

REVISTA

# GEOFÍSICA

AMBATO

Instituto Panamericano de Geografía e Historia



NÚMERO 69

2019

**AUTORIDADES DEL  
INSTITUTO PANAMERICANO DE GEOGRAFÍA E HISTORIA  
2022-2025**

**PRESIDENTE** Dra. Patricia Solís (*Estados Unidos*)  
**VICEPRESIDENTE** Lic. Rocsanda Pahola Méndez Mata (*Guatemala*)

**SECRETARIO GENERAL**  
Mtro. Antonio Campuzano Rosales  
(*México*)

**COMISIÓN DE CARTOGRAFÍA**

(*Costa Rica*)  
Presidente:  
MSc. Max Lobo Hernández

Vicepresidente:  
MSc. Christian Núñez Solís

**COMISIÓN DE GEOGRAFÍA**

(*Chile*)  
Presidente:  
Dr. Hermann Manríquez Tirado

Vicepresidente:  
Dr. Rodrigo Barriga Vargas

**COMISIÓN DE HISTORIA**

(*República Dominicana*)  
Presidente:  
Dr. Filiberto Cruz Sánchez

Vicepresidente:  
Dra. Reina Cristina Rosario Fernández

**COMISIÓN DE GEOFÍSICA**

(*Ecuador*)  
Presidente:  
Dr. Mario Calixto Ruiz Romero

Vicepresidente:  
Dra. Alexandra Alvarado Cevallos

**MIEMBROS NACIONALES DE LA COMISIÓN DE GEOFÍSICA**

Argentina	Ing. Rodolfo García
Belice	
Bolivia	Cnl. DAEN. Darwin Román
Brasil	
Chile	Sr. Juan Carlos Báez
Colombia	Geól. Carlos Alberto Vargas Jiménez
Costa Rica	Dr. Erick Rivera Fernández
Ecuador	Mgs. Juan Gabriel Barros López
El Salvador	Ing. José Antonio González Magaña
Estados Unidos	Dr. Christopher L. Castro
Guatemala	Ing. Oscar Cruz Ramos
Haití	Dr. Kelly Guerrier
Honduras	
México	Dr. José Luis Macías Vázquez
Nicaragua	Sra. Iris Cruz
Panamá	Sr. Luis Santamaría
Paraguay	Lic. Rafael Fugarazzo
Perú	Dr. Juan Carlos Villegas Lanza
Rep. Dominicana	Dr. Eugenio Polanco Rivera
Uruguay	Cnel. Héctor Rovera
Venezuela	

REVISTA

---

# GEOFÍSICA

---

número 69 • 2019



INSTITUTO PANAMERICANO DE  
**GEOGRAFÍA E HISTORIA**

# INSTITUTO PANAMERICANO DE GEOGRAFÍA E HISTORIA

REVISTA GEOFÍSICA

Publicación fundada en 1971

Indizada en las bases académicas: PERIÓDICA, EBSCO, Cengage, JStor

Editor:

Dr. Juan Esteban Hernández Quintero

Instituto de Geofísica

Universidad Nacional Autónoma de México, México

Correo electrónico: [geofisica\\_editor@ipgh.org](mailto: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, (México)

*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)

Venta y distribución de publicaciones:

Departamento de Comunicación Social

Instituto Panamericano de Geografía e Historia

Apartado Postal 18879, 11870, Ciudad de México

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

[publicaciones@ipgh.org](mailto:publicaciones@ipgh.org)

<https://ipgh.org> | <https://revistasipgh.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:** Mapa de infraestructura crítica y poblaciones expuestas a potenciales flujos de lodo a lo largo de las orillas del río Ambato, cerca del volcán Carihuairazo, Ecuador. Fuente: F.J. Vasconez, R. Vásconez, P.A. Mothes "Flujos de lodo del volcán Carihuairazo provocados por el terremoto de Ambato (Ecuador) en 1698 y su reconstrucción numérica con perspectivas a futuro" publicado en este número de la revista (p. 11).

© 2022 Instituto Panamericano de Geografía e Historia.

---

Revista Geofísica, núm. 69, enero-diciembre 2019, 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](mailto:publicaciones@ipgh.org). Editor responsable: M.Sc. Juan Esteban Hernández-Quintero, [geofisica\\_editor@ipgh.org](mailto: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 Comunicación Social del IPGH, Ex-arzobispado núm. 29, Col. Observatorio, Alcaldía Miguel Hidalgo, C.P. 11860, Ciudad de México, México | Fecha de última modificación: 16 de diciembre de 2022.

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 69

2019

**CONTENIDO**

Nota Editorial	5
Editorial Note	7

**Artículos inéditos de investigación**

**Flujos de lodo del volcán Carihuairazo provocados por el terremoto de Ambato, Ecuador, en 1698 y su reconstrucción numérica con perspectivas a futuro**

*Mudflows from the Carihuairazo volcano caused by the earthquake in Ambato, Ecuador, in 1698 and its numerical reconstruction with future perspectives*

Francisco Javier Vasconez

Roberto Vásconez

Patricia Ann Mothese

11

**Experiencias de la enseñanza en tiempos de COVID-19 y nuevos retos en aprendizaje de Ingeniería Geofísica en México, a 50 años de su creación**

*Experiences of teaching in times of COVID-19 and new challenges in learning Geophysical Engineering in Mexico, 50 years after its creation*

Francisco Alejandro Arroyo Carrasco

Sergio Chávez Pérez

Andrés Tejero Andrade

31

**Paradigma de los pronósticos sísmicos en Chile Central**

*Paradigm of seismic forecasts in Central Chile*

M. Araneda

A. Araneda

M. S. Avendaño

61

**Evaluación hidrogeológica para localizar fuentes de abastecimiento en Concepción Buenavista, Estado de Oaxaca, México**

*Hydrogeological evaluation to locate sources of supply in Concepción Buenavista, State of Oaxaca, Mexico*

Martín Carlos Vidal García

Martín Cárdenas Soto

David Escobedo Zenil

Andrés Tejero Andrade

Alejandro García Serrano

75

---

## **Reportes técnicos**

<b>Actividad sísmica y volcánica en El Salvador: el caso del terremoto y la erupción del volcán de San Salvador en 1917</b>	91
Denis Legrand	
<b>(Re)Evaluación de la amenaza y el riesgo por lahares en volcanes activos de El Salvador y Guatemala, con nuevas herramientas de simulación</b>	97
Lucía Capra Pedol	
<b>Instructivo para autores</b>	116

## Nota editorial

La *Revista Geofísica* del Instituto Panamericano de Geografía e Historia (IPGH), se complace en presentar su número 69 en donde se abordan temas propios de las diversas disciplinas que hoy en día son del interés de la comunidad geofísica, sin dejar del lado los valiosos aportes y experiencias en la historia. La temática del volcán Carihuairazo en Ecuador, nos permite reflexionar acerca de la información del pasado y su utilidad para concebir estrategias de protección a la población por peligros relacionados con sismos y/o erupciones en la actualidad. Tales disertaciones nos permiten evaluar, analizar y aprender de otros riesgos latentes como la misma emergencia sanitaria global que afectó muchas actividades, entre estas, aquellas relacionadas con las actividades docentes. Las experiencias que trae consigo un fenómeno sanitario global, nos ha dejado un cúmulo de experiencias que en algunos casos se han quedado para mejorar el proceso de enseñanza-aprendizaje.

No menos importante es el análisis sobre el pronóstico de sismos en Chile Central. La búsqueda de acciones de mitigación de los peligros generados por los sismos, basados en datos duros, en combinación con un buen manejo de la información, aportan a la protección de la población herramientas de acciones de mitigación; en un tema controvertido como lo es el pronóstico, mejor fundamentado que una predicción.

La exploración hidrogeológica permite aminorar los efectos de otro peligro que amenaza el desempeño de la actividad humana; el uso y explotación racional de los mantos acuíferos. La localización de mantos acuíferos como en el caso presentado en este número involucra el concepto que ha cobrado una gran relevancia: la resiliencia. Es de gran importancia la transmisión de las experiencias, las técnicas y metodologías entre los países en América para un desarrollo sustentable y prometedor.

Otro aspecto importante que se presenta en este número, corresponde con los reportes técnicos de los Proyectos de Asistencia Técnica (PAT) del IPGH, los cuales, a través del tiempo han demostrado ser el mejor instrumento para conformar un

acervo de conocimiento teórico-práctico en las Américas, se plasman en éstos, aspectos de peligros y riesgos de diversa índole, como el caso de la actividad sísmica y volcánica, o bien el efecto de los lahares en América Central.

La combinación de las actividades de investigadores, profesores o bien todo profesional asociado a la geofísica en sus distintas líneas de trabajo, quedan plasmadas en este número. El trabajo que se encuentra atrás de cada manuscrito, aporta la experiencia susceptible de ser compartida entre los lectores que enfrentan y abordan problemas similares en las Américas. Permitiendo así una mejor resiliencia ante cada fenómeno que se analiza.

J. Esteban Hernández-Quintero  
*Editor*

## Editorial Note

The Geofísica journal published by the Pan-American Institute of Geography and History (PAIGH) is pleased to present its number 69, which addresses issues to several disciplines that nowadays are of interest to the geophysical community, without neglecting the valuable contributions and experiences in the field of historical applied studies. A topic such as the Carihuairazo volcano in Ecuador allows us to reflect on the information from the past and its usefulness to conceive strategies to protect the population from dangers related to earthquakes and/or eruptions today. Such dissertations allow us to evaluate, analyze and learn from other latent risks such as the same global health emergency that affected many activities, including those related to teaching. The experiences that a global health phenomenon brings with it have left us a wealth of experiences that in some cases have remained to improve the knowledge process.

By the other hand, the earthquakes forecasting in Central Chile is presented in order to search actions to mitigate the dangers generated by earthquakes, based on hard data, in combination with good information management, contribute to the protection of the population with tools for mitigation actions; in a controversial topic such as forecasting, better grounded than a prediction.

Hydrogeological exploration allows to avoid the effects of another kind of hazards that threatens the performance of human activity; the rational use and aquifers exploitation. The geophysical surveying of aquifers, as in the case presented in this issue, involves the concept that has gained great relevance: resilience. It is of great importance the transmission of experiences, techniques and methodologies between the countries in America for a sustainable and promising development.

Technical reports of the PAIGH's supported Projects of Technical Assistance (PTA), have proven to be the best instrument to improve a collection of theoretical and practical knowledge in the Americas.

Hazards of several kinds, such as the case of seismic and volcanic activity, or the effect of lahars in Central America, are described and analyzed to be aware and share experiences in such field.

The work of researchers, professors or any professional associated with geophysics, are embodied in this number. The effort behind each manuscript provides experience that can be shared among readers facing and addressing similar problems in the Americas, allowing a better resilience to each phenomenon that is analyzed.

J. Esteban Hernández-Quintero  
*Editor*

Artículos inéditos de  
**investigación**



# Flujos de lodo del volcán Carihuairazo provocados por el terremoto de Ambato, Ecuador, en 1698 y su reconstrucción numérica con perspectivas a futuro

Mudflows from the Carihuairazo volcano caused by the earthquake in Ambato, Ecuador, in 1698 and its numerical reconstruction with future perspectives

Francisco Javier Vasconez<sup>1</sup>  
Roberto Vásconez<sup>2</sup>  
Patricia Ann Mothes<sup>3</sup>

*Recibido el 3 de agosto de 2020; aceptado el 17 de noviembre de 2021*

## Resumen

En 1698, registros históricos narran la ocurrencia de un gran terremoto ( $7.3 M_c$ ) a los pies del volcán Carihuairazo, Ecuador. El terremoto destruyó la antigua ciudad de Ambato y desencadenó enormes flujos de lodo que descendieron por el río Ambato. Los flujos de lodo enterraron las entonces ruinas de la ciudad y a los sobrevivientes del terremoto. El presente manuscrito utiliza información de los registros históricos y datos de campo para reconstruir los flujos de lodo del evento, utilizando simulaciones numéricas con el fin entender el fenómeno y posibles implicaciones futuras. Eventos de esta naturaleza han ocurrido en la historia reciente del Ecuador y representan una amenaza latente para la sociedad.

Palabras clave: *Carihuairazo, terremoto 1698, deslizamiento, flujos de lodo, aluvión, VolcFlow.*

<sup>1</sup> Instituto Geofísico, Escuela Politécnica Nacional, Ecuador, correo electrónico: [fjvasconez@igepn.edu.ec](mailto:fjvasconez@igepn.edu.ec)

<sup>2</sup> Exploraciones Novomining S.A., Ecuador, correo electrónico: [robertovm@hotmail.com](mailto:robertovm@hotmail.com)

<sup>3</sup> Instituto Geofísico, Escuela Politécnica Nacional, Ecuador, correo electrónico: [pmothes@igepn.edu.ec](mailto:pmothes@igepn.edu.ec)

## Abstract

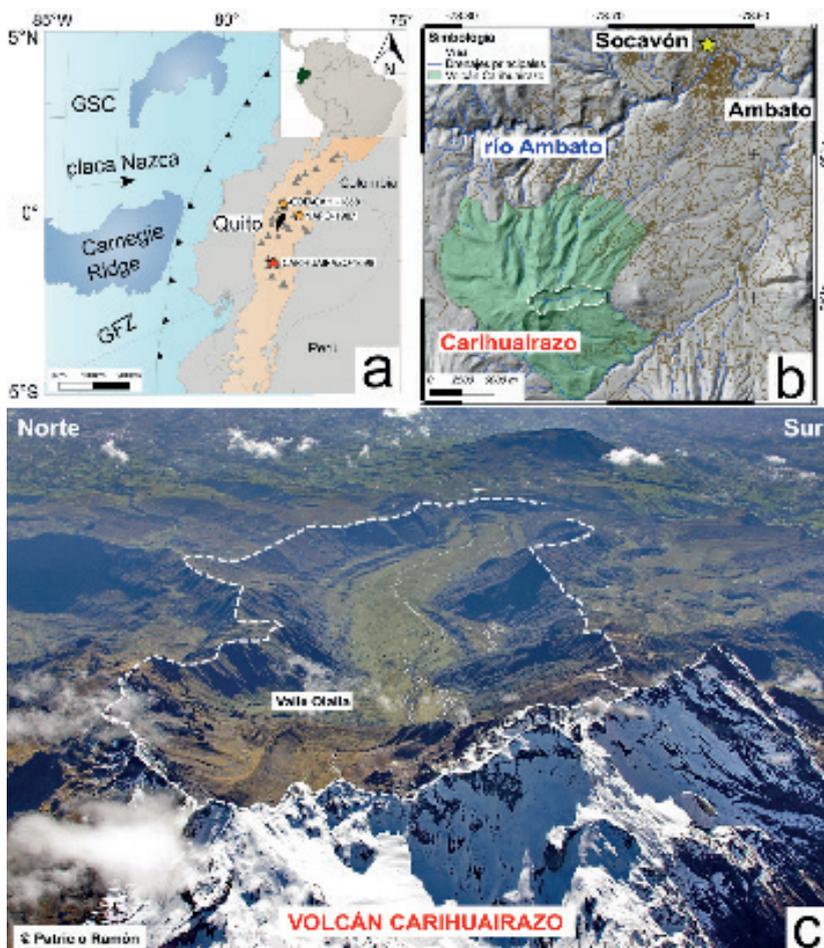
Historical records from 1698 reported a large earthquake 7.3 MIC at the basal plain of Carihuairazo volcano (Ecuador). The earthquake destroyed the old Ambato city and triggered large mudflows which flowed down the Ambato River. The flows buried the earthquake's survivors and what was left of the city. This manuscript uses historical records and field data to reproduce these mudflows by using numerical modelling to better understand this phenomenon and its potential future implications. Events of this nature have occurred in the recent history of Ecuador and are a latent threat to society.

*Key words: Carihuairazo, 1698 earthquake, landslide, mudflow, VolcFlow.*

## Introducción

El Carihuairazo (1.40° S, 78.75° W, 4 940 msnm) es un volcán extinto (Hall *et al.*, 2008) de alrededor de 220 mil años (Samaniego *et al.*, 2012). Está ubicado en la cordillera Occidental de los Andes ecuatorianos, a 140 km de la capital, Quito (Figura 1a) y, a 23 km al suroccidente de la ciudad de Ambato (Figura 1b). El volcán Carihuairazo, que en idioma kichwa significa "viento macho" o "viento bravo" (Barriga López, 2015), cubre un área aproximada de 174 km<sup>2</sup> y tiene un volumen de 21.5 km<sup>3</sup>. A lo largo de su historia geológica han ocurrido al menos cuatro grandes avalanchas de escombros con volúmenes entre 0.1 y 4 km<sup>3</sup> (Ordóñez *et al.*, 2011). Estas avalanchas ocurrieron hace decenas de miles de años y han moldeado la superficie del volcán con grandes cicatrices en forma de herradura (Figura 1b y Figura 1c).

Por otro lado, fenómenos morfo-climáticos como deslizamientos e inundaciones se han observado ampliamente en las quebradas de este volcán extinto. Algunos de ellos fueron inducidos por grandes terremotos como el ocurrido la madrugada del 20 de junio de 1698 (Barriga López, 2015; Wolf, 1873). Ese día, un gran terremoto de intensidad X en la escala Mercalli y de magnitud 7.3 M<sub>c</sub> ocurrió en las cercanías del volcán Carihuairazo (Beauval *et al.*, 2010; Yepes *et al.*, 2016). El sismo fue tan intenso que destruyó la ciudad de Ambato, dejando a familias enteras enterradas bajo los escombros (Wolf, 1873). Además, dio lugar a grandes deslizamientos en la zona alta nororiental del Carihuairazo. Estos suelos, al estar saturados en agua lluvia, rápidamente se fluidizaron transformándose en enormes flujos de lodo que descendieron por varias quebradas del volcán hasta unirse aguas abajo en el río Ambato (Vásconez *et al.*, 2009; Wolf, 1873). Este al no poder contener la inmensa masa de lodo, la derramó a lo largo de sus orillas sepultando una gran parte de las recientes ruinas de la ciudad (Wolf, 1873). El sector actualmente conocido como El Socavón (Figura 1b), que en ese entonces era la ubicación del primer asentamiento de Ambato fue totalmente arrasado por el flujo, alcanzando un calado de 40 metros (Vásconez *et al.*, 2009). Según Wolf,



**Figura 1.** a) Entorno geodinámico del Ecuador continental: subducción de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana y ubicación del volcán Carihuairazo (estrella roja). Las estrellas naranjas representan el epicentro de otros terremotos que generaron grandes flujos de lodo en el Ecuador. El polígono negro es la ciudad de Quito como referencia. Los volcanes cuaternarios están señalados como triángulos grises y la cordillera de los Andes del Norte en naranja claro. GFZ: zona de fractura Grijalva, GSC: dorsal Galápagos. b) Mapa de ubicación del volcán Carihuairazo (polígono verde) y la ciudad de Ambato. La estrella amarilla corresponde al sector de El Socavón en donde estaba asentada la antigua ciudad de Ambato en 1698. Los principales ríos/drenajes y carreteras están señalados en líneas de color azul y café, respectivamente. c) Vista aérea del volcán Carihuairazo, en primer plano destaca la cicatriz de una avalancha de escombros (línea blanca entrecortada) ocurrida hace varios miles de años (Ordóñez *et al.*, 2011) y al fondo las zonas pobladas y de cultivo.

(1873) murieron cerca de 3 mil personas a causa de este evento, que para ese entonces representaba un porcentaje muy alto de la población total de la ciudad.

Hoy en día, Ambato alberga a más de 380 mil habitantes (Instituto Nacional de Estadística y Censos [INEC], 2020), concentrados en una superficie menor a 30 km<sup>2</sup> (Figura 1b). La ciudad ha crecido de forma desorganizada y ha olvidado que históricamente ha sido afectada por grandes terremotos, deslizamientos e inundaciones. El presente artículo utiliza potentes herramientas computacionales para reconstruir los grandes deslizamientos que indujeron la formación de los enormes flujos de lodo durante el terremoto de Ambato de 1698, hace más de 300 años. La validación de los modelos está sustentada con datos de campo e información extraída de los registros históricos. La reconstrucción validada de eventos pasados permite definir nuevos escenarios de peligro, con el fin de determinar las zonas que potencialmente pudiesen ser afectadas y sus implicaciones futuras bajo las condiciones actuales de desarrollo urbano. Estos resultados pueden ser utilizados por las autoridades de turno para planificar el crecimiento de la mancha urbana de Ambato y, la ubicación adecuada de infraestructura crítica (escuelas, hospitales, sistema de agua potable, entre otros), considerando la redundancia de estos sistemas.

