obregón, Ciudad de México

Oscar Daniel Rivera González¹

Recibido el 30 de marzo de 2019; aceptado el 25 de abril de 2019

Resumen

El motivo para realizar el siguiente trabajo de investigación, es la generación de cartografía con un nivel de detalle suficiente para generar algún tipo de predicción, aproximadamente de tres a cuatro metros de tolerancia de error, sustentado con base en puntos de control tomados con Sistema de Posicionamiento Global (GPS), llevándolo a la realidad para poder generar prevención, atención, gestión o coordinación, por parte de las autoridades de las alcaldías, estatales y federales, sobre la presencia de asentamientos humanos permitidos y no permitidos, en zonas urbanas al norte de la Alcaldía Álvaro Obregón, en la cual, se observa algún grado de vulnerabilidad geofísica, geomorfológica, geológica o topográfica. Por otra parte, el alto nivel de marginación por parte de las familias, que habitan dichas zonas, situadas en zonas de montaña como: laderas, cauces de ríos o barrancas, por lo que son un peligro constante por su pronunciado grado de inclinación y al ocurrir algún proceso gravitacional, arrastra o acarrea la cimentación de las construcciones existentes y lo que tenga a su paso, más aún en temporada de lluvias, movimientos sísmicos, colapsos de techos de minas, derrumbes, lo cual ocasiona pérdida de vidas humanas.

Por otra parte, esto da como resultado un deterioro medioambiental en torno al ecosistema original y que arbitrariamente se modificó con el paso de los años, con esta desarticulada urbanización reglamentada y no reglamentada por la Alcaldía Álvaro Obregón, ya que al realizarse este tipo de edificaciones en zonas no aptas para su habitabilidad, inclusive en áreas naturales protegidas ahora urbanizadas. Por las problemáticas antes mencionadas, se elimina o reemplaza la cobertura vegetal, observándose la nula filtración del agua pluvial por la compactación del suelo en cuanto a la utilización de materiales para construcción y recientemente se encontró en trabajo de campo, piedra pómez, la cual es muy endeble cuando se encuentra hidratada.

.....

¹ Geógrafo, Especialista en Economía Ambiental y Ecológica, Maestría en Urbanismo, Estudiante de Doctorado en Urbanismo, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Correo electrónico: oscarandanielnyboy@hotmail.com

Algo de suma importancia, es que las personas que habitan estas zonas con algún grado de vulnerabilidad, rellenan o rellenan de alguna forma pequeñas cavidades o minas con material de cascajo, residuos orgánicos, residuos sólidos o basura para la nivelación del suelo, lo cual solo incrementa las graves consecuencias, haciéndolo aún más inestable.

Se tratará de dar solución a lo antes mencionado, con la utilización de archivos tipo Raster extensión TIFF, GEOTIFF y BIL, obtenidos de la página electrónica de la National Aeronautics and Space Administration (NASA): <https://vertex.daac.asf.alaska.edu/>, y del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI): <http://www.beta.inegi.org.mx/temas/mapas/relieve/continental/>, con base en estos archivos, se generaron modelos de predicción 3d con ayuda de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y visitas a campo.

Palabras clave: *Procesos gravitacionales, zonas de ladera, modelos de predicción, vulnerabilidad y Sistemas de Información Geográfica (SIG).*

Abstract

The reason for doing the following research work is the generation of cartography and sufficient level of detail to generate some kind of prediction, approximately three to four meters error tolerance, based on control points taken with Positioning System Global (GPS), all this taking it to reality to be able to generate, prevention, attention, management or coordination, on the part of the authorities of the alcaldías, state and federal, on the presence of human settlements allowed and not allowed, in urban areas north of the Alcaldía Álvaro Obregón, in which, some degree of geophysical, geomorphological, geological or topographical vulnerability is observed, on the other hand the high level of marginalization on the part of the families, which inhabit these zones, located in mountain areas as they are; slopes, riverbeds or ravines, for what they are, a constant danger due to its pronounced degree of inclination and when some gravitational process occurs, it drags or carries the foundations of existing constructions and what is in its way, even more so in season of rains, seismic movements, collapses of mine roofs, landslides, which causes loss of human life.

On the other hand, this results in an environmental deterioration around the original ecosystem and that was arbitrarily modified over the years, with this disarticulated urbanization regulated and not regulated by the Alvaro Obregon City Hall, since when this type was carried out of buildings in areas not suitable for habitability, including natural protected areas now urbanized, for the problems mentioned above, the vegetation cover is eliminated or replaced, observing the non-filtration of rainwater by the compaction of the soil in terms of the use of materials for construction and recently found in field work, pumice stone, which is very weak when it is hydrated.

Something of utmost importance, is that the people who live in these areas with some degree of vulnerability, fill or fill in some way, small cavities or mines

with gravel material, organic waste, solid waste or trash for leveling the soil, which it only increases and brings serious consequences, making it even more unstable.

It will try to solve the aforementioned, with the use of files type Raster extension TIFF, GEOTIFF and BIL, obtained from the website of the National Aeronautics and Space Administration (NASA): <https://vertex.daac.asf.alaska.edu/>, and the National Institute of Statistics and Geography (INEGI): <http://www.beta.inegi.org.mx/temas/mapas/relieve/continental/>, based on these files, models of 3d prediction with the help of Geographic Information Systems (GIS) and field visits.

Key words: Gravitational processes, slope zones, prediction models, vulnerability and Geographic Information Systems (GIS).

Resumo

A razão para o seguinte trabalho de pesquisa é a geração de mapeamento e nível suficiente para gerar algum tipo de previsão cerca de três a quatro metros de detalhe tolerância de erro, apoiada com base em pontos de controle tomadas com Sistema de Posicionamento global (GPS), tudo levando-o a realidade a fim de gerar, prevenção, assistência, gestão ou coordenação por parte das autoridades do acaldías, estadual e federal, com a presença de assentamentos humanos permitidos e não permitidos em áreas urbanas ao norte do prefeito Alvaro Obregon, nos quais algum grau de geofísica, geomorfologia, a vulnerabilidade geológica ou topográfica se observa, por outro lado, o alto nível de marginalização pelas famílias que habitam essas áreas, localizado em áreas montanhosas como elas são; taludes, leitos de rios ou valas, por isso são um perigo constante para a sua inclinação pronunciada e um processo gravitacional ocorrer, arrasta ou transporta as fundações de edifícios existentes e que tem o seu caminho, especialmente na época chuva, terremotos, o meu telhado desmorona, deslizamentos de terra, causando perda de vida.

Por outro lado, isso resulta em uma deterioração ambiental em torno do ecossistema original e que foi arbitrariamente modificado ao longo dos anos, com essa urbanização desarticulada regulamentada e não regulada pela Prefeitura de Álvaro Obregón, desde quando esse tipo era realizado. de edificações em áreas não habitáveis, incluindo áreas naturais protegidas hoje urbanizadas, para os problemas citados acima, a cobertura vegetal é eliminada ou substituída, observando a não filtração da água da chuva pela compactação do solo em termos do uso de materiais para construção e recentemente encontrados em trabalhos de campo, pedra-pomes, que é muito fraca quando é hidratada.

Algo da maior importância, é que as pessoas que vivem nestas áreas com algum grau de vulnerabilidade, preenchem ou preenchem de alguma forma, pequenas cavidades ou minas com material de cascalho, resíduos orgânicos, resíduos sólidos ou lixo para nivelamento do solo, que só aumenta e traz graves consequências, tornando ainda mais instável.

Ele tentará resolver o problema acima mencionado, com o uso de arquivos do tipo Raster extension TIFF, GEOTIFF e BIL, obtidos no site da NASA: <https://vertex.daac.asf.alaska.edu/>, e do Instituto Nacional de Estatística e Geografia (INEGI): <http://www.beta.inegi.org.mx/temas/mapas/relieve/continental/>, com base nesses arquivos, modelos de Previsão 3D com a ajuda de Sistemas de Informações Geográficas (GIS) e visitas de campo.

Palavras-chave: *Processos gravitacionais, zonas de declividade, modelos de previsão, vulnerabilidade e Sistemas de Informação Geográfica (SIG).*

Introducción

La Alcaldía Álvaro Obregón se ubica al poniente de la Ciudad de México, en las coordenadas: 19°14'; 19°25' N y 99°10'; 99°20' W, su extensión territorial es de 96.17 km², situada sobre las laderas del volcán San Miguel perteneciente a la Sierra de las Cruces. La geología de la alcaldía está constituida por grandes derrames de lavas fuertemente accidentados y fracturados, combinado con las pendientes, dándose a lo largo de la alcaldía, zonas susceptibles a presentar procesos de ladera (Figuras 1 y 2) y un material recientemente encontrado en trabajo de campo: la piedra pómez, mismo que se convierte en un tipo de masa con la precipitación, la cual hace más vulnerables sitios dentro de la zona de estudio, así como a las edificaciones existentes.

Por lo que este análisis se enfoca en la problemática de procesos gravitacionales, también conocidos como procesos de remoción en masa, en zonas marginadas dentro de la zona Norte de la Alcaldía Álvaro Obregón, específicamente en las colonias: Desarrollo Urbano, Desarrollo Urbano el Pirú, Presidentes, Tejocote y Lomas de Capúla (Figura 2) dentro las cuales converge la zona de estudio de este artículo de investigación.

Las amenazas, junto con las condiciones imperantes de exposición, vulnerabilidad y resiliencia, causan riesgo. Las amenazas, cuando se materializaron como un evento físico concreto, pueden desencadenar una escalada de condiciones ya de por si inseguras, en un estado de crisis o emergencia (Alcántara, 2016).

La urbanización en zonas no aptas para la construcción, se debe en mayor medida al indebido crecimiento poblacional que se da en la Ciudad de México específicamente en la Alcaldía Álvaro Obregón, las autoridades ya sean locales, estatales o federales, debieron ubicar zonas con potencial de urbanización y en caso de no ser así, tratar de aminorar dicha problemática con algún tipo de mapeo, basado en modelos de predicción, seguido de una política pública.

Las cinco colonias mencionadas anteriormente no son de interés para el Gobierno mexicano, hasta cierto punto son zonas olvidadas por su grado de marginación económica y social, enfocándose solamente en la zona de Santa Fe

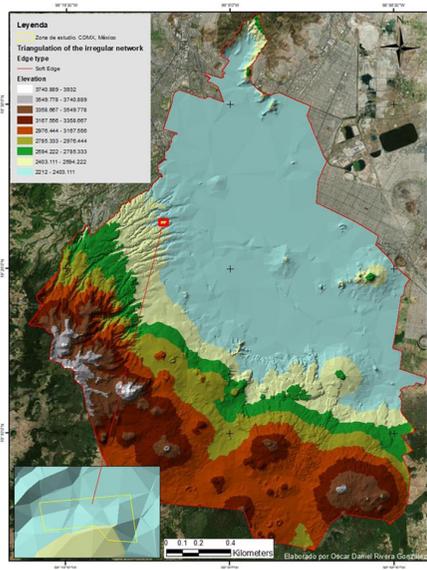


Figura 1. Elaborada con base en datos Raster del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI).
Elaborado con Software ArcGis.

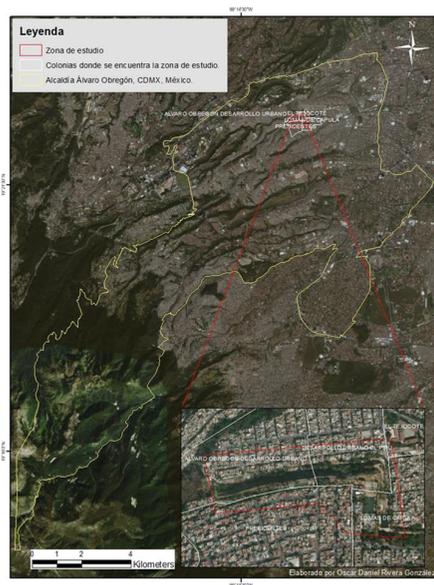


Figura 2. Elaborada con base en datos Raster del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI).
Elaborado con Software ArcGis.

y alrededores, las cuales dejan derramas económicas altas, ya que se encuentran situados allí varios corporativos y empresas particulares.

Existen zonas poco atendidas dentro de la Alcaldía Álvaro Obregón, las cuales en temporada de lluvias, de mayo a noviembre se ven afectadas, ya que se activan de nuevo los ríos desecados, generando diversas problemáticas, como procesos de remoción en masa, reblandecimiento de tierra e inundaciones, todo esto con base a entrevistas con los habitantes de las cinco colonias mencionadas.

Este artículo investigó la falta de una adecuada planeación para la gestión del riesgo, con la finalidad de prevenirlo y atenderlo eficientemente, asimismo se generó como ejemplo, un modelo de predicción basado en Sistemas de Información Geográfica (SIG) y modelos matemáticos simples para poder ser utilizados en un futuro por parte de la alcaldía, lo cual permitirá proteger a los habitantes de estas regiones tan marginadas y olvidadas, así como de la infraestructura urbana de los mismos; cabe mencionar que se permitió una indebida construcción, por parte de las inmobiliarias, como de autoconstrucción por parte de la población, en zonas susceptibles y vulnerables a procesos de remoción en masa, algunas dadas por la inundabilidad, geomorfología (Figuras 3-5), topografía, reblandecimiento de tierra y movimientos telúricos, siendo estas zonas no propicias para la construcción y cobrando por lo tanto vidas humanas.

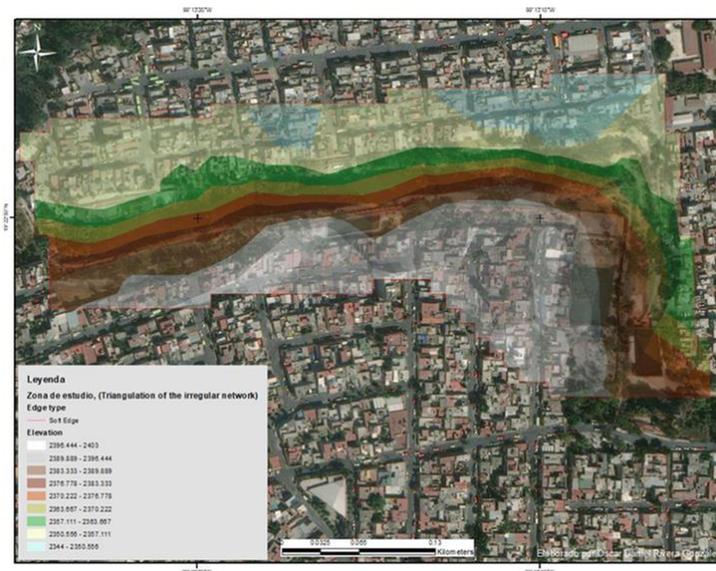


Figura 3. Elaborada con base en datos Raster de la National Aeronautics and Space Administration (NASA).
Elaborado con Software ArcGis.

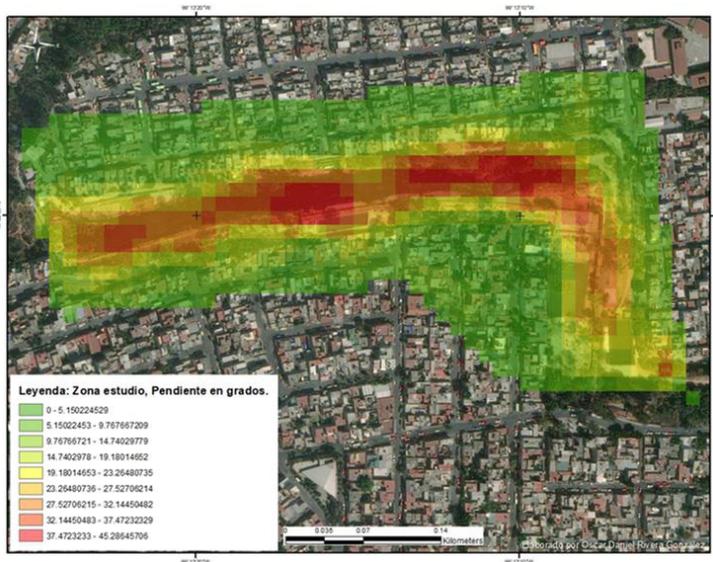


Figura 4. Elaborada con base en datos Raster de la National Aeronautics and Space Administration (NASA).
Elaborado con Software ArcGis.



Figura 5. Elaborada con base en datos Raster de la National Aeronautics and Space Administration (NASA).
Elaborado con Software ArcGis.

Existe una Ley general de asentamientos humanos, así como El Programa Nacional de Desarrollo Urbano 2014-2018 y la nueva Ley general de asentamientos humanos, ordenamiento territorial y desarrollo urbano, publicadas en el *Diario Oficial de la Federación* el 28 de noviembre de 2016, mismas que las autoridades competentes, no analizan e implementan.

Metodología

El trabajo de investigación consistió en la reunión, análisis, recopilación, búsqueda bibliográfica, hemerográfica, periodística y cartográfica de la Alcaldía Álvaro Obregón, trabajo de campo cualitativo, entrevistas con habitantes de la zona de estudio y generación de cartografía con base en encuestas y toma de puntos con GPS. Por otra parte, en cuanto al trabajo de gabinete, se generaron modelos Raster 3D, análisis de fotointerpretación, teledetección y análisis de imágenes satelitales procesadas con softwares ArcGis y QGis para la generación de modelos predictivos que se mostrarán más adelante.

Por otro lado, se buscó información y noticias en páginas electrónicas de periódicos, para identificar y cartografiar zonas de mayor vulnerabilidad que pudieran presentar procesos de remoción en masa, con mayor intensidad en temporada de lluvias y en momentos de sismicidad y la relación que existe con la marginación y nivel socioeconómico de las personas afectadas o posibles afectadas. Con base en lo anterior se tomaron como muestra las cinco colonias antes mencionadas.

Generación de modelos

Se generaron modelos de predicción para evitar deslizamientos de ladera o remoción en masa dado por procesos gravitacionales.

El primero consiguió generar una gráfica de perfil de la zona de estudio, con base en una imagen Raster de sur a norte de la zona de estudio, donde se observa una mayor vulnerabilidad física para presentar inestabilidad de laderas, en la siguiente figura se muestra un corte vertical sobre el terreno, generado con SIG.

Se generaron tres modelos de elevación visuales, para comprender cuál es la geomorfología del terreno y elevación del mismo, el cual, según su geología, hidrología y edafología, ocasionan procesos de remoción en masa, mismos que afectan a zonas urbanas en la infraestructura de las edificaciones, acarreado la cimentación de las mismas.

En el modelo expresado en la Figura 10 se aprecia el posible proceso gravitacional que se pueda generar en la zona de estudio, posible afectación de viviendas, número de m³ de tierra desplazada y posible expansión del material removido.

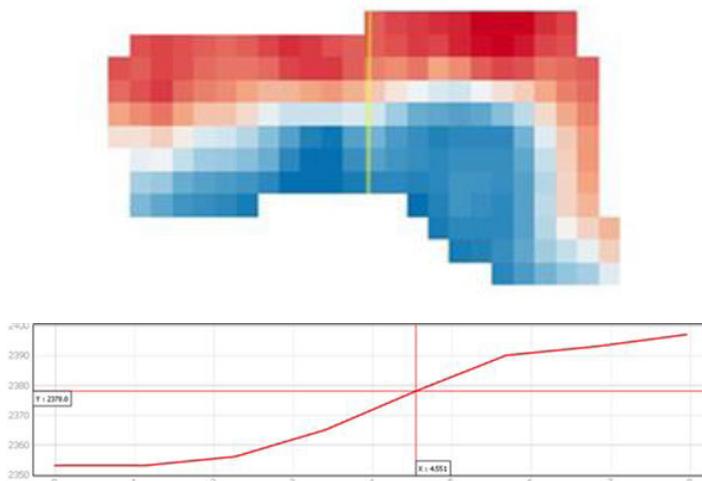


Figura 6. Zona de estudio, modelo digital de elevación (sur a norte) y perfil (izquierda a derecha).
Elaborado con Software QGIS.

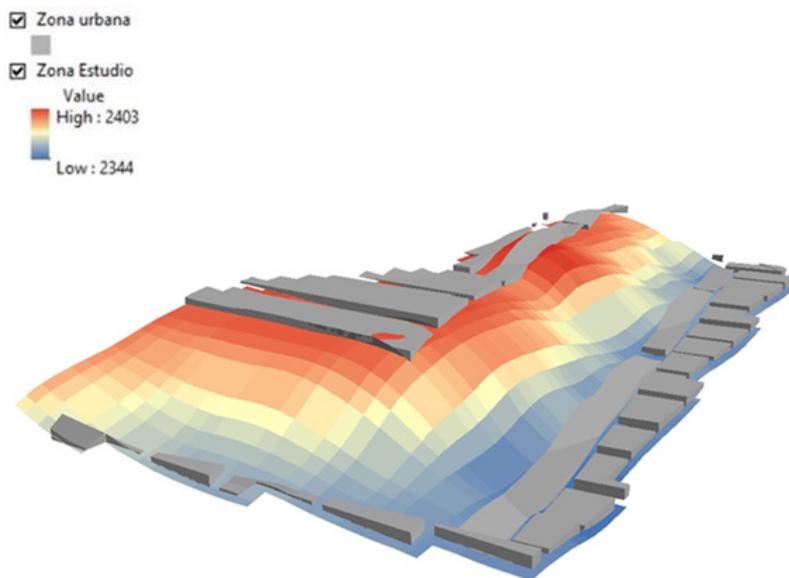


Figura 7. Zona de estudio, modelo digital de elevación 3D.
Elaborado con Software ArcGIS.

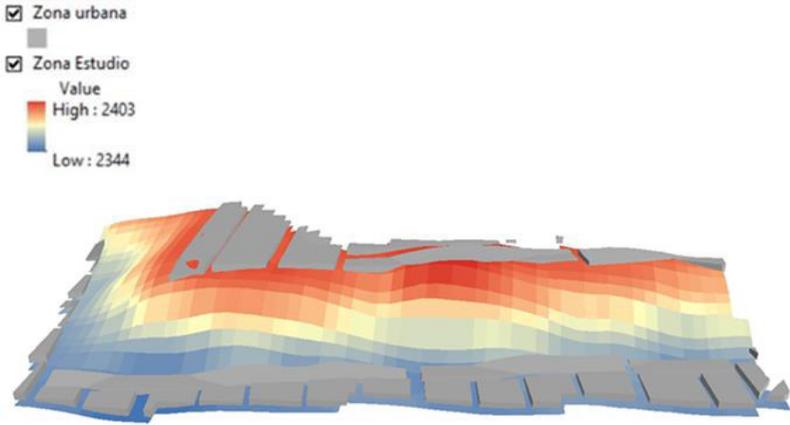


Figura 8. Zona de estudio, modelo digital de elevación 3D.
Elaborado con Software ArcGis.

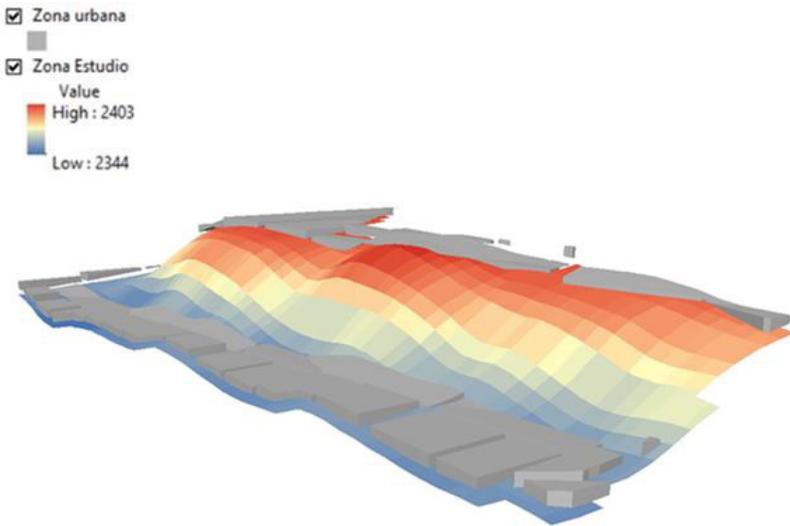


Figura 9. Zona de estudio, modelo digital de elevación 3D.
Elaborado con Software ArcGis.

Para su mejor comprensión, la estructura de la generación del modelo fue la siguiente:

1. Se generó una triangulación de red irregular (triangulation of the irregular network, TIN), con base en las curvas de nivel obtenidas en el terreno y la zona de estudio (Figuras 10-12).
2. Posteriormente se interpoló el shape o capa de la posible zona de derrumbe, con la triangulación de red irregular (Figura 13).
3. Una vez interpolada la zona de estudio se creó una nueva triangulación de red irregular, que es la que en teoría se removió o existió una posible remoción (observar el cambio de la geomorfología de la zona de estudio (Figuras 11 y 12 contrastarla con las Figuras 14 y 15).
4. Posteriormente se obtuvo la diferencia de superficie, al restar el total de la nueva Triangulación de red irregular (en la cual existe remoción en masa o proceso gravitacional) a la anterior Triangulación de red irregular (la que no tiene remoción en masa o proceso gravitacional), obteniendo el área total de afectación en m^2 que se removió, la cual es un área de $74\,951.73\,m^2$ (Figuras 16 y 17) y el posible lugar donde caerán los m^3 de tierra con base en la geomorfología y topografía, la cual es un volumen de $197\,565.19\,m^3$ (Figuras 18 y 19).



Figura 10. Elaborada con base en datos Raster de la National Aeronautics and Space Administration (NASA).
Elaborado con Software ArcGis.