## Datos y metodología

En esta sección se resumen los datos más relevantes obtenidos del registro histórico y del trabajo de campo llevado a cabo en los años 2006 y 2019. Esta información fue utilizada como datos de entrada, para la reconstrucción numérica del evento ocurrido en 1698 y la identificación de la actual infraestructura crítica expuesta. Además, se hace referencia al modelo matemático utilizado para la reconstrucción del evento.

### **Registro histórico**

El análisis de los registros históricos permitió reconocer la ocurrencia de grandes flujos de lodo inducidos por sismos en el Ecuador continental. Entre ellos destacan los flujos de lodo del Carihuairazo, 1698 (Barriga López, 2015; Kolberg, 1977; Wolf, 1873), Cotacachi, 1868 (Stübel y Reiss, 1987) y Napo, 1987 (Hall, 2000), todos ellos localizados en la región Sierra (Figura 1a). A pesar de ser pocos dentro de los más de 500 años de historia escrita del Ecuador, se puede estimar a groso modo un periodo de retorno de  $145 \pm 25$  años, para estos grandes eventos. Todos ellos han dejado a su paso pérdidas de vidas y destrucción de infraestructura, razones por las cuales constituyen una amenaza latente para las crecientes poblaciones de la región Sierra del Ecuador.

Sobre lo ocurrido el 20 de Junio de 1698, Kolberg (1977) escribe:

Sin duda, durante el terremoto tuvieron lugar muchos derrumbes del monte que con sus materiales llenaron las quebradas escarpadas y que tenían muchas aguas, de modo que, como en el terremoto de Ibarra (1868), ocasionaron numerosas

correntadas de lodo. Algunas de ellas, que irrumpieron por las laderas del lado norte del Carihuairazo, se desbordaron desde Ambato y sepultaron los tristes escombros de la infeliz ciudad con todas las vidas que todavía esperaban encontrar salvación. Seguramente esta tormenta no llegó con la velocidad con que se dice, pues los habitantes que pudieron salir de entre las ruinas de sus casas tuvieron tiempo de buscar salvación en las alturas, cuando ya empezaba a extenderse sobre las calles el río de lodo.

Mientras que Wolf, (1873) describe:

A la una de la mañana de dicho día comenzó a moverse el suelo con tanta vehemencia que ya a la segunda ondulación en Ambato no quedó ninguna casa en pie. Familias enteras quedaron enterradas bajo los escombros de sus casas y se extinguieron completamente. Los que quedaron con vida bajo las ruinas, pidiendo socorro, murieron de otro modo; pues, un cuarto de hora después (15 min) del terremoto se precipitaron avenidas de agua y lodo sobre la población, de suerte que ya nadie pensó en socorrer a otros, y todos huyeron a las alturas. Dichas avenidas tuvieron su origen más de cuatro leguas (~20 km) más arriba en las faldas del Carihuairazo. Se dicen que, de muchos lugares, por las quebradas y los cauces de los ríos bajó un lodo muy hediondo. Los muchos ríos pequeños, cada uno de los cuales hizo bastantes estragos, se reunieron en el de Ambato, y este no pudiendo contener en su cauce la masa inmensa de lodo, la derramó sobre ambas orillas sepultando una gran parte de las recientes ruinas de Ambato. Cuando después se quiso socorrer a los enterrados, ya no sacaron sino cadáveres. En consecuencia, a este acontecimiento Ambato se fundó en un sitio algo más alto y retirado del río, es decir, en el mismo lugar en donde está hoy día.

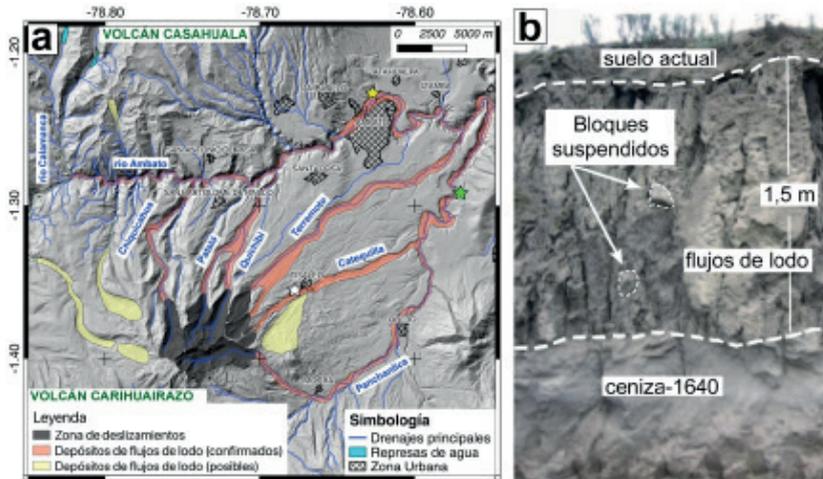
De los relatos históricos, rescatamos varios datos que serán utilizados en la simulación numérica y validación como:

- a) El terremoto induce deslizamientos, estos se fluidizan y forman flujos de lodo. El tiempo de formación y acumulación de sedimentos es corto, en la escala de pocos minutos.
- b) La zona de formación de los flujos de lodo es 20 km aguas arriba de la antigua ciudad de Ambato, es decir en las pendientes altas del volcán Carihuairazo.
- c) Los deslizamientos ocurren en varias quebradas de forma simultánea, y forman varios flujos de lodo, los cuales se unen aguas abajo en el río Ambato (Figura 2a).
- d) El suelo de páramo es el material sólido principal que constituye los flujos de lodo.
- e) Los flujos de lodo fueron lentos e inundaron la zona del Socavón (Figura 1b) 15 minutos después de ocurrido el terremoto.
- f) Las zonas altas son sitios seguros.

### ***Datos de campo***

Los depósitos de los flujos de lodo del Carihuairazo se encuentran en las quebradas de Chiquicahua, Pataló, Quichibi, Terremoto, Catequilla y Olalla-

Panchanlica (Figura 1c y 2a). Los flujos recorrieron más de 54 km, alcanzaron calados entre 10 y 45 metros y anchuras de más de 300 m y, en conjunto, cubrieron un área superior a los 60 km<sup>2</sup>, con un volumen mínimo aproximado de entre 84 y 87 Mm<sup>3</sup> (Vásconez *et al.*, 2009). Los depósitos, que se caracterizan por ser muy homogéneos en color y textura (Figura 2b), se encuentran rellenando pequeños valles afluentes, en las orillas de poca altura y curvas abiertas, más no se encuentran en valles estrechos y con fuertes gradientes topográficos (Vásconez *et al.*, 2009). A menudo se encuentran sobreyaciendo una capa de ceniza del volcán Tungurahua (Figura 2b) correspondiente a la erupción de 1640 A.D. (Le Pennec *et al.*, 2008). Según Vásconez *et al.* (2009), la granulometría de los depósitos de lodo está distribuida de la siguiente manera: 2,1% de grava fina (4 mm), 13,1% de arena media a gruesa (1- 0,25 mm), 11,1% de arena fina (0,25-0,125 mm), 52,6% de arena muy fina (0,125-0,063) y 21,1% de limos y arcillas (< 0,063 mm). Con esta distribución granulométrica el depósito se categoriza como leptocúrtica y de buen sorteo. Adicionalmente, los depósitos están formados por un 95% de suelo de páramo (desde arcilla a arena fina), 2-5% de rocas alteradas (Figura 2b) y una porción menor de restos de plantas.



**Figura 2.** a) Mapa de los depósitos de los flujos de lodo originados en los flancos del volcán Carihuairazo tras el terremoto de 1698. La estrella amarilla representa la ubicación de la antigua ciudad de Ambato, la estrella verde el sitio en donde se calculó la velocidad del flujo utilizando el método de sobre-elevación y la estrella blanca señala un afloramiento tipo de los depósitos, modificado de Vásconez *et al.*, (2009). b) Afloramiento tipo de los depósitos de los flujos de lodo de 1698 (estrella blanca), junto a la población de Tisaleo. La capa de ceniza es producto de la gran erupción del volcán Tungurahua en 1640 A.D. (Le Pennec *et al.*, 2008).

Finalmente, los suelos en la zona fuente (parte alta del volcán, Figura 2a) corresponde a andisoles de 1 a 3 m de espesor, de color café oscuro a negro, homogéneos y porosos. La formación de estos suelos comenzó después de la última glaciación a inicios del Holoceno (Schubert y Clapperton, 1990) y bajo este suelo se encuentra una gruesa capa de depósitos glaciales muy compactos e impermeables, los cuales constituyen un plano de deslizamiento.

### **Simulación numérica de flujos de lodo y escombros**

Hoy en día existen varios modelos numéricos para simular flujos gravitacionales. Estos modelos pueden ser estadísticos: LaharZ (Schilling, 1998), determinísticos: VolcFlow (Kelfoun y Druitt, 2005), LaharFlow (Darnell *et al.*, 2013) o estocásticos (Sandri *et al.*, 2018; Tierz *et al.*, 2016). Modelos estadísticos como LaharZ se fundamentan en la relación: alcance y sección transversal inundada. Este modelo utiliza cientos de ejemplos de flujos de lodo y escombros que han ocurrido en el mundo (Iverson, 1998), para formular dos ecuaciones que reproduzcan el comportamiento típico (estadísticamente hablando) de este fenómeno (Schilling, 1998). Por otro lado, los modelos estocásticos (tipo Monte Carlo; Metropolis y Ulam, 1949), simplifican la física de estos flujos con el objetivo de simular miles de escenarios al mismo tiempo. Estos escenarios varían en uno o pocos parámetros de entrada, para posteriormente determinar el área más probable a ser afectada por el fenómeno (Tierz *et al.*, 2016). Finalmente, el método determinístico, el cual utilizaremos en este ensayo, es el código abierto VolcFlow. Este modelo se fundamenta en las ecuaciones de conservación de la masa y el *momentum* (Kelfoun y Druitt, 2005) sobre un modelo digital del terreno (10 m, MDT). Este modelo físico emplea la reología del flujo, es decir, valores de viscosidad, densidad, cohesión, entre otros. y tiempos de alimentación y depositación. VolcFlow ha sido ampliamente utilizado para simular diferentes flujos gravitacionales, especialmente en volcanes (Charbonnier *et al.*, 2013; Gueugneau, 2014; Kelfoun, 2017; Kelfoun *et al.*, 2017, 2010; Kelfoun y Druitt, 2005; Kelfoun y Vargas, 2016).

Los flujos de lodo y escombros son mezclas fluidas saturadas en agua, altamente concentradas en sedimentos y escombros. Estos se originan en las laderas altas de volcanes y montañas y pueden desplazarse rápidamente pendiente abajo por influencia de la gravedad (Vallance, 2005). Durante el tránsito de un flujo de lodo y escombros pueden ocurrir procesos de erosión o incorporación de sedimentos, segregación de partículas, dilución (flujos granulares e hiperconcentrados) y procesos deposicionales (Pierson *et al.*, 1996; Vallance, 2005). Una de las características principales de los flujos de lodo del Carihuairazo es que fueron poco erosivos. Evidencia de ello es que el estrato subyacente de ceniza de la erupción del Tungurahua 1640 A.D. no fue erosionado (Figura 2b), lo cual sugiere que los flujos tenían un comportamiento laminar en su base y eran muy viscosos (Vásquez *et al.*, 2009). Además, puesto que más del 73% de sus componentes están en el rango de arena muy fina, limos y arcillas es de

esperarse que el flujo haya tenido una alta fuerza de cohesión y que su densidad era equivalente al de las rocas densas suspendidas en él ( $>2500 \text{ kg/m}^3$ ).

Según Gueugneau (2014), los parámetros reológicos que mejor reproducen el comportamiento de los flujos de lodo y escombros desencadenados por la erupción del volcán Nevado del Ruiz en Colombia (Naranjo *et al.*, 1986) son: viscosidad 0,1-0,001 Pa.s (Iverson, 1997), densidad del flujo  $1900 \text{ kg/m}^3$  (Pierson *et al.*, 1990) y cohesión 530-800 Pa (Lowe *et al.*, 1986). Adicionalmente, Manville *et al.*, (1998) realizó un estudio a detalle de la reología de flujos de lodo y escombros de 1995 en el volcán Ruapehu en Nueva Zelanda y reporta valores de densidad de flujo de  $1780 \text{ kg/m}^3$  para flujos que mantienen en suspensión bloques de más de  $2600 \text{ kg/m}^3$ , cohesión de 1900-3400 Pa y viscosidad de Bingham de 29-93 Pa.s. En la literatura se encuentra que estos parámetros físicos varían ampliamente entre un evento y otro (Tabla 1).

**Tabla 1.** Comparación de parámetros reológicos calculados y estimados en diferentes flujos de lodo y escombros en el mundo. Tomado de Manville *et al.* (1998) después de Phillips and Davies (1991)

Ubicación	Cohesión (Pa)	Viscosidad Newtoniana (Pa.s)	Viscosidad de Bingham (Pa.s)	Referencia
Mangatoetoenui, NZ	1900-3420		29-93	Manville <i>et al.</i> , 1998
Wrightwood Canyon, USA		10-6000	40-100	Morton and Campbell, 1974
Wrightwood Canyon, USA		210-600		Sharp y Nobles, 1953
Pine Creek, Mount St Helens, USA	400-1000		20-320	Fink <i>et al.</i> , 1981
Mayflower Gulch, USA		3000		Curry, 1966
Dragon Creek, USA		2780		Cooley <i>et al.</i> , 1977
Bullock Creek, NZ	1300-2400	210-810	17-71	Pierson, 1981
Tarndale Slip, NZ	15-140			Phillips y Davies, 1991
Bullock Creek, NZ	50-300			Phillips y Davies, 1991
Mayon, Filipinas	460-2320	6500	600	Rodolfo <i>et al.</i> , 1989
Nevado del Ruiz, Colombia	530-800			Lowe <i>et al.</i> , 1986
Nevado del Ruiz, Colombia	530-800		0.1-0.001	Gueugneau, 2014

## Resultados

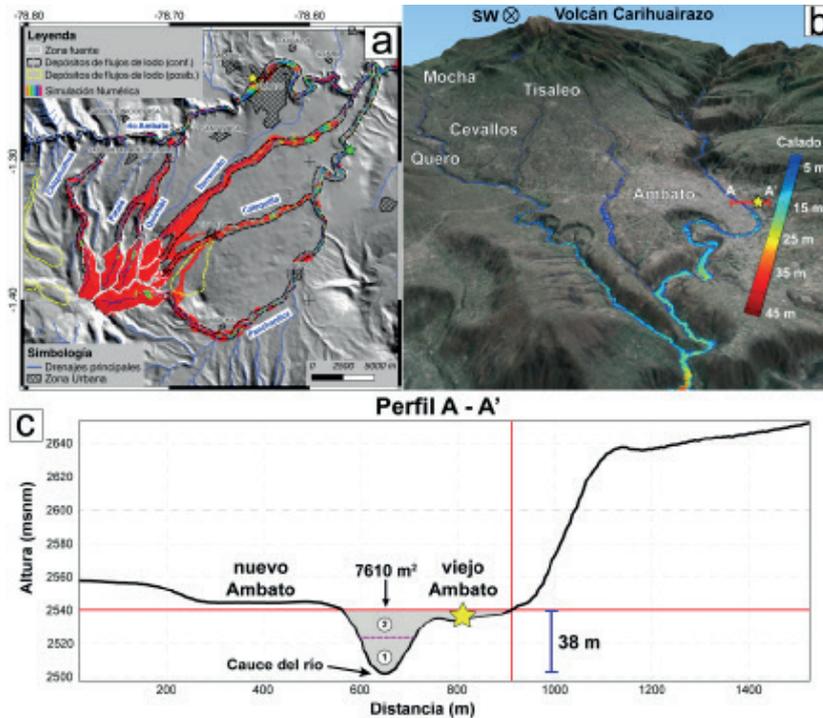
Con base en los parámetros recuperados de la bibliografía, los datos de campo e información del registro histórico, llevamos a cabo varios ensayos de prueba y error hasta encontrar la reología que mejor reproduce el evento de 1698 (Tabla 2). La Figura 3a compara el mejor resultado del modelamiento con el mapa geológico de Vásconez *et al.*, (2009). A simple vista se ve una buena congruencia entre el modelamiento y el mapeo (línea negra entrecortada), lo que nos hace confiar en el resultado de la simulación.

**Tabla 2.** Parámetros reológicos utilizados para el modelamiento de flujos de lodo utilizando el código VolcFlow

	<i>Flujos de lodo por el terremoto de 1698 (este estudio)</i>	<i>Flujos de lodo y escombros del Nevado del Ruiz-1985 (Gueugneau, 2014)</i>
MDT (m)	10	30
Tiempo de alimentación (s)	300	6300
Volumen (Mm <sup>3</sup> )	80	50
Turbulencia	0,01	0,01
Viscosidad (Pa.s)	10	0,05
Cohesión (Pa)	600	500
Densidad del flujo (kg/m <sup>3</sup> )	2000	1800

Según Vásconez *et al.* (2009), la altura media de los flujos de lodo sobre el cauce del río Ambato es de ~26m, y solo en casos excepcionales alcanzaron alturas superiores. Por ejemplo, en el sector de El Socavón o viejo Ambato (Figura 3a) el flujo alcanzó 38 m de calado, sobre un cañón de 360 m de ancho. Al comparar con el resultado de la simulación numérica encontramos valores superiores a 20 metros en este sitio (Figura 3b). Las zonas de menor pendiente, generalmente aguas abajo, tienen los mayores calados (20-45 metros), siendo claramente áreas de depositación y de menor velocidad. El perfil topográfico A-A' (Figura 3b y Figura 3c) resalta la ubicación de la antigua ciudad de Ambato (actualmente El Socavón). Esta zona fue cubierta por los flujos de lodo en 1698, alcanzando calados superiores a los 30 m. Tras el evento, la ciudad fue reubicada, al sitio actual, el cual no fue afectado por los flujos de lodo (Wolf, 1873). En el sector del Socavón los flujos cubrieron un área de 7610 m<sup>2</sup> (Figura 3c).

Con respecto a la velocidad de los flujos de lodo, Wolf (1873) menciona que llegaron en tan solo 15 minutos a la antigua ciudad de Ambato (el Socavón, Figura 3a); lo que implica una velocidad media de 29 m/s. Adicionalmente, Vásconez *et al.* (2009) propone un tiempo de entre 43 y 63 minutos para el mismo punto, considerando las rutas de los valles de Pataló (22 km) y de Chiquichua



**Figura 3.** a) Comparación del resultado de la simulación numérica con el mapa de los depósitos de los flujos de lodo de 1698 de Vásconez *et al.* (2009). b) Vista oblicua de la zona de estudio en donde se resalta el espesor de los flujos de lodo obtenidos con la simulación numérica. La estrella amarilla señala la zona del Socavón, que corresponde al sitio en donde estaba asentada la antigua ciudad de Ambato; mapa base cortesía de Google Earth. c) Perfil topográfico en el sector de la antigua ciudad de Ambato, en este sitio los flujos de lodo alcanzaron calados de 38 m sobre el cauce del río Ambato e inundaron un área total de más de 7610 m<sup>2</sup> (área sombreada). La línea fucsia entrecortada muestra el efecto amplificador de los flujos en este sector debido posiblemente al arribo de varias oleadas de lodo. Nótese que la escala vertical está exagerada para una mejor visualización.

(28 km aguas abajo), respectivamente (Figura 3a) y velocidades de 18 m/s para los gradientes escarpados y 5 m/s para el tramo transitado en el río Ambato hasta El Socavón, con una velocidad promedio de 10 m/s. Vásconez *et al.* (2009) argumenta estos resultados en base a una velocidad calculada de 12,8 m/s en el tramo inferior del río Pachanlica (Figura 2a, estrella verde). Por otro lado, nuestros resultados muestran tiempos de arribo al Socavón de entre 24 y 32 minutos con una velocidad promedio de 15,2-15,8 m/s para las rutas de los flujos de lodo de los valles de Pataló y de Chiquichua, respectivamente (Figura 3a). Además, con el modelo se obtuvo una velocidad de 8.7 m/s para el sitio en donde Vásconez *et al.* (2009) realizó su estimación. Las velocidades para los gradientes escarpados están en el orden de 17 m/s y en el tramo del río Ambato al Socavón de 13,8 m/s.