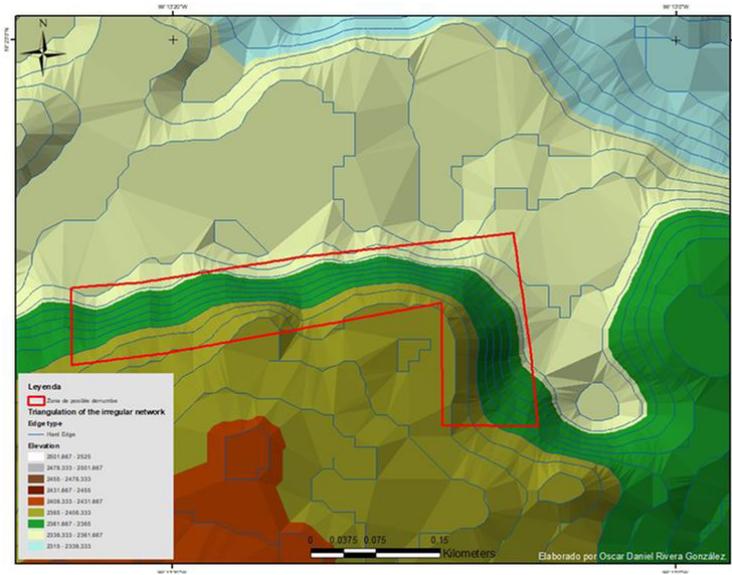


Figura 11. Elaborada con base en datos Raster de la National Aeronautics and Space Administration (NASA).
Elaborado con Software ArcGis.

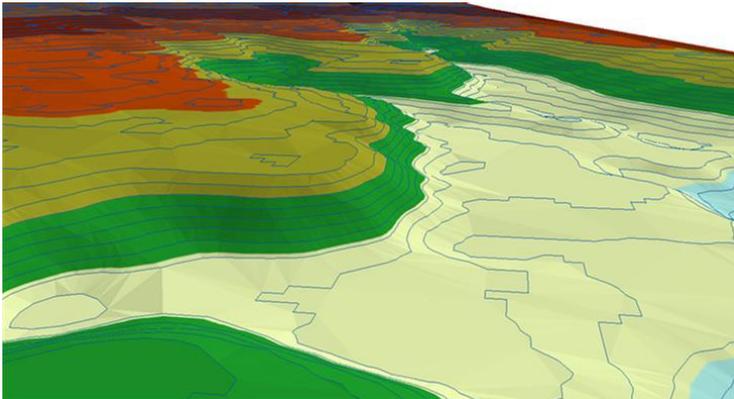


Figura 12. Elaborada con base en datos Raster de la National Aeronautics and Space Administration (NASA),
imagen 3D.
Elaborado con Software ArcGis.

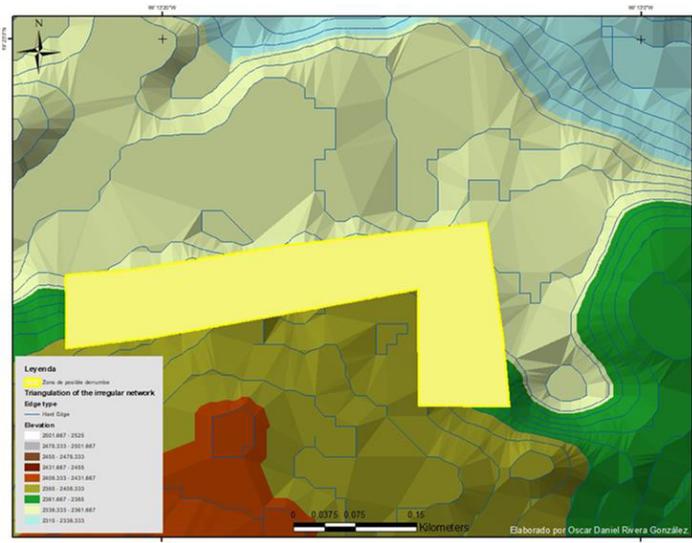


Figura 13. Elaborada con base en datos Raster de la National Aeronautics and Space Administration (NASA).
Elaborado con Software ArcGis.

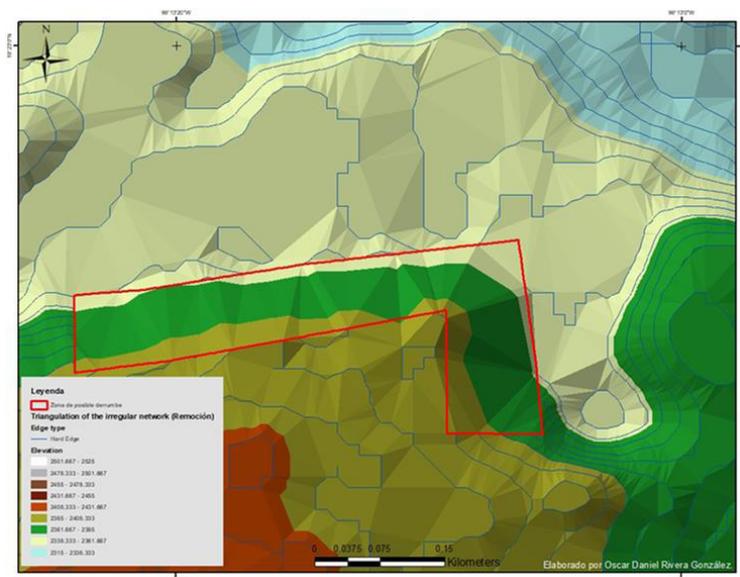


Figura 14. Elaborada con base en datos Raster de la National Aeronautics and Space Administration (NASA).
Elaborado con Software ArcGis.

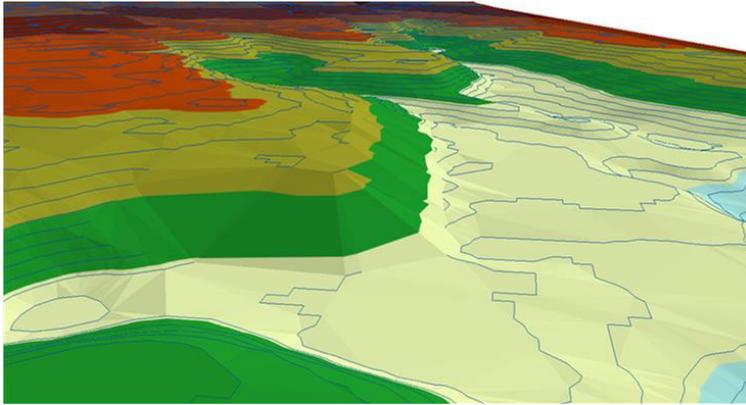


Figura 15. Elaborada con base en datos Raster de la National Aeronautics and Space Administration (NASA), imagen 3D.
Elaborado con Software ArcGis.

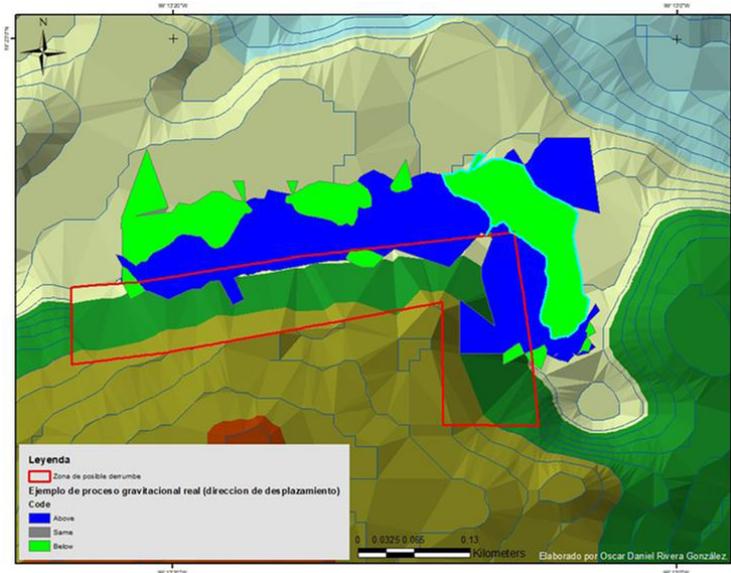


Figura 16. Elaborada con base en datos Raster de la National Aeronautics and Space Administration (NASA).
Elaborado con Software ArcGis.

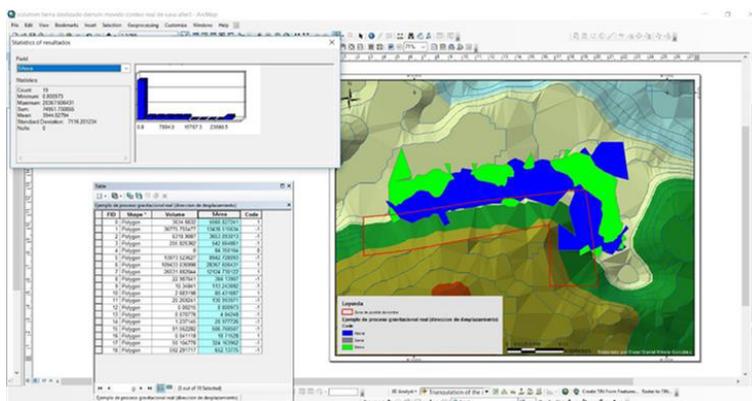


Figura 17. Impresión de pantalla, software ArcGis, elaborada con base en datos Raster de la National Aeronautics and Space Administration (NASA).
Elaborado con Software ArcGis.

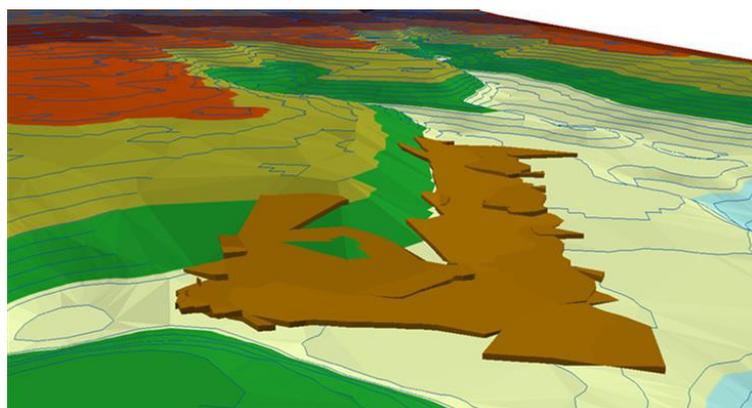


Figura 18. Elaborada con base en datos Raster de la National Aeronautics and Space Administration (NASA), imagen 3D.
Elaborado con Software ArcGis.



Figura 21. Vista 3D, Google Earth, zona de estudio.



Figura 22. Vista 3D, Google Earth, zona de estudio.

Conclusiones

La aplicabilidad de modelos de predicción en procesos gravitacionales en zonas de laderas, con base en procedimientos reales y cuantificados como se realizaron a lo largo de este artículo, deben utilizarse en la implementación de políticas públicas para posibles soluciones a problemáticas dadas ante este tipo de episodios geomorfológicos, mismos que indudablemente han acontecido a lo largo de la Alcaldía Álvaro Obregón, existiendo diversas noticias periodísticas que lo avalan,

por lo que este tipo de modelaciones, pueden aplicarse como posible solución a cualquier zona de dicha alcaldía, Ciudad de México y República Mexicana o inclusive cualquier parte del mundo donde se presenten características, geográficas, geológicas, geomorfológicas, edafológicas, hidrográficas, similares a la zona estudiada en este artículo.

Así mismo, la población afectada y políticas publicas bien gestionadas por parte de los tres niveles de gobierno mexicano, podrían atenuar, aminorar o posiblemente desaparecer diversas problemáticas generadas ante este tipo de episodios geomorfológicos, que cobran vidas humanas año con año.

Por otra parte, sustentar con este tipo de modelaciones, proyecciones de reubicación en zonas urbanas vulnerables a inestabilidad de laderas, concientizando a la población del peligro con el cual viven sus familias a diario, lo que dará como resultado una posible prevención del riesgo y no corrección del mismo, lo que desencadenará disminución o desaparición de problemáticas sociales, económicas, ambientales y físicas, derivadas de este tipo de procesos geomorfológicos.

Por ultimo con este tipo de modelos predictivos, se podrá crear un mapeo de vulnerabilidad baja, media y alta, en zonas de barrancas, mismas que se encuentren urbanizadas, así como replicarlo a nivel Alcaldía, Municipio o Estado, el cual, podría consultar la población directamente en la Alcaldía Álvaro Obregón, o vía electrónica en la página de dicha alcaldía, para que la población posiblemente afectada, sepa cuál es el nivel de peligro con el que vive de manera constante y pueda esta población acercarse a las autoridades competentes y gestionar una posible solución a su petición.

Agradecimientos

A la Universidad Nacional Autónoma de México, a Kristoff Pineda González y a Oscar Pineda Durán.

Bibliografía

- Alcántara, I., 2016. *Investigación forense de desastres: un marco conceptual y guía para la investigación*, Editorial Instituto de Geografía, UNAM, México, p. 38.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), <<http://www.beta.inegi.org.mx/temas/mapas/relieve/continental/>>, consultado el 18 de enero de 2019.
- Ley General de Asentamientos Humanos, "Nueva Ley publicada en el Diario Oficial de la Federación el 21 de julio de 1993", Texto vigente, última reforma publicada DOF 30-11-2010, México, 1993, <http://www.senado.gob.mx/comisiones/desarrollo_social/docs/marco/Ley_GAH.pdf>, consultado el 12 de agosto de 2018.
- National Aeronautics and Space Administration (NASA), <<https://vertex.daac.asf.alaska.edu/>>, consultado el 18 de enero de 2019.

Nueva Ley general de asentamientos humanos, ordenamiento territorial y desarrollo urbano, publicadas en el *Diario Oficial de la Federación* el 28 de noviembre de 2016, <http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGAHOTDU_281116.pdf>, consultado el 16 de noviembre de 2018.

Programa Nacional de Desarrollo Urbano 2014-2018, <http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5342867&fecha=30/04/2014>, consultado el 14 de noviembre de 2018.

Modernización con bajo presupuesto de la estación hidrométrica de Guaqui, lago Titicaca

Bismarck Jigena Antelo¹
Luis Miguel Carrasco Nattes²
Juan Jose Muñoz Pérez³
Manuel Berrocoso Dominguez⁴
Renato Mamani Velázquez⁵

Recibido el 21 de julio de 2019; aceptado el 30 de agosto de 2019

Resumen

El Instituto Panamericano de Geografía e Historia (IPGH) ha financiado el proyecto GEOF 04 2018, para la modernización del seguimiento de los niveles del lago Titicaca en la estación hidrométrica del puerto de Guaqui, Bolivia. El proyecto ha consistido en la instalación de una nueva regla limnimétrica, así como la adquisición y colocación de un sensor de presión. El presupuesto final tuvo una disminución del 60% respecto al presupuesto original, por lo que el proyecto fue llevado a cabo gracias a la colaboración y patrocinio del Servicio Nacional de Hidrografía Naval de Bolivia (SNHN) y de la Universidad de Cádiz (UCA), España. Asimismo, la UCA dirigió la ejecución del proyecto, además de cursos de formación para preparar al personal del SNHN que posteriormente se encargará del mantenimiento de los equipos y de la descarga de los datos y del envío de datos a la UCA para su procesamiento y utilización con fines de investigación.

Palabras clave: *Benchmark, marca de nivel, nivel superficie lago, cero hidrográfico, mareógrafo, datum, hidrología.*

Abstract

The Pan-American Institute of Geography and History (PAIGH) has financed a project GEOF 04 2018, for the modernization of the monitoring of the Titicaca lake level in the Guaqui hydrometric station. The project consisted in the installation of a new limnimetric staff along with the acquisition and placement of a pressure sensor. The final budget has had a reduction of 60% with respect to the original

.....
¹ Departamento de Ciencias y Técnicas de la Navegación y Construcciones Navales, CASEM, Universidad de Cádiz, España. Correo electrónico: bismarck.jigena@uca.es

² Servicio Nacional de Hidrografía naval de Bolivia (SNHN), La Paz, Bolivia. Correo electrónico: carrascoluismiguel@gmail.com

³ Departamento de Física Aplicada, CASEM, Universidad de Cádiz, España. Correo electrónico: juanjose.munoz@uca.es

⁴ Laboratorio de Astronomía, Geodesia y Cartografía, CASEM, Facultad de Ciencias, Universidad de Cádiz, España. Correo electrónico: manuel.berrocoso@uca.es

⁵ SNHN, La Paz, Bolivia. Correo electrónico: renamave@gmail.com

thanks to the collaboration of the snhn (National Service of Naval Hydrography) of Bolivia. Likewise, the University of Cadiz has carried out an on-site course to prepare SNHN personnel who will later be responsible for the maintenance of the equipment and the downloading of the data and sending data to the UCA for processing and use for research.

Key words: Benchmark, pressure sensor, lake surface level, datum, hydrology, vertical reference level.

Introducción

Mediante el Reglamento de la Ley de Ministerios del Poder Ejecutivo, de acuerdo al Decreto Supremo No. 23660 del 12 de Octubre de 1993, se reconoció al Servicio Nacional de Hidrografía Naval (SNHN), la atribución y competencia de “Realizar la planificación, estudio, investigación, promoción, control y asesoramiento técnico-científico, de las actividades hidrográficas, de navegación y gestión de los recursos hídricos, que se desarrollan en el Estado Plurinacional de Bolivia” así como “Satisfacer las necesidades del usuario del medio ambiente acuático, con la producción de cartas náuticas, prestación de servicios de ayuda a la navegación e investigación técnico-científica, en el marco de la gestión integral del recurso agua” (SNHN, 2014, 2019). Una metodología para la gestión de este tipo información hidrológica en vías navegables ya fue presentada por Jigena et al. (2018).

De este modo, el SNHN venía realizando el almacenamiento y procesamiento de las lecturas limnimétricas enviadas por la Capitanía de Puerto Mayor “GUAQUI” del lago Titicaca, del año 1974 hasta la fecha. Sin embargo, durante los últimos cinco años, la regla instalada había sufrido el deterioro por su tiempo de uso y actualmente los datos se remitían al SNHN con mediciones efectuadas mediante flexómetros en forma empírica y referencial, este proceso casi artesanal introducía muchos errores en los datos recibidos en el SNHN, que afectaba en gran medida al procesamiento de los datos y en consecuencia a los resultados sobre la altura real del nivel del agua del lago para los fines requeridos por el SNHN y otras instituciones técnicas y científicas, (SNHN, 2014, 2019). Para intentar solucionar este problema, el doctor Bismarck Jigena, docente investigador de la Universidad de Cádiz (UCA) en España, remitió al SNHN, un proyecto para la instalación de sensores de presión (mareógrafos), para el control de los niveles del agua del lago Titicaca, con un presupuesto de USD14 600, además del apoyo de copatrocinio del SNHN (Bolivia) y de la UCA (España). La iniciativa fue presentada al Instituto Panamericano de Geografía e Historia (IPGH), para su financiamiento. Luego de varios intercambios de correos electrónicos, para los ajustes respectivos y tras una visita del mencionado investigador al SNHN en marzo de 2017, se elabora un nuevo proyecto consensuado y presentado al IPGH un mes después.

El 6 de marzo de 2018, el IPGH aprueba la concesión del proyecto GEOF 04 2018 "Modernización de la red de monitoreo hidrológico en el lago Titicaca (RMHLT), lago Menor o Huiñaymarca", difundido en el marco de la "Agenda Panamericana del IPGH 2010-2020", con un financiamiento aprobado de U\$D 5.866,00, correspondiente al 40% del financiamiento solicitado. La reducción de los fondos fue asumida gracias a la colaboración y cooperación altruista de la Universidad de Cádiz y de los técnicos y mandos del Servicio Nacional de Hidrografía Naval y de la Armada Boliviana. Por lo que, se tuvo que encarar una nueva planificación de las actividades del proyecto, así como la asignación de responsabilidades para la instalación y cuidado de los equipos. Las labores consideradas fueron:

1. Reconocimiento del área de interés para la elección del sitio más adecuado para la reinstalación de la estación hidrométrica y el sensor de presión.
2. Instalación de una nueva regla limnimétrica y sensor de presión.
3. Realización de un taller de capacitación para la instalación de la nueva estación hidrométrica dotada con sensor de presión y regla limnimétrica para la lectura de los niveles del mareógrafo. También se incluyó la enseñanza en el manejo del software para la adquisición y gestión de los datos de niveles de agua del lago Titicaca.
4. Trabajos de nivelación para monumentar un nuevo Benchmark (BM, del inglés bench mark, punto de referencia de altitud) que es el punto de referencia altimétrico del mareógrafo, instalado cercano a la nueva regla limnimétrica, y que además permitirá la determinación del "cero de la regla limnimétrica y del sensor de presión".
5. Instalación de un mareógrafo, para obtener lecturas digitales y georreferenciadas de niveles de agua del lago Titicaca.

El objetivo de este artículo es la presentación de las metodologías utilizadas, tanto en el aspecto humano como de equipamiento, sus características, y las posibilidades que su instalación permitirá en cuanto al tipo de datos que se recogerán y que mejorarán sensiblemente y la calidad de los mismos.

Área de trabajo

El lago Titicaca está ubicado en el altiplano andino a una altitud media de unos 3 812 msnm, es el lago navegable más alto del mundo con una superficie total de 8 560 km², compartido entre Bolivia y Perú, correspondiendo el 56% de su superficie a Perú y el 44% restante a Bolivia, su eje mayor está orientado en sentido NW-SE y pasando por el estrecho de Tiquina, tiene una longitud de 173 kilómetros. El lago está formado por dos masas de agua separadas que se comunican por el umbral geológico denominado Estrecho de Tiquina, este fenómeno físico es la principal característica de esta masa de agua (SNHN, 2007).

La zona más grande es la situada al norte, denominada Lago Mayor o Chucuito, la parte más pequeña ubicada al sur llamada Lago Menor o Laguna Huiñaymarca, es allí donde se ubica la Capitanía de Puerto Mayor "GUAQUI" y la Unidad Operativa de Servicios "NAVTUR", que son unidades operativas de la Armada Boliviana dependientes del Cuarto Distrito Naval "TITICACA". La estación hidrométrica Guaqui está instalada en la localidad de Guaqui y más específicamente en el puerto de Guaqui, en la Provincia Ingavi del Departamento de La Paz, a una distancia de 91 km de la ciudad de La Paz sobre la carretera internacional que va al municipio de Desaguadero y la población del mismo nombre, frontera con la República del Perú (Figura 1).



Figura 1. Ubicación general del lago Titicaca y de la población de Guaqui, donde se encuentra instalada la Estación Linimétrica "Guaqui".

Fuente: elaboración propia en base a imágenes de Google Earth.

Las profundidades máximas se pueden encontrar en el del Lago Mayor, en la parte boliviana, al noreste de la Isla Campanario, donde se alcanza una profundidad de 275 m, mientras que en el estrecho de Tiquina, la profundidad entre los muelles de las poblaciones de San Pedro y San Pablo es de 36 m. En el Lago Menor, la profundidad máxima es de 30 m frente al faro de la población de Chua. El lago, pese al enorme volumen de agua que embalsa, no presenta mareas significativas y la diferencia de lecturas simultáneas en diversas estaciones hidrométricas se debe más a efectos meteorológicos que a efectos astronómicos (SNHN, 2007). Las características principales se aprecian en la Tabla 1.

Tabla 1
Características del lago Titicaca

Característica	Lago Mayor	Lago Menor
Longitud máxima (km)	130	30
Ancho máximo(km)	68	58
Profundidad máxima (m)	275	39
Profundidad media (m)	135	23
Superficie (km ²)	6 642	1 388
Volumen (hm ³)	8 966 105	3 192 104
Altitud media (msnm)	3 192 104	3 192 104

Para la georreferenciación horizontal y vertical de la estación hodrométrica Guaqui, se cuenta con tres mojones o marcas de referencia o BM en el área de trabajo y son los siguientes:

- El BM N° 38, que es el punto principal de referencia altimétrica, está ligado con Red Geodésica Nacional de Altimetría y desde este punto se ha dado la altitud a los otros puntos de referencia, por sus características este punto es el BM de referencia altimétrica de la estación, designado como TGBM (Tide Gauge Benchmark). El "BM No. 38" se encuentra en el Departamento de La Paz, Provincia Ingavi, puerto Guaqui, en la localidad del mismo nombre, físicamente monumentado en el predio de la Unidad Operativa de Servicios (UOS) "NAVTUR", de la Armada Boliviana. Al BM se llega ingresando por el camino principal hasta las instalaciones de la Unidad Operativa de Servicios "NAVTUR", y pasando dichas instalaciones hasta el final de la vía férrea, lugar donde hay una pequeña edificación, el BM se encuentra a tres metros antes de llegar a dicho punto y más próximo al riel del lado derecho. El BM No. 38, está físicamente monumentado mediante un bulón de bronce de forma circular empotrado en bloque de cemento con la inscripción: HIDROGRAFÍA, No 38. BOLIVIA.
- El BM RN-01, es la referencia altimétrica más cercana a la Estación Hidrométrica Guaqui, al igual que el anterior se ingresa por el camino principal hasta llegar a la UOS "NAVTUR", se realiza un recorrido por el Patio de Honor, y pasando dichas instalaciones hasta el final de la última construcción de casas de calamina. El punto RN-01, se encuentra en las cercanías del cantil del muelle que se encuentra en el Canal Guaqui. El mojón RN-1 está físicamente monumentado por un bulón de bronce de forma circular empotrado en bloque de cemento con la inscripción: HIDROGRAFÍA NAVAL, RN-1, GUAQUI, MAY- 08, BOLIVIA.

- El Mojón "RN2" es la segunda referencia altimétrica más cercana a la estación, al igual que el anterior (RN-1), se ingresa por el camino principal hasta llegar a la UOS "NAVTUR", se realiza un recorrido por el Patio de Honor, y pasando dichas instalaciones hasta el final de la última construcción de casas de calamina. El punto RN-02, se encuentra en las cercanías del cantil del muelle que se encuentra en el canal Guaqui. Está físicamente monumentado por un bulón de aluminio de forma circular empotrado en bloque de concreto con la inscripción: SNHN.

Mayores detalles de la ubicación de los BM de referencia los podemos apreciar en la Figura 2, y las coordenadas de estas marcas de nivel se muestran en la Tabla 2.



Figura 2. Ubicación de la Estación Hidrométrica de Guaqui, dentro de las instalaciones de la UOS NAVTUR (Armada Boliviana), donde también apreciamos la ubicación de las marcas de referencia de nivel (BM) o puntos de referencia altimétrica del mareógrafo.

Fuente: elaboración propia en base a imágenes de Google Earth.

Se dispone de trabajos batimétricos previos del Canal de acceso "Guaqui" que han sido utilizados como referencia técnica para el establecimiento de la nueva estación.

El clima en la zona de trabajo es semiárido, la precipitación anual varía de 400 a 600 mm con lluvias durante el verano y sequedad en el invierno. Normalmente las precipitaciones vienen acompañadas por tormentas eléctricas y fuertes granizadas, generalmente durante los meses de diciembre a abril. La precipitación es mayor en los valles abruptos de la Cordillera Oriental. Además, se tienen cambios bruscos de temperatura, llegando durante el día a registrarse máximas de 18° C y mínimas por la noche hasta -5° C, siendo los meses de junio y julio los más fríos del año.

Tabla 2
Coordenadas del punto de referencia de mareógrafo
(BM 38) y de los puntos auxiliares

Est	Lat (S)	Lon (W)	Altitud (msnm)	Datum Horizontal	Datum Vertical
BM 38	16°35'10.9348"	68°51'19.1677"	3.810.988	PSAD-56	Arica (Chile)
RN 01	16°35'11.5023"	68°51'17.2324"	3.811.025	PSAD-56	Arica (Chile)
RN 02	16°35'11.5823"	68°51'17.0224"	3.811.222	PSAD-56	Arica (Chile)

Metodología

Personal

La organización y ejecución de los trabajos de reconocimiento e instalación de la Estación Hidrométrica "Guaqui" estuvieron a cargo de cuatro miembros del personal técnico del SNHN y un investigador de la UCA que se desplazó hasta el área de trabajo y dos investigadores UCA que prestaron apoyo y asistencia técnica *on line* durante la ejecución de los trabajos.

De manera más específica, el jefe de comisión, ingeniero hidrólogo designado por el SNHN y el profesor-investigador de la UCA, fueron los responsables de la planificación del trabajo y de la coordinación con el personal tanto de la Capitanía de Puerto Mayor "GUAQUI" como de la UOS "NAVTUR"; así como la elaboración del plan de trabajo, organización de viaje, supervisión del alistamiento general de los equipos, revisión de normas técnicas e hidrológicas para instalación de estaciones hidrométricas, trabajos de gabinete y la elaboración del informe técnico final.

El topógrafo se encargó de realizar los trabajos de nivelación geométrica de los bancos de nivel, de la regla limnimétrica, de cálculos complementarios y la elaboración de las fichas de descripción correspondiente.

El investigador de la UCA fue el responsable de la adquisición del equipo (mareógrafo) y del resto de materiales; combustible e insumos necesarios para llevar adelante los trabajos. Asimismo, de la capacitación del personal técnico del SNHN en el manejo del Software "AQUAlogger", para la adquisición y gestión de datos de niveles de agua, así como de la instalación y fondeo del mareógrafo.

Especificaciones técnicas de los equipos

Equipo para georreferenciación y topografía

Para la georreferenciación de los puntos de control se utilizaron técnicas GNSS- GPS (Berrocoso *et al.*, 2007, 2012; Jigena *et al.*, 2014), se establecieron tres puntos de

control en las cercanías de la estación. Además, para realizar la georreferenciación se usaron dos equipos GPS Leica 1200, y para el procesamiento de datos GPS se empleó el software Leica Geomatic Office. Las coordenadas absolutas obtenidas fueron referidas al sistema de referencia WGS-84 (World Geodetic System, 1984), sistema global estándar utilizado por todos los sistemas GNSS.

Para dar cota altimétrica a los puntos de control se utilizó un nivel óptico marca Wild, modelo N2, que es un instrumento topográfico óptico usado para hacer las mediciones de nivelación geométrica de alta precisión, con lecturas sobre reglas de nivelación o estadias. Este tipo de nivel es un instrumento óptico de imagen directa sobre la regla de nivelación y consta de un nivel vertical de coincidencia, anillo de enfoque de la cruz filar y del campo visual, además de trabajos topográficos, puede ser utilizado para el control geodésico cumpliendo con los estándares del segundo orden geodésico, con una precisión de 0.7 mm por cada kilómetro de doble nivelación (ida y vuelta), dependiendo del tipo de regla y de la técnica utilizada. Los cálculos de nivelación se realizaron tomando en cuenta la metodología propuesta por Berrocoso *et al.* (2007) y Jigena *et al.* (2014). Durante la obtención de datos, es necesaria la utilización de registro en formularios de nivelación geométrica. Para mayor detalle véase la Figura 3.



Figura 3. Vista de la regla de nivelación (izquierda) y del nivel Wild N2 (derecha).

Equipo hidrométrico

El sensor AQUAlogger 520 (Figura 4) es un instrumento de tamaño reducido que trabaja midiendo la presión hidrostática de la columna de agua que se encuentra por encima del sensor, transformando esta presión en altura de la columna de agua y determinando de esta forma el nivel instantáneo del agua. Es capaz de monitorear mediciones precisas de temperatura y presión a profundidades de hasta 1 000 m, pero en nuestro caso está calibrado para



Figura 4. Sensor de presión AQUAlogger 520.

mediciones de hasta 30 metros de profundidad y que repercute en una mayor precisión en las lecturas y que corresponde a $\pm 0,05^\circ$ C en temperatura y de 0.005% a escala completa para cada 10 m, en presión. Con estos datos y precisiones se obtuvieron las mediciones instantáneas del nivel del lago (Jigena-Antelo *et al.*, 2015). El dispositivo es una alternativa flexible dado su diseño autónomo y es apropiado para aplicaciones tanto oceánicas, como fluviales, lacustres y medioambientales. Tiene un diámetro estrecho (sólo 32 mm), lo que lo hace adecuado para tomar medidas precisas en espacios pequeños. Su lector, con conexión por USB, permite cargar fácilmente hasta 250 000 lecturas de parámetros registrados usando un sistema de comunicación inalámbrico. Dado que el AQUAlogger 520 no requiere ningún conector, asegura que sus datos están protegidos contra fugas. La duración de su batería es hasta por cinco años para una configuración de implementación típica. Para la lectura de datos hidrométricos se han tenido en cuenta las metodologías propuestas por OMM (1994), Chamorro (2008), Vidal *et al.* (2012) y Jigena *et al.* (2014, 2015, 2018).

Otros equipos

Para el proceso de datos de campo se utilizó el equipo de computación portátil Lenovo Intel(R) Core (TM) i7-4702MQ de 2,20 GHz, con sistema operativo Windows 10 de 64 bits y un equipo de escritorio Intel(R) Core (TM) i5 de 2Ghz. Asimismo, también fue necesaria una impresora multifuncional Epson L210.

En cuanto a las comunicaciones se hizo uso de la red de telefonía celular existente en la zona de trabajo, tanto entre los propios miembros de la Comisión como con la Oficina Central del SNHN.

Trabajos de reconocimiento

Los trabajos de reconocimiento comprendieron la visita *in situ* a la estación hidrométrica “Guaqui”, para la verificación y elección del sitio más apropiado desde el punto de vista técnico y de infraestructura. En este aspecto, los trabajos realizados se describen a continuación.

En la Capitanía de Puerto Mayor “Guaqui”, se verificó la ubicación de la regla desde la cual se remiten actualmente las lecturas diarias al SNHN (Figura 5). La posición actual en el muelle de la Capitanía, muestra bastante vegetación, que dificultaría la reinstalación y principalmente el colocado del mareógrafo, razón por la cual no se consideró esta ubicación.

Como se determinó que no sería posible reinstalar la nueva regla en predios de la Capitanía de Puerto, se procedió a buscar otras localizaciones, optando como mejor opción su ubicación en los predios de la Unidad Operativa de Servicios “NAVTUR” (frente a la Capitanía de Puerto), observando en primera instancia la regla actual desde la que personal de “NAVTUR” hace sus lecturas (ver la composición de la Figura 6).

Se puede comprobar que el muelle de “NAVTUR” sí cuenta con la infraestructura adecuada para reinstalar una regla. Sin embargo, al ser un sitio de permanente atraque de embarcaciones, se corre el riesgo de que el sensor sea averiado o destruido por golpes de las embarcaciones en la maniobra de atraque, además durante el atraque de las embarcaciones se genera oleaje que provocaría lecturas falsas en el sensor al ser un equipo de registro continuo, razones por las cuales también se desestimó este sitio.



Figura 5. Ubicación de la regla actual del SNHN en los predios de la Capitanía de Puerto mayor “Guaqui”.

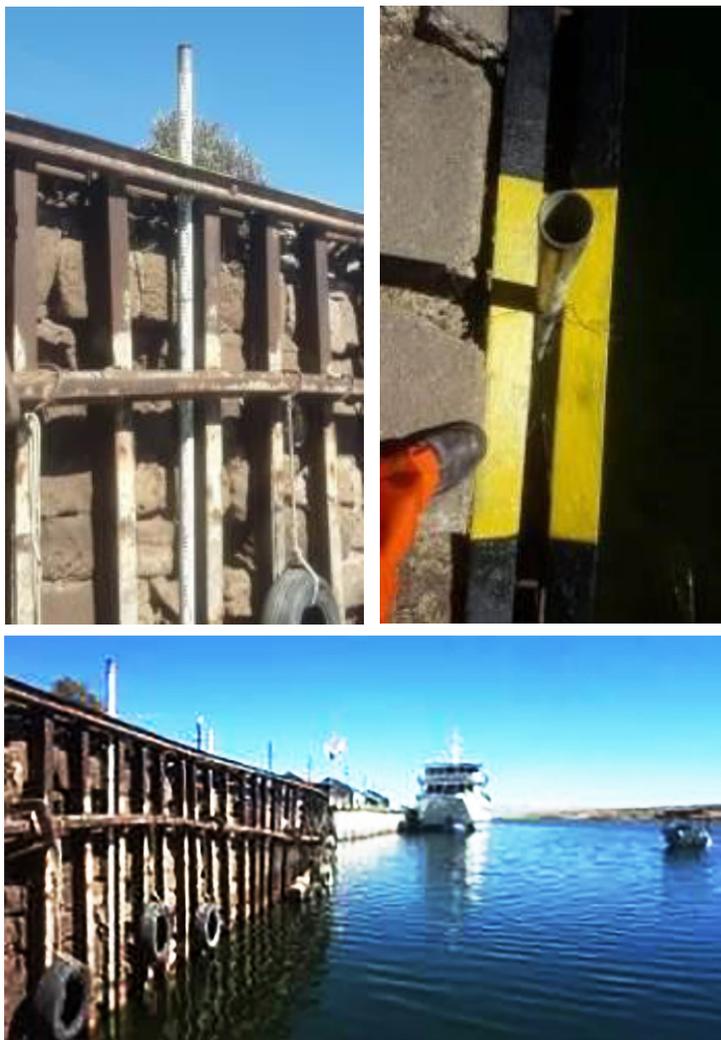


Figura 6. Ubicación de la regla actual en la UOS NAVTUR.

Finalmente, se realizó la inspección en la zona de atraque del barco multipropósito "Mosoj Huayna", al final del muelle hacia el oeste. Se consideró dicho sitio como el más idóneo y de mejores condiciones para la instalación del sensor y reinstalación de la regla limnimétrica al estar protegido y contar con la infraestructura necesaria para la fijación de la regla limnimétrica y del sensor (Figura 7).

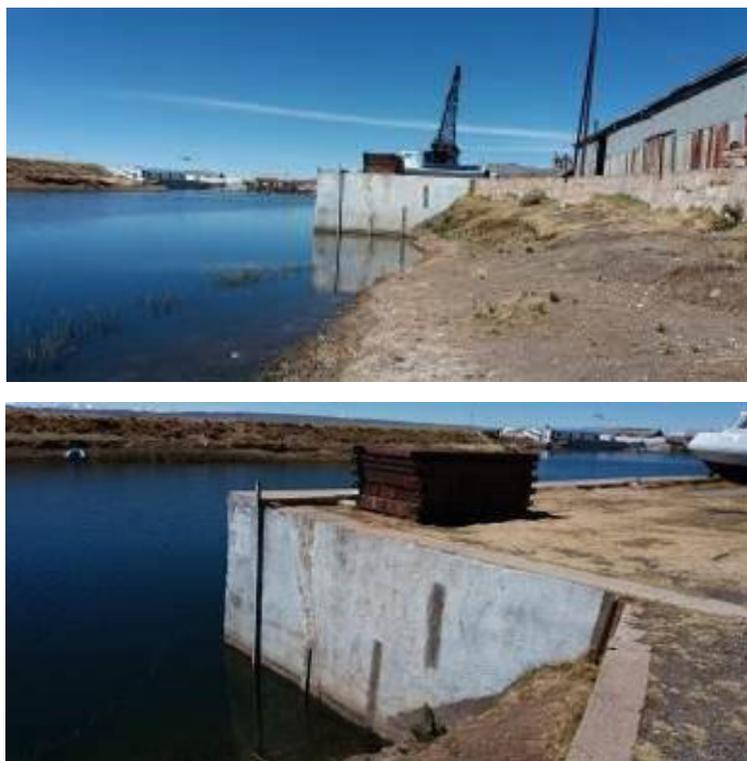


Figura 7. Ubicación de la regla limnimétrica y el mareógrafo, en el muelle de atraque del Barco Multipropósito “Mosoj Huayna”, al final del muelle hacia el oeste.

También se procedió al reconocimiento del lugar, al objeto de verificar la existencia y el estado del BM N° 38, punto fundamental de altimetría, establecido por el SNHN y vinculado a la Red de nivelación geométrica de primer orden del Instituto Geográfico Militar (IGM), está referido al datum vertical de la red altimétrica de Bolivia establecida por el IGM que es el mareógrafo de Arica-Chile. Este es punto fundamental que será utilizado como Punto de Control de Referencia Altimétrica del Sensor (TGBM, Tide Gauge Benchmark).

Obtención de la información topográfica

Nivelación geométrica de bancos de nivel

En días posteriores al reconocimiento se realizaron los trabajos de instalación de la regla limnimétrica y el sensor y su georreferenciación respecto a los puntos de control altimétrico para el cero de la regla y el sensor. Se verificó el estado

del BM38 y se establecieron dos nuevas marcas de control (BM), el BM RN-01 y el RN-02, materializados con bulón de bronce y aluminio respectivamente. Se procedió a realizar la nivelación geométrica desde el BM N° 38 (TGBM) hasta las Marcas Auxiliares para Control de Mareógrafos (TGAR, Tide Gauge Auxiliary Reference), que en este caso serían las marcas altimétricas RN-01 y RN-02. La nivelación geométrica se realizó aplicando el método compuesto de ida y vuelta, con distancias no mayores a 50 m desde el instrumento hasta la regla de nivelación y lecturas del hilo superior, medio e inferior, cumpliendo con los estándares del segundo orden geodésico, con una precisión de 0.7 mm por cada kilómetro de doble nivelación (ida y vuelta). Para la instalación y georreferenciación de la estación se han tomado en cuenta los criterios de OMM (1994), Berrocoso *et al.* (2007), Chamorro (2008), Vidal *et al.* (2012) y Jigena *et al.* (2014, 2015, 2018).

Nivelación geométrica de la estación limnimétrica

Para el establecimiento del cero de la regla de la estación limnimétrica instalada en el Puerto de "GUAQUI", se aplicó igualmente la nivelación geométrica compuesta de ida y vuelta. Dicha nivelación se realizó desde el BM RN-1 "GUAQUI" debidamente materializado con bulón de bronce, quedando el cero de la regla y el cero del sensor en las siguientes cotas:

Cero de la Regla Limnimétrica:	Cota Ortométrica: 3807.191 msnm
Cero del Sensor de Presión PT520:	Cota Ortométrica: 3807.561 msnm

Otros

Se elaboraron las Fichas de descripción de las marcas de nivelación (BM), que son el BM38, RN-01 "GUAQUI" y RN-02 "NAVTUR", que serán considerados como puntos fundamentales de referencia para futuras actividades de reinstalación y restitución de la estación limnimétrica, así como de apoyo a otras actividades técnicas donde se requiera contar con un datum de referencia altimétrico.

Obtención de información hidrométrica

Preparación de la Regla Limnimétrica

En instalaciones del SNHN previo al viaje de instalación, se procedió a la preparación de la regla limnimétrica y del sistema de sujeción del sensor (mareógrafo). El sistema está conformado por cuatro tramos de fibra de vidrio de un metro de longitud cada uno, que mediante remaches fueron fijados a una regla de acero inoxidable de cinco metros de longitud. Asimismo, en forma paralela y mediante sistema de soldadura, se adosó un tubo de acero inoxidable de 1.5", dentro del cual se colocaría el mareógrafo. Finalmente se soldaron pletinas de 30 centímetros de longitud a distancias de un metro entre cada una con orificios para la respectiva sujeción del sistema en la zona elegida de instalación (Figura 8).



Figura 8. Trabajos previos de preparación del sistema de regla y sensor de presión para la instalación de la estación limnimétrica de Guaqui.



Figura 9. Trabajos de colocación de la regla limnimétrica y del tubo donde se ubicaría el sensor de presión AQUAlogger.

Instalación de Regla Limnimétrica

En el sitio elegido para la ubicación de la estación limnimétrica de Guaqui, se procedió a preparar todo el equipamiento necesario para la instalación del sistema de regla limnimétrica y sensor de presión.

Con el apoyo de personal de la UOS "NAVTUR", se procedió, a colocar en agua una escalera metálica de cinco metros, desde la cual se procedió a hincar y nivelar la regla limnimétrica. Después, se perforaron los orificios en el muro de hormigón para la sujeción correspondiente. Cabe mencionar que el tubo que contendría el mareógrafo, se colocó después de la capacitación técnica impartida en campo (ver Figura 9). La instalación de la estación

se ha realizado de acuerdo a los criterios técnicos que se dan en OMM (1994), Chamorro (2008), Vidal *et al.* (2012) y Jigena *et al.* (2014, 2015, 2018).

Capacitación del personal

El Prof. Dr. Bismarck Jigena, investigador y docente de la UCA, procedió a dictar un curso-taller de capacitación en campo y en las oficinas del SNHN para el personal técnico del SNHN, consistente en el manejo del software AQUAtalk y gestión y procesamiento de los datos limnimétricos de los niveles del lago. Para la descarga y lectura de los datos del sensor, se procede colocando el sensor en el dispositivo lector, que por inducción accede a los datos registrados en el mareógrafo y se los descarga en formato propio de AQUAlogger y exportable a formato Excel (.xls) y texto plano (.txt) para su lectura, procesado e interpretación. Asimismo, el curso consideró las técnicas para el fondeo del sensor y colocado en el sitio para la medición de los niveles junto a la regla limnimétrica. Una vez terminado el curso, se procedió a calibrar el sensor (mareógrafo) para ser colocado en el tubo receptor mediante bridas plásticas a objeto de que comenzara su registro a las 13:00 horas del día 8 de agosto del 2018, con la previsión de retornar después de tres meses y retirar el sensor para el vaciado de datos.

Procesamiento de información

Nivelación geométrica

Los datos obtenidos de la nivelación geométrica compuesta fueron procesados aplicando formularios de proceso automático, desarrollados en la aplicación Microsoft Excel. Se tomó como referencia de partida, el dato vertical del BM N° 38, a partir del cual, mediante cálculo de los datos obtenidos en campo, se dio el valor de Cota Geométrica a los BMs RN-1 y RN-2. Asimismo, se utilizó la Cota Geométrica del BM RN-1, para determinar mediante cálculo la Cota Geométrica del cero de la estación limnimétrica "Puerto Guaquí". También se efectuaron tomas fotográficas para la elaboración de las respectivas Fichas de descripción y elaboración de la memoria pertinente. En gabinete, se empleó la aplicación del Microsoft Excel para el procesamiento de la nivelación geométrica compuesta.

Medición hidrométrica

La información que es reportada por la Capitanía de Puerto Mayor "GUAQUI", está siendo almacenada a partir de las lecturas de la nueva regla instalada en el muelle de la UOS "NAVTUR" y del registro que se genera el sensor de presión. Las lecturas de niveles con el sensor de presión iniciaron su registro a las 13:00 horas del 8 de agosto del 2018, con la previsión de retornar después de tres meses y retirar el sensor para el vaciado de datos. La lectura de datos hidrométricos se realizará de acuerdo a criterios OMM (1994), Chamorro (2008), Muñoz & Abarca (2009), Vidal *et al.* (2012) y Jigena *et al.* (2014, 2015, 2018).

Discusión y resultados

El logro de este trabajo con respecto a los resultados anteriores, se resume a continuación.

El presente trabajo representa una contribución a la extensión de estudios de niveles en lagos y sistemas de agua dulce en el mundo. En nuestro caso, se reinstaló la Estación Limnimétrica de Guaqui, utilizando equipos de última generación para la lectura de los niveles del lago, en este caso el sensor AQUAlogger PT520, que nos proporciona de forma directa medidas de presión y temperatura, con lo que aseguramos una medición en formato digital, continua y precisa de los niveles del lago y de la temperatura del agua en el lugar donde se encuentra instalada la estación.

El producto principal de este trabajo será una serie temporal con datos diarios y con frecuencia constante del nivel del lago, con una frecuencia de 1 datos/hora, y cuyo inicio está datado el 8 de agosto de 2018 a partir de las 13:00 horas y en el futuro nos permitirá corregir y reconstruir la serie original de la estación Guaqui, que cuenta con datos diarios a partir del 1 de enero de 1973, pero al ser datos observados y medidos en una regla hidrométrica, que ha sufrido muchos cambios a lo largo del tiempo, es una serie temporal que tiene muchos errores que no han sido filtrados.

La Tabla 3 muestra las coordenadas de los puntos de control y de los datos altimétricos de la Estación Guaqui. La altimetría se encuentra referida al datum vertical oficial de la Red Altimétrica del IGM de Bolivia, que corresponde al nivel medio del mar del mareógrafo de Arica, Chile.

Tabla 3
Establecimiento de Benchmarks, referidos
al datum vertical de Arica, Chile

Marca	Cota Altimétrica (msnm)	Observaciones
BM38	3 810.988	TGBM
RN01	3 811.025	TGAR
RN02	3 811.222	TGAR
Cero Regla	3 807.191	Cero de la regla limnimétrica
Cero Sensor	3 807.561	Cero del sensor de presión

El registro hidrométrico en la nueva estación Guaqui se inició con la lectura del 8 de agosto de 2018 a las 13:00 horas (H-4, Hora oficial de Bolivia), que se corresponde con una lectura en la regla limnimétrica de 1.08 m equivalente a 3 808.271 msnm. Hay que tomar en cuenta que en estas lecturas no se aplica ninguna corrección por efectos meteorológicos o efecto de barómetro invertido (Muñoz & Abarca, 2009), sin embargo, con los datos registrados por el sensor podremos obtener una serie temporal muy precisa, con frecuencia de observación constante, libre de errores humanos y que nos permitirá corregir la serie temporal que se ha registrado por medios mecánicos y analógicos desde 1973.

La recuperación de las observaciones históricas de los niveles del lago Titicaca y su disponibilidad para la comunidad científica es importante, para los temas de la investigación climática actual. Sólo unas pocas estaciones en todo el mundo tienen series temporales lo suficientemente largas para proporcionar información y que coadyuven al estudio de los cambios de niveles en lagos que se puedan utilizar para predicciones y estudios a nivel local o regional en su relación con el cambio climático.

Hay que tomar en cuenta que para el mantenimiento de la serie temporal del lago entre 1973 y 2018, el SNHN ha dedicado muchos esfuerzos a todo el proceso de su mantenimiento, sin embargo y pesar de todo se tienen saltos en la serie y errores de lectura por parte de los observadores, pero todas estas mediciones manuscritas del nivel del lago se encuentran almacenadas en los libros de registro originales y han sido digitalizadas y pasadas a formato electrónico para su registro, análisis y estudio.

A pesar de todos los errores y contratiempos en el mantenimiento de los archivos históricos de esta serie temporal, sin embargo, es importante destacar que ellos permitieron el establecimiento de un datum vertical local único y estable que hasta la fecha ha sido utilizado como referencia en trabajos hidrográficos, limnológicos y medioambientales.

Aunque la recuperación de las observaciones históricas es a veces difícil y tediosa, la información que proporcionan es única y original, y por lo tanto es muy valiosa y relevante para la investigación actual y futura. Esto debido a la escasez de observaciones de niveles de lagos en el mundo y que se remontan a más de un siglo y debido a la complejidad de lo espacial y a la variabilidad temporal y estacional de los niveles en los lagos, estas mediciones históricas, independientemente de las fuentes y los errores que lleven consigo, son un complemento valioso para la comprensión actual de los cambios de los niveles, los patrones que siguen y su relación con el cambio climático. De todo, esto lo más importante es el hecho de que si no se hacen esfuerzos con el objetivo de la recuperación, mejoramiento y el estudio del control de calidad de estos datos, que son únicos, se corre el riesgo de que los mismos puedan perderse definitivamente, siendo este un tema de gran preocupación en la comunidad científica.