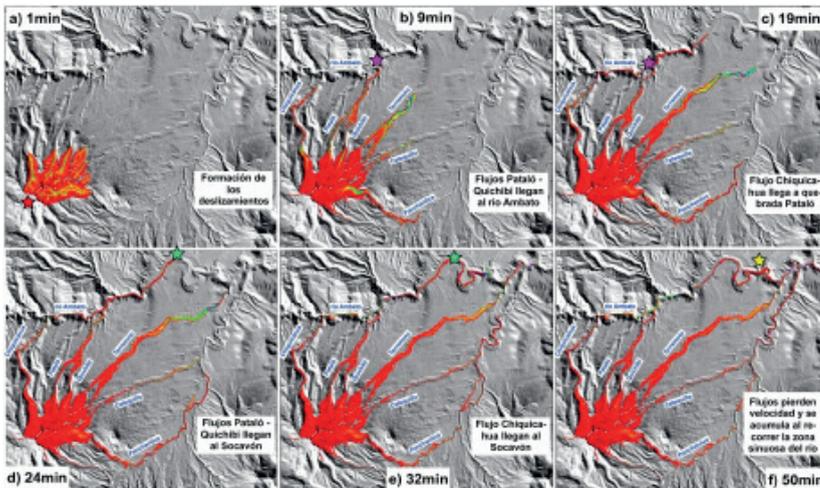
La velocidad promedio para estos flujos es de aproximadamente 15 m/s o 54 km/h. Aguas abajo del Socavón se estimaron velocidades promedio de 9,3 m/s. Vale notar que los resultados de la simulación son ligeramente superiores a los calculados previamente en campo, pero menores a los reportados en las narrativas históricas, como lo resume la Tabla 3.

**Tabla 3.** Comparación de los parámetros calculados para los flujos de lodo del Carihuairazo según Wolf (1873), Vásconez *et al.* 2009 y el presente trabajo.

	<i>Wolf, 1873</i>	<i>Vásconez et al., 2009</i>	<i>Este trabajo</i>
Tiempo de arribo al Socavón (min)	15	43-63	24-32
Velocidad Promedio (m/s)	29	10	12
Velocidad gradientes escarpados (m/s)		18	17
Velocidad río Ambato – Socavón (m/s)		5	13,8
Velocidad sitio calculado (m/s)		12,8	8,7
Velocidad aguas abajo del Socavón (m/s)			9,3

Vásconez *et al.* (2009) menciona que no se conoce si los volúmenes de estos tres afluentes: Qbd, Chiquicahua, Pataló y Quichibí (Figura 3a) llegaron al río Ambato de forma simultánea o separados en el tiempo. Esta interrogante fue contestada por la simulación numérica (Figura 4). Los flujos de las quebradas Pataló y Quichibí llegan de forma simultánea a la confluencia con el río Ambato después de 9 minutos de ocurrido el terremoto formando un solo frente de lodo (Figura 4b). Por otro lado, el flujo que desciende del valle de Chiquicahua arriba en 11 min a la confluencia con el río Ambato y en 19 minutos a la desembocadura de la quebrada Quichibí-Pataló formando una segunda oleada de lodo (Figura 4c). Estos dos frentes de lodo tiene una diferencia de aproximadamente 10 minutos. El primer frente de lodo proveniente de los valles de Quichibí-Pataló llegan al sector del Socavón (antigua ciudad de Ambato) 24 minutos después de ocurrido el terremoto (Figura 4d), y la segunda oleada 8 minutos más tarde (Figura 4e). Las crónicas no mencionan la ocurrencia de dos oleadas de lodo, sin embargo, los registros geológicos demuestran que en la zona cercana al Socavón los calados del flujo de lodo aumentaron de forma inusual (Figura 3c), doblando su altura inicial de 20 a 38 m (Vásconez *et al.*, 2009), a pesar de que en esta zona hay un ensanchamiento del cañon del río Ambato el cual debería dar un efecto opuesto. Puesto que el calado del flujo aumentó considerablemente en lugar

de disminuir, Vásconez *et al.* (2009) sugiere un posible represamiento del río que estaría ubicado cerca del punto de mayor calado (40 m), aguas abajo del Socavón. Por otro lado, los resultados de la simulación numérica sugieren que la primera oleada de lodo dejó un depósito que elevó el cauce del río. La primera oleada pudo tener calados moderados (<20 m) y produjo limitada destrucción (Figura 3c). Sin embargo, el segundo flujo (8 minutos después) al verse obstaculizado por los depósitos del primero, alcanzó cotas superiores, lo suficiente para enterrar las ruinas y sobrevivientes del terremoto de la antigua ciudad de Ambato (Figura 3c). Esta diferencia de tiempo de arribo entre varios flujos de lodo en un mismo punto puede explicar el efecto amplificador del área inundada y calados reportados por Vásconez *et al.* (2009). Pasados los 50 minutos los flujos se juntan en el río Cutuchi al oriente de la ciudad de Ambato (Figura 4f) y empiezan su descenso a la Amazonía, pasando junto a las ciudades de Patate y Baños, mayormente encauzados en profundos encañonados.



**Figura 4.** Reconstrucción numérica de la serie temporal del recorrido de los flujos de lodo ocurridos tras el terremoto de Ambato de 1698 utilizando el código VolcFlow. Note que la estrella destaca la zona de arribo del flujo descrita en cada figura.

## Discusión de resultados y perspectivas a futuro

### ***Mecanismo generador de los flujos de lodo del Carihuairazo de 1698***

Para la generación de los enormes flujos de lodo del Carihuairazo dos fenómenos naturales jugaron un rol importante; un sismo de gran magnitud y suelos de páramo saturados en agua (lluvias). Para el primero, Baize *et al.* (2015) demuestra que uno de los tramos de la falla de Pallatanga cruza bajo los volcanes Chimborazo-Carihuairazo, y que este fue el causante del terremoto de 1698 y, de otros terremotos que han sido muy destructivos en esta región. Durante el

periodo de 1587 a 1996, en un radio menor a 80 km alrededor del Carihuairazo, han ocurrido siete sismos de magnitud superior a  $6M_{IC}$  de los cuales tres fueron mayores a  $7M_{IC}$ , los cuales ocurrieron a una profundidad máxima estimada de 10 km (Beauval *et al.*, 2010). La falla de Pallatanga y sus tramos son de tipo *strike-slip* y forman parte del sistema de fallas que mueven al bloque nor-andino a una velocidad promedio de 2.5 mm/año (Baize *et al.*, 2015).

Por otro lado, los suelos de páramo son conocidos por almacenar grandes cantidades de agua de lluvia, siendo junio uno de los últimos meses de invierno en Ecuador. Además, en altitudes superiores a los 4000 msnm es común encontrar pequeñas lagunas y turberas que almacenan grandes cantidades de agua. Tal es el rol de estos dos componentes que siempre se conjugan para la formación de estos eventos como lo demuestran los registros históricos (Hall, 2000; Kolberg, 1977; Stübel and Reiss, 1987; Wolf, 1873). Sismos de gran magnitud ( $>7M_w$ ) inducen deslizamientos en suelos de páramo ( $>4000$  msnm) que al estar saturados de agua incrementan la probabilidad de formar grandes flujos de lodo, convirtiéndose en un escenario de multi-amenaza y de efecto en cascada. Eventos de esta naturaleza han ocurrido en otras partes del mundo como los reportados en el volcán Popocatepelt (2017) en México, tras el terremoto de 7.1Mw de Puebla-Morelos (Coviello *et al.*, 2021).

### ***Simulación numérica de flujos de lodo y escombros***

La simulación numérica constituye una herramienta poderosa para la reconstrucción de eventos pasados y la identificación de áreas afectadas, ésta además permite pronosticar áreas posiblemente afectadas en escenarios futuros. Por otro lado, los resultados de los modelos deben ser entendidos bajo el contexto de sus incertidumbres. En nuestro estudio, el código VolcFlow es un modelo determinístico que utiliza los principios de conservación de la masa y el *momentum* para fluidos gravitacionales bajo ciertos criterios reológicos (Kelfoun y Druitt, 2005). Estos parámetros reológicos son difíciles de cuantificar durante el emplazamiento de estos fenómenos ya que son muy peligrosos e impredecibles y por ello, varios de los parámetros físicos han sido estimados estudiando los depósitos dejados por eventos pasados o bajo condiciones de laboratorio (Iverson, 1997; Phillips y Davies, 1991). Estas limitaciones generan incertidumbres intrínsecas al fenómeno que luego son llevadas al modelo. Adicionalmente, hay que tomar en cuenta que la reología del flujo cambia con el tiempo, es decir, no es constante, convirtiéndose en una limitación por la falta de conocimiento, que de igual manera es incorporada al modelo y sus resultados. Por otro lado, es necesario conocer la calidad del modelo digital de terreno (MDT) que se va a utilizar en la simulación; este debe reproducir la topografía lo mejor posible. El resultado de la simulación está vinculado directamente a la calidad del modelo de terreno (Marrero *et al.*, 2018). Finalmente, el resultado del modelamiento por sí solo no significa nada, si no ha sido validado con datos de campo o registros escritos del fenómeno.

En este estudio, la mayoría de las quebradas son grandes encañonados de varias decenas de metros de profundidad (Figura 3b y 3c) y por tanto los resultados de las simulaciones para flujos de lodo y escombros (flujos gravitacionales) siempre estarán restringidos dentro de las escarpadas paredes que bordean el río. Solo en áreas específicas los flujos se desbordan después de alcanzar el calado necesario (p.e. sector de El Socavón, Figura 3c). Por estas razones no hay mayor diferencia en los resultados de las simulaciones al cambiar los parámetros reológicos del flujo y por ello los valores presentados en este estudio deben ser tomados con cuidado, ya que no reflejan el comportamiento de cualquier flujo de lodo; en zonas con pendientes menores podría generar mayores diferencias e incertidumbres, lo cual no sucede en este ensayo.

### ***Infraestructura crítica expuesta***

Hoy en día, zonas pobladas, vías de primer y segundo orden y sistemas de captación, tratamiento y distribución de agua potable y de riego están instaladas en las orillas del río Ambato (Figura 5). En el posible caso de que ocurran nuevos flujos de lodo, la infraestructura y población expuesta serán total o parcialmente afectada. Un gran número de personas sufrirían daños directa e indirectamente. En caso de afectación directa individuos, cultivos, animales e infraestructura (escuelas, casas, etc.) podrían ser enterrados por los flujos de lodo, como ya sucedió en 1698. Mientras que, en afectación indirecta, poblaciones podrían quedar incomunicadas por la destrucción de puentes y carreteras, y un número muy elevado de personas quedarían sin acceso a agua potable, incluso en zonas muy alejadas del río Ambato y sufrirían los estragos del evento por varios días o semanas. Vale señalar que el sistema de agua potable actual está concentrado en esta zona muy peligrosa y eso lo hace altamente vulnerable. Por ello es importante plantearse la necesidad de construir sistemas complementarios fuera de esta zona de peligro, generando redundancia del sistema de agua potable.

Actualmente hay dos proyectos de agua potable y de riego funcionando en las pendientes altas del volcán extinto Casahuala, ubicado inmediatamente al norte del río Ambato (Figura 2a y Figura 5). Los proyectos multipropósito Chiquiurco y Mulacorral, son dos grandes represas que almacenan 3 Mm<sup>3</sup> de agua del páramo cada uno. El agua es tratada y distribuida como potable y para riego para las ciudades de Ambato y Pelileo (>200 mil personas) desde hace 10 años. Vásconez *et al.* (2009), indica que posiblemente flujos de lodo se generaron también en el volcán Casahuala después del terremoto de 1698, los cuales descendieron por el río Calamanca hasta llegar al río Ambato (Figura 2a y Figura 5). Con esto en mente y bajo las circunstancias actuales es necesario plantearse la posibilidad de que un gran terremoto pudiese romper las dos represas, generando dos grandes oleadas que se unirían aguas abajo en el río Calamanca y posteriormente en el río Ambato afectando a las poblaciones e infraestructura crítica asentada a sus orillas. El sistema de fallas en el sector de Riobamba y Ambato históricamente ha demostrado que tiene la capacidad de generar sismos de magnitudes mayores

a 6Mw (Beauval *et al.*, 2013, 2010; Yepes *et al.*, 2016) y por ello es importante considerar este fenómeno como un factor potencial para la ruptura de represas de agua en zonas altas. Estas son razones de sobra para trabajar en el corto y mediano plazo en la elaboración de medidas de mitigación, sistemas de alerta temprana, protocolos de evacuación y sobretodo educar a la población cercana sobre el potencial riesgo de vivir a orillas del río Ambato.

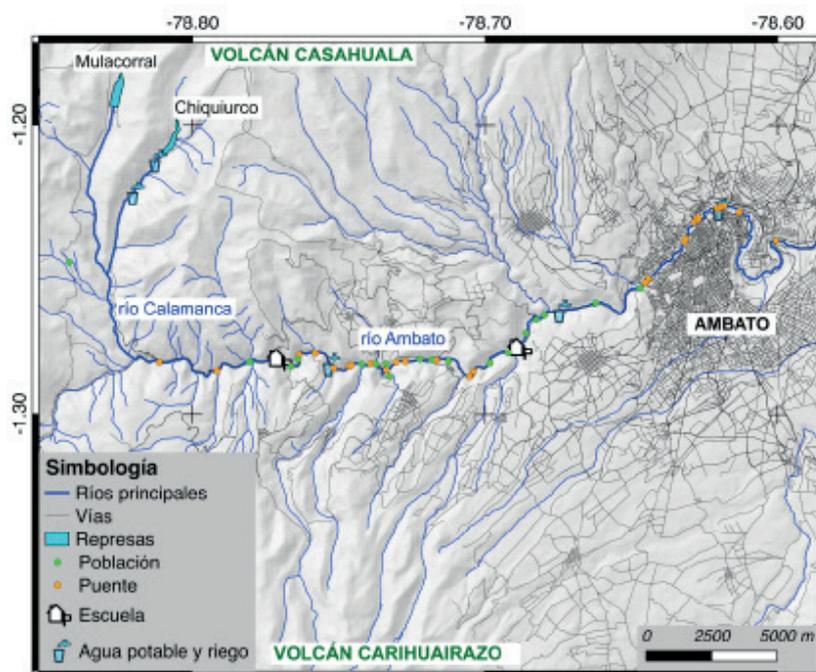


Figura 5. Mapa de infraestructura crítica y poblaciones expuestas a potenciales flujos de lodo a lo largo de las orillas del río Ambato.

## Conclusiones

- El modelamiento numérico validado, permitió reconstruir los flujos de lodo del Carihuairazo desencadenados por el terremoto de Ambato de 1698. Los resultados obtenidos se asemejan a los datos geológicos y relatos históricos, tanto en valores de calado, como de velocidad (Tabla 3).
- Se estimaron tiempos de arribo para el sector de El Socavón (antigua ciudad de Ambato) de entre 24 y 32 minutos, velocidades promedio de 15 m/s y calados de entre 5-45 metros en el cauce del río Ambato.
- La simulación además permitió identificar la formación de dos frentes de lodo que confluyen en la antigua ciudad de Ambato con 8 minutos de diferencia. La ocurrencia de estos dos frentes causó un efecto amplificador en el calado de

los flujos (Figura 3c), lo que incrementó el daño y enterró con lodo la antigua ciudad de Ambato hace más de 300 años.

- Hoy en día, grandes represas de agua se han construido en las laderas altas del volcán Casahuala. Estas están expuestas a la ocurrencia de eventos sísmicos de magnitudes mayores a 6 Mw (Baize *et al.*, 2015), lo que podría dañarlas gravemente e inducir la formación de grandes flujos de lodo que afectarían las poblaciones e infraestructura de agua potable y para riego construidas a las orillas del río Ambato, dejando sin agua por varios días o semanas a sectores muy poblados como las ciudades de Ambato y Pelileo (>200 mil personas).

## Agradecimientos

Los autores agradecen a la prefectura de Tungurahua por la invitación ha conocer las represas Mulacorral y Chiquirco y toda la infraestructura del sistema de agua potable y para riego a lo largo del río Ambato. Un agradecimiento especial a Gabriela Labre, organizadora del evento, quien preocupada por la alta exposición de esta infraestructura pidió nuestro asesoramiento. Agradecimiento también a Anais Vásconez Müller por el acompañamiento durante la visita técnica y por las ideas y sugerencias durante la escritura de este artículo. Esta investigación fue llevada a cabo en el contexto del proyecto “Generación de Capacidades para la Emisión de Alertas Tempranas” del Instituto Geofísico de Escuela Politécnica Nacional financiado por la Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo (SENPLADES), Ecuador.

## Referencias

- Baize, S., Audin, L., Winter, T., Alvarado, A., Pilatasig Moreno, L., Taipe, M., Reyes, P., Kauffmann, P., Yepes, H. (2015). Paleoseismology and tectonic geomorphology of the Pallatanga fault (Central Ecuador), a major structure of the South-American crust. *Geomorphology*, 237, 14-28. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.02.030>
- Barriga López, F. (2015). *Historia de los desastres naturales en el Ecuador: erupciones volcánicas, terremotos, cataclismos, tsunamis, inundaciones y más*. Academia Nacional de Historia del Ecuador e Instituto Panamericano de Geografía e Historia Sección Nacional del Ecuador, Quito, Ecuador.
- Beauval, C., Yepes, H., Bakun, W. H., Egred, J., Alvarado, A., Singaicho, J.-C. (2010). Locations and magnitudes of historical earthquakes in the Sierra of Ecuador (1587-1996). *Geophysical Journal International*, 181(3), 1613-1633. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2010.04569.x>
- Beauval, C., Yepes, H., Palacios, P., Segovia, M., Alvarado, A., Font, Y., Aguilar, J., Troncoso, L., Vaca, S. (2013). An Earthquake Catalog for Seismic Hazard Assessment in Ecuador. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 103(2A), 773-786. <https://doi.org/10.1785/0120120270>
- Charbonnier, S. J., Germa, A., Connor, C. B., Gertisser, R., Preece, K., Komorowski, J.-C., Lavigne, F., Dixon, T., Connor, L. (2013). Evaluation of the impact of the 2010 pyroclastic

- density currents at Merapi volcano from high-resolution satellite imagery, field investigations and numerical simulations. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 261, 295-315.
- Cooley, M. E., Aldridge, B. N., Euler, R. C. (1977). *Effects of the catastrophic flood of December 1966, North Rim area, eastern Grand Canyon, Arizona*. US Govt. Print. Off.
- Coviello, V., Capra, L., Norini, G., Dávila, N., Ferrés, D., Márquez-Ramírez, V.H., Pico, E. (2021). Earthquake-induced debris flows at Popocatepetl Volcano, Mexico. *Earth Surf. Dynam.*, (9), 393-412. <https://doi.org/10.5194/esurf-9-393-2021>
- Curry, R. R. (1966). Observation of alpine mudflows in the Tenmile Range, central Colorado. *Geological Society of America Bulletin*, (77), 771-776.
- Darnell, A. R., Phillips, J. C., Barclay, J., Herd, R. A., Lovett, A. A., Cole, P. D. (2013). Developing a simplified geographical information system approach to dilute lahar modelling for rapid hazard assessment. *Bulletin Volcanology*, 75(713). <https://doi.org/10.1007/s00445-013-0713-6>
- Fink, J. H., Malin, M. C., D'Alli, R. E., Greeley, R. (1981). Rheological properties of mudflows associated with the spring 1980 eruptions of Mount St. Helens volcano, Washington. *Geophysical research letters*, 8, 43-46.
- Gueugneau, V. (2014). Evaluation du logiciel VolcFlow pour la simulation numérique de lahars et application aux risques associés. *Rapport de Travail d'Etude et de Recherche (TRE)*. Université Blaise Pascal Clermont II. France, 25 pp.
- Hall, M. (2000). Los terremotos del Ecuador del 5 de marzo del 1987, Deslizamientos y sus efectos socioeconómicos. *Estudios de Geografía*, 9.
- Hall, M. L., Samaniego, P., Le Pennec, J. L., Johnson, J. B. (2008). Ecuadorian Andes volcanism: A review of Late Pliocene to present activity. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 176, 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2008.06.012>
- INEC (2020). Proyección de la población ecuatoriana, por años calendario, según cantones 2010-2020 [WWW Document]. <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/proyecciones-poblacionales/>
- Iverson, R. M. (1998). Objective delineation of lahar-inundation hazard zones. *Geological Society of America Bulletin*, 14.
- Iverson, R. M. (1997). The physics of debris flows. *Reviews of Geophysics* 35, 245-296.
- Kelfoun, K. (2017). A two-layer depth-averaged model for both the dilute and the concentrated parts of pyroclastic currents: A Model For Pyroclastic Currents. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 122, 4293-4311. <https://doi.org/10.1002/2017JB014013>
- Kelfoun, K., Druitt, T. H. (2005). Numerical modeling of the emplacement of Socompa rock avalanche, Chile. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 110.
- Kelfoun, K., Giachetti, T., Labazuy, P. (2010). Landslide-generated tsunamis at Réunion Island. *Journal of Geophysical Research*, 115. <https://doi.org/10.1029/2009JF001381>
- Kelfoun, K., Gueugneau, V., Komorowski, J.-C., Aisyah, N., Cholik, N., Merciecca, C. (2017). Simulation of block-and-ash flows and ash-cloud surges of the 2010 eruption of Merapi volcano with a two-layer model: MODEL OF THE 2010 ERUPTION OF MERAPI. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 122, 4277-4292.