El estudio de los niveles del lago, también es una fuente de datos muy interesante para otros estudios complementarios como la validación de series reconstruidas y que tengan datos heterogéneos que ayudarán a interpretar y conocer los patrones en la variabilidad de los niveles del lago o cambios en las componentes de los niveles del lago debido a factores meteorológicos y astronómicos. Por lo tanto, estamos seguros que cualquier esfuerzo dedicado a la recuperación, mantenimiento y control de calidad de los niveles del lago Titicaca, es un esfuerzo muy valioso y que será un gran soporte a la investigación de los niveles del lago, tanto a de manera local, como regional y global.

Conclusiones

Los trabajos de campo y de gabinete se efectuaron cumpliendo con el Plan de Trabajo presentado en el proyecto.

Después de cerca de 13 años se reinstaló la regla limnimétrica en la estación "GUAQUI", utilizando equipos de última generación para la lectura de los niveles del lago, en este caso el sensor AQUAlogger PT520 y se están monitoreando los niveles desde el 8 de agosto del 2018, asegurando de esta forma la adquisición y almacenamiento de datos digitales de los niveles del lago de forma continua y precisa.

A pesar de que la nueva estación GUAQUI dispone de un sistema de registro automático de datos, es necesario seguir contando con el apoyo del personal de la Armada Boliviana, tanto del Cuarto Distrito Naval "Titicaca" así como de la UOS "NAVTUR", para todo lo que es la seguridad de los equipos, al encontrarse en sus predios, además del apoyo que se requerirá para el mantenimiento y la lectura y descarga de datos.

Para la referenciación altimétrica, los datos del BM N° 38, fueron proporcionados por el Departamento de Hidrografía del SNHN. Se establecieron dos nuevas marcas de nivel para el control altimétrico de los datos de niveles del lago, los Benchmarks RN-01 "GUAQUI" y RN-02 "NAVTUR", que se han monumentado y georreferenciado al datum vertical del mareógrafo Arica-Chile, que además del control altimétrico de los niveles, permitirá en caso necesario la reinstalación y/o recuperación de la regla limnimétrica de la estación en caso de avería o destrucción, con la misma referencia altimétrica.

Mediante los cursos de capacitación, impartido tanto en las oficinas centrales del SNHN como en el área de trabajo, el personal técnico del SNHN, se encuentra capacitado tanto para el manejo del software AQUAtalk que permitirá la descarga y procesamiento de datos del mareógrafo, así como las técnicas para el reemplazo del sensor en forma periódica.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido posible a la financiación del proyecto GEOF 04 2018, "Modernización de la red de monitoreo hidrológico en el lago Titicaca (RMHLT),

Lago Menor o Huiñaymarca”, financiado por el Instituto Panamericano de Geografía e Historia (IPGH), a través de la Sección Nacional del IPGH en Bolivia y copatrocinado por la Universidad de Cádiz (UCA) y el Servicio nacional de Hidrografía Naval de Bolivia (SNHN).

Los autores agradecen al doctor Juan Carlos García Galindo, Director General de Relaciones Internacionales de la Universidad de Cádiz y al doctor Casimiro Mantell, Vicerrector de Investigación de la Universidad de Cádiz por sus gestiones y apoyo al proyecto a través de la financiación de la movilidad del investigador UCA hasta el área de trabajo. Asimismo, nuestro agradecimiento al Capitán de Navío Juan Pablo Montero Villegas, Director General del Servicio Nacional de Hidrografía Naval, por su apoyo en los trabajos de campo para instalación de equipos, movilidad del equipo de investigadores en el área de trabajo y toma de datos durante la ejecución del proyecto.

También agradecer al Comandante de la UOS NAVTUR y al personal de su unidad por su apoyo con personal y medios durante la instalación de la estación limnimétrica de Guaqui.

Bibliografía

- Berrococo, M., Enríquez de Salamanca, J.M.; Ramírez, M.E.; Fernández-Ros, A. & Jigena, B., 2007. "Determination of a local geoid for Deception Island", in Cooper, A., Raymond, C. & The 10th ISAES Team (eds.), *Antarctica: a keystone in a changing world*, Washington, D.C., The National Academies Press, Extended Abstract, 123, 4 pp.
- Chamorro de Rodríguez, G.I., 2008. "Guía de hidrometría de aguas superficiales. Medición del nivel de agua", separata SENAMHI/DGH No. 001-2008, Lima, Perú, 25 pp.
- Jigena, B.; Manani, R.; Muñoz-Perez, J.J.; Walliser, J.; Calderay, F. & Berrococo M., 2018. "Methodology for hydrological information management in waterways: Application to Bolivia", *Tecnología y Ciencias del Agua*, 9(4), 236-255.
- Jigena, B.; Vidal J. and Berrococo, M., 2014. "Determination of the mean sea level at Deception and Livingston islands, Antarctica", *Antarctic Science*, 27(1): 101-102. DOI: <https://www.doi.org/10.1017/S0954102014000595>.
- Jigena, B.; Vidal, J. and Berrococo, M., 2015. "Determination of the tide constituents at Livingston and Deception Islands (South Shetland Islands, Antarctica), using annual time series", *Dyna*, 82(191): 209-218, June, Medellín. DOI: <http://dx.doi.org/10.15446/dyna.v82n191.45207>
- Muñoz Pérez, J.J. & Abarca Molina, J.M., 2009. "Influencia del viento y de las variaciones de la presión atmosférica en el nivel del mar de marismas y estuarios", *Revista de Obras Públicas*, núm. 3.505.
- Organización Meteorológica Mundial (OMM), 1994. *Guía de prácticas hidrológicas. adquisición y proceso de datos, análisis, predicción y otras aplicaciones*, Publicación OMM No. 168, quinta edición, 781 pp.

- Servicio Nacional de Hidrografía Naval de Bolivia, (SNHN), 2007. *Hidrografía de Bolivia*, ed. Servicio Nacional de Hidrografía Naval, segunda edición, La Paz, Bolivia, 403 pp.
- , 2014. *Memoria Hidrométrica 2001-2014*, La Paz, Bolivia.
- , 2017. Portal del Servicio Nacional de Hidrografía Naval, <http://hidronav.org/vision/>
- Vidal, J.M., Berrocoso, M. & Fernández-Ros, A., 2012. "Study of tides and sea levels at Deception and Livingston islands, Antarctica", *Antarctic Science*, 24: 193-201.

Análisis morfotectónico y gravimétrico en un valle intermontano de la Precordillera Central de San Juan, Argentina

L.P. Perucca¹
F. Audemard M.²
J.M. Alcacer Sánchez³
M. Rothis⁴
M. Vargas⁵
F. Haro⁶
F. Tejada⁷
P. Blanc⁸
N. Vargas⁹
G. Lara¹⁰
M. Onorato¹¹

Recibido el 8 de marzo de 2019; aceptado el 5 de julio de 2019

Resumen

En este trabajo se efectúa un análisis morfotectónico y gravimétrico de la cuenca del río Talacasto, en Precordillera Central, con énfasis en el río de La Burra. Se describen además las principales estructuras con evidencia de actividad

-
- ¹ Gabinete de Neotectónica y Geomorfología (INGEO), Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de San Juan (FCEFYN-UNSJ), Argentina. Centro de Investigaciones de la Geósfera y Biósfera (CIGEOBIO-CONICET), Argentina. Correo electrónico: lperucca@unsj-cuim.edu.ar
 - ² Funvisis Earth Sciences Dept., Venezuelan Foundation for Seismological Research, Venezuela. Correo electrónico: faudemard@gmail.com
 - ³ Gabinete de Neotectónica y Geomorfología (INGEO), Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de San Juan (FCEFYN-UNSJ), Argentina. Centro de Investigaciones de la Geósfera y Biósfera (CIGEOBIO-CONICET), Argentina. Correo electrónico: alcacersanchez@gmail.com
 - ⁴ Gabinete de Neotectónica y Geomorfología (INGEO), Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de San Juan (FCEFYN-UNSJ), Argentina. Centro de Investigaciones de la Geósfera y Biósfera (CIGEOBIO-CONICET), Argentina. Correo electrónico: marothis@gmail.com
 - ⁵ Gabinete de Neotectónica y Geomorfología (INGEO), Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de San Juan (FCEFYN-UNSJ), Argentina.
 - ⁶ Gabinete de Neotectónica y Geomorfología (INGEO), Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de San Juan (FCEFYN-UNSJ), Argentina. Centro de Investigaciones de la Geósfera y Biósfera (CIGEOBIO-CONICET), Argentina. Correo electrónico: federicoharo58@gmail.com
 - ⁷ Gabinete de Neotectónica y Geomorfología (INGEO), Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de San Juan (FCEFYN-UNSJ), Argentina. Centro de Investigaciones de la Geósfera y Biósfera (CIGEOBIO-CONICET), Argentina. Correo electrónico: flaviatejada@gmail.com
 - ⁸ Gabinete de Neotectónica y Geomorfología (INGEO), Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de San Juan (FCEFYN-UNSJ), Argentina. Centro de Investigaciones de la Geósfera y Biósfera (CIGEOBIO-CONICET), Argentina. Correo electrónico: pabloandresblanc@gmail.com
 - ⁹ Gabinete de Neotectónica y Geomorfología (INGEO), Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de San Juan (FCEFYN-UNSJ), Argentina. Correo electrónico: nicolasvargas2003@yahoo.com.ar
 - ¹⁰ Gabinete de Neotectónica y Geomorfología (INGEO), Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de San Juan (FCEFYN-UNSJ), Argentina. Correo electrónico: gabyge21@hotmail.com
 - ¹¹ Gabinete de Neotectónica y Geomorfología (INGEO), Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de San Juan (FCEFYN-UNSJ), Argentina. Correo electrónico: onoratomariaromina@gmail.com

tectónica cuaternaria. La morfología irregular de la cuenca y la diversidad de depósitos aluviales encontrados a lo largo del río de La Burra (colector principal de la cuenca) permitieron inferir que la misma se encuentra en un ambiente tectónico activo con fuertes controles litológicos y estructurales. Las principales fallas descritas se ubican en el piedemonte oriental de la Sierra de La Crucecita, y occidental de la sierra de Talacasto ($30^{\circ} 54' - 31^{\circ} S$ y $68^{\circ} 47' - 68^{\circ} 55' O$), unos 70 km al noroeste de San Juan, en el Departamento Ullum. Las mismas se denominaron de norte a sur: Las Crucecitas y Vertientes (en el piedemonte oriental de la sierra de La Crucecita) y el sistema de falla Talacasto occidental (piedemonte occidental de la sierra homónima). Las fallas afectan depósitos asignados al Pleistoceno tardío y Holoceno y muestran en las exposiciones naturales identificadas, rasgos típicos de ambientes compresivos y que evidencian su actividad cuaternaria. Las estructuras identificadas coinciden con el estilo estructural de tectónica de piel delgada de vergencia oriental, característico de Precordillera Central. Además, se identificó un control estructural sobre el río de La Burra, con la generación de al menos tres terrazas de erosión sobre su margen izquierda. Esta deformación se vincula con el tectonismo activo que a escala regional afectó y afecta al ámbito precordillerano. Finalmente, se identificaron las principales estructuras geológicas a partir del análisis e interpretación de las anomalías gravimétricas, empleando datos obtenidos de WGM12 (World Gravity Map, 2012), que incluye datos de gravedad terrestre y satelital derivados del modelo EGM2008. La respuesta gravimétrica del basamento que compone el área en estudio, muestra una correlación con la estructura superficial y podría estar asociada a los diferentes dominios morfotectónicos reconocidos en la región.

Palabras clave: *cabalgamiento, vergencia oriental, piel delgada, geoformas, La Burra, Talacasto, Cuaternario.*

Abstract

In this work, we have made a morphometric analysis of the Talacasto river basin (Central Precordillera), with emphasis on the La Burra River. The main structures with evidence of Quaternary tectonic activity are also described. The irregular morphology of the basin and the diversity of alluvial deposits found along the La Burra River allow the authors to infer that it is in an active tectonic environment with strong lithologic and structural controls. These main structures are located in the eastern piedmont of the Sierra de la Crucecita, and western piedmont of the sierra de Talacasto ($30^{\circ} 54' - 31^{\circ} S$ and $68^{\circ} 47' - 68^{\circ} 55' W$), about 70 km northwest of San Juan, in the Ullum Department. The faults located in both piedmonts are named from north to south: Las Crucecitas and Vertientes (in the eastern piedmont of the La Crucecita range) and the Western Talacasto fault system (in the western piedmont of the homonymous range). The faults affect alluvial deposits assigned to the Late Pleistocene and Holocene and show typical features of ongoing compressional Quaternary tectonic activity in the evaluated

natural exposures. Faults exhibit the east-verging thin-skinned structural style typical of Central Cordillera. This deformation is related to the regional tectonics that affected and currently affects the Cordilleran region. Finally, the main geological structures were identified by the analysis and interpretation of gravimetric anomalies, employing data obtained from WGM12 (World Gravity Map 2012), which includes earth and satellite gravity data derived from the EGM2008 model. The gravimetric response of the crustal blocks that compose the study area shows a correlation with the outcropping crustal structure and could be associated to the different morphotectonic domains recognized in the region.

Key words: thrusting, eastern vergence, thin-skinned tectonics, landforms, La Burra, Talacasto, Quaternary.

Introducción

El área de estudio se ubica en el centro de la Provincia de San Juan, Argentina, entre los 30° 54' y 31° 00'S y 68° 55' y 68° 45' O, Departamento de Ullum, a unos 70 km al noroeste de la capital de San Juan (Figuras 1a, b). La zona corresponde a la provincia geológica de Cordillera Central, en el borde oriental de la sierra de La Crucecita y occidental de la sierra de Talacasto. Los ríos y arroyos ubicados en los piedemontes de ambos cordones montañosos drenan hacia el sur, a partir de una divisoria de aguas ubicada al oeste del bolsón de Gualilán, por el río de La Burra hasta el río Talacasto (Figura 1c). Las deformaciones cuaternarias identificadas en ambos piedemontes modifican la red de drenaje, ya que los pequeños arroyos tributarios son susceptibles a las variaciones, aún las sutiles de la topografía, en función de su tasa de erosión (Audemard, 1999).

El diseño del drenaje en el área de estudio es el resultado de una combinación de factores climáticos, tectónicos, litológicos, geomorfológicos, de suelo y vegetación. Este patrón no sólo responde a las condiciones presentes, sino que hereda las condiciones de modelados anteriores. Las diferencias identificadas en el drenaje se deben a la combinación de estos factores y al predominio de uno de ellos. Por ello, las características de la red de drenaje en el río Talacasto varían de acuerdo con el sector analizado, respondiendo principalmente a controles geológicos y geomorfológicos. Los ríos son de carácter efímero y solamente llevan agua durante las lluvias torrenciales que ocurren esporádicamente durante los meses de verano del hemisferio austral (diciembre-marzo).

Existen en el área muy escasos antecedentes referidos a estructuras neotectónicas en la depresión. En tal sentido, Casa *et al.* (2011, 2014) mencionaron algunas estructuras en el piedemonte occidental de la sierra de Talacasto, aunque no indicaron su cinemática ni los niveles aluviales afectados. De igual manera, Perucca y Vargas (2014) describieron una exposición natural ubicada

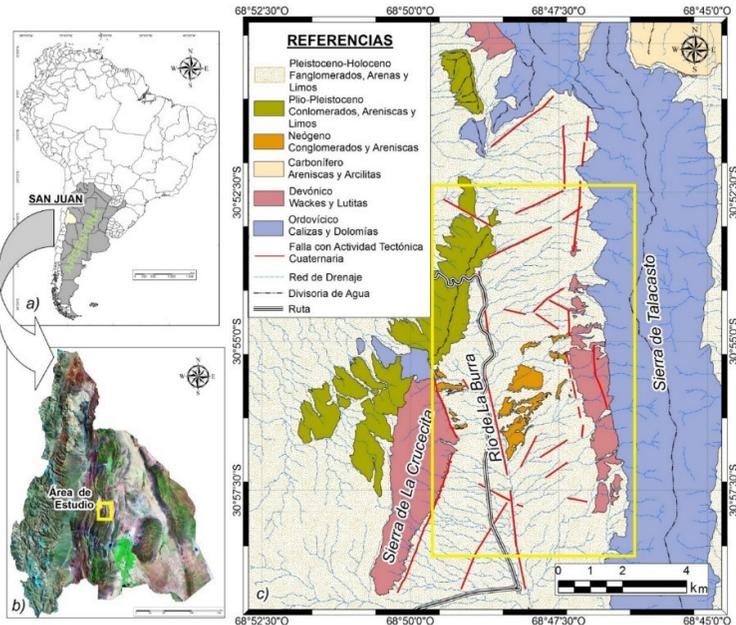


Figura 1. a) y b) Ubicación del área de estudio en San Juan y Argentina, c) Geología del área de estudio (modificado de Furque et al., 1998). El recuadro identifica la ubicación de la figura.

en la porción norte del piedemonte oriental de la sierra de La Crucecita, en donde identificaron una falla inversa buzante al oeste a la cual denominaron falla Las Crucecitas, mientras Levina *et al.* (2014) evaluaron el relleno cenozoico del sector frontal de la cuenca de antepaís de Precordillera en tres quebradas ubicadas a lo largo del río San Juan (una de ellas, el río de La Burra) concluyendo que las tres sucesiones neógenas ubicadas en estas depresiones registran la construcción interna de Cordillera Frontal, el volcanismo de arco regional y la exhumación inicial de la Precordillera. Los cambios de procedencia registrados en la edad del zircón detrítico sugirieron un acortamiento inicial en la Cordillera Frontal que coincidió con el cambio de acumulación eólica a fluvial en la cuenca de antepaís adyacente, durante el Mioceno temprano (24-17 Ma) y consideraron entre los 12 y 9 Ma, como la probable edad de exhumación inducida por el empuje y levantamiento de la Precordillera (Levina *et al.*, 2014).

Allis (2016), por su parte, analizó el piedemonte oriental de la sierra de la Crucecita e identificó estructuras con evidencia de actividad neotectónica, mientras Ocaña *et al.* (2017) presentaron un mapa geomorfológico del abanico aluvial del río Talcasto e indicaron algunos procesos geomorfológicos dinámicos y potencialmente destructivos para la infraestructura pública.

En este trabajo se realizó un análisis morfométrico y morfotectónico de la cuenca del río Talacasto, con énfasis en el tributario del río de La Burra. Además se efectuó un análisis neotectónico en los piedemontes ubicados en el valle del río de La Burra, en los que se identificaron las principales fallas con actividad tectónica cuaternaria. Por otro lado, se intentó definir las estructuras geológicas del área basadas en el procesamiento y análisis de datos gravimétricos satelitales, los cuales tienen la ventaja de que permiten ver las variaciones de densidad en el subsuelo con buena estabilidad espacial y sin perturbaciones por aproximaciones matemáticas. De esta forma se intenta determinar si existe una correspondencia entre las unidades morfotectónicas identificadas en superficie y su continuidad en subsuelo basada en el procesamiento y análisis de los datos gravimétricos.

Se intenta de esta forma mejorar el conocimiento sobre las estructuras activas situadas en la depresión intermontana cercanas a la ciudad de San Juan (población > 700 000 habitantes) y cerca de las principales presas hidroeléctricas de la región.

Marco tectónico

En el marco geotectónico actual de convergencia entre las placas de Nazca y Sudamericana, correspondiente al sector sur de Los Andes Centrales, el segmento de subducción comprendido entre los 28° y los 33° de latitud sur, asume una disposición subhorizontal (e.g., Jordan *et al.*, 1983). Éste se caracteriza por la ausencia de volcanes activos y por una intensa actividad sísmica (e.g., Cahill e Isacks, 1992) atribuida a la presencia de importantes fallas activas que afectan a los depósitos aluviales cuaternarios, generando cabalgamientos notables de las secuencias neógenas sobre esos depósitos. De esta forma, numerosas evidencias de deformaciones cuaternarias han sido descritas a estas latitudes (Perucca *et al.*, 1999; Costa *et al.*, 2000; Perucca *et al.*, 2012, 2014a, b; 2015; Perucca y Vargas, 2014; Audemard *et al.*, 2016; Rimando *et al.*, 2019, entre otros).

La provincia geológica Precordillera es un orógeno paleozoico que ha sido subdividida, según su estilo estructural en Precordillera Occidental, Central y Oriental (Ortiz y Zambrano, 1981). El área de estudio se ubica en el ámbito de Precordillera Central, que constituye una faja plegada y corrida de carácter epidérmico, con una marcada vergencia hacia el este (Zapata y Allmendinger, 1996; Ramos, 1999), establecida sobre rocas sedimentarias paleozoicas como resultado de la migración hacia el este del frente orogénico (Ramos, 1988), con cordones montañosos que se desarrollan a lo largo de toda la Provincia de San Juan con rumbo N-S. Estos corrimientos forman un abanico imbricado hacia el antepaís (Boyer y Elliot, 1982) donde las láminas imbricadas antiguas se disponen sobre las más nuevas produciendo un aumento progresivo de las inclinaciones originales de las fallas hacia el oeste e incluso el vuelco de los planos de corrimiento (von Gosen, 1992). A pesar del aumento de la inclinación de las fallas, los ángulos de corte de las mismas se mantienen entre 20° y 30° O. Esto implicaría que los

ángulos actuales de las fallas son secundarios y adquiridos por una rotación diferencial que se incrementa hacia el oeste (von Gosen, 1992). A este esquema hay que adicionar la existencia de corrimientos fuera de secuencia como lo es el sistema de falla La Cantera, que constituye un conjunto de corrimientos de bajo ángulo que dispone rocas del Neógeno de la Formación Pachaco sobre depósitos aluviales del Pleistoceno tardío a Holoceno tardío. Este sistema se ubica al oeste de la zona de estudio, sobre el piedemonte occidental de la sierra de La Cantera y su actividad tectónica es al menos holocena (Perucca *et al.*, 2014a, b; 2015).

Metodología

El análisis geomorfológico y estructural se realizó utilizando datos topográficos, trabajo de campo e imágenes satelitales digitales (Landsat 7-TM y SPOT 5). Se utilizó la hoja geológica publicada por el Servicio Geológico Minero de Argentina (Furque *et al.*, 1998) a escala de 1: 250 000 para determinar la litología que se cartografió en la pantalla en un entorno GIS (en formato vectorial) y luego se verificó mediante el trabajo de campo.

La determinación del orden de la cuenca se basó en la metodología propuesta por Strahler (1964). La longitud del cauce principal (Lcp) y la longitud de la cuenca (L), fueron obtenidas de acuerdo con Schumm (1956). La delimitación de la cuenca y el cálculo de los parámetros morfométricos fueron realizados mediante el uso de *Google Earth Pro* y de *SAGA GIS*. Los parámetros morfométricos fueron divididos en parámetros básicos tales como: área (A), perímetro (P), longitud (L), orden de la cuenca (On), altura máxima y mínima (H, h), longitud total de cauces (Ltc), longitud de cauce principal (Lcp); y parámetros derivados, obtenidos a partir de las siguientes ecuaciones:

- Relación de elongación: $Re = (\sqrt{4A/\pi})/L$ (Schumm, 1956)
- Factor de forma: $Ff = A/L^2$ (Horton, 1932)
- Sinuosidad del cauce: $S = Lcp/L$ (Schumm, 1977)
- Ancho medio: $Wm = A/L$
- Desnivel de cuenca: $Hr = H - r$ (Hadley y Schumm, 1961)
- Razón de relieve: $Rr = Hr/L$ (Schumm, 1956)
- Densidad de drenaje: $Dd = Ltc/A$ (Horton, 1932)
- Coeficiente de compacidad: $Kc = 0,28x p/\sqrt{A}$
- Relación de circularidad: $Rci = 4\pi A/p^2$

Por otro lado, los índices morfotectónicos se incluyen entre las técnicas morfométricas y se desarrollaron como una herramienta de reconocimiento básico para identificar áreas que experimentan rápida deformación tectónica. Se calculan a partir de información topográfica, de fotografías aéreas y de modelos digitales de elevación (DEM) (Keller y Pinter, 2002).

Otro de los índices geomorfológicos utilizados en este trabajo para analizar la evidencia de tectónica activa es la sinuosidad del frente montañoso (Smf) y la asimetría de la cuenca de drenaje (AF). Los índices son combinados, con otra información como tasas de levantamiento a partir de dataciones, para clasificar los grados de actividad tectónica relativa de un área (Keller y Pinter, 2002).

La elaboración del mapa geomorfológico permitió integrar todos estos datos y caracterizar la geomorfología del sector y las estructuras que afectan a ambos piedemontes. Las tareas de campo consistieron en un análisis de las exposiciones naturales identificadas en los cauces que atraviesan las fallas Las Crucecitas y Talacasto occidental, a fines de conocer la cinemática de la falla y los niveles aluviales afectados; lo último para definir, la edad relativa de actividad de los accidentes tectónicos.

Por otra parte, se cubrió el área bajo estudio con la base de datos de gravedad obtenida a partir del WGM12 (*World Gravity Map*, 2012). El WGM es el primer conjunto de mapas de anomalías de gravedad global que tienen en cuenta un modelo realista de la Tierra y que considera la contribución de la mayoría de las masas superficiales (atmósfera, tierra, océanos, mares interiores, lagos, capas de hielo y plataformas de hielo (Bonvalot *et al.*, 2012). El WGM denota un conjunto de mapas de anomalías de gravedad de alta resolución y cuadrículas digitales computadas a escala global a partir de los modelos disponibles de gravedad de la Tierra y modelos de elevación de referencia. La versión 1.0 (WGM12) incluye un conjunto de tres mapas de anomalías (anomalía de aire libre, de Bouguer completa e isostática) derivado del modelo de gravedad global EGM2008 y el modelo de relieve global ETOPO1 (Bonvalot *et al.*, 2012).