- <https://doi.org/10.1002/2017JB013981>
- Kelfoun, K., Vargas, S. V. (2016). VolcFlow capabilities and potential development for the simulation of lava flows. *Geological Society, London*, 426, 337-343.  
<https://doi.org/10.1144/SP426.8>
- Kolberg, J. (1977). *Hacia el Ecuador: (Nach Ecuador): relatos de viaje*. Traducido de la IV edición alemana por F. Yepez Arboleda, Cuarta, Alemania 1807. ed. República Federal de Alemania y Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Quito, Ecuador.
- Le Pennec, J.-L., Jaya, D., Samaniego, P., Ramón, P., Moreno Yáñez, S., Egred, J., van der Plicht, J. (2008). The AD 1300–1700 eruptive periods at Tungurahua volcano, Ecuador, revealed by historical narratives, stratigraphy and radiocarbon dating. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 176, 70-81.  
<https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2008.05.019>
- Lowe, D. R., Williams, S. N., Leigh, H., Connort, C. B., Gemmell, J. B., Stoiber, R. E. (1986). Lahars initiated by the 13 November 1985 eruption of Nevado del Ruiz, Colombia. *Nature*.
- Manville, V., Hodgson, K. A., White, J. D. L. (1998). Rheological properties of a remobilised-tephra lahar associated with the 1995 eruptions of Ruapehu volcano, New Zealand. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 41, 157-164.  
<https://doi.org/10.1080/00288306.1998.9514800>
- Marrero, J. M., Vasconez, F., Espín, P., Ortiz, R., Yepes, H., García, A., Mothes, P., Estrella, C. (2018). MDTanaliza: understanding digital elevation models when facing gravity-driven flows in a hazard assessment context. *Earth Science Informatics*.  
<https://doi.org/10.1007/s12145-018-0372-4>
- Metropolis, N., Ulam, S. (1949). The monte carlo method. *Journal of the American Statistical Association*, 44, 335-341.
- Morton, D. M., Campbell, R. H., 1974. Spring mudflows at Wrightwood, southern California. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 7, 377-384.
- Naranjo, J. L., Sigurdsson, H., Carey, S.N., Fritz, W. (1986). Eruption of the Nevado del Ruiz volcano, Colombia, on 13 November 1985: tephra fall and lahars. *Science*, 233, 961-963.
- Ordóñez, J., Hall, M., Samaniego, P. (2011). Erupciones volcánicas del Pleistoceno tardío alrededor de Ambato: caracterización y distribución de sus depósitos. *Séptimas Jornadas de Ciencias de la Tierra* 6.
- Phillips, C. J., Davies, T. R. (1991). Determining rheological parameters of debris flow material. *Geomorphology*, 4, 101-110.
- Pierson, T. C. (1981). Dominant particle support mechanisms in debris flows at Mt Thomas, New Zealand, and implications for flow mobility. *Sedimentology*, 28, 49-60.
- Pierson, T. C., Daag, A. S., De los Reyes, P. J., Regalado, M. T. M., Solidum, R. U., Tubianosa, B. S. (1996). Flow and deposition of posteruption hot lahars on the east side of Mount Pinatubo. *Fire and Mud: eruptions and lahars of Mount Pinatubo, Philippines*, 921-950.
- Pierson, T. C., Janda, R. J., Thouret, J. -C., Borrero, C. A. (1990). Perturbation and melting of snow and ice by the 13 November 1985 eruption of Nevado del Ruiz, Colombia,

- and consequent mobilization, flow and deposition of lahars. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 41, 17-66.
- Rodolfo, K. S., Arguden, A. T., Solidum, R. U., Umbal, J. V. (1989). Anatomy and behaviour of a post-eruptive rain lahar triggered by a typhoon on Mayon Volcano, Philippines. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology-Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur*, 40, 55-66.
- Samaniego, P., Barba, D., Robin, C., Fornari, M., Bernard, B. (2012). Eruptive history of Chimborazo volcano (Ecuador): A large, ice-capped and hazardous compound volcano in the Northern Andes. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 221, 33-51.
- Sandri, L., Tierz, P., Costa, A., Marzocchi, W. (2018). Probabilistic Hazard From Pyroclastic Density Currents in the Neapolitan Area (Southern Italy). *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123, 3474-3500. <https://doi.org/10.1002/2017JB014890>
- Schilling, S.P. (1998). LAHARZ; GIS programs for automated mapping of lahar-inundation hazard zones. *US Geological Survey, Information Services* [distributor].
- Schubert, C., Clapperton, C. M. (1990). Quaternary glaciations in the northern Andes (Venezuela, Colombia and Ecuador). *Quaternary Science Reviews* 9, 123-135.
- Sharp, R. P., Nobles, L. H. (1953). Mudflow of 1941 at Wrightwood, southern California. *Geological Society of America Bulletin*, 64, 547-560.
- Stübel, A., Reiss (1987). Las montañas volcánicas del Ecuador. Retratadas y descritas geológica-topográficamente. UNESCO (Ed.): Archivo Histórico del Banco Central del Ecuador.
- Tierz, P., Sandri, L., Costa, A., Zaccarelli, L., Di Vito, M.A., Sulpizio, R., Marzocchi, W. (2016). Suitability of energy cone for probabilistic volcanic hazard assessment: validation tests at Somma-Vesuvius and Campi Flegrei (Italy). *Bulletin of Volcanology*, 78. <https://doi.org/10.1007/s00445-016-1073-9>
- Vallance, J. W. (2005). Volcanic debris flows. In *Debris-Flow Hazards and Related Phenomena*. Springer, pp. 247-274.
- Vásconez, R., Hall, M., Mothes, P. A. (2009). Devastadores flujos de lodo disparados en el volcán Carihuairazo por el terremoto del 20 de Junio de 1698. *Revista Politécnica*, 20.
- Wolf, T. (1873). *Crónica de los fenómenos volcánicos y terremotos en el Ecuador con algunas noticias sobre otros países de la América Central y Meridional desde 1535 hasta 1797*. Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
- Yepes, H., Audin, L., Alvarado, A., Beauval, C., Aguilar, J., Font, Y., Cotton, F. (2016). A new view for the geodynamics of Ecuador: Implication in seismogenic source definition and seismic hazard assessment: Ecuador Geodynamics and PSHA. *Tectonics*, 35, 1249-1279. <https://doi.org/10.1002/2015TC003941>



# Experiencias de la enseñanza en tiempos de COVID-19 y nuevos retos en aprendizaje de Ingeniería Geofísica en México, a 50 años de su creación

Experiences of teaching in times of COVID-19 and new challenges in learning Geophysical Engineering in Mexico, 50 years after its creation

Francisco Alejandro Arroyo Carrasco<sup>1</sup>  
Sergio Chávez Pérez<sup>2</sup>  
Andrés Tejero Andrade<sup>3</sup>

*Recibido el 9 de diciembre de 2020; aceptado el 18 de enero de 2021*

## Resumen

Se hace un análisis del avance que ha tenido la carrera de Ingeniería geofísica en los últimos 50 años, específicamente en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), México. Se plantea la visión, un poco de historia, forma de enseñanza y proceso de aprendizaje que da identidad al ingeniero geofísico, formas de aprendizaje y competencias que deben tener y adquirir los aspirantes para obtener el título profesional; también, se detalla lo experimentado en la asignatura Introducción a la Geofísica, ante la COVID-19, en el primer confinamiento. Finalmente, se proponen algunos retos y áreas de oportunidad que enfrentarán los ingenieros geofísicos en el futuro cercano.

Palabras clave: *experiencias, formas en la enseñanza, Ingeniería Geofísica, aprendizaje, competencias.*

- <sup>1</sup> Consultor independiente en Exploración y Evaluación Hidrogeofísica (ExEvHi) y profesor de asignatura en la carrera de Ingeniería Geofísica, División de Ingeniería en Ciencias de la Tierra, Facultad de Ingeniería, UNAM. Correo electrónico: fa.arroyoc@gmail.com
- <sup>2</sup> Investigador geofísico, Instituto Mexicano del Petróleo (IMP) y profesor de asignatura en la carrera de Ingeniería Geofísica, División de Ingeniería en Ciencias de la Tierra, Facultad de Ingeniería, UNAM. Correo electrónico: sergio.chavezp@gmail.com
- <sup>3</sup> Profesor de carrera, División de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ingeniería de la UNAM. Correo electrónico: atatejero16@gmail.com

## Abstract

This work analyzes the progress that the degree of geophysical engineer has made in the last fifty years, specifically in the School of Engineering of the Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Mexico. This raises the vision, a little history, the teaching, and learning process that gives identity to the geophysical engineer, the forms of learning and the competences that applicants must have and acquire to obtain the professional title; In addition, the experience in the Introduction to Geophysics course, at the beginning of the COVID-19 pandemic, is detailed; finally, some challenges and areas of opportunity are proposed that geophysical engineers will face in the near future.

*Key words: experiences, ways of teaching, Geophysical Engineering, learning, skills.*

## Introducción

A 50 años de su creación en México, la carrera de Ingeniería Geofísica se ha consolidado como una disciplina importante para el desarrollo social y económico del país, al aportar conocimiento orientado a la búsqueda de insumos básicos e indispensables para vivir: agua, energía, minerales, así como predicción de eventos naturales, entre otros. La situación que se presentó en el año 2020 parece haber puesto en riesgo la supervivencia del hombre y de la carrera. Ante esto, se presentan nuevos desafíos que superar y vencer. La incertidumbre, término con el cual el ingeniero geofísico convive en el día a día de su quehacer profesional, viene a retarlo de nueva cuenta y a motivarlo para vencer, esta y otras contingencias que se presenten.

Ante el escenario que se presenta en estos momentos por la COVID-19, así como en los últimos 50 años, la Tierra y México, por supuesto, han sufrido otros eventos —crisis económicas, políticas, geológicas y climatológicas— que han puesto en duda a muchos ingenieros geofísicos por las posibilidades de trabajo futuro.<sup>1</sup> Otro problema, de igual o mayor magnitud, es la seguridad de estos profesionales al trabajar en ocasiones en zonas donde el crimen organizado domina el territorio y hay que hacer mediciones. Tanto la pandemia como el trabajo en zonas de riesgo, deja claro que aún falta mucho por aprender, por hacer, y sobre todo, hay dudas sobre cómo enseñar la disciplina ante un nuevo entorno de vida.

Sin un conocimiento de los antecedentes de la carrera, no es posible entender por qué hoy en día se consolida como una disciplina de apoyo para enfrentar y resolver problemas relacionados con el interior de la Tierra. A pesar de todo, la profesión se ha fortalecido y se han incrementado las perspectivas de nuevas

<sup>1</sup> Se recomienda buscar y leer sobre la historia de México, en lo relativo a desastres, en el último siglo para formarse un criterio sustentado.

oportunidades de trabajo. A la fecha, existen al menos siete universidades en México que imparten la carrera de Ingeniería Geofísica y otras seis imparten la carrera de Geociencias (Tabla 1).

**Tabla 1.** Universidades/Tecnológicos que ofrecen la carrera de Ingeniería Geofísica en México

<i>Institución</i>	<i>Ingeniero Geofísico</i>	<i>Ciencias de la Tierra</i>
Universidad Nacional Autónoma de México	X	XXXX
Instituto Politécnico Nacional	X	
Universidad Autónoma de Nuevo León	X	
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla	X	
Universidad del Carmen	X	
Universidad Juárez Autónoma de Tabasco	X	
Universidad Politécnica del Centro en Tabasco	X	
Universidad Olmeca de Tabasco	X	
Universidad de Guadalajara (Centro Universitario del Sur)	X	
Instituto Tecnológico de Ciudad Madero		X
Universidad de Ciencias y Artes en Chiapas		X
Universidad Estatal de Sonora		X
Instituto Tecnológico Superior de Tacámbaro		X
Instituto Tecnológico Superior de Venustiano Carranza Puebla		X

Nota: La X indica el número de facultades, escuelas y centros de investigación a nivel licenciatura sobre la enseñanza de la disciplina.

La carrera de ingeniero geofísico nace en el año de 1970 en la Facultad de Ingeniería de la UNAM y en la Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura del Instituto Politécnico Nacional (IPN), para resolver una necesidad de la industria petrolera y la identificación de estructuras geológicas a profundidad.

Actualmente, se aplica en las áreas de energía, minería, agua, contaminación-ambiente-cambio climático, agricultura, medicina forense, arqueología, prevención de eventos —que ponen en riesgo la integridad física de las personas— (geológicos, hidrogeológicos, sísmicos para la construcción de obras civiles y ambientales, entre otros), y en el área de investigación en institutos y centros de investigación del país. En los últimos diez años, a nivel mundial, es el área ambiental donde se ha desarrollado más esta disciplina.

El aporte que ofrecen hoy los ingenieros geofísicos, ha sido de apoyo para resolver muchas problemáticas relacionadas con el comportamiento de la corteza

terrestre, su interior y su exterior, su interacción con el ambiente, así como el estudio de otros planetas y del universo.

Ante la pandemia de COVID-19, la forma de enseñanza tuvo que adaptarse y por ello el medio de comunicación cambió de presencial a virtual (a distancia); en tanto, para el caso de la seguridad física de los ingenieros que desarrollan su trabajo en áreas de riesgo se tendrán que plantear estrategias acordes con la situación que se enfrente.

## **Visión de los primeros geofísicos sobre las perspectivas de la Ingeniería Geofísica y resultados que se tienen actualmente (caso México)**

Revisando la bibliografía y referencias relacionadas con el futuro de la geofísica y en especial la Ingeniería geofísica, la mayor información y desarrollo se ha orientado principalmente al área petrolera, al haber sido la fuente de energía más importante en la segunda mitad del siglo XX. Boulware (1965), indicó que:

Una pequeña porción de las reservas de petróleo se proporcionará desde áreas actualmente productivas a través de técnicas y prácticas de producción mejoradas. La mayoría de las nuevas reservas se encontrarán mediante las técnicas de exploración mejoradas en horizontes más profundos.

La Sociedad de Geofísicos de Exploración (SEG), organización mundial de geofísica aplicada, en 2001 publicó *Geofísica en los asuntos de la humanidad*, que presenta la historia de la geofísica desde inicios del siglo XX, donde se aprovecha el conocimiento de eventos desfavorables —guerras mundiales y explosiones atómicas, entre otras—, para ser utilizados con fines benéficos para la sociedad. Resalta el capítulo 10 referente a “Geofísica como negocio, entonces y ahora”, que hace una sinopsis de la evolución de la geofísica aplicada al área del petróleo, donde los resultados para las compañías fueron exorbitantes, resalta el hecho de que en esa época no se consideraba a México como productor de petróleo importante, ya que el objetivo del capítulo se enfocaba en la geofísica con fines de negocio (lucro). Se indica que a partir del año 1985 los precios del barril del petróleo fueron impredecibles, con oscilaciones muy fuertes desde los 10 dólares a 42 dólares por barril entre 1986 y 1990. Durante los primeros años del nuevo milenio los precios llegaron en 2008 a los 140 dólares por barril, de 2011 a 2014 por arriba de los 100 dólares (Figura 1); en enero de 2020 el precio de la mezcla mexicana llegó por debajo de los 10 dólares por barril.

Lawyer *et al.* (2001) mencionan que:

El desafío de operar tanto a nivel mundial como a la tecnología de vanguardia ha sido tan intenso, en capital, que la mayoría de estos famosos leviantes<sup>2</sup> ya no tienen reconocimiento de nombre. El Informe Form 10-K de 1997 de Seitel para la

<sup>2</sup> Se refiere a súper grandes empresas de petróleo que existían en esa época

Comisión de Bolsa y Valores de EE.UU. Lo expresa de esta manera: “En 1985, había aproximadamente 150 empresas sísmicas independientes que operaban en los Estados Unidos, de las cuales aproximadamente 15 eran competidores importantes. En 1997, había aproximadamente 100 empresas, con cerca de 10 competidores”. La profesión geofísica debe mucho a estos esfuerzos pasados. Lo que sigue ahora, para el registro histórico, es una sinopsis de las empresas de servicios completos que han desaparecido.



**Figura 1.** Precios barril de petróleo (Mezcla Mexicana) entre 2010 y 2019.

Fuente: [https://www.cefp.gob.mx/new/graficas\\_interactivas.php](https://www.cefp.gob.mx/new/graficas_interactivas.php).

Asimismo, en el capítulo 14, Lawyer *et al.* (2001) remarcan:

Si el geofísico de hoy (y el de mañana) se enfrenta con éxito al "desafío y al cambio", debe contar con una infraestructura profesional de apoyo que permita un libre intercambio de ideas con sus compañeros. Esta infraestructura le proporciona una caja de resonancia por la cual se puede identificar, plantear, corregir o descartar permanentemente la visión de los proyectos y por lo cual se han creado sociedades profesionales para orientar los propósitos específicos.

Marfurt *et al.* (2000) hablan sobre perspectivas y futuro del geofísico; en esa publicación se habla de geofísico como científico enfocado principalmente al área de energía. Mencionaron que el futuro de la investigación fuera de las compañías petroleras sería muy difícil durante los siguientes diez años, no existía vinculación escuela-industria favorable, y la mayoría de los servicios se subcontratarían. En ese artículo se realizó una encuesta orientada a identificar el mercado laboral y las habilidades que deberían tener los futuros profesionales a nivel maestría y doctorado. La habilidad del manejo de la computadora era un tema importante. Resaltaron que los profesionales independientes se enfocaban más en adquirir habilidad en la interpretación sísmica 3D. También manifestaron que "la tecnología cambiaba tan rápido que al cabo de un corto tiempo habría necesidad de volverla a estudiar". Sobre este punto, hay que aclarar que el término *interpretación* no es correctamente utilizado, el término correcto es *procesamiento*. Lo que más resalta del artículo es que enfatizaban que debería enfocarse en el dominio de fundamentos de la disciplina y en la calidad de adquisición de los datos de campo.

Por otra parte, Lumley (2019) describe la experiencia profesional de un investigador famoso en la que expone las oportunidades orientadas a los desafíos globales que enfrenta la humanidad y la exploración terrestre, planetaria y espacial, donde se manifiesta la necesidad de proveer elementos para la toma de decisiones y proporcionar información encaminada a resolver los problemas que presentan las áreas de aplicación en la Tierra y expresa que “El futuro de la geofísica aplicada me parece muy brillante”.

Chávez (2019) expone, previo a la pandemia para el área del petróleo, que “Estamos viviendo un tiempo de reconfiguración y cambios en el mundo petrolero internacional y nacional, y la velocidad de esta parece incrementarse constantemente”, propone dos armas para enfrentar la reconfiguración relacionadas con la educación (formación académica, conocimientos y habilidades) y la comunicación (escrita, oral e idiomas).

Como se puede observar, la mayoría de las predicciones, perspectivas y futuro de la ingeniería geofísica se han enfocado principalmente en el área del petróleo, por ser la fuente de energía más sustentable en estos momentos. Con base en lo anterior, puede mostrarse un panorama nada gratificante para el futuro del petróleo como fuente de energía; hoy la mayoría de las compañías petroleras se han diversificado y son ahora empresas de energía (eólica, geotérmica, nuclear, mareas y solar), donde se presentan muchas más oportunidades para el ingeniero geofísico.

En lo relativo a la minería, Collete (1976) expresó que:

La geofísica debería enfocarse a diferenciar entre ruido geológico y anomalías geológicas económicas, técnicas de investigación más profundas, aplicación de técnicas multifrecuencia (electromagnéticas, polarización inducida, sistemas aéreos de detección, sistemas de navegación GPS, técnicas geofísicas por debajo del suelo marino, prospecciones en regiones topográficas complejas; técnicas de procesamiento e interpretación más complejas; planteamiento de estrategias de exploración orientadas a incrementar el éxito exploratorio.

Termina diciendo: “es difícil proyectar hacia el futuro, pero los avances más obvios sin duda vendrán de una integración de desarrollos geofísicos con aquellos en geoquímica y geología”.

En esta área, también, la ingeniería geofísica ha aportado nuevo conocimiento; sin embargo, no a la misma velocidad que la economía lo requiere. Hay que vencer las ideas antiguas de la exploración y transformar la metodología de la investigación del subsuelo en el área de la minería. En México el responsable de la exploración minera es el Servicio Geológico Mexicano quien cuenta con un grupo de especialistas geofísicos.

Para el área de la hidrogeología, ambiente y contaminación, si bien se han utilizado técnicas eléctricas y electromagnéticas específicamente orientadas a identificar la porosidad y la permeabilidad de las rocas, es un hecho que la necesidad creciente de este líquido requiere de estudios de más detalle. En la década de los noventa, Susan Hubbard, plantea y adopta el término hidrogeofísica

para aplicar las técnicas geofísicas en la exploración y evaluación hidrogeológica; si bien la geofísica no detecta porosidad y permeabilidad, la aplicación de estas técnicas combinadas adecuadamente con la geología, hidrogeología, ambiente e hidrogeoquímica permiten incrementar el éxito exploratorio; así como extender los resultados a una mayor área reduciendo los altos costos de exploración directa.

La aplicación de técnicas geofísicas ha presentado una gran aceptación en esta área. Binley *et al.* (2015) indican que:

...la geofísica proporciona un conjunto multidimensional de métodos de investigación que están transformando la capacidad de ver la estructura del ambiente del subsuelo y permiten monitorear la dinámica de sus fluidos y las reacciones biogeoquímicas que ocurren dentro de él.

Hoy todas las técnicas geofísicas, aplicadas en la hidrogeología, ambiente y contaminación, se aplican desde la conceptualización del problema, su caracterización y definición de: zonas con mayor potencial hidráulico subterráneo, carsticidad, identificar plumas de contaminación, conocer la movilidad del agua en el subsuelo, identificar zonas con mayor concentración de sales, por ejemplo, intrusión salina, así como aprovechar el agua de lluvia no controlada, a través de la identificación de zonas con mayor porosidad y fracturamiento para infiltrar el agua al subsuelo y recargar acuíferos y prevenir desastres por el abatimiento acelerado de los niveles del agua subterránea, entre otros. En cuanto a la localización de fuentes de abastecimiento de agua subterránea en México, la geofísica es parte fundamental, aunque no es usada adecuadamente, al darle sólo el crédito a la disciplina para decidir el sitio más apropiado, lo que en muchas ocasiones produce un resultado que no es favorable y desacredita la bondad de ésta.

En la agricultura, en algunos países la geofísica apoya a determinar la distribución de salinidad del suelo para que el agricultor le dé el tratamiento correctivo y sus cultivos sean mejores. La exploración geofísica es una herramienta de apoyo para evaluar la condición física del suelo previo a la siembra de las semillas, durante el crecimiento de las plantas y al finalizar la cosecha.

En cuanto a medicina forense —algo muy delicado y aún más doloroso—, en la búsqueda de restos de personas, la geofísica ha venido a ser una herramienta para identificar sitios donde existen restos humanos.

En la parte de la arqueología, Tejero *et al.* (2018) y Argote *et al.* (2020) han demostrado que la aplicación de la ingeniería geofísica es una herramienta útil y fundamental en la investigación arqueológica. Por ejemplo, en Chichen Itzá, Yucatán y en la pirámide de la Luna en Teotihuacán, Estado de México.

En la parte de riesgos de tipo geológico, la ingeniería geofísica apoya en la identificación de estructuras geológicas (zonas fracturadas, cavidades, taludes, deslizamiento de suelos, subsidencia, caída de bloques), que pongan en riesgo la integridad física de las personas. Hoy en día algunos estados de la República Mexicana realizan estudios específicos de geofísica para identificar cavidades o estructuras en el subsuelo con fines de protección civil y ya están reglamentados.

En cuanto a riesgos hidrogeológicos y ambientales (sequías, lluvias extraordinarias, huracanes), donde el abastecimiento, distribución y control del agua superficial y subterránea es motivo de preocupación para las autoridades encargadas de la prevención de riesgos; ante la escasez de agua se pueden generar conflictos sociales a nivel local, estatal, nacional y entre países.

En la parte de la geotecnia, en específico México, a raíz de los sismos de 1985 y 2017, se ha favorecido la cultura de la prevención y desarrollo de conocimiento para construir obras civiles más resistentes. La Comisión Federal de Electricidad<sup>3</sup> a finales de la década de los setenta, crea el Departamento de Geofísica, orientado a obtener parámetros físicos de apoyo al diseño de grandes obras civiles (presas y termoeléctricas) y en 1985 inicia con el desarrollo de una metodología junto con el Instituto de Ingeniería y el Instituto de Geofísica de la UNAM; Servicio Sismológico Nacional, Centro de Instrumentación y Registro Sísmico, A.C., Centro de Investigación Sísmica, A.C. e Instituto de Investigaciones Eléctricas (hoy Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias) han realizado estudios de sismología y ruido sísmico de mucho detalle para analizar ondas de cuerpo S y superficiales de Love y de Rayleigh, así como definir zonas de riesgo y dar elementos para el diseño de cimentaciones acordes con las condiciones del sitio donde se edificarán las construcciones.

En la parte de minerales radiactivos, la Comisión Nacional de Energía Nuclear, fundada en 1956 y en 1979 nombrado como Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ).

En 1979 se crea URAMEX con el fin de explorar, explotar, beneficiar y comercializar minerales radiactivos para el desarrollo de energía; en 1985 sus funciones las absorbe el Servicio Geológico Mexicano.

El cambio climático es otra área de oportunidad encaminada a predecir algunos fenómenos meteorológicos de la Tierra, donde se requieren complejos algoritmos matemáticos y cómputo intensivo para resolver principios y fenómenos físicos involucrados.

A mediados del siglo XX, grandes equipos de cómputo estaban enfocados en resolver problemática geofísica, empresas como Texas Instruments,<sup>4</sup> fundada en diciembre de 1941 con el objetivo de proporcionar servicios sismológicos para la exploración petrolera (Wikipedia).

Lo hasta ahora expuesto permite identificar la amplia visión que presentaban los primeros geofísicos donde resaltaban los conceptos con los que el profesional debería contar, alta preparación sobre fundamentos físicos de la Tierra, extenso conocimiento en el desarrollo y aplicación de paquetería<sup>5</sup> compleja, habilidad para transformarse con base en las necesidades, desarrollo de nuevas tecnologías; así como, una alta disposición y necesidad permanente de adquirir nuevo conocimiento.

<sup>3</sup> Empresa del estado mexicano encargada de la generación de energía eléctrica.

<sup>4</sup> En sus inicios fue *Geophysical Service Incorporated* (GSI).

<sup>5</sup> Se usa este término para referirse al término inglés *Software*.

Las perspectivas que la geofísica presenta ante una nueva forma de vivir, a causa de la COVID-19, no limita la imaginación y el futuro ingeniero geofísico deberá enfrentar retos relacionados con la energía (petróleo, gas, eólica, solar, mareas, captura-almacenamiento-reutilización de carbono, minerales como el litio), búsqueda-tratamiento-reciclado de agua potable, riesgo geológico (predicción), ambiente (caracterización de zonas contaminadas para su remediación), agricultura (identificación del tipo-condición de suelo para obtener mejores cosechas), educación (actualización permanente de planes de estudio y creación de nuevas especialidades con base en las necesidades que se vayan presentando), investigación (conocer con mayor profundidad los fenómenos naturales que se presentan en la Tierra y el Universo). Comunicación (más ágil para compartir ideas). Tecnología de Información (desarrollo de paquetería más compleja de los fenómenos físicos y procesos geológicos que se presentan en la Tierra y Universo).

En cada una, los ingenieros geofísicos deberán entender y manejar fenómenos físicos de la Tierra y del Universo para proponer soluciones viables. Por lo que el conocimiento, experiencias, desarrollo de tecnología y con nuevas propuestas de adquisición, procesamiento e interpretación de datos serán las herramientas del quehacer diario de la actividad.

## **Aprendizaje del ingeniero geofísico**

Se pueden marcar también varias etapas en el aprendizaje de la carrera. Si bien, durante las primeras generaciones la transmisión de los conocimientos fue a través de profesionales de otras áreas que aplicaban geofísica con fines petroleros (geólogos, mecánicos, electrónicos, físicos), pudieron permear el amor y la necesidad de buscar más allá de lo que se sabía, sobre las condiciones físicas y estructura del subsuelo. Si bien tenían una visión para resolver los problemas que se les presentaban, dejaron una huella muy grande a las generaciones que formaron cuando transmitieron sus conocimientos con pasión y hasta obsesión por lo que hacían. Hay que mencionar que mucho del conocimiento que adquirieron las generaciones en esa etapa de la carrera fue autodidacta, ya que con sus inquietudes de buscar nuevas oportunidades de trabajo tuvieron que adquirirlo y aplicarlo. En esta parte, el desarrollo de equipos más sofisticados, tanto de adquisición de datos como de procesamiento, se enfocaban a la parte sustantiva del problema: entenderlo y resolverlo.

La siguiente etapa se presenta entre 1981 a 2000, se inicia un periodo de aprendizaje-enseñanza, donde la mayoría de los mentores y profesores son los primeros egresados, quienes con la poca experiencia adquirida obtienen más conocimientos y habilidades para resolver problemas, que fueron compartidas para el bien de la carrera.

Sobre estas dos etapas, es claro que la comunicación presencial (transmisor-receptor de conocimiento) fue fundamental, ya que la transferencia de vivencias, experiencias, búsqueda y obtención de conocimiento generaron equipos y

paqueterías buscando reducir tiempos de adquisición y procesamiento. Faltó enseñar que su uso y aplicación requerían de conceptualización de la problemática (los equipos son limitados a la profundidad de investigación). Eran conscientes de que la paquetería era una herramienta de apoyo, no de solución del problema que se enfrentaba, ya que en estas etapas el ingeniero lo desarrollaba.

Una tercera etapa correspondiente al nuevo milenio, si bien la tecnología de adquisición y procesamiento se han pulido y sofisticado, la divulgación, que es una panacea limita mucho el entendimiento del problema y se enfoca en aplicar herramientas computacionales o paquetería que realizan cálculos por *predeterminación*. Actualmente, tanto los equipos como la paquetería “ya resuelven el problema”, limitando al “ingeniero geofísico pasivo” a solo apretar un botón o presionar el ratón para que los equipos adquieran, procesen<sup>6</sup> y desplieguen datos. En esta parte se obtienen datos, ya que sin una conceptualización, y por ende caracterización, el resultado que da la computadora no tiene sentido si no se aplican los conceptos de conceptualización y caracterización. La facilidad y accesibilidad a estas paqueterías han restringido la capacidad para que muchos de los ingenieros e investigadores desarrollen sus competencias y habilidades en la mejora de nuevas técnicas geofísicas, diseño de adquisición de datos, procesamiento e interpretación. También hay que identificar que existen “ingenieros geofísicos activos” que, con base en conocimiento, planteamientos del problema, y sobre todo con la aplicación de las bases físicas y matemáticas sólidas, desarrollan y desempeñan una labor que da credibilidad a la disciplina.

Algo muy notorio que se identificaba en las primeras generaciones es que “luchaban por aprender y lograr el objetivo”; las generaciones actuales “pelean por obtener una buena calificación sin importar si realmente aprendieron”. Sobre esto hay que caracterizar el término “calificación”, un número expedido con base en un comportamiento desempeñado en un lapso muy corto (duración de una asignatura que se toma, en la Facultad de Ingeniería de la UNAM es de no más de 48 horas de clase), no refleja el conocimiento real de lo que se “aprendió”. De ahí que la concepción de Universidad es una institución donde se informa y forma al alumno sobre los fundamentos mínimos con que debe contar para desarrollar una actividad; el conocimiento lo adquirirá una vez que haya asimilado, aplicado conceptos fundamentales de la disciplina, las competencias, las habilidades y actitudes para desarrollarla, para formar la identidad del aspirante.

Hoy en día se tiene el orgullo que varios de los egresados han incursionado en el área de investigación con mucho éxito y logrado escalar a niveles de dirección de institutos de investigación. Otros más, son distinguidos dueños de compañías de exploración geofísica y la mayoría son exitosos profesionales; que si bien, no todos se dedican a ella, tienen una formación que les permite sobresalir en las actividades que desempeñan.

<sup>6</sup> En esta parte el término procesar se refiere a “Someter una cosa a un proceso de elaboración o de transformación” (Real Academia de la Lengua) y no a término adecuado que se usa en la Ingeniería Geofísica de Procesamiento “la acumulación y manipulación de elementos de datos para producir información significativa” (Wikipedia).

Sobre la formación de ingenieros geofísicos en la UNAM, la Facultad de Ingeniería se ha caracterizado por buscar lo mejor y estar en permanente actualización de sus planes y programas de estudio, condición que le permite ser competitiva tanto a nivel nacional como internacional.

## Proceso de aprendizaje del ser humano

Previo a caracterizar la forma de aprendizaje del ingeniero geofísico es necesario mencionar la forma en que aprende el ser humano. Ocampo (2017) menciona que:

En los primeros días de su existencia, una vez que ha palpado, gustado y visto las cosas, es la de cuestionar el porqué de las cosas, situación a veces no muy agradable para los seres humanos mayores; es el primer contacto con el razonamiento que le permite al niño, entre otras cosas, dominar el lenguaje, desarrollar el pensamiento, conocer y ordenar su mundo, ampliar su conocimiento y sobre todo conocer las razones de por qué el mundo que le rodea es así. Sin embargo, a medida que pasa el tiempo este cuestionamiento se reduce a muy poco o a nada, posiblemente porque el entorno en el que vive le presenta muchas imágenes que aparentemente le responden a su inquietud y pierde la capacidad de razonar.

Un aspirante a ingeniero geofísico es un niño que requiere enfocar sus sentidos hacia la aplicación de la geología, física y matemática al estudio de los fenómenos que se presentan en la Tierra (interior y exterior). Es un ser en etapa de formación y al igual que un niño presenta muchas dudas, cuestionamientos y requiere de información fundamental para desempeñar la actividad por lo que resta de vida.

Con base en lo expuesto, Serrat (2009) expresa “¿Qué es lo que realmente se puede aprovechar de estos cuestionamientos?”, la manera de pensar y fundamentar el sentido de las cosas, razonar. Esta habilidad de cuestionar es lo que falta a las personas, y una manera de enseñarla es precisamente a través de la comunicación visual, verbal y presencial; siendo la última forma esencial de cómo se transmite el conocimiento, viendo y copiando algunas actitudes en el comportamiento corporal de las personas, situación que le da vida a la transmisión del conocimiento, carácter e identidad de la ingeniería geofísica.

## Proceso de aprendizaje del ingeniero geofísico

La primera forma de aprendizaje, y fundamental, es el uso de los sentidos: vista, gusto, oído, olfato y tacto; de estos para el ingeniero geofísico resalta la observación (tácita y explícita); sobre la tácita hay que mencionar que una de las cualidades que debe tener un ingeniero geofísico es “ver lo que no se ve”.

La segunda parte del proceso, es la capacidad de distinguir entre lo que es dato, información y conocimiento. Valhondo (2003) indica que un dato es un conjunto discreto de hechos objetivos acerca de los eventos (registros estructurados), carecen de sentido ya que describen parcialmente lo que sucede y no proporcionan juicio ni interpretación, ni permiten la toma de decisiones (no dice lo que se tiene que hacer). Estos hechos y valores pueden ser históricos o

actuales y ser producto de la observación, medición o experimentación. Cuando al dato se le da un sentido se convierte en información (Figura 2).

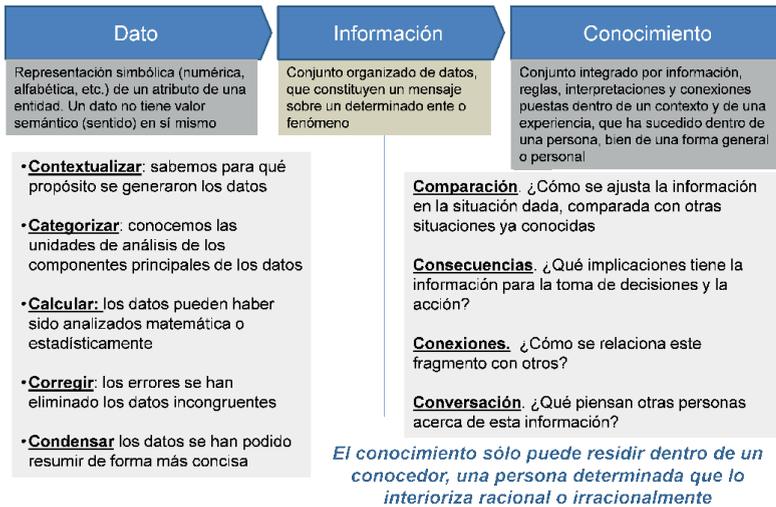


Figura 2. Diferencias y correlación entre dato, información y conocimiento. Interpretado y adaptado de Valhondo (2003).

En lo relativo a la información, Valhondo (2003) menciona que son datos dotados de relevancia y propósito para lo que se quiere hacer y está organizada con algún propósito. En esta parte se involucra la comunicación y transmisión sobre hechos o circunstancias particulares donde, además, interviene la investigación e instrucción. Cuando la información se trata, analiza y transforma se convierte en conocimiento.

Por su parte, el conocimiento según Davenport *et al.* (1998), indican que es una mezcla fluida de experiencias, valores, información contextual y apreciaciones expertas que proporcionan un marco para su evaluación e incorporación de nuevas experiencias e información. Se origina y aplica en las mentes de los conocedores. Es una aprehensión de hechos, verdades o principios resultado de estudio, investigación o erudición general (Valhondo, 2003).

Es necesario precisar que la Tecnología de la Información (paquetería y computadora) no da conocimiento, es una herramienta que añade valor al dato (para su captura, cálculo, corrección) y para mostrar resultados de una manera más ágil (tablas, figuras, dibujos, imágenes); poco aporta en la parte de la caracterización (lo que se busca). Con base en lo anterior, una parte importante e interesante para adquirir conocimiento es contar con un proceso. En este trabajo se menciona el proceso de investigación CCC (Conceptualización, Caracterización

y Concreción), siguiendo la lógica y secuencia de utilizar verbos que inician con la letra C.

La Figura 3, muestra el proceso exploratorio, que no es otra cosa que la descripción del Método Científico aplicado al área geofísica. En ella se pueden ver acciones que se requieren para realizar una investigación o estudio; así como el tratamiento que se debe aplicar a datos para convertirlos en información útil que permita adquirir o generar nuevo conocimiento.

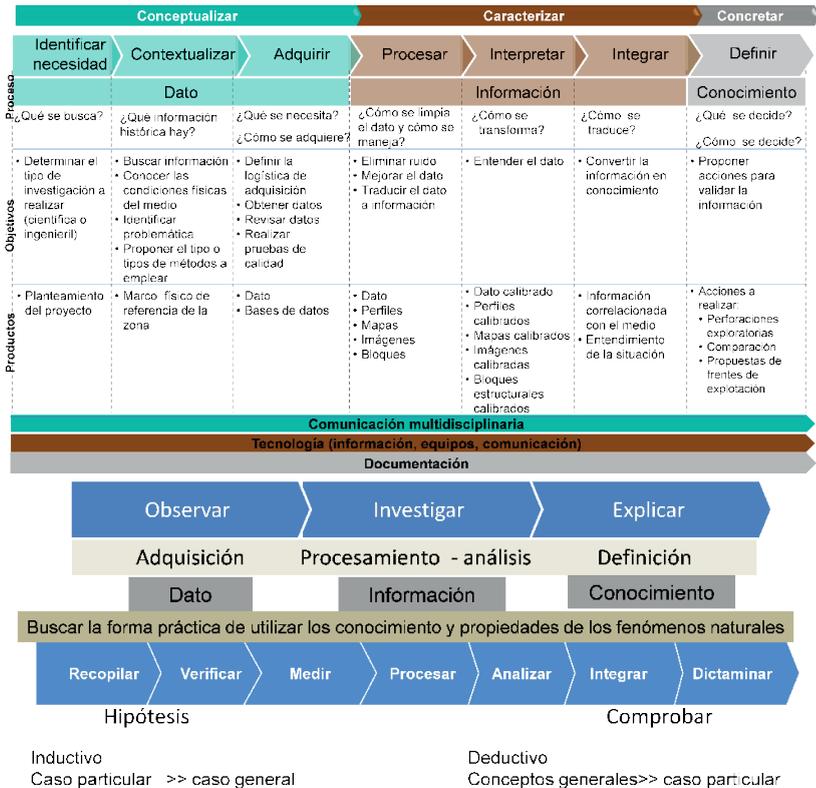


Figura 3. Proceso exploratorio.