La información de gravedad utilizada se deriva del modelo EGM2008, que fue desarrollado en armónicos esféricos hasta el grado 2160 por la Agencia Nacional de Inteligencia Geoespacial (NGA). El modelo EGM2008 incluye mediciones de gravedad de superficie (a partir de estudios terrestres, marinos o aéreos), altimetría satelital y gravimetría satelital (Misión GRACE). Las anomalías de gravedad se utilizan para investigar la distribución de densidad de masa del interior de la Tierra para proporcionar más claridad en el reconocimiento de las estructuras geológicas en el subsuelo, desde la corteza hasta las profundidades del manto superior (Bonvalot *et al.*, 2012).

La anomalía del aire libre se calculó en la superficie de la Tierra en el contexto de la teoría de Molodensky (Heiskanen y Moritz, 1967) e incluye correcciones para la masa de la atmósfera. La anomalía de Bouguer completa resultante, refleja la perturbación entre la gravedad observada y la calculada para un modelo de Tierra de referencia dado en un punto particular P. También se define a partir de la anomalía de aire libre (Δg_{FA}). La anomalía esférica completa de Bouguer se determina en toda la Tierra al calcular en un sólo paso la contribución de la gravedad de todas las masas superficiales por encima o por debajo de la superficie media del mar (Balmino *et al.*, 2011). La anomalía de la gravedad

esférica de Bouguer en un punto P de la superficie de la Tierra (Balmino *et al.*, 2011) viene dada por:

$$\Delta g_B = \Delta g_{\text{surface free-air}} - \Delta g_{\text{surface masses}} = g_{\text{obs}}(P) - \gamma(Q) + \delta g_{FC} - \delta g_{TOP} + \delta g_{Atm}$$

De la misma manera, la contribución de su compensación en el límite corteza-manto también se calcula en geometría esférica sobre la base del equilibrio isostático (modelo Airy-Heiskanen) para determinar la correspondiente anomalía isostática. Se utilizó un enfoque armónico esférico para proporcionar cálculos globales homogéneos y precisos de las correcciones de gravedad y anomalías hasta el grado 10 800 (resolución espacial equivalente de media longitud de onda de $1 \times 1'$). Los mapas de aire libre, Bouguer y anomalía isostática se cuadraron de acuerdo con el método de curvatura mínima con una grilla de 1.5 km, utilizando el software Oasis Montaj. De acuerdo con la propuesta de Hinze, se consideró una densidad de 2.67 g/cm^3 para las rocas de la corteza superior. Los datos de gravedad cubren la región analizada y sus sectores limítrofes. Para eliminar los efectos de borde, se realizó una expansión de datos. Es bien sabido que la anomalía de Bouguer contiene la suma de los efectos gravimétricos de diferentes fuentes y existen muchas técnicas que permiten una separación adecuada de los mismos. El mapa de anomalías de Bouguer contiene dos efectos: uno regional (atribuido a la corteza inferior y el manto) y otro residual (atribuido a la corteza superior e intrabasamento). Para separar las anomalías de la gravedad regional de las residuales, asumimos que una anomalía regional es causada por fuentes que tienen una amplia extensión horizontal, son profundas en términos de la profundidad hasta la parte superior de las fuentes, y tienen una profundidad similar. Del mismo modo, se asume que una anomalía residual es producida por fuentes que están limitadas en extensión horizontal, son poco profundas y que tienen profundidades diferentes de las anomalías profundas pero similares entre sí.

Para obtener el mapa de anomalías de Bouguer regional, los datos de la grilla se filtraron con un pasabanda (*Band pass*), rechazando todas las longitudes de onda superiores a 11 km e inferiores a 3 km. Se obtuvo un gráfico de anomalías residuales que resta la anomalía regional estimada obtenida de la anomalía de Bouguer completa.

Marco geológico

La unidad más antigua que aflora en el área de estudio (Figura 1c) corresponde a la unidad carbonática integrada por calizas macizas, calizas lajosas y margas de edad tremadociana superior a llanvirimiana inferior. Por encima se ubican areniscas y lutitas de edad silúrica. El Devónico está representado por lutitas y areniscas dispuestas en discontinuidad estratigráfica sobre las rocas del Silúrico. Éstas son cubiertas, en discordancia erosiva o en paraconcordancia, por depósitos

carboníferos, unos 100 m de conglomerados y areniscas de tonalidades verdes grisáceas (Furque, 1983).

El Neógeno en el área de estudio está expuesto en ambos piedemontes del área de estudio y con un espesor estimado en 1 000 m, constituido por depósitos eólicos y de ambiente aluvial y fluvial, con areniscas finas a medianas y limolitas intercaladas con conglomerados. Levina *et al.* (2014) señalaron edades entre 24.0 ± 1.2 Ma y 14.0 ± 1.6 Ma para estos depósitos.

En el piedemonte oriental de la sierra de La Crucecita de este a oeste, afloran estratos neógenos con un rumbo N 50° E y buzamiento 10° O, que hacia el oeste aumentan a 45° O hasta inclinar 70°E, formando un sinclinal fallado en su flanco occidental por una falla inversa con azimut 160° y buzamiento 47° a 67° O que levanta las rocas del Devónico sobre rocas del Neógeno (Figura 1c).

En el piedemonte occidental de la sierra de Talacasto, los estratos del Neógeno poseen un rumbo variable de N4° E, N16° E y N-S e inclinan entre 40 y 45° O, en las proximidades al río de La Burra. Hacia el oeste, el rumbo de los estratos es N8° O y el buzamiento aumenta a 70° O hasta cubrir en discordancia angular las rocas de edad devónica, con azimut 355° y buzamiento 60° O por la elevación de la sierra de Talacasto que habría generado el basculamiento de toda la cuenca neógena (Figura 1c).

Por encima de los estratos neógenos y en discordancia erosiva se colocan los depósitos aluviales pleistocenos y holocenos, constituidos por fanglomerados y conglomerados mal seleccionados, con clastos angulosos a subangulosos de diferentes tamaños provenientes de las sedimentitas paleozoicas y cenozoicas. Su matriz es arenosa, de granulometría gruesa y frecuentemente la sucesión tiene intercalaciones lenticulares de areniscas gruesas.

Finalmente se mencionan los depósitos actuales de los cauces fluviales provenientes de los diferentes cordones y que se dirigen hacia el río de La Burra, similares a los anteriormente descritos (Figura 1c).

Marco geomorfológico

En el sector de estudio se identificaron tres unidades morfoestructurales principales, montañosa, de transición y deprimida (Figura 2).

La Unidad Montañosa está conformada por los relieves positivos elevados por falla de las sierras de La Crucecita por el oeste y Talacasto por el este.

La sierra de La Crucecita posee un rumbo NNE con sus mayores elevaciones en el sector central (2 024 msnm), y 5 km de ancho promedio. Constituye un importante relieve positivo que aporta material detrítico hacia el sector este. Este cordón está constituido por rocas sedimentarias del Paleozoico y se caracteriza por tener una pendiente suave en su ladera occidental, mientras que la oriental posee una morfología abrupta debido a la presencia de la falla que levanta las secuencias del Devónico superior por sobre el Neógeno.

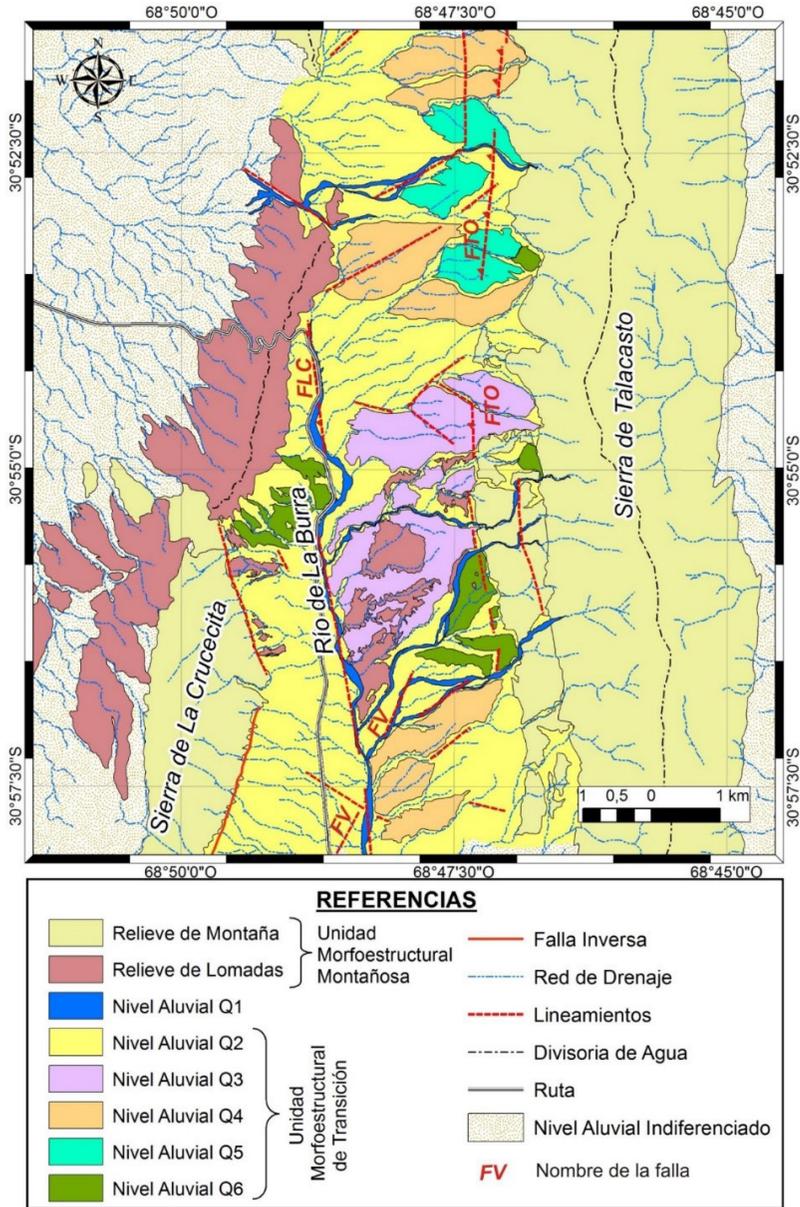


Figura 2. Mapa geomorfológico del área de estudio. Se señalan las tres fallas cuaternarias principales reconocidas: Falla Las Crucecitas, FLC; Falla Talacasto Occidental, FTO; y Falla Vertientes, FV.

en su porción central la pendiente promedio es de 12.5%, y en el sector sur la pendiente alcanza apenas un 7% promedio, con una extensión mayor que los sectores anteriores. Por otro lado, el piedemonte occidental de la sierra de Talacasto posee un ancho promedio de 2 km, que queda reducido a menos de 500 m en su extremo sur, con una pendiente que varía entre 10% en la parte norte y 5% en la porción central y sector sur.

El piedemonte está formado por abanicos aluviales que se forman por la acumulación de detritos a partir de los materiales procedentes de la erosión de los altos estructurales (relieve montañoso y de lomadas). En la formación de los mismos el clima representa un papel esencial, ya que en regiones de clima húmedo son poco frecuentes, mientras que en las zonas de clima árido, la escasez de la vegetación sobre el relieve permite la disgregación de éste en fragmentos que se acumulan y extienden al pie de los macizos. Los niveles aluviales sobreyacen a sedimentitas glaciplanizadas del Neógeno, destacándose las superficies tope de las unidades cuaternarias más antiguas por encontrarse también planizadas formando glacia o rampas detríticas.

En ambos piedemontes se identificaron cinco niveles aluviales en función de su posición topográfica, grado de incisión y presencia de barniz del desierto, además y por encima del nivel actual. El nivel más antiguo fue identificado como Q5 y el nivel actual como Q1 (Figura 2). Sin embargo, estos cinco niveles no se desarrollan a lo largo de todo el piedemonte oriental de la sierra de La Crucécita. Por ejemplo, los mismos son claramente identificables en la porción norte donde aflora el Neógeno. Este cambio se produce en coincidencia con una fuerte inflexión del frente montañoso de la sierra controlado por fallas, desde un rumbo N 20° E a N 20° O. Hacia el sur de los 30° 56', solamente se reconocen los niveles Q1 y Q2 (Figura 2).

El diseño de la red de drenaje para la cuenca del río Talacasto es subdendrítico y presenta en algunos sectores, evidencias de control estructural (Figura 3a, b). Se asume en general la presencia en el área de materiales homogéneos, no consolidados o suelos. El control estructural de algunos tributarios se manifiesta por ángulos de confluencia rectos, el cual se desarrolla siguiendo estratificación, fallas, fracturas y diaclasas.

Se observa un alto grado de integración ya que, si se eligen dos puntos cualesquiera del sistema, pueden vincularse entre sí sin necesidad de abandonar los cauces.

La cuenca del río Talacasto es de 6° orden según la clasificación de Strahler (1964; Figura 3a). Los ríos de orden 1, 2, 3 y el río principal (antecedente) de orden 6 presentan orientación E-O, mientras que los cauces de orden 4 y 5 tienen una marcada orientación N-S, paralela a los principales cordones montañosos, elevados por falla. Esta cuenca cubre una superficie (A) de aproximadamente 269.63 km², valor que permite considerarla como una cuenca grande (Villon, 2002). Además posee un perímetro (P) de 97.09 km, una longitud

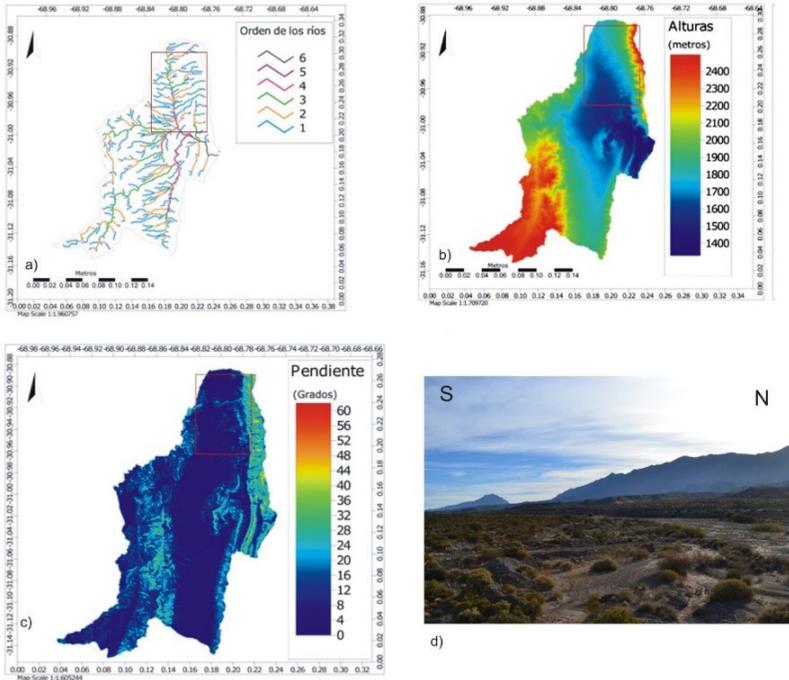


Figura 3. a) Cuenca del río Talacasto y número de orden (el recuadro rojo identifica la ubicación de la Figura 2), b) Mapa de elevaciones, c) Mapa de pendientes, d) Vista al suroeste del valle del río de La Burra.

total de 23.17 km y un ancho medio (Wm) de 11.63 km. La longitud de su cauce principal (Lcp) es de 37.15 km mientras que la longitud total de todos sus cauces (Ltc) es de 849.09 km.

Las elevaciones en la cuenca (Figura 3b) muestran valores mínimos entre 1 400 m snm y una cota máxima de más de 2 400 m snm correspondiente a la sierra de Talacasto al NE y a la sierra de La Cruccecita al SO. La cuenca del río Talacasto presenta pendientes máximas (Figura 3c) de hasta 60° en el flanco oriental de la sierra de Talacasto, y algo menores en el oriental de la sierra de La Cruccecita.

Por otra parte, la red de drenaje identificada en ambos piedemontes del río de La Burra es dendrítica divergente, típica de abanicos aluviales. Sin embargo, se producen anomalías en el patrón del drenaje cuando los arroyos atraviesan la traza de las fallas, aumentando el grado de incisión y sinuosidad de los cauces.

La unidad deprimida más importante de la zona, es la planicie aluvial del río de La Burra que es el colector principal de los ríos y arroyos provenientes de los cordones serranos, con un rumbo N-S (Figuras 1 y 2). En la margen izquierda de

este río se ubican formas aluviales relícticas tales como tres terrazas de erosión y acumulación ubicadas a diferentes alturas, siendo las más antiguas las que están topográficamente más altas y se encuentran distribuidas asimétricamente (Figura 2). Su origen puede ser debido a cambios climáticos o a la variación de nivel de base por causas tectónicas. Si bien es posible que haya una combinación de ambos procesos, en la porción norte de la depresión se infiere una causa tectónica, debido a la evidencia de actividad tectónica cuaternaria identificada en ambos piedemontes (Figura 2).

El factor de asimetría fue desarrollado para detectar basculamientos tectónicos sobre cuencas de drenaje en áreas extensas (Keller y Pinter, 2002). El valor obtenido para la cuenca de Talacasto es 36.31%, correspondiendo a una cuenca marcadamente asimétrica, lo que sugiere un basculamiento de la cuenca hacia el este, en coincidencia con el avance del frente orogénico (Figura 3a, b, c).

La sinuosidad del frente de montaña refleja el balance entre las fuerzas erosivas de los ríos que tienden a formar engolfamientos al salir del sector montañoso y las fuerzas tectónicas que tienden a producir un frente recto coincidente con una falla activa. La cuenca en estudio, presenta un índice de sinuosidad del frente montañoso de 0,97, indicando frentes controlados por estructuras activas. A mayor actividad tectónica, la unión piedemonte-montaña tenderá a coincidir con la traza de la falla, dando un índice cercano a 1.

Análisis neotectónico

Se identificaron fallas con evidencia de actividad tectónica cuaternaria en ambos piedemontes del valle del río de La Burra. Todas las fallas analizadas poseen rumbo submeridional, con componente de movimiento principal vertical, inversas y con vergencia oriental, consistente con el estilo estructural de Precordillera Central (Figura 2).

Estas estructuras fueron denominadas de norte a sur: Las Crucecitas y Vertientes (piedemonte oriental de La Crucecita) y Sistema de falla Talacasto occidental, ubicado en el piedemonte occidental de la sierra homónima. Las fallas afectan los depósitos asignados al Pleistoceno tardío y Holoceno y se definen por una serie de geoformas típicas de ambientes compresivos tales como escarpas a favor (piedemonte occidental) y en contra de la pendiente (piedemonte oriental), terrazas restringidas al bloque elevado de las fallas, lagunas de fallas (*sagponds*), vertientes alineadas, drenajes obturados, desviados, fuertemente incisos y sinuosos en los bloques elevados de las fallas, abanicos aluviales con pendientes anómalas, entre otros rasgos que señalan su actividad tectónica cuaternaria. Se identificaron en función de la posición relativa e incisión, así como por la presencia de pavimento y barniz del desierto, cinco (5) niveles aluviales cuaternarios en el sector norte del piedemonte oriental de la sierra de La Crucecita, denominados del más reciente al más antiguo: Q1, Q2, Q3, Q4 y Q5; y probablemente hasta un sexto nivel (Q6) en el piedemonte occidental de

la sierra de Talacasto. En este análisis se determinó que las fallas afectan todos los niveles aluviales (a excepción del actual Q1) y coinciden con el estilo estructural de Precordillera Central, inversas de bajo ángulo y con vergencia oriental. Esta deformación se vincula con el tectonismo que a escala regional afectó y afecta al ámbito precordillerano.

Piedemonte Oriental sierra de La Crucecita

De norte a sur, existen notorias diferencias geomorfológicas a lo largo de este piedemonte. En su porción norte, se han reconocido cuatro niveles aluviales fuertemente incisos que cubren las rocas del Neógeno y han sufrido procesos de glaciplanación (Figura 2).

Hacia el sur, solamente se han identificado el nivel actual (Q1) y el nivel Q2; y solamente en los sectores afectados por la falla Las Vertientes, afloran rocas del Neógeno.

Sobre el extremo norte del piedemonte oriental de la Sierra de la Crucecita se ubica una falla inversa, denominada falla Las Crucecitas, que afecta el nivel aluvial Q4 con escarpa al este suavemente redondeada, de aproximadamente 1.70 m de altura, así como una terraza de erosión de un tributario del río de La Burra en la que la falla posee azimut 30° y un buzamiento de 40° O. Coloca sedimentitas neógenas de la Formación Cuculí sobre depósitos aluviales asignados en este trabajo tentativamente al Holoceno (Figuras 4a y b).

Hacia el sur, otra exposición natural muestra la falla Las Crucecitas con azimut 20° e inclinación 40° O (Perucca y Vargas, 2014). Se midieron estrías en el plano de falla, cuyo pitch es de 57° NO, indicando un movimiento vertical con componente horizontal sinestral. La falla coloca rocas del Neógeno sobre depósitos cuaternarios del nivel Q4 asignados tentativamente al Pleistoceno; y aunque no corta la superficie, presenta la superficie combada, correspondiendo a un cabalgamiento ciego (Figura 4a). Esta suave inflexión de la superficie (eskarpe de flexura) del nivel aluvial constituye un marcador planar deformado y flexurado que evidencia la presencia de la falla, aunque la misma no aflore en superficie. Los fanglomerados del nivel Q4 presentan lentes de materiales finos como así también clastos orientados y flexurados como resultado de la deformación.

En la porción centro y sur del piedemonte oriental de la sierra de La Crucecita, se destaca una falla con rumbo promedio 24° con una suave inflexión en la parte sur donde cambia a 11° (Figura 4c, d), con el labio hundido al este, cuyo plano de falla inclinaría al oeste (consistente con la estructura regional de Precordillera Central). Esta falla, denominada falla Vertientes, desplaza depósitos aluviales asignados al Pleistoceno tardío-Holoceno del nivel Q2. La longitud de la falla es de ~ 6 km y afecta también la porción distal del piedemonte occidental de la sierra de Talacasto, donde eleva rocas del Neógeno con rumbo $N10^\circ$ e inclinación 45° al O (Figura 2). Si bien no se han encontrado exposiciones naturales que indiquen su cinemática se infiere su carácter inverso y vergencia al este.

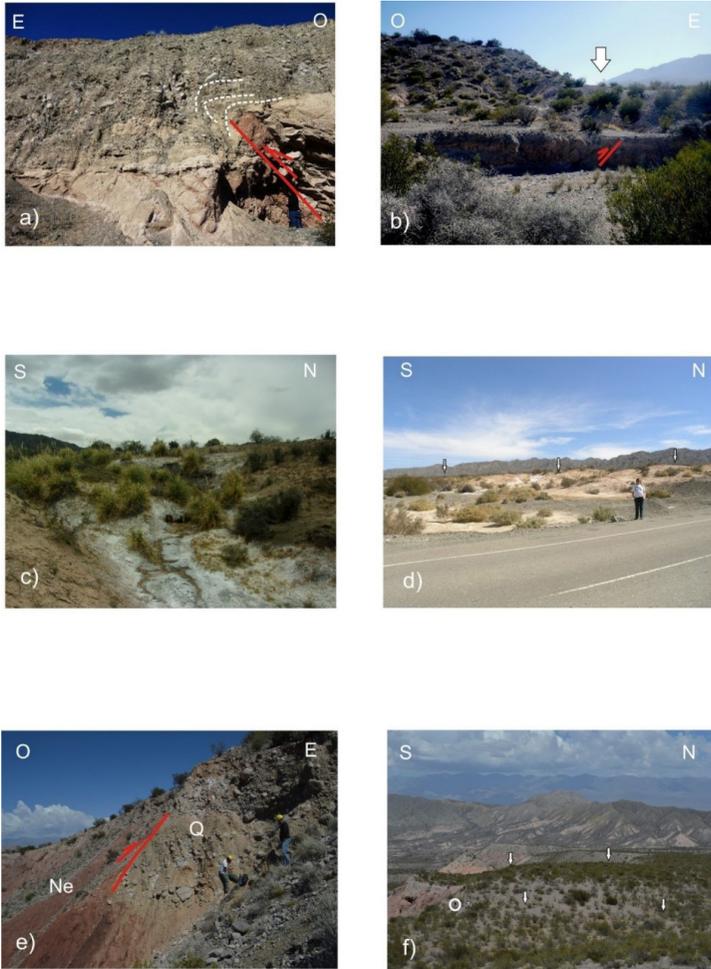


Figura 4. a) Vista hacia el sur de exposición natural en la que se aprecia la falla inversa Las Crucecitas, que inclina al oeste y coloca rocas del Neógeno sobre depósitos aluviales pleistocenos del nivel Q3. La falla no corta la superficie pero deforma los niveles aluviales más antiguos, b) Exposición natural donde se aprecian depósitos probablemente holocenos de una terraza ubicada sobre la margen izquierda de un pequeño tributario del río de La Burra. Al fondo, se puede apreciar una escarpa de flexura de la falla Las Crucecitas preservada en el nivel aluvial Q3, redondeada y de aproximadamente 3 m de altura, c) Vista al oeste de los depósitos limosos y vertientes alineadas a lo largo de la falla, d) Depósitos finos asociados a las vertientes, con salida de agua permanente, e) Vista hacia el norte de la falla Talacasto Occidental. La falla coloca rocas del Neógeno sobre depósitos aluviales cuaternarios. f) Vista al oeste de la escarpa a contrapendiente de la falla Talacasto Occidental, señalada por flechas. El círculo blanco señala una persona a modo de escala.

Piedemonte Occidental sierra de Talacasto

En el piedemonte occidental de la sierra de Talacasto se identificaron secciones de falla discontinuas y subparalelas que fueron identificadas a partir de escarpes de fallas a contrapendiente, simples y compuestos, terrazas en el bloque elevado, escarpes flexurales, plegamiento reciente en depósitos cuaternarios y diversas anomalías en la red de drenaje. Además se observa un aumento en la incisión y sinuosidad de los cauces en el bloque elevado de la falla, donde se exponen las rocas del Neógeno. La altura de los escarpes de falla varía entre 0.30 m y 10 m, encontrándose las mayores elevaciones en la porción norte del piedemonte. La falla coloca rocas del Neógeno sobre depósitos fluviales del nivel Q4, inclina al oeste 74° y su azimut es 25° (Figura 4e, f).

Análisis gravimétrico

Las cartas de anomalías obtenidas para el área de La Burra reflejan contrastes de alta densidad a escala de la corteza y la litosfera, donde los valores positivos y negativos se asocian aparentemente a las diferentes unidades expuestas en el área de estudio. Es importante resaltar la fuerte influencia de la raíz andina sobre las anomalías observadas. El mapa de anomalías de aire libre (Figura 5a) muestra la correspondencia con los frentes inversos que elevan las distintas sierras de la Precordillera Central, es decir, la sierra de Talacasto al este y la sierra de la Cruccecita al oeste. Además, los cambios de gradiente observados entre las unidades morfotectónicas elevadas al este (Sierra de Talacasto) y al oeste (Sierra de la Cruccecita) limitarían la depresión correspondiente al valle de La Burra.

En la carta de anomalías de Bouguer completa, se observaron valores negativos asociados con las cadenas montañosas que exhiben unidades paleozoicas y que fueron elevadas por fallas N-S (Figura 5b). Por otro lado, los valores positivos parecen mostrar la existencia de depocentros entre las montañas (valle de La Burra) donde predominan los depósitos Neógeno-cuaternarios. Estos valles parecen estar controlados por estructuras NE y NO.

La carta de anomalías isostáticas sugiere preliminarmente un fuerte desequilibrio para la región en estudio, evidenciada por valores negativos a lo largo de las principales cadenas montañosas tal como en la sierra de Talacasto, al este del sector analizado. Por otro lado, los depocentros cenozoicos muestran valores positivos que también sugieren un desequilibrio isostático, por lo que se esperarán ajustes tectónicos para la región analizada para poder alcanzar el equilibrio isostático (Figura 5c).

Por su parte, el análisis de las cartas de anomalías residuales sugiere la existencia de controles estructurales (frentes de empuje) con rumbo N-S que exponen las unidades del Paleozoico, alcanzando las mayores elevaciones topográficas. Estas estructuras limitan tanto el este como el oeste por valles intermontanos rellenos por sedimentos del Neógeno a Cuaternario. Además, la carta de anomalías residuales revela contrastes laterales de densidad en

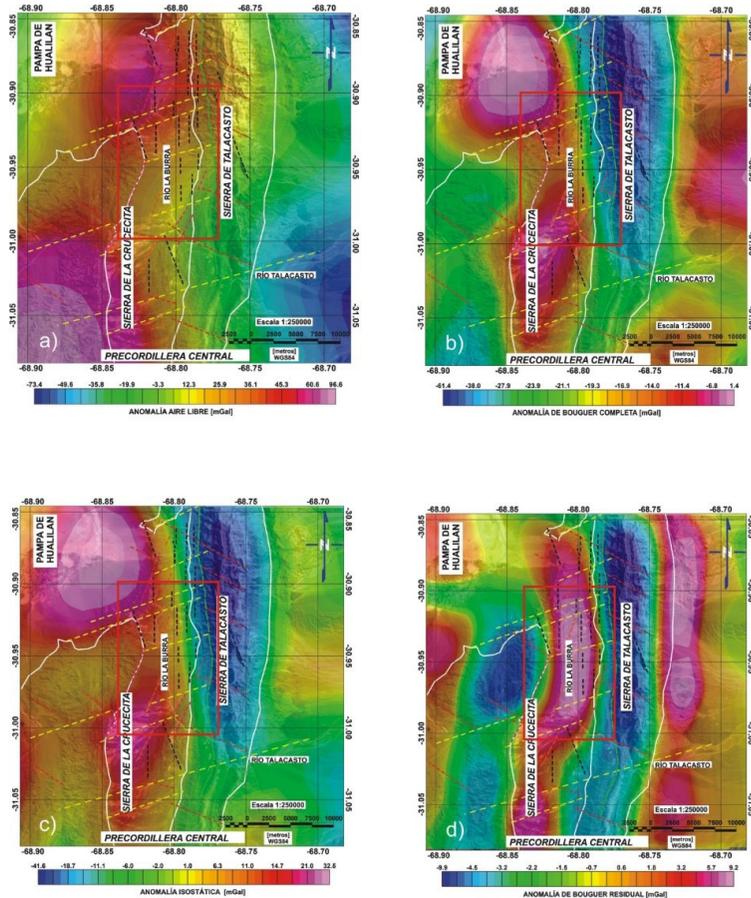


Figura 5. a) Mapa de anomalías de aire libre, b) mapa de anomalías de Bouguer completas, c) mapa de anomalías isostáticas, d) mapa de anomalías de Bouguer residuales. Los recuadros rojos indican el área de estudio en el valle del río de La Burra.

dirección norte-sur asociados a las estructuras NE y NO que segmentarían los valles intermontanos (Figura 5d).

Discusión y conclusiones

Numerosas evidencias de actividad tectónica cuaternaria se desarrollan en el valle longitudinal ubicado entre la sierra de La Crucecita, por el oeste y la sierra de Talacasto por el este, en el ámbito del cinturón plegado y cabalgado de la Precordillera Central.

La identificación de la existencia de deformaciones activas a lo largo de ambos piedemontes, las cuales son observables tanto en fotografías aéreas como en el campo, muestran una orientación preferencial N-S, a excepción de la falla Vertientes de rumbo N30°E y afectan los niveles aluviales Q4 a Q2 en el sector.

Intepretamos que los niveles Q6-Q3 pudiesen ser tentativamente asignados al Pleistoceno tardío, mientras que los niveles Q2 hasta el nivel actual serían del Holoceno. Del análisis de las geoformas en ambos piedemontes, es posible determinar el control estructural que ejercen estas estructuras y su actividad tectónica holocena. Todas ellas mostraron cabalgamientos de rumbo casi norte sur y buzamientos entre 40° y 70° O. Se reconocieron además pliegues de arrastre y fallas menores de poco desplazamiento. Se considera estas estructuras como fuentes sismogénicas potenciales en la región precordillerana, cercana a la ciudad de San Juan y a presas cimentadas y a construir sobre el río San Juan.

Agradecimientos

La presente contribución fue financiada con fondos del IPGH, para el proyecto GEOF-03 2018, como así también CICITCA 2016-17 (UNSJ). Los autores agradecen a CIGEOBIO (CONICET-UNSJ) por la entrega de fondos para la obtención de la licencia del software ArcGIS 10.3.

Bibliografía

- Allis, C., 2016. "Geomorfología y Neotectónica en el Piedemonte Oriental de la Sierra de La Crucecita, Precordillera Central, Provincia de San Juan", trabajo final de licenciatura de la Universidad Nacional de San Juan, inédito, 80 pp.
- Audemard, F.A., 1999. "Morpho-structural expression of active thrust fault systems in the Humid Tropical Foothills of Colombia and Venezuela", *Zeitschrift fur Geomorphologie*, 118: 1-18.
- Audemard, F.A.; Perucca, L.P.; Pantano, A.; Avila, C.; Onorato, M.R.; Vargas, H.N.; Alvarado, P. & Viète, H., 2016. "Holocene compression in the Acequión valley (Andes Precordillera, San Juan Province, Argentina): Geomorphic, tectonic, and paleoseismic evidence", *J South American Earth Sciences*, 67: 140-157.
- Balmino, G.; Vales, N.; Bonvalot, S. & Briais, A., 2012. "Spherical harmonic modeling to ultra-high degree of Bouguer and isostatic anomalies", *Journal of Geodesy*, 86: 7: 499-520. DOI: <https://www.doi.org/10.1007/s00190-011-0533-4>
- Bonvalot, S.; Balmino, G.; Briais, A.; Kuhn, M.; Peyrefitte, A.; Vales N.; R. Biancale; G. Gabalda; G. Moreaux; F. Reinquin; M. Sarrahill, 2012. *World Gravity Map. Bureau Gravimetricque International (BGI)*, map, CGMW-BGI-CNES-IRD Ed., Paris.
- Boyer, S.E. & Elliott, D., 1982. "Thrust systems", *Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists*, 66: 1196-1230.
- Cahill, T. & Isacks, B.L., 1992. "Seismicity and the shape of the subducted Nazca plate", *Journal of Geophysical Research*, 97: 17503-17529.

- Casa, A.; Yamín, M.; Wright, E.; Costa, C.; Coppolecchia, M. & Cegarra, M., 2011. *Deformaciones Cuaternarias de la República Argentina, Sistema de Información Geográfica*, Instituto de Geología y Recursos Minerales, Servicio Geológico Minero Argentino, publ. 171, v.1.0 DVD.
- Casa, A.; Yamín, M.; Wright, E.; Costa, C.; Coppolecchia, M.; Cegarra, M. & Hongn, F. (eds.), 2014. *Deformaciones cuaternarias de la República Argentina. Sistema de Información Geográfica*, Instituto de Geología y Recursos Minerales, Servicio Geológico Minero Argentino, publ. 171, v.1.0 en formato DVD.
- Costa, C.; Machette, M.N.; Dart, R.L.; Bastías, H.E.; Paredes, J.D.; Perucca, L.P.; Tello, G.E. & Haller, K.M., 2000. *Map and database of Quaternary faults and folds in Argentina*, U.S. Geological Survey Open-File Report 00-0108, 81 pp.
- Furque, G., 1983. "Descripción Geológica de la Hoja 19 C, Ciénaga de Hualilán", *Boletín de la Secretaría de Minería*, 193, Buenos Aires, 111 pp.
- Furque, G.; González, P.; Caballé, M., 1998. "Descripción de la Hoja Geológica 3169-II, San José de Jáchal (Provincias de San Juan y La Rioja)", Servicio Geológico y Minero Argentino, *Boletín* 259, 150 pp.
- Hadley, R.F. & Schumm, S.A., 1961. "Sediment sources and drainage basin characteristics in upper Cheyenne River Basin", U.S. *Geological Survey Water-Supply Paper*, 1531-B, 198 pp.
- Heiskanen, W.A. & Moritz, H., 1967. *Physical Geodesy*, WH Freeman & Co, San Francisco, USA, 364 pp.
- Horton, R.E., 1932. *Drainage basin characteristics: American Geophysics Union Trans.*, 13: 350-361.
- Jordan, T.E.; Allmendinger, R.W.; Brewer, J.A.; Ramos, V.A. & Ando, C.J., 1983. "Andean tectonics related to geometry of subducted Nazca plate", *Geological Society of America Bulletin*, 94: 341-361.
- Keller, E.A. & Pinter, N., 2002. *Active Tectonics, Earthquakes, Uplift and Landscape*, 2nd Edition, Prentice Hall, Upper Saddle River, 362 pp.
- Levina, M.; Horton, B.; Fuentes, F. & Stockli, D., 2014. "Cenozoic sedimentation and exhumation of the foreland basin system preserved in the Precordillera thrust belt (31-32° S), southern central Andes, Argentina", *Tectonics*, 33: 1659-1680. DOI: <https://www.doi.org/10.1002/2013TC003424>.
- Ocaña, R., Flores, D., Alcayaga, G., Suvires, G., 2017. "Geomorphology of Talacasto Aluvial Fan, Precordillera of San Juan, Argentina", *Journal of Maps*, 13:2, 929-935. DOI: <https://www.doi.org/10.1080/17445647.2017.1409138>.
- Ortiz, A. & Zambrano, J., 1981. "La provincia geológica de Precordillera Oriental", *Proceedings*, 8° Congreso Geológico Argentino, San Luis, 3: 59-74.
- Perucca, L.P. & Vargas, H.N., 2014. "Neotectónica de la provincia de San Juan, centro-oeste de Argentina", *Bol. de la Soc. Geol. Mexicana*, 66: 291-304.
- Perucca, L.; Paredes, J.; Tello, G. & Bastías, H., 1999. "Fallamiento activo en el área norte del sistema de fallamiento El Tigre, San Juan-La Rioja", *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 54: 206-214.

- Perucca, L.P.; Lara, G. & Vargas, N., 2012. "Nueva evidencia de actividad tectónica cuaternaria en la depresión Zonda-Maradona, provincia de San Juan", *Revista Asociación Geológica Argentina*, 69: 97-105.
- Perucca, L.P.; Rothlis, M. & Vargas, H.N., 2014a. "Morphotectonic and neotectonic control on river pattern in the Sierra de la Cantera piedmont, Central Precordillera, province of San Juan, Argentina", *Geomorphology*, 204: 673-682.
- Perucca, L.P.; Onorato, M.; Millán, J.; Bustos, A. & Vargas, H.N., 2014b. "Variación del estilo de deformación a lo largo del Sistema de falla La Cantera, Precordillera Central, San Juan, Argentina", *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 27(2): 69-79.
- Perucca, L.; Rothlis, M.; Bezerra, F.; Vargas, N. & Lima, J., 2015. "Late Quaternary evolution of the La Cantera Fault System (Central Precordillera, Argentina): a morphotectonic and paleoseismic analysis", *Tectonophysics*.
DOI: <https://www.doi.org/10.1016/j.tecto.2015.08.041>
- Ramos, V., 1988. "The Tectonics of the Central Andes; 30° to 33° S latitude", *Geological Society of America Special Paper*, 218: 31-54.
- , 1999. "Las provincias geológicas del territorio Argentino", en Caminos, R. (ed.), *Geología Argentina*, Instituto de Geología y Recursos Minerales, *Anales*, 29(12): 41-96.
- Rimando, J.M.; Schoenbohm, L.M.; Costa, C.H.; Owen, L.A.; Cesta, J.M.; Richard, A.D., & Gardini, C.E., 2019. "Late Quaternary Activity of the La Rinconada Fault Zone, San Juan, Argentina", *Tectonics*. DOI: <https://www.doi.org/10.1029/2018TC005321>.
- Schumm, S.A., 1956. "Evolution of drainage systems and slopes in badlands at Perth Ambos, New Jersey", *Geological Society of America Bulletin*, 67: 597-646.
- Schumm, S.A., 1977. *The fluvial system*, New York, John Wiley & Sons, 338 pp.
- Soil Conservation Service, 1986. *Urban hydrology for small watersheds*, TR-55, 2nd ed., USA.
- Strahler, A.N., 1964. "Quantitative geomorphology of drainage basin and channel networks", en Chow, V.T. (ed.), *Handbook of applied hydrology*, New York, McGraw Hill, pp. 4-76.
- Villon, 2002. *Hidrología*, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Facultad de Ingeniería Agrícola, 2a. edición, Ediciones Villon, Lima, Perú, 15-64 pp.
- Von Gosen, W., 1992. "Structural evolution of the Argentine Precordillera: the Rio San Juan section", *J. Struct. Geol.*, 14(6): 643-667.
- Zapata, T.R. & Allmendinger, R.W., 1996. "Thrust-front zone of the Precordillera, Argentina: a thick-skinned Triangle zone", *Am. Assoc. Petroleum Geol. Bull.*, 80: 359-381.

Investigación geofísica en la fosa de Santa Lucía, Uruguay

Jorge Eduardo de los Santos Gregoraschuk¹
Julián Andrés Ramos Cavallo²
Fernando Corbo Camargo³
Manuel Araneda Cabrera⁴
Álvaro Araneda Avenaño⁵
Alfonso Nicolás Flaquer Barrios⁶

Recibido el 17 de abril de 2019; aceptado el 31 de mayo de 2019

Resumen

En este trabajo se investiga el sector sudeste de la fosa tectónica del río Santa Lucía, ubicada al sur de Uruguay, mediante el empleo de métodos geofísicos de exploración. En particular, gravimetría, sondeos magnetotelúricos y eléctricos (SEV y Tomografía eléctrica). El interés de explorar dicha fosa radica en determinar su geometría, reconocer la posible existencia de acuíferos profundos, su desarrollo y la factibilidad de termalismo debido al gradiente geotérmico (3°C cada 100 m de profundidad). Se adquirieron, procesaron e invirtieron 121 estaciones gravimétricas dispuestas en cuatro perfiles y diez sondeos magnetotelúricos (MT). Los resultados indican que la fosa se profundiza hacia el SE, alcanzando espesores sedimentarios que superan los 800 m. Por lo tanto, a partir de nuestros resultados se podría extraer agua entre los 800-900 m de profundidad en dicha zona (SE). Los episodios arenosos o fracturados en profundidad podrían albergar aguas termales, cuya temperatura sería de aproximadamente 36 to 40°C a partir del gradiente geotérmico del país.

Palabras clave: *Fosa Santa Lucía, exploración geofísica, gravimetría, sondeos.*

.....
¹ Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA), Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Uruguay. Correo electrónico: jedls@fing.edu.uy

² Departamento del Agua, Centro Universitario Regional (Cenur) Litoral Norte, Udelar, Uruguay. Correo electrónico: jramos@unorte.edu.uy

³ Centro de Geociencias, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), México. Correo electrónico: fercorbo@geociencias.unam.mx

⁴ Servicios Geofísicos en Minería e Ingeniería (SEGMI), Santiago, Chile. Correo electrónico: segmi@netexpress.cl

⁵ Servicios Geofísicos en Minería e Ingeniería (SEGMI), Santiago, Chile. Correo electrónico: aaraneda@segmi.cl

⁶ Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA), Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Uruguay. Correo electrónico: aflaquer@fing.edu.uy

Abstract

In this work, the southeast sector of the tectonic fossa of the Santa Lucía River, located in southern Uruguay, is investigated through the use of geophysical methods of exploration. In particular, gravimetry, magnetotelluric and electrical soundings. The interest of exploring this graben lies in determining its geometry, recognizing the possible existence of deep aquifers, its development and the feasibility of thermalism due to the geothermal gradient (3 °C every 100 m deep). 121 gravimetric stations arranged in four profiles and ten magnetotellurics (MT) soundings, were acquired, processed, and inverted. The results indicate that the graben deepens towards the SE, reaching sedimentary thicknesses that exceed 800 m. Therefore, from our results, water could be extracted between 800-900 m deep in that area (SE). The sandy or deeply fractured episodes could harbor hot springs, whose temperature would be approximately 36 to 40 °C from the geothermal gradient of the country.

Key words: *Santa Lucia graben, geophysical exploration, gravimetry, magnetotelluric soundings.*

Introducción

La cuenca del río Santa Lucía está contenida en seis departamentos de Uruguay (Florida, San José, Canelones, Montevideo, Lavalleja y Maldonado). Tiene 12 000 km², y el río principal alcanza una longitud de 248 km (Rosello *et al.*, 2017). En el interior de la cuenca se encuentra la fosa tectónica de este estudio (fosa de Santa Lucía), ocupando parte de los cuatro departamentos centrales citados. Está limitada por dos fallas principales de rumbo N 60-70 E y en su borde oriental por fallas en gradería en dirección N-S. Se desarrolla en 120 km de largo por 45 km de ancho, componiendo un complejo estructural con dos grabens y un horst (Figura 1). Esta investigación se centra en el sur de dicha fosa, al SE del departamento San José, en su límite con los departamentos Montevideo y Canelones con una extensión de 533 km².

Se tiene referencia de una importante y variable profundidad de la fosa en ese sector (Bossi, J. & Navarro, R., 1988; Veroslavsky *et al.*, 2004; Rosello *et al.*, 2017), donde la mayoría de estos trabajos se refieren al estudio del sistema acuífero Raigón, el cual es un valioso recurso hídrico para Uruguay. Por lo tanto, la profundidad de investigación es somera y se desconoce el perfil sedimentario más allá de la Fm. Fray Bentos, piso del SAR (De los Santos *et al.*, 1998).

Se conoce que el graben de estudio, en su sector SE, posee un paquete sedimentario de cientos de metros debido a la información de dos perforaciones (Libertad y Rincón de la Bolsa) que se ubican dentro del área de estudio (Figura 3A). La perforación Libertad posee un paquete sedimentario de 142 m de origen Cenozoico subyaciendo el basamento cristalino (De los Santos, J. *et al.*, 1998;

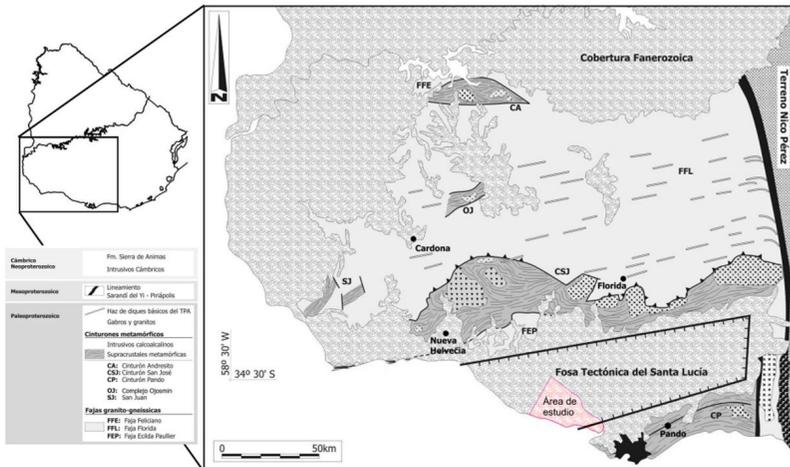


Figura 1. Ubicación del área de estudio en la fosa tectónica del río Santa Lucía (Modificada de Maldonado et al., 2003).

De los Santos, J. et al., 1999). La perforación Rincón de la Bolsa, posee un paquete sedimentario de 801 m, sin encontrar las rocas cristalinas del fondo de la fosa. La descripción litológica de dicho pozo puede resumirse en: 0m-6m, Fm Villa Soriano y limo arenoso verde; 6 m-95 m Fm. Fray Bentos; 95 m-801 m, Fm. Migueles (sedimentos cretácicos) (Bossi, J. & Navarro, R., 1988). Por lo tanto, para esta investigación se tiene la premisa que el graben de estudio se profundiza hacia el SE.

Métodos geofísicos empleados

Con base en afloramientos de la roca cristalina del basamento y la información de las perforaciones Libertad y Rincón de la Bolsa (De los Santos, J. et al., 1998; De los Santos, J. et al., 1999; Bossi, J. & Navarro, R., 1988), que indican un espesor de cientos de metros (> 800 m) se decidió utilizar mediciones gravimétricas y magnetotelélicas para generar modelos geofísicos profundos del graben.

A partir de la gravimetría, se mide la aceleración de gravedad sobre un terreno con el fin de detectar las variaciones de densidades en las unidades geológicas presentes en el subsuelo. El procedimiento es hacer las mediciones en superficie en distintos puntos distribuyéndolos en toda el área de estudio. Con ello se pretende identificar la profundidad del basamento, que siendo de origen ígneo metamórfico (Veroslavsky et al., 2004) posee una densidad mayor al medio sedimentario que lo sobreyace.

El método magnetotelúrico (MT) se creó para el estudio y modelación de cuencas profundas (Tikhonov, 1950; Cagniard, 1953; Vozoff, 1972). Esta característica se debe a que es un método pasivo de exploración, donde el equipo mide los campos eléctricos y magnéticos que fluyen naturalmente en el subsuelo a diferente profundidad con un mismo arreglo geométrico de sus sensores (Tikhonov, 1950; Cagniard, 1953; Vozoff, 1972). A partir de este método, se puede obtener información desde la superficie hasta cientos de kilómetros de profundidad, la cual es función de su frecuencia de muestreo donde a altas frecuencias se traduce en información más somera respecto a bajas frecuencias. El resultado final de las mediciones MT son curvas de resistividad y fase en función de la frecuencia, a partir de las cuales se invertirán para obtener las variaciones la resistividad eléctrica del subsuelo en función de la profundidad. La resistividad eléctrica de un basamento (Orellana, 1972) es mucho mayor que la resistividad eléctrica en un medio sedimentario, por lo que es posible distinguir el contacto entre ambos medios geológicos. El agua subterránea, por las sales disueltas que contiene, se comporta como un electrolito que permite a las corrientes eléctricas fluir en el subsuelo por lo que al medir la resistividad del subsuelo se tiene posibilidad de identificar la presencia de acuíferos (El-Qady, 2006, citado por Meli'i, Njandjock y Gouet, 2011). Se debe tener presente que, el hecho de que el agua contenida en las rocas sea un factor decisivo en su resistividad no implica que se esté detectando el agua directamente. Lo que se busca con esta propiedad son estructuras y capas acuíferas, y la diferenciación entre materiales permeables e impermeables. En cada prospección con fines hidrogeológicos, se requiere que los objetivos sean claramente fijados en términos de resistividades (Orellana, 1972).

Mediciones, resultados y discusión

Los datos gravimétricos fueron obtenidos con un gravímetro LaCoste y Romberg, Modelo G y N° de serie 463. La precisión de este instrumento es de la centésima de un miligal, (10^{-3} miligales) y una deriva instrumental aproximada de 1 [mgal/mes].