Por otra parte, la actividad del ingeniero geofísico, en su ámbito profesional, se refleja en tres áreas: campo, investigación y manejo de información, donde el proceso CCC bien se puede aplicar. La primera parte se refiere a la *conceptualización* del problema a resolver. Consiste en investigar sobre lo que hay del lugar para tener un marco de referencia y orientar la investigación para adquirir la información que falta, ya sea nueva o bien actualizarla. En esta parte la clasificación de la información histórica es importante. Para esto, la búsqueda de información, la comunicación entre pares<sup>7</sup> que intercambien

<sup>7</sup> Personas que realizan actividades similares o han trabajado realizando otros estudios en el sitio donde se requiere.

conocimiento. El resultado de esta etapa es la identificación de las brechas de conocimiento, plantear la necesidad de adquirir nuevo conocimiento y plantear la estrategia que permita llegar al objetivo esperado. En esta parte la Tecnología de la Información apoya en la organización y ordenación de la información, principalmente, a través de bases de datos, así como la Tecnología de la Comunicación (telefonía celular, internet, videoconferencia) en la parte de acercar y transmitir el conocimiento a través de la voz e imágenes. La parte de campo es fundamental, ya que permite contextualizar la situación que se presenta y plantear opciones de solución. En este sentido, la presencia en campo le permite identificar la necesidad del porqué del estudio o investigación, observar el entorno donde se desarrollará, plantear el tipo de técnica geofísica a aplicar, diseñar la forma de adquirir los datos, percibir riesgos que se pueden presentar tanto en campo, como en los momentos del procesamiento e interpretación, convivir con la naturaleza para planear la estrategia del desarrollo del trabajo en campo, copiar mejores prácticas de otros trabajos similares para mejorarlo o evitar repetir errores. “Un dato tomado o adquirido mal, es basura, ningún procesamiento podrá definir la esencia de éste” frase que el ingeniero Enrique del Valle Toledo<sup>8</sup> transmitía a los ingenieros geofísicos que le tocó formar.

La parte correspondiente a la *caracterización* se enfoca en analizar información obtenida en campo, a eliminar mediante aplicación de filtros el o los ruidos que presentan la medición o señales obtenidas, con el objeto de tener una señal mejorada que represente mejor las condiciones del medio medido.

Otra parte que se desarrolla en esta etapa, es el análisis de la relación señal-ruido. Generalmente, aún después que los datos han sido filtrados, puede ocurrir que a causa de ruido el resultado esperado no revele la presencia del objetivo tan claramente como se querría. El ruido es una variación o fluctuación en los valores medidos que se superpone con los valores buscados llamados señal.

La generación de modelos matemáticos y físicos también es una actividad en la etapa de caracterización. Como se ha mencionado, los datos obtenidos en campo, después de su procesamiento se disponen en forma de mapas, gráficas, perfiles, que muestran la distribución de las mediciones. Y ya que cada método geofísico responde a una propiedad física del terreno, la empresa Hydro-Geophysics, en su página web indica que:

El procedimiento que identifica cuál es esta distribución subterránea de parámetros de interés a partir de los datos adquiridos se llama inversión. Es un proceso matemáticamente complejo: algunos algoritmos eficientes han sido incorporados en códigos libres y comerciales de uso extendido. El resultado de la inversión es una imagen de la distribución de propiedades. Ésta depende, en general, de algunos parámetros numéricos que el ordenador pide, para lo cual es preciso tener un conocimiento del algoritmo matemático (en las opciones por predeterminación es el

<sup>8</sup> Importante personaje en la creación de la carrera de ingeniero geofísico en la Facultad de Ingeniería, UNAM.

programa el que toma la decisión, lo ignore o no el usuario). Varias imágenes finales son posibles, compatibles con las medidas tomadas.

Resalta en la descripción de Hydro-Geophysics algo que se mencionó en párrafos anteriores sobre el hecho de que, en la aplicación de cualquier paquetería de inversión, el programa por predeterminación toma la decisión de organizar, interpolar o utilizar el método matemático más adecuado, limita el criterio y razonamiento del "ingeniero geofísico pasivo"; situación que se debe evitar y aplicar el conocimiento.

Otra parte importante se refiere a escuchar la opinión de otros pares o profesionales inmersos en el estudio o investigación, con el objeto de correlacionar información. En esta parte, la Tecnología de Información es más compleja, ya que hay que desarrollar o utilizar complejos algoritmos tanto para la limpieza de las señales o datos, como para la modelación de fenómenos físicos y el despliegue de los resultados (una, dos o tres dimensiones); así como también, la Tecnología de Comunicación, la cual puede reducir distancias y facilitar comunicación verbal y escrita. Sobre esto, es necesario reiterar que las tecnologías mencionadas "son apoyo, no solución".

La parte de *concreción* se refiere a plasmar el nuevo conocimiento generado. Una vez que todos los datos, información y conocimiento fueron organizados, analizados, procesados, interpretados e integrados se puede definir el resultado. A partir de esto se da un dictamen sobre las condiciones actualizadas del sitio y se proponen las acciones que permitan validar la información y conocimiento. Las acciones se orientan a indicar los sitios donde hay que hacer las exploraciones directas o frentes de explotación, la comparación de resultados es fundamental para validar o replantear el estudio. Otra parte importante de este proceso es la documentación, ya que es la única evidencia de plasmar en conocimiento explícito y no quede sólo como tácito.

## **Formas de aprendizaje del ingeniero geofísico en la Facultad de Ingeniería de la UNAM**

La integración del plan de estudio de la carrera de ingeniero geofísico en la UNAM se divide en cinco bloques, donde se tienen que cursar 52 asignaturas (Figura 4). Cada bloque agrupa a diferentes áreas del conocimiento, en las cuales resaltan matemáticas, física, geología, geofísica, ciencias sociales e ingeniería. La carrera requiere de diez semestres, con un total de 450 créditos. Varias de las asignaturas, además de la parte teórica, requieren prácticas de laboratorio y campo.<sup>9</sup>

Ante la contingencia de la pandemia por la COVID-19, hubo necesidad de adaptarse a la situación e innovar la forma de enseñanza. En este trabajo se plantea una opción de las muchas que se plantearon, ya que cada profesor

<sup>9</sup> Para mayor información véase la página web [https://www.ingenieria.unam.mx/programas\\_academicos/licenciatura/geofisica\\_plan2016.php](https://www.ingenieria.unam.mx/programas_academicos/licenciatura/geofisica_plan2016.php)

aplicó (enseñanza a distancia) la que mejor convenía de acuerdo con la situación del tipo de asignatura y a su habilidad para comunicarse a través de medios electrónicos.



Figura 4. Plan de estudios de la carrera de Ingeniería geofísica.<sup>10</sup>

Por lo anterior, es necesario valorar las dos opciones que se plantearon para enfrentar y solventar la problemática: clases presenciales y a distancia.

¿Cuál es la ventaja que plantean las **clases presenciales** en los alumnos? A continuación, se plantean algunas acciones, propuestas por Cerato y Galindo (2013), adaptadas y mejoradas:

1. Adquirir la identidad de la carrera al percibir, copiar actitudes y personalidades de los mentores.
2. Obtener confianza al ver al profesor mentor en cómo transmite y aplica sus conocimientos.
3. Atender las deficiencias.
4. Sentir la pasión de cómo el mentor comunica sus experiencias y dar sentido a lo que se quiere.
5. Contar con alguien que oriente la forma de adquirir el conocimiento.
6. Confirmar que el conocimiento adquirido va en la línea del aprendizaje o de la investigación a la que se desea llegar.
7. Competir y compararse con un par, qué tanto conocimiento tiene o le falta.
8. Identificar oportunidades con base en el punto anterior para buscar nuevo conocimiento.
9. Conversar con profesores y compañeros para discernir lo que se aprende.
10. Convivir y compartir experiencias con sus futuros competidores.

<sup>10</sup> Adaptado del plan de estudios 2016 de la Carrera de Ingeniería Geofísica de la Facultad de Ingeniería, UNAM

## 11. Adquirir una personalidad.

En cuanto a las **clases a distancia**:

*InGenio Learning*, en su página web plantea algunas situaciones que deben tomarse en cuenta para poder usar bien esta modalidad; sobre esto se hacen algunas precisiones.

- Un requisito esencial para poder educarse de forma virtual es tener una computadora con buen Internet; para muchos esto es algo trivial; no todo el mundo tiene acceso a una computadora y mucho menos a Internet, bien sea por falta de recursos económicos o porque viven tan alejados de las ciudades donde no hay forma de acceder a la red.
- Personalidad. Para hacer uso de esta modalidad es necesario ser una persona responsable para no distraerse frente a la computadora. La experiencia personal indica que el uso de la computadora provoca dispersión, ya que la búsqueda de información se ve distraída por las infinitas opciones que plantean las plataformas, lo cual provoca que se pueda perder el objetivo de lo que se quiere. El teléfono celular es otro gran distractor del aprendizaje, si no se usa adecuadamente.
- Otro problema que se presenta es la falta de responsabilidad, disciplina y capacidad de atención. Estas habilidades son parte de las fortalezas de la enseñanza presencial. La actitud es el medio para provocar los cambios.

Con base en lo anterior se plantean las ventajas de esta modalidad.

1. Los participantes pueden enriquecerse a través de diferentes formas para adquirir el conocimiento y no de una sola persona como es el caso de clases presenciales. En cuanto a la búsqueda de fuentes de información, nuestra experiencia indica que las búsquedas de información que realizan los aspirantes a la carrera de ingeniero geofísico se limitan a lo que presentan Google Académico u otros buscadores de información, la cual no está sustentada o avalada; la búsqueda en libros, artículos o sociedades técnicas especializadas, por lo regular se ve limitada ya que se requiere de licencias y de altos recursos económicos para acceder a ellos y, por otra parte, del dominio de los idiomas en que están escritos. Por lo regular se van por lo más fácil y eso no aporta conocimiento ni experiencia.
2. El participante puede pasar de pasivo a activo; puede convertirse en autodidacta. En esta situación es importante la actitud y disciplina del aspirante; pero el cuestionamiento se orienta al ¿qué, cómo y por qué tiene que estudiar? o bien, ¿quién lo va a orientar?
3. El tiempo y el espacio son un atractivo ya que no tienen que desplazarse a un lugar en específico y aprovechar mejor el tiempo. En cuanto al espacio, cualquier lugar donde sea cómodo puede ser utilizado; se requiere de prácticas de laboratorio, no se tienen los recursos para crear un laboratorio personal y realizar los experimentos y si se tienen que realizar mediciones en campo, pues se requiere de otro tipo de espacio y equipamiento. En la parte del espacio, a

nivel personal, es necesario respetarlo, saber que es un lugar específico para aprender, es una disciplina que muchos no entienden.

Se reitera que el uso de las Tecnologías de Información y Comunicación son herramientas de apoyo y a nivel personal, no da la identidad al aspirante.

Sobre que la “educación a distancia es la opción del futuro”, se puede cuestionar; a nivel personal, es válida pero a otros niveles de conocimiento, por ejemplo, para una maestría o doctorado. ¿Por qué? Porque para adquirir conocimientos a un nivel más elevado ya se cuenta con la identidad y se conoce el proceso de adquisición de conocimiento de la disciplina, entre otros.

Sobre el párrafo anterior, en estos de pandemia y confinamiento, existe un mundo de artículos, instituciones de enseñanza y páginas de la red donde aprovechan el momento para favorecer el método de enseñanza a distancia; sin embargo, hay que identificar que son instituciones enfocadas a proveer servicios sobre negocios, no de desarrollo de ingeniería. Hay que entender que la ingeniería geofísica es una actividad de ciencia aplicada, donde los conceptos de matemáticas, física, química y geología requieren de un sólido conocimiento para la comprensión y razonamiento del problema que enfrenta; no se elimina el término negocio, en el cual se debe adquirir la habilidad para saber vender el conocimiento.

Hay que mencionar que lo importante del aprendizaje a nivel licenciatura es “Aprender entendiendo no aprender haciendo”. Lo anterior lleva a que el estudiante tenga los elementos para “Saber qué hacer con lo que se sabe”.

## **Competencias para un aspirante a Ingeniería Geofísica**

Cerato y Galindo (2013) indican que:

...el desarrollo de la educación por competencias, con base en un enfoque sistémico y complejo, es una necesidad impostergable en el desarrollo de la Educación Superior en general y en el caso del ingeniero, en particular, para los nuevos paradigmas y desafíos del Tercer Milenio con un enfoque de Desarrollo Humano Integral.

Por otra parte, Molina (2000) indica que:

...la competencia profesional abarca múltiples dimensiones y define que para que se alcance una competencia profesional el aspirante debe poseer cuatro cualidades: aprender a conocer, aprender a hacer, aprender a convivir y aprender a ser.

El término competencias aparece a finales del siglo XX como un elemento para crear valor; para un aspirante a ingeniero geofísico, se puede definir como el conjunto de conocimientos, habilidades, destrezas, actitudes y valores que, aplicados al entendimiento de la estructura de la Tierra, genera los elementos suficientes y necesarios para tener un mejor desempeño de la actividad. Lo anterior implica que para cada una de las áreas de conocimiento que plantea la carrera de ingeniero geofísico (Figura 4), deben estar alineadas con la capacidad de la enseñanza-aprendizaje, así como a la adaptación a nuevas situaciones (técnicas,

científicas, sociales, económicas, tecnológicas y ambientales), lo que representa un gran desafío al conjugarlas.

El trabajo que realiza un ingeniero geofísico es amplio y diverso en cuanto a las áreas de desempeño y poco predecible, ya que dentro de la carrera existen diversas áreas de aplicación. Si bien pueden aplicarse las diferentes técnicas para conocer el interior o exterior de la Tierra, su caracterización difiere. Se puede decir que cada trabajo o investigación que se desarrolla es un nuevo reto que cumplir, siempre diferente. Por lo anterior, en la etapa temprana de conocimiento de la disciplina es necesario clarificar las competencias e implementar los procesos de enseñanza que le permitan al egresado enfrentar un contexto laboral amplio, cambiante y variante.

La complejidad para los responsables del diseño, administración y actualización de la carrera de ingeniero geofísico es ofrecer un profesional que resuelva el conocimiento relacionado con la estructura interna y externa de la Tierra, cumpliendo la misión de resolver problemas relacionados con la disciplina y satisfacer necesidades para la humanidad. Por lo anterior, Cerato y Galindo (2013) plantean que:

Los desafíos en la educación son los dirigidos a aplicar modos y metodologías de estrategias de enseñanza, que tiendan a una educación transdisciplinaria, desarrollo de habilidades metacognitivas, más que acumulaciones de conocimientos de hechos. Saber qué hacer con lo que se sabe, formación de pensamiento esencialmente científico, apertura al pensamiento intuitivo, creatividad, formación de valores, dar respuesta a las necesidades de diversos agentes sociales, etc. En síntesis, desarrollar competencias para el Desarrollo Humano Integral.

Lo anterior se traduce en que, para saber hacer, primero, se requiere entender el saber. Esto implica que para tener un criterio para proponer una solución se debe contar con los elementos necesarios e indispensables para entender el problema y plantear la solución más adecuada.

Los alumnos que ingresan a la carrera de ingeniero geofísico en México, específicamente los de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, provienen de tres diferentes fuentes: 1) Escuela Nacional Preparatoria<sup>11</sup> de la UNAM; 2) Colegio de Ciencias y Humanidades (CCH)<sup>12</sup>; 3) de otras escuelas preparatorias o colegios

<sup>11</sup> Modelo educativo de la Escuela Nacional Preparatoria que tiene como principal propósito la formación integral del educando: aquella que le proporciona elementos cognoscitivos, metodológicos y afectivos que, en síntesis, le permitan profundizar de manera progresiva en la comprensión de su medio natural y social, desarrollar su personalidad, definir su participación crítica y constructiva en la sociedad en que se desenvuelve e introducirse en el análisis de las problemáticas que constituyen el objeto de estudio de las diferentes disciplinas científicas y tecnológicas, siempre con la perspectiva de la formación profesional universitaria. Dicha formación integral busca fortalecer el perfil del egresado, de acuerdo con los requerimientos que demandan los estudios superiores en general y los de cada área de formación académica en particular, en términos de valores y actitudes que suponen una formación social y humanística básicas (científica, lingüística, histórica, económica, política y artística). Plan de estudio 1996.

<sup>12</sup> Modelo educativo del Colegio de Ciencias y Humanidades que tiene como principal propósito la conjunción de cultura básica, formación intelectual ética y social de los alumnos considerados sujetos de la cultura y de su propia educación, formados por los métodos científico Experimental e Histórico Social y por dos lenguajes: español y matemáticas. 2018.

de ciencias y humanidades incorporados de diferentes estados de la República Mexicana.

No se entrará en detalle para no provocar conflictos de intereses, pero un problema del que se queja la mayoría del profesorado, a nivel licenciatura, es la baja preparación con la que llegan los alumnos a nivel licenciatura, tema de un posible nuevo trabajo. Ahora bien, asintiendo la premisa de que el alumno llega con conocimientos necesarios para cursar la carrera de ingeniero geofísico, las competencias a desarrollar se enfocan en:

Competencias de **ciencias básicas**:

1. Capacidad de:
  - a. Conocer los principios físicos en los que se sustenta la carrera.
  - b. Abstracción, análisis y síntesis.
  - c. Razonar.

Competencias de **ciencias de la ingeniería**:

2. Capacidad de entender los conocimientos sobre el área de estudio y la profesión.

Competencias de **ingeniería aplicada**:

3. Capacidad de o para:
  - a. Aplicar conocimientos en la práctica.
  - b. Buscar, procesar y analizar información de diferentes fuentes.
  - c. Identificar, plantear, resolver problemas y dar elementos para la toma de decisiones.
  - d. Investigar.
  - e. Crear e innovar.
  - f. Aplicar conocimientos del área de estudio.
  - g. Organizar y planificar.
  - h. Aprender y actualizarse permanentemente.
  - i. Entender y hacer uso de tecnologías de información y comunicación.
  - j. Desarrollar nuevas técnicas de adquisición de datos y procesamiento de información.

Competencias de **ciencias sociales y humanidades**

4. Capacidad para o de:
  - a. Identificar y entender necesidades y problemáticas social y económicas del país.
  - b. Comunicar en forma oral y escrita (español e inglés) los conocimientos adquiridos.
5. Compromiso y responsabilidad social.
6. Compromiso ético.

Competencias de **asignaturas convenientes**

7. Capacidad para:
  - a. Formular y gestionar proyectos.
  - b. Desarrollar equipo y paquetería relacionados con la disciplina.

#### **Otras competencias**

8. Capacidad de o para:
  - a. Adaptarse continuamente.
  - b. Motivar personal y conducir hacia metas comunes.
  - c. Hacer relaciones interpersonales.
9. Compromiso con la:
  - d. Calidad.
  - e. Preservación del medio ambiente.
10. Habilidad para trabajar en equipo, en forma autónoma y en contextos internacionales.
11. Resiliencia.

Como se puede ver en estas competencias, la **socialización** implica que a través de ella el futuro ingeniero geofísico podrá identificar a sus competidores, sus socios intelectuales y hacer comparaciones, ver las consecuencias, tener las conexiones y hacer conversaciones que le permitan adquirir nuevo conocimiento.

El planteamiento de las competencias antes mencionadas se sustenta en la experiencia académico-administrativa que han tenido los autores en el planteamiento y diseño de los diferentes planes de estudio que ha tenido la carrera.

## **Experiencia sobre dar clases a nivel presencial y a distancia**

A raíz de la COVID-19 se ha tenido la necesidad de realizar la enseñanza a distancia; si bien es una alternativa para evitar los contagios, creemos que a nivel personal no es la más adecuada ni la que resolverá la problemática del aprendizaje en la carrera de Ingeniería geofísica. Para fines de ilustración, se presentan los resultados obtenidos durante el semestre 2020-2 de la asignatura Introducción a la Geofísica.

Esta asignatura se imparte en el cuarto semestre de la carrera de Ingeniería Geofísica en la UNAM y para este caso, se impartió en dos formas: presencial del 1 de febrero al 21 de marzo y a distancia del 28 de marzo al 6 de junio. La duración de la asignatura es de 4 horas, pero por problemas de ajuste de tiempo del profesor, por tener otras responsabilidades, se dio el día sábado. Reto interesante ya que mantener la atención del grupo por tanto tiempo, requirió plantear una estrategia *ad hoc* al número de alumnos inscritos al semestre y buscar incentivos de enseñanza-aprendizaje.

El resultado del proceso enseñanza-aprendizaje y el responsabilizarse, motivó a los alumnos a presentar mejores trabajos, realizar cuestionamientos orientados a resolver sus dudas y sobre todo a buscar nuevos horizontes donde encontrar el conocimiento.

Durante las clases a distancia se realizó una encuesta a los alumnos para indagar sobre el plan de estudios que llevaron en su educación intermedia (preparatoria o CCH). De 12<sup>13</sup> alumnos, ocho provenían de CCH y cuatro de preparatoria; los alumnos de CCH para este tipo de curso tuvieron mejor desempeño, el cual se identificará por la metodología empleada en la impartición del curso.

## ***Clases presenciales***

Estrategia planteada fue:

1. Identificación del profesor.
2. Antecedentes académicos de la asignatura.
3. Desarrollo del curso (exposición del profesor, investigación, exposición de los alumnos, búsqueda de información, discusión de temas, respuesta a dudas).
4. Presentación del programa de la asignatura y sus objetivos.
5. Forma de evaluación (resúmenes semanales de la clase impartida, participación, investigación a través de lecturas y dos de cuatro exámenes parciales).
6. Presentación de bibliografía básica existente en la biblioteca de la Facultad de Ingeniería.
7. Metodología de aprendizaje (¿Qué ví? ¿Qué entendí? ¿Qué espero?)<sup>14</sup>
8. Hablarles sobre la vida cotidiana de un ingeniero geofísico (¿Qué hace? ¿Cómo se prepara? ¿Cómo vive? ¿Qué rasgos lo identifican?).
9. Establecimiento de metas de cada uno de los alumnos.
10. Firma de un contrato-compromiso (alumno-profesor) donde se exponían obligaciones y responsabilidades de alumnos y profesor.
11. Exposición de los diferentes temas por parte del profesor, cuestionando lo que expresaba.
12. Al inicio de cada clase, además de presentar un documento sobre lo que se vio, los alumnos exponían lo que habían asimilado, con fines de recordar, afianzar el conocimiento y reforzar las debilidades de la clase anterior.

Para la evaluación se tomaron en consideración los siguientes aspectos

- Asistencia.
- Exposición de lo entendido la clase anterior.
- Entrega del resumen ¿Qué ví...? de la sesión anterior.
- Redacción.
- Examen parcial.
- Actitud del alumno.

<sup>13</sup> Número final de alumnos, de 20 inscritos, que terminaron el curso.

<sup>14</sup> Adaptación del proceso EDA (Evaluación Después de la Acción) del Ejército de Estados Unidos enfocado en mejorar la capacidad de aprendizaje en una acción militar y optimizar el trabajo en equipo. Es un debate acerca de un acontecimiento centrado en los niveles de actuación que permite a los soldados descubrir por sí mismos lo que ha sucedido, por qué ha sucedido, cómo mantiene las fuerzas y mejorar los puntos débiles (Collison y Parcell, 2001).

### *Deficiencias identificadas*

- Falta de compromiso y motivación. Hay que mencionar que es la primera asignatura de la carrera dónde los alumnos se enfrentan a su primera realidad; algunos aún no están enterados ni convencidos de lo que realmente es la carrera.
- El 80% no tenía conocimiento del idioma inglés, situación que les dificultó buscar información veraz y actualizada sobre la asignatura (la mayor información sobre la materia está disponible en inglés).
- No saben aprovechar herramientas de Tecnología de Información; si son muy hábiles en su uso, pero no saben buscar ni identificar información importante. La Tecnología de Comunicación es un distractor muy eficiente, le ponen más atención a esta que a la exposición de la materia.
- Falta de maduración, por lo menos en el cuarto semestre de la carrera, aún no se ubican en el nivel académico en el que se encuentran y presentan actitudes similares a las que desarrollaban a nivel medio (preparatoria o CCH).
- Se distraen demasiado; para ello se aplicó la técnica ¿por qué?, ¿por qué? para evitar distracciones, funcionó en un buen porcentaje, a pesar de las molestias que provocaba la interrupción de la distracción.
- En cuanto al profesor, la preparación del material para exponer la clase estaba encaminada a tener las ideas que requería para que el tema fuese expuesto en orden, recalcando las ideas necesarias y suficientes para transmitir conocimiento. Era apoyo para el profesor y un elemento para que el alumno tuviese las ideas que exponía el profesor.

### **Clases a distancia**

Estrategia planteada fue:

1. Desapareció el profesor, no hubo mentor, aunque se llevaba un seguimiento particular a cada alumno. Se tomó la filosofía “enseña para aprender”, donde ahora el alumno tomó la iniciativa de ser receptor-transmisor.
2. La identificación de personalidades de cada alumno en la etapa de clases presenciales facilitó identificar y calificar el desempeño de cada alumno.
3. La actividad en esta parte del curso consistió en que los alumnos fueran más responsables, al indicarles el tema que debían desarrollar y proporcionarles material donde deberían investigar.
4. Dado que no había biblioteca, se les entregaron archivos digitales de capítulos de libros que deberían consultar.
5. El trabajo estaba diseñado para que invirtieran al menos dos horas al día en el desarrollo de la investigación. La asignatura es de 12 créditos y de acuerdo con el diseño del plan, por lo menos se debe invertir una hora de estudio extra clase. El trabajo lo realizaban el día viernes o sábado antes de entregarlo. Lo anterior se sustenta por los correos o mensajes electrónicos que enviaban los alumnos a partir del día jueves.

6. El trabajo lo debían entregar antes de las 7:00 de la mañana del día sábado.
7. Durante el periodo de clase, el profesor revisaba la investigación, identificaba debilidades y lo regresaba a los alumnos para que durante el periodo de clase (6 horas) regresaran la investigación mejorada. En este caso se obtenían dos calificaciones (inicial y mejorada).
8. Al término de la clase se les enviaba el trabajo con las calificaciones obtenidas.
9. Al identificar brechas de cada uno de los trabajos presentados, el profesor realizaba un ensayo sobre lo que debieron haber buscado, analizado y entendido. Este trabajo se les enviaba dos o tres días después de la clase y los alumnos tenían que hacer un escrito sobre las diferencias entre su trabajo y el del profesor.
10. Se realizaron cuatro exámenes parciales, que tenían que resolver durante la semana y entregarlo el día de la clase, vía internet.
11. Las últimas tres clases, a petición de los alumnos y viendo la necesidad de observar el comportamiento de los alumnos, se hacían al menos dos videoconferencias de 40 minutos para aclarar dudas.

Para la evaluación de ensayos se tomó en consideración:

- Organización.
- Búsqueda y análisis de información.
- ¿Qué tanta información buscó y de dónde la obtuvo? (es fácil identificar dónde la obtuvieron.)
- Si copiaron y pegaron lo que dice una referencia que consultaron.
- Si leyeron y entendieron lo que escribieron.
- Desarrollo del tema, no era sólo contestar las preguntas que se les sugería al final de las presentaciones, sino discutir las, ampliarlas y proponer nuevas ideas, con base en lo que buscaron.
- Agilidad para describir el tema y cómo lo desarrollaron.
- Redacción y ortografía.

Actitud, difícil, pero se nota cuando desarrollan sus trabajos.

### *Deficiencias identificadas*

- A pesar del material que proporcionado para el desarrollo de los temas, la mayoría evitó leerlos y analizarlos (deficiencia del conocimiento del idioma inglés).
- Se identificó que el material que preparó el profesor para sus exposiciones no era el adecuado para los alumnos, situación que provocó cambiar el material indicándoles lo que se quería que vieran, aprendieran y desarrollaran en su ensayo.
- La estrategia de darles la responsabilidad fue permeando con el tiempo, tomaron bien la responsabilidad y el reto. En esta parte hay que recalcar que los alumnos provenientes de CCH presentaron mejor desempeño.

- Para las últimas tres clases ya se tuvo contacto con los alumnos a través de videoconferencia; sin embargo, se desconoce si los alumnos estaban atentos o distraídos, ya que nunca encendieron la cámara para ver su cara y comportamiento.
- La falta de comunicación presencial provocó angustia en algunos de los alumnos (información manifestada en la encuesta final sobre el desempeño del curso).
- Al no identificar distracciones no se pudo aplicar la técnica ¿por qué?

### ***Competencias, habilidades y valores que se deben reforzar en el curso ofrecido en 2020***

A continuación se presentan algunas de las competencias, habilidades y valores que el profesor debe reforzar para otros cursos similares con el afán de mejorar la metodología de enseñanza–aprendizaje en la asignatura Introducción a la Geofísica.

#### *Competencias*

- Copiar (saber qué y cómo)
- Análisis de información
- Redacción
- Conceptualización del problema que están desarrollando
- Relacionar información de asignaturas que llevaron y están llevando
- Reforzar el conocimiento de las asignaturas antecedentes.

#### *Habilidades*

- Búsqueda de información
- Manejo del idioma inglés (lectura, traducción y comprensión)
- Análisis crítico.

#### *Valores que se consideran en el desempeño de los alumnos*

- Actitud
- Compromiso
- Responsabilidad
- Amor a la disciplina
- Humildad para aprender
- Motivación
- Calidad.

### ***Análisis de la experiencia***

En clases presenciales, se identifica que el valor responsabilidad y compromiso no aplica, llegaban tarde más del 50% de los alumnos. En las sesiones a distancia,

se conectaban a la plataforma de comunicación, pero se desconocía si realmente estaban atendiendo las indicaciones o escuchando a sus compañeros. Sólo conectaban la interfaz de voz.

Del total de alumnos inscritos al curso sólo el 60% continuaron con clases a distancia; los que no pudieron seguir fue porque en la ciudad donde vivían no tenían servicio de Internet, otros no contaban con equipo de cómputo adecuado para poder conectarse. De los que continuaron todos respondieron en tiempo a la entrega de los ensayos.

En cuanto a la evaluación de los ensayos, los primeros no tuvieron buena calificación debido al cambio de metodología de aprendizaje, donde el alumno ahora tenía que tomar la iniciativa de investigar un tema sin ninguna dirección, material adecuado o suficiente para desarrollar el tema; una vez entendido, las calificaciones fueron mejores, teniendo un mejor desempeño los alumnos provenientes del Colegio de Ciencias y Humanidades.

En la parte de clases a distancia se identifica también una mayor responsabilidad en cuanto a la participación. Los alumnos, al no tener supervisión puntual, se enfocaban en cumplir con la responsabilidad y estar atentos para recibir observaciones y aplicarlas.

El trabajo en equipo se reforzó tanto para el desarrollo de los ensayos como para responder los exámenes.

La experiencia fue de aprendizaje para ambas partes.

## **Retos que enfrentarán los futuros ingenieros geofísicos**

Las áreas de oportunidad que se presentan, además de las ya comentadas, y que deben reforzarse son:

1. Reinventarse, facilidad para cambiar ante los retos que se presenten.
2. Capacitarse permanentemente.
3. Innovar nuevas técnicas de aplicación, adquisición, procesamiento e interpretación de datos.
4. Desarrollar técnicas geofísicas para aplicarse en zonas de alto ruido.
5. Desarrollar equipo y paquetería geofísicos más sofisticados, encaminados a resolver problemas relacionados con la Tierra.
6. Mapear patrones del subsuelo en grandes áreas.
7. Interrelacionar diferentes áreas de conocimientos (biología, ecología, química) para dar resultados más contundentes, aplicando técnicas estocásticas y modelos de inversión conjunta.
8. Evaluar ecosistemas para producción de alimentos.
9. Aprender más sobre fenómenos físicos que acontecen en la Tierra y conocer con más detalle su respuesta y representación matemática para asociarla con la problemática a resolver.

10. Reforzar conocimientos de geología, física y matemáticas enfocados en resolver necesidades básicas de la sociedad: energía, agua, minerales, ambientales, agricultura, medicina forense, arqueología y los orientados a la identificación de riesgos geológico (hidrogeológico, construcción de obras civiles y ambientales).
11. Predecir fenómenos físicos de la Tierra.
12. Divulgar y promover mejor la carrera de ingeniería geofísica para generar mayores oportunidades de trabajo.
13. Plantear estrategias para asegurar la integridad física de los participantes en trabajos de campo. Esta actividad requiere que el ingeniero geofísico socialice en las comunidades donde realizará su trabajo para evitar incidentes de robo del equipo o accidentes provocados por grupos de personas que ponen en riesgo la integridad física de los ingenieros geofísicos.

El mayor reto será contar con conocimiento sólido y habilidades suficientes para ser mejores y enfrentar retos que se presenten.

## Conclusiones

Uno de los objetivos que tiene la carrera de ingeniero geofísico es reducir incertidumbre e incrementar el éxito exploratorio. El nuevo reto que plantea la COVID-19, la seguridad física de los ingenieros geofísicos y los muchos otros que se avecinan, no son una limitante para la carrera; el ingeniero geofísico siempre ha aprovechado lo bueno de lo malo, basta ver los grandes avances en las áreas de ingeniería petrolera, minería, geotecnia, ambiente e ingeniería sísmológica, al aprovechar eficientemente y en forma ordenada el conocimiento de la geofísica. No solo la pandemia de la COVID-19 es un reto para las nuevas generaciones, la seguridad de los ingenieros geofísicos es fundamental, el riesgo de la integridad física, por la inseguridad, que hoy se tiene es muy grande al tener que enfrentarse a cárteles y personas sin escrúpulos que ponen en riesgo su vida; hay que enfrentarlos para poder vivir y seguir aportando valor a la sociedad.

Las áreas de trabajo y oportunidad que se han alcanzado en los 50 años de la carrera de ingeniero geofísico se han consolidado por el buen desempeño de la actividad; sin embargo, hay mucho aún por reforzar y más aún, falta mucho por aprender y enseñar.

La preparación del ingeniero geofísico requiere continuo aprendizaje, ya que, si bien los fundamentos físicos y matemáticos no cambian, si varían las técnicas de adquisición, procesamiento e interpretación, Hoy en día, la carrera es una herramienta de apoyo a muchas disciplinas. Es una carrera que se transforma continuamente.

La experiencia durante la impartición de la clase descrita indica que, para el nivel licenciatura, la educación presencial es primordial ya que la socialización y el *aprender a conocer, el aprender a hacer, el aprender a convivir y el aprender a ser* le dan la identidad al aspirante, sobre todo para motivarse. Un modelo híbrido, bien sustentado y soportado con valores y nuevas competencias puede ser una

solución a la problemática de la enseñanza, donde la creatividad e innovación, conjugados con aspectos pedagógicos deberán ponerse en marcha. Es necesario y fundamental que el aspirante a ingeniero geofísico conozca y refuerce el proceso de enseñanza-aprendizaje y el proceso de aplicación de la disciplina.

Si bien el futuro de la enseñanza apunta a la era digital, y se mantiene en transformación continua, es necesario tomar en consideración que el alumno es un ente que aprende, entre otras cosas, de copiar lo que sus mentores le enseñan. Una máquina no es un ente vivo y no puede transmitir valores, enseñanzas, experiencias pero, sobre todo, razonar.

Es importante recalcar que a nivel licenciatura la educación debe ser presencial, para obtener la identidad de ingeniero geofísico. El contacto con los formadores le apoyará a orientar su razonamiento a lo que es la disciplina, así como, dominar el lenguaje, desarrollar el pensamiento, y conocer y ordenar el mundo relacionado con la ingeniería geofísica. Con base en lo anterior, el aspirante a obtener el grado de licenciatura tiene que aprender el proceso para: buscar, entender, desarrollar, aplicar y definir resultados relacionados con la disciplina para adquirir la identidad.

Se reitera que el uso de las Tecnologías de Información y Comunicación son herramientas de apoyo y a nivel personal, no dan la identidad al aspirante ni le resuelven el problema, al contrario le puede ocasionar problemas si no conceptualiza, caracteriza y concreta bien su estudio o proyecto.

La Facultad de Ingeniería de la UNAM tendrá que enfrentar el reto de proponer alternativas para decidir el tipo de nueva enseñanza para enfrentar el desafío de evitar contagios ante la COVID-19, buscar financiamiento para replantear métodos de enseñanza, cómo mantener socialización con sana distancia, cómo plantear nuevas metodologías pedagógicas de aprendizaje de calidad enfocado a resultados, cómo mantener la competitividad de la carrera, cómo promover la carrera, así como plantear y desarrollar una plataforma que forme ingenieros geofísicos.

Como se puede observar, en los cincuenta años que tiene la carrera de ingeniero geofísico se han desarrollado nuevos enfoques en la medición geofísica, así como se han fortalecido e implementado otros más para investigar el subsuelo. Hoy se tiene una mejor comprensión de la sensibilidad de parámetros geofísicos a procesos que controlan el funcionamiento de yacimientos petroleros, hidrogeológicos, bioquímicos, ecológicos; así como también de la respuesta natural de la tierra ante eventos como sismos y huracanes.

El campo de acción afortunadamente crece y las oportunidades de desarrollo se incrementan, por lo que el ingeniero geofísico requiere fortalecer sus conocimientos, observar más ("ver lo que no se ve"), desarrollar y aplicar, con el apoyo de las tecnologías de información y comunicación, instrumentos, paqueterías y modelos; así como, plantear nuevas ideas sobre la interacción de la geofísica con otras disciplinas.

El ingeniero geofísico requiere de estar en contacto con la naturaleza, insumo principal para el desarrollo de su actividad.

*Siempre hay una oportunidad para aprender, enseñar y mejorar.*

## Agradecimientos

Agradecemos las oportunidades que nos ha ofrecido la Facultad de Ingeniería de la UNAM para compartir y enseñar lo que sabemos.

A los alumnos de la carrera de ingeniería geofísica que hemos tenido la oportunidad de transmitir nuestros conocimientos, y en especial a los alumnos de la asignatura Introducción a la Geofísica, de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, del semestre 2020-2, por haberle enseñado al primer autor a aprender más sobre la carrera.

## Referencias

- Argote E., D. L., Tejero-Andrade, A., Cárdenas-Soto, M., Cifuentes-Nava, G., Chávez, R. E., Hernández-Quintero, E., y Ortega, V. (2020). Designing the underworld in Teotihuacan: Cave detection beneath the moon pyramid by ERT and ANT surveys. *Journal of Archaeological Science*, 118, 105141. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2020.105141>.
- Binley, A., Hubbard, S. S., Huisman, J. A., Revil, A., Robinson, D. A., Singha, K., y Slater, L. D. (2015). The emergence of Hydrogeophysics for improved understanding of subsurface processes over multiple scales. *Water Resources Research*, 51(6), 3837-3866. <https://doi.org/10.1002/2015wr017016>
- Boulware, R.A. (1965). Future Prospects of Exploration Geophysics. *Canadian Society of Exploration Geophysics*, 5-8.
- CEFP, 2019, Precios Internacionales de la Mezcla Mexicana de Exportación del Petróleo. Cámara de Diputados. [https://www.cefp.gob.mx/new/graficas\\_interactivas.php](https://www.cefp.gob.mx/new/graficas_interactivas.php).
- Cerato, A.I. y Gallino, M. 2013, Competencias genéricas en carreras de ingeniería. *Revista de Ciencia y Tecnología*, Facultad de Ingeniería, Universidad de Palermo, Edición 13, 83-94. <https://doi.org/10.18682/cyt.v1i13.58>.
- Chávez P., S. (2019). ¿Qué hacer, como estudiante o profesional de geociencias o ingeniería petrolera, para enfrentar la reforma energética en México y la crisis mundial del precio del petróleo? *EAGE Latin America Newsletter*, edición 1, 9-10.
- Collete, L. S. (1976). Future Trends in Geophysical Mineral Exploration. *World Mineral Supplies - Assessment and Perspective*, 377-396. <https://doi.org/10.1016/b978-0-444-42577-5.50019-8>.
- Collison, Ch. y Parcel, G. (2003). *La gestión del conocimiento, lecciones prácticas de una empresa líder*. Editorial Paidós. España. ISBN: 84-493-1367-8.
- Davenport TH y Prusack L. (1998). *Working Knowledge: How Organizations Manage What They Know. (Originally published in 1998)*. New preface edition, Harvard Business School Press, Boston, MA.
- Hubbard, S. S., y Rubin, Y. (2005). *Introduction to Hydrogeophysics*, edited by Y. Rubin and S.S. Hubbard, Springer, The Netherlands.

- Hydro-Geophysics and NDT Modeling Unit. <https://www.hydrogeophysicsndt.com/lineas-de-trabajo/geofisica/>
- InGenio Learning. *Educación presencial vs educación a distancia ¿cuál es mejor?* <https://ingenio.edu.pe/educacion-presencial-vs-educacion-virtual/>
- Lawyer, L. C., Bates, C. C., y Rice, R. B. (2001). *Geophysics in the Affairs of Mankind. A Personalized History of Exploration Geophysics*. Society of Exploration Geophysicists, Tulsa Oklahoma, USA.
- Lumley, D. (2019). President's Page. Is there a future in applied geophysics? *The Leading Edge*, 38(2), 88-90.
- Marfurt, K. J., Zhou, H., Sekharan, K. K., Sheriff, R. E., Hall, S.A., Nagihara, S., y Hou, A. (2000). Future need for geophysicists and geophysical research in the oil business? Conclusions of a 'listening tour'. *The Leading Edge*, 19(9), 974-980.
- Molina A. (2000). La competencia profesional en el ingeniero del nuevo milenio. *Revista Facultad de Ingeniería*, (8), 65-67.
- Ocampo L. J. (2017). La edad del 'por qué' en los niños, Guía infantil.com. <https://www.guiainfantil.com/articulos/educacion/aprendizaje/la-edad-del-por-que-en-los-ninos/>
- Serrat, O. (2009). The five Whys Technique, Asian Development Bank. <https://digitalcommons.ilr.cornell.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1200&context=intl>
- Tejero-Andrade, A., Argote-Espino, D. L., Cifuentes-Nava, G., Hernández-Quintero, E., Chávez, R. E., y García-Serrano, A. (2018). "Illuminating" the interior of Kukulkan's Pyramid, Chichen Itzá, Mexico, by means of a non-conventional ERT Geophysical Survey. *Journal of Archaeological Science*, (90), 1-11. <https://doi:10.1016/j.jas.2017.12.006>.
- UNAM, Escuela Nacional Preparatoria. Plan de estudios 1996. México.
- UNAM, Escuela Nacional Colegio de Ciencias y Humanidades Plan de estudios.
- UNAM, Facultad de Ingeniería (2016). Plan de Estudios de la Licenciatura en Ingeniería Geofísica. [https://www.ingenieria.unam.mx/programas\\_academicos/licenciatura/geofisica\\_plan2016.php](https://www.ingenieria.unam.mx/programas_academicos/licenciatura/geofisica_plan2016.php)
- Valhondo, D. (2003). *Gestión del conocimiento: del mito a la realidad*. Ediciones Díaz de Santos.
- Wikipedia. <https://es.wikipedia.org/wiki/Wikipedia>.