Para la calibración y cierres parciales de la gravedad se utilizó la estación gravimétrica ubicada en la Fortaleza del Cerro de Montevideo (Figura 2).

Las mediciones comenzaron en octubre de 2015, donde en dicho mes se midieron 111 estaciones gravimétricas distribuidas en 4 perfiles, con una separación entre ellas de 1 000, 500 y 300 m dependiendo del caso y diez estaciones de control (Figura 3B). La zona investigada, se caracteriza por tener una topografía suave, con pocos cambios de elevación por su cercanía a la costa.

Para determinar las elevaciones en cada estación, se utilizó la información del Modelo Digital del Terreno (MDT) de la Dirección General de Recursos Naturales del Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca (MGAP, 2016) del Uruguay (Figura 3B). Complementariamente, un grupo de estaciones fueron medidas



Figura 2. Estación gravimétrica Fortaleza (inicio del trabajo).

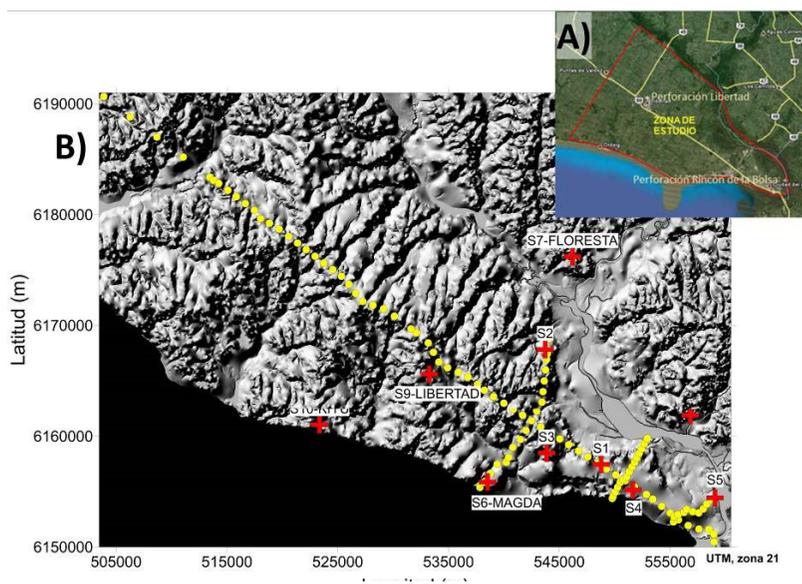


Figura 3. A) Ubicación de la zona de estudio; B) Estaciones gravimétricas en color amarillo y estaciones MT en color rojo. La topografía corresponde al MDT (MGAP, 2016).

con un sistema de posicionamiento global (GPS) diferencial. Las diferencias en elevación comparadas con las correspondientes al MDT no superaron los 4 m. Se realizó un análisis de sensibilidad en los modelos invertidos y estas diferencias en cuanto a la altura es de menor a 2 mgal, por lo que puede despreciarse. Con el fin de determinar el efecto regional gravimétrico se propuso el perfil principal de manera tal que ambos extremos alcancen los afloramientos observados. Las profundidades fueron calculadas con un contraste de densidades de $0.67 \text{ (g/cm}^3\text{)}$, considerando que las rocas del basamento existentes en el área tienen una densidad de $2.67 \text{ (g/cm}^3\text{)}$ y que la densidad del relleno sedimentario es de $2.0 \text{ (g/cm}^3\text{)}$. Cabe destacar que, para los cálculos, se forzó el modelo a pasar por los dos pozos que son puntos de referencia (Libertad, con basamento a 142 m y Rincón de la Bolsa, con basamento que supera los 801 m).

Del análisis de la anomalía de Bouguer se calculó un modelo de profundidades del basamento con el programa Oasis Montage (Geosoft). El mapa isobático se presenta en la Figura 4, en el cual se aprecia que las profundidades mayores del basamento rocoso se ubican al sudeste del área de estudio, con profundidades que superan los 800 m.

Los datos magnetotelúricos fueron adquiridos con un equipo modelo MTU-5A (Phoenix Geophysics) con una distancia de los dipolos eléctricos de 50 m. Las componentes magnéticas de alta frecuencia se midieron con bobinas modelo AMTC30, mientras que las de baja frecuencia se midieron con bobinas MTC-50. Se adquirió un total de 10 estaciones (Figura 4) cuyas coordenadas (UTM 21S) se presentan en la Tabla 1.

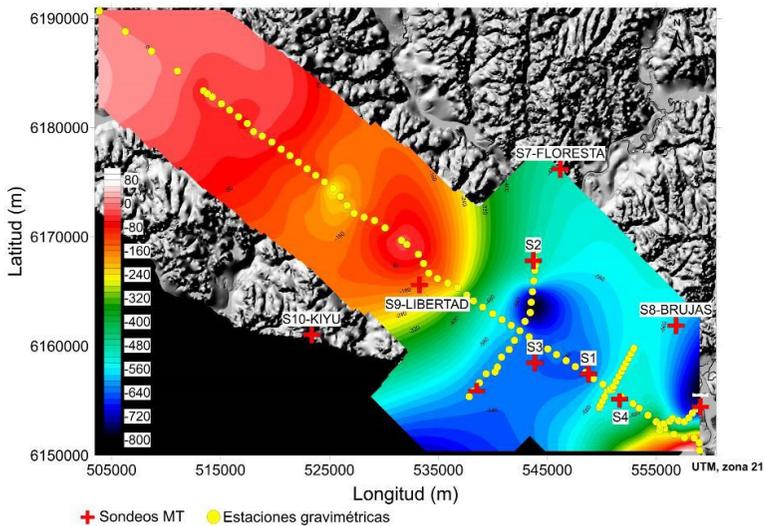


Figura 4. Mapa isobático. Cruces rojas estaciones MT, círculos amarillos estaciones gravimétricas.

Tabla 1
Ubicación de los sitios relevados mediante sondeos Magnetotelúricos

Sondeo	Tipo	Coordenadas UTM [m]		Elevación [m]
		X	Y	
S1	Exploratorio	548.791,05	6.157.459,00	20
S2	Exploratorio	543.720,43	6.167.834,59	20
S3	Exploratorio	543.857,64	6.158.484,33	29
S4	Exploratorio	551.644,54	6.155.160,81	24
S5	Exploratorio	559.057,82	6.154.444,67	8
S6	Exploratorio	538.533,76	6.155.868,86	37
S7	Exploratorio	546.197,98	6.176.213,44	32
S8	Paramétrico	556.824,01	6.161.895,03	11
S9	Exploratorio	533.264,48	6.165.607,94	34
S10	Exploratorio	523.366,11	6.161.039,39	33

Para el procesamiento de los datos se utilizaron los programas SSMT2000 v0.6.0.69 y MTeditor v0.99.2.106, provistos por el fabricante del equipo. La inversión de los datos magnetotelúricos ejecutados se realizó con el programa WINGLINK v.2.2.01.

Se trabajó con más de una hipótesis a efectos de estudiar el peso de las primeras capas resistivas y de las capas resistivas más profundas, dando preeminencia a unas u otras, consecutivamente. Según el criterio considerado, se asoció a la roca masiva cuando las resistividades son superiores a 200 ohm-m, considerando que en algunos casos se tratara de rocas con alteraciones o saturadas de agua; en casos de rocas tenaces, la resistividad debería superar los 500 ohm-m. La Figura 5, presenta la inversión 1D del sondeo S1 y el ajuste obtenido de las curvas de resistividad y fase en función de la frecuencia.

El modelo se ajusta con un comportamiento característico de rocas sedimentarias hasta los 700 m de profundidad. A partir de dicha profundidad se observa que el valor de la resistividad tiene un comportamiento creciente con la profundidad hasta cotas inferiores a los 1 000 m. Este comportamiento puede interpretarse como la transición de la roca no masiva a masiva. En la Figura 6, se muestran únicamente los modelos 1D obtenidos para los sondeos restantes.

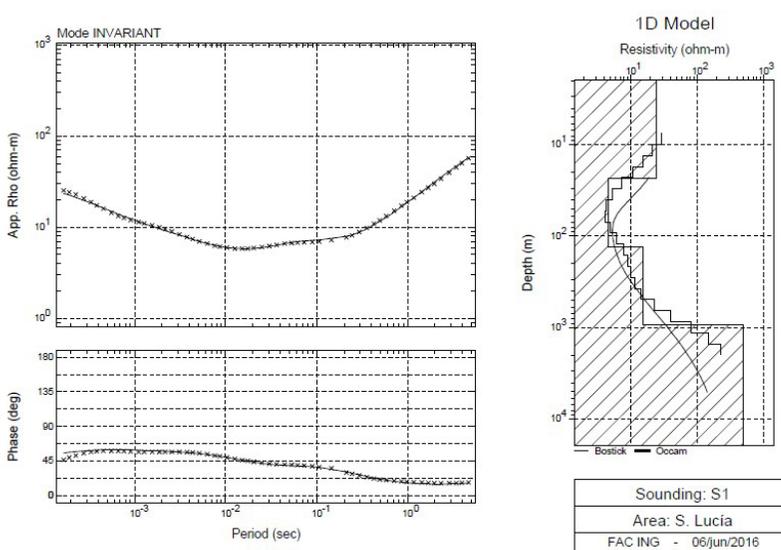


Figura 5. Modelo 1D ajustado del sondeo S1.

El Sondeo S2 tuvo un comportamiento muy distinto a todos. Las curvas de resistividad aparente se separan a frecuencias de 100 Hz aproximadamente (alrededor de 100 m de profundidad, skin depth, Vozoff, 1972), indicando que el medio tiene un comportamiento bidimensional o tridimensional, por lo que el punto escogido para la medición debe encontrarse en el borde de la fosa y por lo tanto su inversión 1D no traería información certera de la profundidad del basamento. El sondeo S3 presentó un medio con una resistividad mayor del resto de los sondeos desde la superficie, 350 ohm-m, manifestando la profundidad del basamento a 170 m. El Sondeo S4 tiene un comportamiento similar al resto de los sondeos, un medio sedimentario desde la superficie y la profundidad de la roca del basamento supera los 350 m de profundidad. El Sondeo S5 presentó a 130 m de profundidad un ascenso de resistividad y a los 550 m la presencia de la roca del basamento. El Sondeo S6 distingue la presencia de arenas hasta los 40 m de profundidad y sedimentos arcillosos hasta 200 m de profundidad, a partir de la cual la roca se hace evidente. El Sondeo S7 presenta un comportamiento predominantemente arcilloso hasta los 800 m de profundidad. El Sondeo S9, cercano al pozo Libertad, muestra un sedimento arcilloso hasta los 140 m de profundidad, subyaciendo se observa un escalón que aumenta la resistividad que insinúa la presencia de roca a los 400 m. El escalón mencionado entre los 140 m y 400 m de profundidad genera incertidumbre en cuanto a la profundidad de la roca. Según el mapa isobático calculado por la gravimetría,

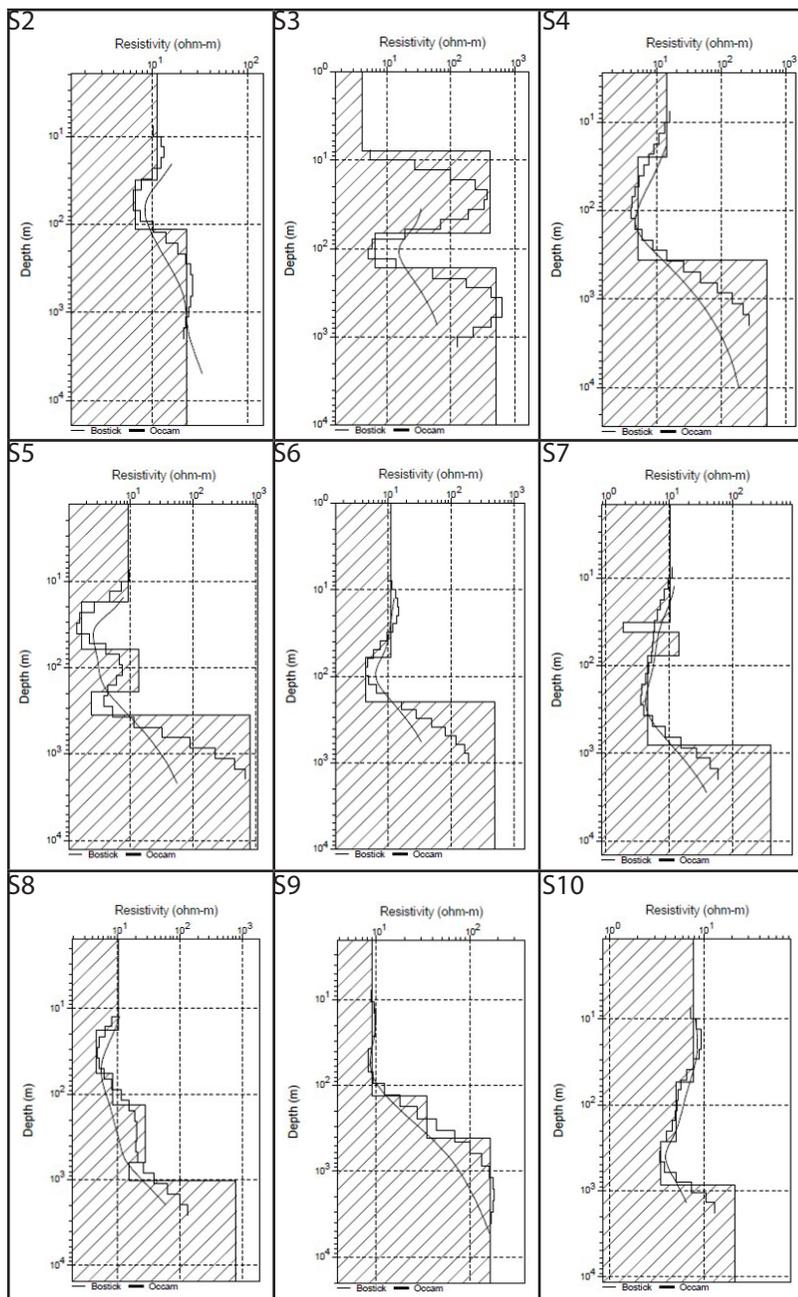


Figura 6. Modelos 1D de los sondes MT.

la profundidad del basamento se encontraría a los 140 m de profundidad y si eso fuera correcto la resistividad del mismo estaría en torno a los 50 ohm-m, cosa que difiere de la hipótesis original que considera el basamento con resistividades mayores a los 200 ohm-m en el caso de rocas alteradas y saturadas en agua. El sondeo S10, realizado en las cercanías de Kiyú, se distingue un perfil arcilloso que supera los 800 m de profundidad, por debajo se podría estimar la presencia de roca.

Posteriormente a las inversiones 1D, se generó una inversión 2D con las estaciones S9, S3, S1, S4 y S5. Dichas estaciones forman un perfil prácticamente superpuesto al perfil 1 gravimétrico. Para dicha inversión se consideraron los sondeos según su adquisición; es decir a 0° (TE hacia el norte) y se utilizó el algoritmo de gradientes conjugados no lineales (NLGC, Rodi Mackie, 2001). Para generar una buena inversión es importante el diseño de una malla adecuada a efectos de alcanzar resultados numéricos más precisos. Para evitar inestabilidades de cálculo, los elementos de la malla presentan un refinamiento mayor en zonas de interés. El modelado se realizó por ensayo y error, partiendo como modelo inicial un mallado homogéneo con una resistividad de 100 ohm-m. Posteriormente, se fue variando el espesor de la malla para aumentar el número de celdas y obtener un mayor detalle en zonas someras y en la cima del basamento, que en este caso es el objetivo principal de estudio. Se invirtieron conjuntamente ambos modos de polarización, TM y TE. A los efectos de obtener el mayor ajuste de los datos, no se utilizaron las curvas suavizadas y se incluyeron los errores en los datos. Se invirtió ajustando simultáneamente las curvas de resistividad y fases, usando un error del 10% para resistividad y 5% para las fases. Cuando no se obtuvo un ajuste ideal en las curvas de resistividad, se efectuó una nueva inversión a partir del modelo más reciente, procurando tener la mejor precisión de los resultados numéricos con la malla y verificando la convergencia de las soluciones numéricas. El modelo final se presenta en la Figura 7 con un error RMS de 1.3.

El modelo de la inversión 2D ilustra la existencia del graben, con un horst en la zona de Libertad y la roca del basamento más profunda (>800 m) hacia Rincón de la Bolsa y el río Santa Lucía. También, se distingue que el basamento desciende entre los sondeos S3 y S1, evidenciando la complejidad dimensional de dichos sondeos.

El análisis conjunto de resultados de ambas metodologías aplicadas (gravimétrica y magnetotelúrica), permite definir zonas donde el basamento cristalino tiene una cota segura y lugares donde debería investigarse con mayor detalle su profundidad.

En el mapa isobático se distingue que en el sector SE la roca alcanzaría poco más de 800 m, con una relativa coincidencia con los sondeos magnetotelúricos cercanos, aunque hay detalles y pequeñas diferencias en cuanto a la profundidad en algunos, especialmente en los sondeos S3 y S6, que se ubican en una zona donde el mapa isobático gravimétrico indica profundidades que superan los

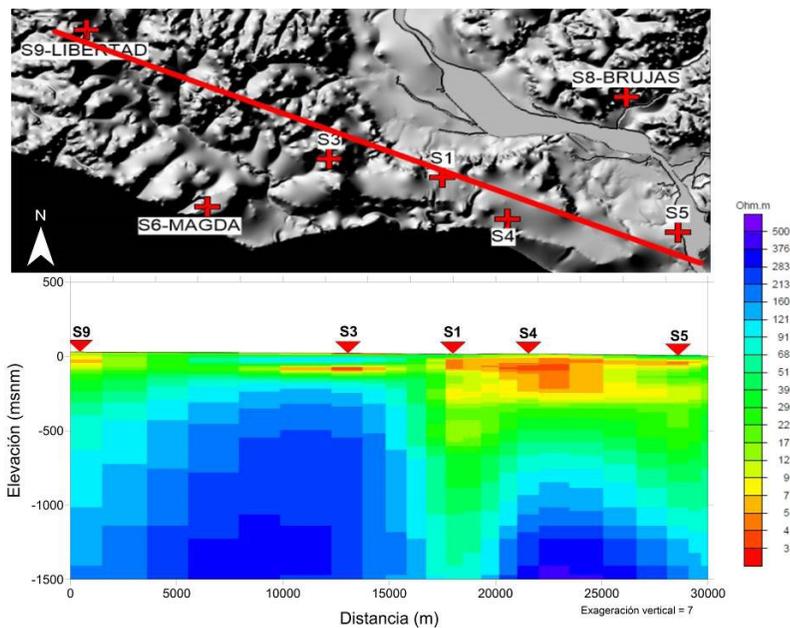


Figura 7. Inversión 2D de 5 sondeos MT.

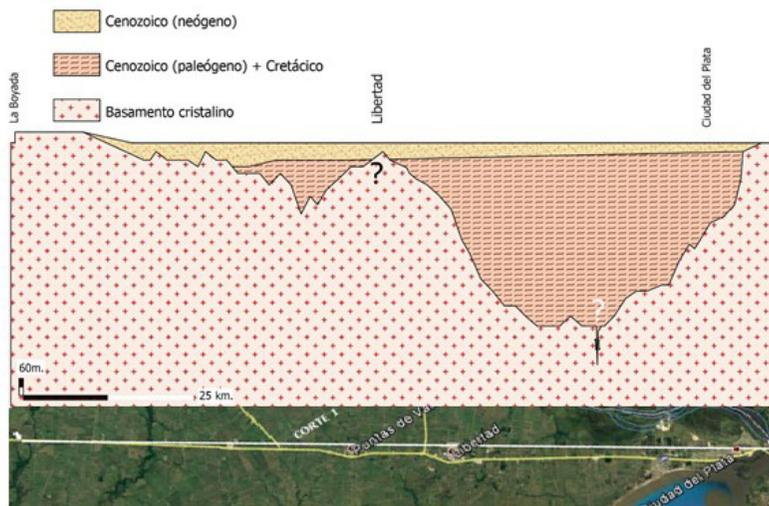


Figura 8. Corte litológico longitudinal, paralelo a la Ruta 1.

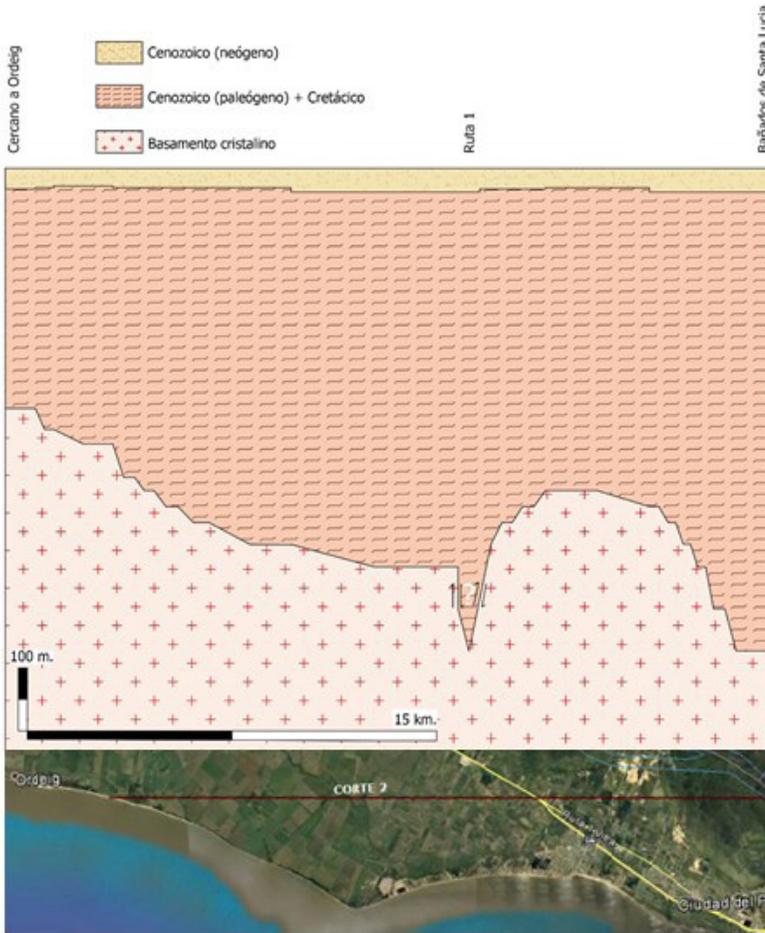


Figura 9. Corte litológico oblicuo a la Ruta 1.

500 m. Sin embargo, las profundidades del basamento encontradas por los métodos de resistividad rondan los 200 m; en la zona del sondeo S3 el basamento se encontró a 170 m, y para el sondeo S6 a 200 m con el equipo MT. Otras diferencias se encuentran en los sondeos S7 y S9, donde para el primer caso (S7) el mapa isobático muestra una extrapolación de la información gravimétrica, por lo que parecería más sustentable la profundidad del basamento brindada por el sondeo MT, y en el segundo caso (S9), la curva de resistividad del sondeo MT presenta un escalón con una resistividad intermedia que genera incertidumbre en cuanto a la profundidad del basamento.

El corolario de los resultados correspondiente al análisis conjunto de las metodologías aplicadas parece ser definitivo: la dirección NE-SO es el sector más profundo de la porción de cuenca analizada. Los demás sectores presentan la roca encima de 450 m.

Los trabajos realizados fueron ejecutados con el mayor cuidado posible, repitiendo incluso medidas de MT en dos casos. Aún así, se mantuvo la incertidumbre sobre los datos adquiridos en las cercanías de Libertad, donde se asumió que la roca se encontraba a 142 m de profundidad. El sondeo MT, que se realizara en un sitio próximo a esta ciudad, no acusaba presencia de roca antes de los 350 m.

A modo de resumen, las Figuras 8 y 9 proponen dos cortes, uno a lo largo de la Ruta 1 y otro oblicuo a ella en el sector SE de la cuenca estudiada, respectivamente.

Con signos de interrogación se muestran las dudas que permanecen tras este análisis, con el propósito de que sean retomadas y estudiadas para su aclaración.

Conclusiones

El sector comprendido entre los ríos San José, Santa Lucía y de la Plata, pertenecientes a la fosa tectónica del río Santa Lucía, presenta profundidades promedio de 200 m y más hasta alcanzar el basamento cristalino en torno a la localidad de Libertad.

Hacia ciudad del Plata (Rincón de la Bolsa) esas profundidades van desde 250 m hasta 800 m y más, existiendo una cuña de poca profundidad y afloramiento en el sector del puente que une los departamentos San José y Montevideo. Fuera del sector estudiado, parece tener un incremento en profundidad hacia el centro-norte, en la zona inmediata al río San José.

El presente estudio permitió reconocer una pequeña área de esta cuenca y, distinguir el espesor sedimentario y el piso rocoso en forma aproximada. Queda una incógnita importante sobre la profundidad real a la que los sondeos MT de mayor penetración alcanzan el basamento cristalino. Debido a la baja resistividad de las rocas presentes, no se puede confirmar si se trata de basamento fisurado o rocas de baja resistividad.

Dentro del espesor sedimentario, solamente se puede distinguir, entre los 40 m y hasta los 70 m en promedio los sedimentos correspondientes a la Fm. Raigón y a la Fm. Camacho, apoyados en forma continua sobre las formaciones Fray Bentos y Migueles, sin observarse mayores diferencias en la resistividad de estas últimas.

El Sondeo S2 dejó una zona de incertidumbre. Es conveniente en estudios posteriores, realizar un perfil con dirección normal a la posible falla, insinuada por las resistividades contrapuestas en ambas direcciones.

Será necesario realizar la adquisición con sondeos MT utilizando un rango menor de frecuencias de muestreo para alcanzar mayores profundidades y tener

mayor certidumbre de la profundidad del basamento en zonas donde las bajas resistividades encontradas propiciaron una baja profundidad de exploración.

Por último, el *horst* que la bibliografía refiere en la ciudad de Libertad debería revisarse con mayor detalle, realizando mediciones geofísicas más cercanas, ello debido a que el arreglo empleado en esta investigación con las dos metodologías geofísicas no lo identifican a profundidad somera.

Los episodios arenosos o fracturados en profundidad podrían albergar aguas termales, cuya temperatura se correspondería con el gradiente geotérmico del país (+3°C cada 100 m). La profundidad máxima de extracción alcanzaría los 800 m-900 m en el este-sudeste del área estudiada, y, posiblemente, en cercanía del sondeo S1, donde se observa un incremento de resistividad en el gradiente vertical a partir de los 700 m.

Referencias

- Bobachev, C. (2002). IPI2Win: A windows software for an automatic interpretation of resistivity sounding data. Moscow State University, 320.
- Bossi, J. & Navarro, R. (1988). *Geología del Uruguay*, tomo 2, Departamento de Publicaciones, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay.
- Cagniard, L. (1953). "Basic theory of the magnetotelluric method of geophysical Prospecting", *Geophysics*, 18: 605-645.
- De los Santos, J. et al. (1998). "Modelación numérica del acuífero Raigón, sector sudeste", Facultad de Ingeniería, proyecto CONICYT-BID, Informe final.
- , (1999). Carta de vulnerabilidad del acuífero Raigón. Facultad de Ingeniería-DINAMA, Informe final.
- Loke, M.H. & Lane Jr., J.W. (2004). "Inversion of data from electrical resistivity imaging surveys in water-covered areas", *Exploration Geophysics*, 35(4): 266-271.
- Orellana, E. (1972). *Prospección geoeléctrica en corriente continua*.
- Meli'l, J., P. Njandjock & D. Gouet (2011). "Magnetotelluric method for groundwater exploration in crystalline basement complex, Cameroon", *Journal of Environmental Hydrology*, 19.
- Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca de Uruguay. Disponible en: <http://www.mgap.gub.uy/unidad-organizativa/direccion-general-de-recursos-naturales/tramites-y-servicios/biblioteca-digital/modelo-digital-del-terreno>, consultado en 2017.
- Rodi, W. & Mackie, R.L. (2001). "Non linear conjugate gradients algorithm for 2-D magnetotelluric inversion", *Geophysics*, 66: 174-187.
DOI: <https://www.doi.org/10.1190/1.1444893>.
- Rossello, E.A.; Veroslavsky, G., de Santa Ana, H. & Rodríguez, P. (2017). *Depocentros mesozoicos y rasgos tectónicos del basamento cristalino del Río de la Plata (Argentina y Uruguay)*.
- Tikhonov, A.N. (1950). "The determination of the electrical properties of deep layers of the Earth's crust", *Dokl. Acad. Nauk. SSR*, 73: 295-297.

- Veroslavsky, G.; de Santa Ana, H. y Rossello, E.A. (2004). "Origen y evolución tectosedimentaria de los depósitos jurócretácicos de la región meridional del Uruguay: su vinculación con el Lineamiento Santa Lucía-Aiguá-Merín", en Veroslavsky, G., M. Ubillay & S. Martínez (eds.), *Cuencas sedimentarias de Uruguay: Geología, paleontología y recursos minerales. Mesozoico*, DIRAC, Universidad de la República de Uruguay, Montevideo, pp. 117-142.
- Vozoff, K. (1972). "The magnetotelluric method in the exploration of sedimentary basins", *Geophysics*, 37: 98-141.



Reporte **técnico**

Caracterización y estadística de señales volcánicas en los Andes, casos de estudio volcanes Reventador y Cotopaxi en Ecuador

Participantes:

Hugo Ortiz, Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Ecuador¹

Juan Anzieta, Pontificia Universidad Católica del Ecuador

Jeffrey Johnson, Boise State University

Gabriela Badi, Universidad Nacional de la Plata

Jorge Córdova, Escuela Politécnica Nacional

Stephen Hernandez, Escuela Politécnica Nacional

Aaron Marshall, Boise State University

Jacob Anderson, Boise State University

Kabir Sulca, Pontificia Universidad Católica del Ecuador

Introducción

El proyecto "Caracterización y estadística de señales volcánicas en los Andes, casos de estudio volcanes Reventador y Cotopaxi en Ecuador" (GEOF 02 2019), formó parte del Programa de Asistencia Técnica del año 2019 del Instituto Panamericano de Geografía e Historia. Contempló trabajos de campo en el volcán Reventador en tres ocasiones, para descarga de datos y mantenimiento de las estaciones acústicas CON, LAV y AZU.

Como parte de los trabajos de campo y de las discusiones científicas, se contó con la asistencia del doctor Jeffrey Johnson. También, se llevó a cabo el taller "Principios de Geofísica y Comunicación", con la asistencia de 19 estudiantes de seis universidades, y siete instructores de diversas áreas de Ciencias de la Tierra.

Adicionalmente, se hizo una consultoría para el desarrollo de un sistema de adquisición de datos acústicos, del cual ya se tienen los esquemas y reportes. Finalmente, se publicaron los resultados del proyecto en mayo de 2019, en la revista *International Journal of Geophysics*, igualmente se enviaron los resúmenes científicos a las conferencias: Fall Meeting 2019-American Geophysical Union, 8th International Symposium on Andean Geodynamics y al 1er Congreso de la Asociación Latinoamericana de Volcanología.

.....
¹ Correo electrónico: huda013@gmail.com

Otra parte del proyecto estuvo centrada en el procesamiento de datos, obtención de modelos físicos para la interpretación de la actividad eruptiva del Reventador. También se fomentó la transferencia de conocimiento a través de una pasantía especializada en el ámbito de la sismología volcánica.

Objetivo general

Utilizar metodologías estadísticas y herramientas computacionales para caracterizar e interpretar las diversas señales sísmicas e infrasónicas de los volcanes Cotopaxi y Reventador, así como su recurrencia en el tiempo.

Objetivos específicos

1. Fortalecer y mantener los sistemas de campo para el registro de señales sísmicas e infrasónicas.
2. Identificar e interpretar los mecanismos físicos que generan las señales sísmicas e infrasónicas registradas en las redes de monitorización.
3. Desarrollar modelos probabilísticos sobre la ocurrencia de erupciones volcánicas.
4. Fomentar y desarrollar grupos de trabajo multinacionales en el área de sismología volcánica.
5. Impulsar, elaborar, publicar, y divulgar el conocimiento de geofísica de volcanes.

Detalle de actividades

1. Trabajo de campo en el volcán Reventador, del 4 al 7 de febrero de 2019. Juan Anzieta, Jorge Córdova y Hugo Ortiz visitaron los flancos norte y sur del volcán para realizar mantenimiento y descarga de datos de tres arreglos acústicos: LAV, AZU y CON.
2. Trabajo de campo en el volcán Reventador, del 22 al 24 de febrero de 2019. Stephen Hernandez y Hugo Ortiz realizaron el cambio de baterías e instalación de paneles solares en el arreglo acústico CON y la posterior descarga de datos. También atendieron los arreglos LAV y AZU para la descarga de datos.
3. Trabajos de campo, conformación de grupos de trabajo multidisciplinarios, y divulgación sobre geofísica de volcanes, del 25 al 27 de junio de 2019. A través de postulación y concurso, 18 estudiantes de pregrado de seis universidades y un técnico, accedieron a becas para participar en el taller "Principios de Geofísica y Comunicación". Hubo siete instructores presenciales y dos instructores remotos. El taller fue reubicado en la ciudad de Baños, Ecuador, debido a que la carretera hacia el volcán Reventador estuvo cerrada por el colapso de un puente y varios deslizamientos.
4. Visita técnica del doctor Johnson, del 24 de junio al 2 de julio de 2019. El doctor Johnson fue instructor en el taller "Caracterización y estadística de señales

volcánicas” y formó parte del grupo de investigadores que realizó trabajo de campo en el volcán Reventador del 28 junio al 2 de julio. Durante la estancia se recopiló material audiovisual sobre fenómenos geofísicos superficiales y trabajo de campo, y se discutieron productos científicos sobre la actividad acústica del volcán Reventador.

5. Trabajo de campo en el volcán Reventador, del 28 de junio al 2 de julio de 2019. Hugo Ortiz, junto a investigadores de diferentes disciplinas de Boise State University, NASA y la Escuela Politécnica Nacional, participó en la caracterización de procesos geofísicos superficiales en el volcán. En esta ocasión se realizó la descarga de datos de los arreglos acústicos AZU y CON.
6. Consultoría para el desarrollo de un sistema de digitalización y adquisición de datos de infrasonido del 15 de abril al 30 de agosto de 2019. Se registraron el reporte y esquemas de la consultoría y se realizaron pruebas en el laboratorio; las pruebas de campo se programaron para realizarse en el periodo del 19 al 23 de agosto de 2019.
7. El primer artículo científico del proyecto de investigación titulado: “Finding Possible Precursors for the 2015 Cotopaxi Volcano Eruption Using Unsupervised Machine Learning Techniques” se publicó revista *International Journal of Geophysics*, en mayo de 2019. El IPGH recibió el reconocimiento por el apoyo brindado al interior del artículo.
8. Con fondos de la contraparte del proyecto, el sistema de digitalización y adquisición de datos de infrasonido fueron actualizados. Nuevos componentes electrónicos al sistema de digitalización fueron incorporados, así como la actualización de los programas para la adquisición de datos.
9. Durante el taller “Community Network For Volcanic Eruption Response” realizado en Fairbanks, Alaska, se coordinó y conversó sobre los productos científicos del proyecto con Jeffrey Johnson y Juan Anzieta.
10. Los productos científicos del proyecto fueron presentados en el American Geophysical Union Fall Meeting 2019. El estudio se tituló: “Overview of Reventador Infrasound Activity from January 2915 to June 2019”.
11. Las visitas de campo al volcán Reventador realizadas en dos periodos: del 22-25 de diciembre de 2019 y del 4-6 de enero de 2020, donde se realizó el mantenimiento y de descarga de datos de las estaciones LAV, AZU y CON.
12. Pasantía y tutoría en sismología volcánica a Jorge Perea, estudiante de Yachay Tech University.

Logros

- Se ha realizado mantenimiento periódico a las estaciones acústicas LAV, CON y AZU. Helicorders de los datos recolectados en las cinco salidas de campo están disponibles.

- Un artículo científico publicado, dos artículos en proceso de elaboración y cinco resúmenes enviados a conferencias nacionales e internacionales.
- Presentación de resultados científicos en la conferencia AGU Fall Meeting.
- Asistencia de 19 estudiantes al taller “Principios de Geofísica y Comunicación”, con la participación de nueve instructores de diferentes disciplinas de las Ciencias de la Tierra.
- Nuevos esquemas y programas del sistema de digitalización acústico de datos están disponibles.
- Dos reuniones técnicas. La primera con el doctor Johnson en Ecuador y la segunda con Juan Anzieta y el doctor Johnson, en Alaska, para la discusión de modelos probabilísticos sobre la recurrencia eruptiva del volcán Reventador.
- Los trabajos de campo descritos en las actividades 1, 2, 5 y 11, se han completado a cabalidad y están enmarcados en los objetivos específicos 1 y 4.
- El taller “Principios de Geofísica y Comunicación”, reunió a 26 personas entre estudiantes, técnicos e investigadores de áreas como la geología, geofísica, sismología, vulcanología y comunicación, para discutir problemas actuales en la geofísica de volcanes. La transferencia de conocimiento a los estudiantes fue evaluada a través de tareas en el aula y actividades de campo para dar cumplimiento a los objetivos específicos 4 y 5.
- Durante la reunión técnica mantenida con el doctor Johnson, se definieron las preguntas científicas que podrían ser abordadas con el conjunto de datos recolectados y se envió un resumen científico a una conferencia internacional. También se documentó el trabajo de campo y se elabora la edición de un cortometraje. Actividades que impulsan los objetivos específicos 2, 3 y 5.
- El diseño y ensamble del sistema de digitalización de datos de infrasonido está listo y puede aportar al fortalecimiento de los sistemas de campo para el registro de erupciones, de acuerdo al objetivo específico 1.
- Se ha publicado un artículo científico enmarcado en el proyecto con el fin de impulsar, elaborar y divulgar el conocimiento de la geofísica de volcanes. Además, se presentan nuevas metodologías que ayudan a reconocer premonitores en erupciones volcánicas.
- La actualización del sistema de digitalización y adquisición de datos acústicos, ha permitido obtener un sistema más robusto y confiable. Trabajo que incide en objetivo 1.
- La presentación de resultados en talleres y conferencias internacionales ha permitido obtener retroalimentación en nuestros métodos e interpretaciones físicas de erupciones de colegas de diferentes disciplinas de la vulcanología, lo cual ha permitido establecer colaboraciones a largo término.
- Transferencia específica de conocimiento a estudiantes universitarios.

Decisiones tomadas

- Continuación con el mantenimiento y descarga de datos de los arreglos acústicos: CON, LAV y AZU.
- Pruebas de campo en el volcán Reventador del sistema de digitalización y revisión del código.
- Preparación de un trabajo científico sobre la diversa actividad acústica en el volcán, para la presentación en Fall Meeting 2019, American Geophysical Union.
- Entrega de certificados a los estudiantes que aprobaron el taller "Principios de Geofísica y Comunicación"
- Reunión técnica en noviembre de 2019 con el doctor Johnson.
- Elaboración de artículos científicos para *Revista Geofísica* del IPGH y *Journal Geochemistry, Geophysics, Geosystems*.

Hitos en gestión del proyecto en el año 2019

- Febrero: mantenimiento y descarga de datos en el volcán Reventador.
- Marzo-agosto: procesamiento de datos acústicos.
- Mayo: publicación del artículo "Finding Possible Precursors for the 2015 Cotopaxi Volcano Eruption Using Unsupervised Machine Learning Techniques".
- Mayo-junio: preparativos para el taller "Principios de Geofísica y Comunicación".
- Junio: taller "Principios de Geofísica y Comunicación".
- Julio: mantenimiento y descarga de datos en el Volcán Reventador.
- Abril-agosto: diseño, ensamble y evaluación del sistema de digitalización de datos de infrasonido/acústicos.
- Agosto: pasantía y tutoría a Jorge Perea.
- Septiembre-diciembre: actualización del sistema de digitalización y adquisición de datos de infrasonido.
- Noviembre: reunión técnica con Jeffrey Johnson y Juan Anzieta en Fairbanks, Alaska.
- Diciembre: presentación de resultados en la conferencia AGU Fall Meeting.
- Diciembre-enero, 2020: trabajos de mantenimiento y descarga de datos en el volcán Reventador.

Reseña

4th Iberoamerican Seminar on Forensic Geosciences

Ana Luz Caccavari Garza¹

Desde la década de 1960, se ha informado de la desaparición de miles de personas en México y América Latina, muchas de ellas a la fecha, no han podido ser localizadas; los métodos tradicionales de búsqueda no son suficientes. Es por eso que la aplicación e integración de los conocimientos de las Ciencias de la Tierra en la Ciencia Forense, resulta fundamental para el desarrollo de esta disciplina, ya que aporta útiles y novedosas herramientas. La geociencia forense surge en respuesta a diversas problemáticas que enfrentan los países tanto en Latinoamérica como en el mundo, buscando aportar información que contribuya a solucionar delitos de tipo penal y civil, en beneficio de la sociedad.

Bajo este panorama se organizó el 4to. Seminario Iberoamericano en Geociencia Forense, llevado a cabo en Puerto Vallarta, México, del 28 al 29 de octubre de 2019. Se realizó en asociación con la Reunión Anual de la Unión Geofísica Mexicana (RAUGM), la Universidad Antonio Nariño (Colombia), la Policía Federal Brasileña y el Grupo de Geociencia Forense (Italia).

Durante más de diez años, la Iniciativa sobre Geología Forense (IFG) de la Unión Internacional de Ciencias Geológicas (IUGS), ha organizado cuatro Seminarios Iberoamericanos en Geociencia Forense.

El primer seminario se llevó a cabo en la Universidad Nacional de Colombia, en colaboración con el Instituto Nacional de Medicina Legal de Colombia (30 de marzo al 3 de abril de 2009), en Bogotá, Colombia.

El segundo, se realizó en colaboración con la Policía Federal Brasileña (BFP) y el Grupo de Geociencias Forenses de la Sociedad Geológica de Londres, en el Instituto Nacional de Criminalística (INC), en Brasilia, Brasil (2 al 4 de octubre de 2013).

El tercer seminario, en asociación con el Programa Nacional de Ciencia y Justicia, la Universidad Antonio Nariño, la Universidad Nacional de Río Cuarto, el Conicet, el Grupo de Geociencia Forense (Italia) y la Policía Federal de Brasil, fue realizado en La Plata, Argentina (30 de noviembre al 1 de diciembre de 2017).

El 4to. Seminario Iberoamericano en Geociencia Forense se centró en las aplicaciones de la geociencia para ayudar en la investigación de delitos en México y América Latina. Se buscó continuar con la difusión de los trabajos realizados en esta área, y se invitó a reconocidos especialistas que pudieran aportar nuevas

.....
¹ Servicio Magnético, Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM),
correo electrónico: anavari@igeofisica.unam.mx

herramientas y puntos de vista para impulsar y fortalecer la integración de las Ciencias de la Tierra en el contexto forense.

Los temas considerados fueron: análisis de suelos, SIG, exploración geofísica superficial, fraude de gemas y minerales, percepción remota, desastres ambientales y civiles, geomorfología, así como la relación interdisciplinaria de estos con la micología, tafonomía, entomología, palinología, arqueología, antropología y genética.

Las presentaciones incluyeron ejemplos de buenas prácticas y técnicas nuevas e innovadoras en geociencia forense, tales como el uso de drones, rovers y geofísica somera, la aplicación de los procesos de descomposición utilizados en la búsqueda y el análisis de la escena del crimen. También se presentó la Estrategia de Búsqueda Geoforense (GSS), que es un método desarrollado, con más de 25 años de investigación y rastreo, de los restos de un homicidio en Reino Unido. Actualmente, este método se ha aplicado en toda América Latina para la búsqueda de personas desaparecidas.

Cabe destacar que en México se están desarrollando diversos trabajos en esta materia, mismos que fueron presentados en este seminario. Entre ellos, el estudio en un campo de pruebas ubicado en la Ciudad de México, en el que se simularon siete fosas con diferentes características y profundidades, en el que, de manera periódica y sistemática, se hicieron tanto sondeos geofísicos: de prospección de Tomografía de Resistividad Eléctrica Capacitiva (TREC), sondeos de conductividad (CMD) y de Radar de Penetración Terrestre (GPR), como de teledetección: monitoreo hiperespectral, monitoreo térmico y fotogrametría. También, un estudio de caracterización geofísica para una fosa común dentro de un panteón, en el estado de Michoacán, México, en el que se combinó el uso de Tomografía de Resistividad Eléctrica (ETR) en las modalidades 2D y 3D y el Radar de Penetración Terrestre (GPR), con el objetivo de generar imágenes de alta resolución y comprobar la funcionalidad de estas técnicas en un contexto forense real y controlado. La geofísica de exploración somera, en particular la técnica de ETR 3D, es una herramienta aún poco utilizada dentro del ámbito forense en México.

En ambos trabajos se busca analizar y evaluar el uso de los diferentes métodos geofísicos y ópticos, y plantear una metodología funcional que permita optimizar la obtención de la información como la geometría y las propiedades físicas de los objetos y estructuras enterradas, aplicado en el contexto forense.

Los métodos geofísicos de exploración y de teledetección son una herramienta importante en los estudios de geociencia forense, ya que, al ser métodos no invasivos, ayudan a caracterizar la zona de interés reduciendo la pérdida de información material y optimizando el tiempo de búsqueda y de excavación, aportando además un registro físico.

Además, se presentaron numerosos casos operativos en los que los geólogos forenses han contribuido positivamente en las investigaciones policiales en todo

el mundo. Hubo también trabajos y debates sobre la aplicación de la geología forense en la industria minera, metalúrgica y ambiental. Si bien la minería ha generado una gran riqueza, también atrae actividades delictivas. Se realizaron exposiciones en las que se mostró cómo los geólogos forenses apoyan cada vez más las investigaciones de minería ilegal, robo, falsificación, adulteración, sustitución, contrabando y minerales conflictivos.

También se habló del papel de la geociencia forense en las investigaciones ambientales. Se expusieron los casos de las presas de relaves en Brasil: Brumadinho, en 2019 y Mariana, en 2015, que tuvieron fallas en su construcción, y derivaron en grandes desastres que causaron daños ambientales generalizados y pérdida de vidas humanas.

Durante el Seminario, se impartió un curso de Geociencia Forense por parte de los delegados del IUGS, en el que participaron alrededor de 30 personas, entre profesionales, académicos, investigadores y estudiantes. Se trabajaron técnicas de búsqueda en tierra, examen de la escena del crimen y recuperación de rastros geológicos de un automóvil.

La RAUGM tuvo como tema ese año "Geociencia y sociedad", por lo que la presentación invitada sobre geología forense, por parte del fundador de la IUGS, Laurence Donnelly, también permitió reflexionar sobre el papel de esta línea de estudio en el contexto que viven México y América Latina, y la importancia de seguir integrando las Ciencias de la Tierra en beneficio de la sociedad.

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 Paleomagnetismo y Tectónicas, Oceanografía Física.

Sistema de arbitraje

Los manuscritos recibidos por el Editor de la *Revista Geofísica* son evaluados por dos miembros de Comité Editorial, pudiendo requerirse la opinión de un tercer miembro si es el caso, para la aceptación definitiva del artículo.

Instructivo para autores

Los autores interesados en publicar en la Revista Geofísica, deberán registrarse de forma correcta en el portal de las Revistas Científicas del IPGH: <https://revistasipgh.org>, para disponer de un nombre de usuario y una contraseña personal.

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.
- La adscripción de los autores comprenderá los siguientes datos que se incluirán a pie de página al inicio del artículo: Nombre del autor, institución a la que pertenece, dirección postal, país, dirección electrónica y ORCID.
- 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. El resumen incluye el título del artículo en el idioma que corresponda.
- 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, 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. Las imágenes, además deberán ser incluidas de manera separada en formato .png, .tiff o .jpg sin compresión y a color con su respectiva numeración y descripción o fuente.

- Los artículos deberán presentarse en formato Word, tamaño carta con márgenes normales, fuente Arial de 12 puntos, interlineado de 1.5.
- La sección de Referencias, deberá estar citada en formato APA. La lista de referencias al final del trabajo solo debe contener aquellas que se han citado en el cuerpo del texto. Se debe incluir enlace DOI o enlace web en todos los casos que sea posible.

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-Miller 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.

- El aviso del resultado a los autores será en un plazo no mayor de un año.
- Todos los autores deberán atenerse a estos lineamientos.

Los artículos deben enviarse al Editor de la Revista Geofísica:

M.Sc. J. Esteban Hernández-Quintero
 Instituto de Geofísica
 Universidad Nacional Autónoma de México
 Ciudad de México
 Correo electrónico: geofisica_editor@ipgh.org
[Revista Geofísica \(revistasipgh.org\)](http://RevistaGeofisica(revistasipgh.org))

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:

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
<https://revistasipgh.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
2020

ESTADOS MIEMBROS
DEL
INSTITUTO PANAMERICANO DE GEOGRAFÍA E HISTORIA

Argentina

EL IPGH, SUS FUNCIONES Y SU ORGANIZACIÓN

Belice

Bolivia

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.

Brasil

Chile

Colombia

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.

Costa Rica

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

Ecuador

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

El Salvador

Estados Unidos de América

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

Guatemala

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

Haití

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.

Honduras

México

El IPGH se compone de los siguientes órganos panamericanos:

Nicaragua

1) Asamblea General

2) Consejo Directivo

Panamá

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

Paraguay

Perú

4) Reunión de Autoridades

República Dominicana

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

Uruguay

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.

Venezuela



Gravedad en la estructura andina Segmento 18°-42° S Manuel Araneda, María Soledad Avendaño, María Inés Pastorino y Álvaro Araneda • **Procesos gravitacionales en zonas de ladera, aplicándolos a modelos de predicción real con Archivos Raster y SIG,** Alcaldía Álvaro Obregón, Ciudad de México Oscar Daniel Rivera González • **Modernización con bajo presupuesto de la estación hidrométrica de Guaqui, lago Titicaca** Bismarck Jigena Antelo, Luis Miguel Carrasco Nattes, Juan Jose Muñoz Pérez, Manuel Berrocoso Domínguez y Renato Mamani Velázquez • **Análisis morfotécnico y gravimétrico en un valle intermontano de la Precordillera Central de San Juan, Argentina** L.P. Perucca, F. Audemard M., J.M. Alcacer Sánchez, M. Rothis, M. Vargas, F. Haro., F. Tejada, P. Blanc, N. Vargas, G. Lara y M. Onorato • **Investigación geofísica en la Fosa de Santa Lucía, Uruguay** Jorge Eduardo de los Santos Gregoraschuk, Manuel Araneda Cabrera, Álvaro Araneda Avendaño, Julián Andrés Ramos Cavallo, Fernando Corbo Camargo • **Caracterización y estadística de señales volcánicas en los Andes, casos de estudio volcanes Reventador y Cotopaxi en Ecuador** Hugo Ortiz • **4th Iberoamerican Seminar on Forensic Geosciences** Ana Luz Caccavari Garza