# Paradigma de los pronósticos sísmicos en Chile Central

## Paradigm of seismic forecasts in Central Chile

M. Araneda<sup>1</sup>  
A. Araneda<sup>2</sup>  
M. S. Avendaño<sup>3</sup>

*Recibido el 15 de enero de 2021; 17 de noviembre de 2021*

### Resumen

Los terremotos y sus efectos en el territorio de Chile han sido estudiados y analizados desde la llegada de los españoles a América en el año 1575. Dichos fenómenos se deben principalmente a la ubicación geográfica de Chile Central asociada a la subducción de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana. Esta situación ha generado una serie de terremotos de gran magnitud que han afectado la zona central y su litoral, en algunos casos acompañados de maremotos devastadores.

La mayoría de estos procesos tectónicos son desconocidos por la población por lo que siempre ha sido de gran interés el estudio de los parámetros que los originan y sus efectos. Estudios tendientes a poder pronosticar dichos eventos considerando la problemática que se tiene en determinar su génesis.

Actualmente la mayor parte del conocimiento de los efectos que producen los terremotos son aquellos que han sido registrados y observados posteriormente de haber ocurrido los eventos sísmicos.

Ninguna de las hipótesis antiguas y actuales que se tienen sobre el origen de los terremotos ha podido resolver el problema de la predicción de estos eventos telúricos, dentro de períodos de tiempos razonables. Actualmente la mayoría de medidas que se tienen para enfrentar los efectos de los terremotos tiene su origen en el análisis detallado de las observaciones superficiales y las rupturas tectónicas profundas, características que en cierta medida han permitido determinar la génesis del movimiento. Este conocimiento ha permitido mejorar la normativa de

<sup>1</sup> Servicios Geofísicos en Minería e Ingeniería (SEGMI), Santiago, Chile, correo electrónico: [segmi@netexpress.cl](mailto:segmi@netexpress.cl)

<sup>2</sup> Servicios Geofísicos en Minería e Ingeniería (SEGMI), Santiago, Chile, correo electrónico: [aaaneda@segmi.cl](mailto:aaaneda@segmi.cl)

<sup>3</sup> Servicios Geofísicos en Minería e Ingeniería (SEGMI), Santiago, Chile, correo electrónico: [segmi@netexpress.cl](mailto:segmi@netexpress.cl)

construcción de obras civiles en general y los protocolos para abandonar áreas de alto riesgo ante tsunamis.

En el presente se han escrito y publicado una serie de artículos relacionados con el pronóstico de los terremotos asociados a la subducción de la placa de Nazca en Chile Central, basados en parámetros estadísticos. Las conclusiones son siempre las mismas, que existe un peligro sísmico que en alguna área puede ocurrir. Los más osados dan hasta fechas de ocurrencia. Si la instrumentalización geofísica no ha permitido pronosticar eventos sísmicos destructivos y otros asociados a la dinámica de fallas, es poco probable que estudios estadísticos puedan realizar un pronóstico confiable.

Palabras clave: *sismología, tectónica.*

## Abstract

Earthquakes and their effects in the territory of Chile have been studied and analysed since the arrival of Spanish conquerors in America in 1575. Such phenomena are mainly due to the geographic location of Central Chile associated to Nazca plate subduction under South American plate. This situation has resulted in a series of major earthquakes affecting the central zone and its coastal area, in some cases accompanied by devastating tsunamis.

Most of these tectonic processes are unknown by the population so it has always been of great interest to study the parameters that originate them and their effects. Studies tending to be able to predict these events, considering the problems that exist in determining their genesis.

Currently, most of the knowledge of the effects produced by earthquakes are those that have been recorded and observed after the seismic events have occurred.

None of the ancient and current hypotheses about the origin of earthquakes have been able to solve the problem of predicting these telluric events, within reasonable periods of time. Currently, most of the measures taken to face the effects of earthquakes have their origin in the detailed analysis of surface observations and deep tectonic ruptures, characteristics that to a certain extent have allowed determining the genesis of the movement. This knowledge has made it possible to improve construction regulations for civil works in general and the protocols for abandoning high-risk areas in case of tsunamis.

At present, a series of articles have been written and published related to the prediction of earthquakes associated with the subduction of the Nazca plate in Central Chile based on statistical parameters. The conclusions are always the same, that there is a seismic risk of an earthquake occurring in some area. The most adventurous even give dates of occurrence. If the geophysical instrumentalization has not allowed to predict destructive seismic events and others associated with fault dynamics, it is unlikely that statistical studies can produce a reliable prediction.

Key words: *seismology, tectonics.*

## Introducción

Actualmente la predicción de los terremotos es un objetivo latente y lejano de solucionar. En el presente se han estado investigando algunas técnicas relacionadas con la prevención de los terremotos, sin embargo ninguna ha tenido resultados ni el éxito esperado.

La historia de cómo se ha ido desarrollando el saber del origen de los terremotos es bastante extensa. Se destaca que las investigaciones de la génesis de los terremotos tiene su origen hace miles de años, incluso las primeras hipótesis provienen de la mitología. Posteriormente aparecen los filósofos griegos los que asignaron a causas naturales el origen de los terremotos. Se mencionan teorías generadas por Demócrito (siglo IV A.C.) y Anaxímenes (siglo V A.C.) las que se alejan de toda realidad. Se destacan los estudios realizados por Wilsdorf y Schmidt (1981).

La teoría que se mantuvo durante largo tiempo fue la propuesta por Aristóteles (384 A.C.). Esta proponía que las causas de los terremotos se detonaban por la salida súbita de aire caliente desde el interior de la Tierra, el cual se encontraba atrapado en su interior.

Chile Central (Figura 1), ubicado en las proximidades del contacto entre la placa de Nazca y la placa Sudamericana, origina frecuentemente sismos de gran magnitud  $M_b > 7$ . Este hecho han generado gran interés y a su vez preocupación

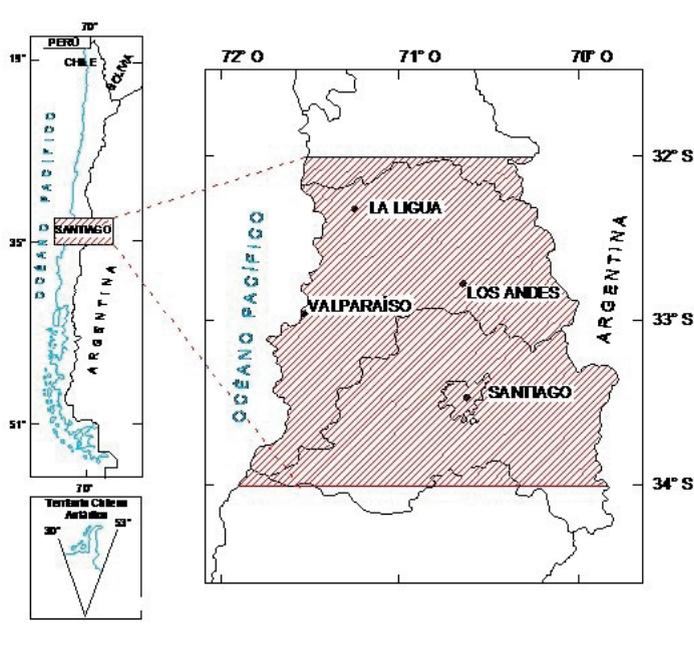


Figura 1. Plano general de Chile Central.

en los profesionales relacionados con la sismología, en buscar metodologías que permitan anticiparse a estos eventos telúricos, sin embargo esta tarea no ha sido fácil debido a que dichos movimientos presentan parámetros físicos diferentes en su génesis y trayectoria.

Actualmente el historial sísmico ocurrido en la zona de Chile Central ha permitido determinar períodos de retorno que varían en decenas de años.

Algunos autores que se pueden mencionar son Nishenko  $82 \pm 6$  años, Comte  $83 \pm 9$  años, Kausel  $82 \pm 7$  años. Valores que entregan un promedio de recurrencia de 84.5 años, valores que no son suficientes como pronósticos serios.

Normalmente los métodos estadísticos y probabilísticas que se utilizan para la predicción de terremotos consideran la ubicación del área esperada del evento, su magnitud histórica, el tiempo de ocurrencia y el origen de ellos. La hipótesis en la cual se basa una predicción solo ha logrado predecir el sitio y la magnitud no así el tiempo esperado de su ocurrencia, parámetro que tiene un mayor impacto social considerando que no se tiene el tiempo necesario para tomar medidas preventivas adicionales al evento sísmico.

## Marco estructural de los Andes

La placa de Nazca subducta bajo la placa sudamericana con una velocidad de 6.2 cm/año en el sector de Chile Central, tasa determinada mediante el advenimiento del sistema GPS Kendrick *et al.* (2003). Este hecho ha constituido un factor favorable para estudiar los procesos tectónicos, tales como la actividad sísmica, el magmatismo de la tierra y el desarrollo de las fosas oceánicas.

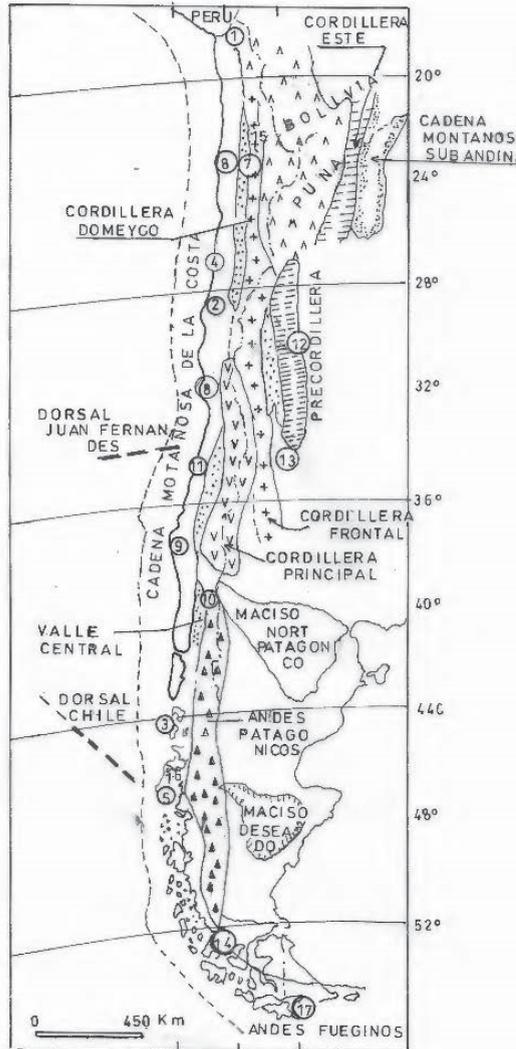
La interacción antes descrita permitió la generación de la cordillera de los Andes debido a los procesos que se extienden desde el Paleozoico, situación que generó un registro de las Cordillera relacionado con cambios geológicos producidos por la interacción de la placa oceánica con la continental. Los principales efectos geotectónicos generados por esta corresponden a arcos magmáticos, antearcos, cuencas sedimentarias, metamorfismo y deformaciones.

Esta secuencia de características tectónicas han sido modelada conceptualmente determinándose un margen activo en la región de los Andes desde el comienzo del Paleozoico, Figura 2.

Estas características morfoestructurales y estructurales del área estudiada se caracterizan por la presencia de la cordillera de la Costa en el margen continental, para continuar con el Valle Central el cual está limitado por áreas montañosas.

Al oriente de esta área se distinguen tres cadenas montañosas de este a oeste, a las cuales se les denomina, cadena principal, frontal y precordillera. Se destaca que la cadena montañosa denominada cordillera frontal está compuesta por una unidad morfoestructural con dirección noreste cuyas rocas tienen origen Paleozoico superior y drenaje continental ubicadas solamente en territorio chileno al norte de la latitud  $28^\circ \text{S}$ .

Al sur aparece un cordón montañoso el cual termina en los Andes Patagónicos ubicados entre las latitudes 40 °S a 52 °S aproximadamente. Los Andes fueguinos están compuestos por bloques de fallas con basamento cristalino de edad Proterozoica los que están expuestos entre las latitudes 28 °S-33 °S y comparte la actividad volcánica plutónica, último tectonismo Paleozoico.



**Figura 2.** Elementos morfoestructurales de los Andes chilenos-argentinos.

1. Belen, 2. Chñaral, 3. Archipiélago Conos, 4. Toco, 5. Golfo de Penas, 6. Huentelauquen, 7. Limón Verde, 8. Mejillones, 9. Cordillera Nahuelbuta, 10. Panguipulli, 11. Pichilemu, 12. San Juan, 13. San Rafael, 14. Sarmiento, 15. Sierra Morena, 16. Taitao, 17. Tortuga (Herve, F. *et al.*).

Localmente Chile Central está compuesto por la cordillera de los Andes al este, el valle central y la cadena montañosa de la Costa al oeste. Los Andes están compuestos principalmente por rocas estratificadas, sedimentarias marinas y continentales plegadas y falladas en sistemas de rumbo norte-sur. Estas rocas están intruidas por plutones granodioríticos del Terciario superior.

El valle central está compuesto principalmente por sedimentos del Cuaternario, pequeños afloramientos de rocas volcánicas y sedimentarias del Cretácico, formaciones afectadas por fallamientos de rumbo noreste.

## **Antecedentes de terremotos históricos**

### ***Terremoto del 17 de mayo de 1575***

De acuerdo al criterio anteriormente expuesto, Lomnitz (1971) le asigna al sismo ocurrido el año 1575 una magnitud de 7.5 en la escala de Richter. De esta misma forma y basados en narraciones habría ocurrido otro sismo similar al del año 1582. Estos eventos constituyen la primera señal de la alta sismicidad asociada a la zona de Chile Central.

### ***Terremoto del 13 de mayo de 1647***

La destrucción originada por este terremoto se dejó sentir entre el río Choapa en el norte y el río Maule en el sur. Según la historia este terremoto fue situado en el continente, Lomnitz (1971). Posteriormente el mismo autor el año 1983 rectifica la ubicación de la zona de ruptura, ubicándola en la parte más superficial del plano de Wadati-Benioff entre la fosa marina y la costa.

### ***Terremoto del 8 de julio de 1730***

Este terremoto ocurrió frente a Valparaíso afectando también en forma significativa a la ciudad de Santiago, la magnitud de este evento fue de  $8\frac{3}{4}$  aproximadamente, además fue acompañado de un maremoto que desoló las costas de Valparaíso. La discusión que provocó este evento está relacionada con la zona de ruptura, que según Kelleher (1972) habría abarcado una zona de 350 a 450 km y según Nishenko (1985) ubica la zona de ruptura entre 31 °S y 34 °S aproximadamente 330 km. Posteriormente Comte et al (1985) propone una zona de 550 km la que se estima exagerada si se considera que con este valor la zona de ruptura se superpone con las zonas de ruptura investigadas anteriormente. Solo 21 años después Kausel E. (1986) determinó la zona de ruptura que actualmente se utiliza en sismología.

### ***Terremoto del 19 de noviembre de 1822***

Este terremoto produjo un maremoto con olas de 4 m de altura aproximadamente. Se destaca que gran parte de los efectos generados por este sismo fueron

entregados por relatos proporcionados de María Graham, visitante en Valparaíso en esa época. Dentro de estas notas cuenta que se observaron alzamientos de la costa de 1.2 m en Valparaíso y 0.9 m en Quintero. Lomnitz (1971) estima la magnitud en 8.5. El maremoto generado no produjo daños en Valparaíso y la intensidad en la escala de Mercalli fue estimada en VII a VIII en Santiago.

Gran parte de las observaciones realizadas en terreno provienen de estimaciones dadas por lugareños de la zona afectada, dentro de ellas las más importantes fueron los solevantamientos producidos en la desembocadura del río Rapel y la zona de ruptura en la cual la latitud 32 °S a 34 °S dado por Comte *et al.* (1985).

### ***Terremoto del 17 de agosto de 1906***

El epicentro de este terremoto se produjo costa afuera de Valparaíso. Su intensidad aproximada fue de VIII y el maremoto no generó daños de consideración. Se observaron solevantamientos en la costa que fluctuaron entre 0.4 a 0.8 m en Pichilemu al sur y Quintero-Zapallar, en Los Vilos y en Pichidangui se observaron alzamientos en la costa no evaluados. En Valparaíso se observaron alzamientos del orden 0.6 m. La zona de ruptura no fue definida, pero se estima que se produjo entre Los Vilos y Llico abarcando 330 km aproximadamente. La magnitud fue de 8.2 según Kausel (1985). El período de retorno a la zona se le asigna 82+6 años.

### ***Terremoto del 3 de marzo de 1985***

Este evento fue el último ocurrido en la secuencia de los sismos históricos de la zona de Chile Central. Este sismo permitió obtener la mayor cantidad de información de los parámetros físicos observados antes y después de haber ocurrido el evento, Figura 3. Estos comenzaron con el registro del primer sismo precursor cuya magnitud fue 4.7, ocurrido el 21 de febrero de 1985, sentido en el litoral entre San Antonio y Algarrobo, seguido posteriormente por ocho sismos cuya magnitud mayor fue de 4.5, Comte *et al.* (1985). Además se identificaron un total de 360 sismos cuya magnitud fue mayor de 3.0 entre el período del 21 al 28 de febrero. Posteriormente Algermissen y Kausel (1985) basados en la sismicidad precursora identificaron la posible zona de influencia, asociándole una dimensión de 50 km x 50 km costa afuera frente a Valparaíso y Algarrobo, zona que correspondería posteriormente a la ubicación del sismo principal donde se iniciaría la ruptura del probable terremoto.

El epicentro del sismo principal ocurrido el 3 de marzo de 1985 fue ubicado a 33.13 °S, 71.87 °O según el NEIS (*Nacional Earthquake Information Service*, Estados Unidos). Según Kausel (1985) consideró que la precisión de la ubicación del sismo principal fue producto de dos sismos superpuestos en el tiempo, tomando en cuenta la escasa distancia que los separó.

El mecanismo focal según NEIS correspondió a una falla inversa de bajo ángulo con rumbo N 20 °O y manteo 10 °E-NE con deslizamiento de acuerdo a la máxima pendiente, asociada al ángulo de inclinación del plano de subducción en dicha zona.

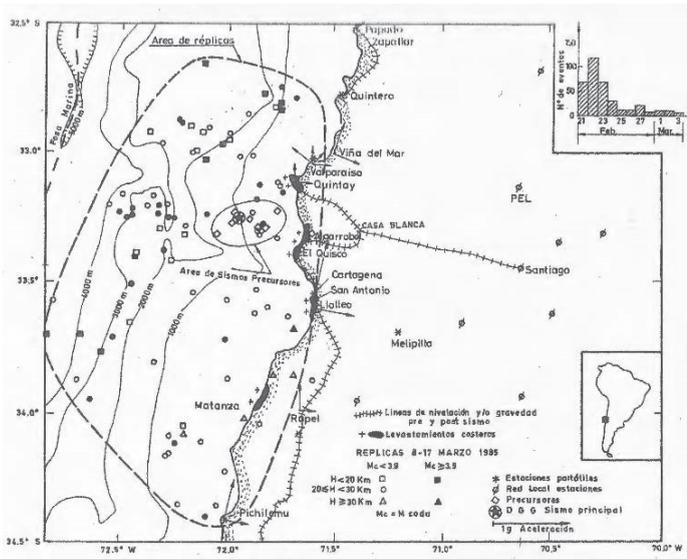


Figura 3. Sismo del 3 de marzo de 1985. Área de sismos precursoros y replicas. Figura tomada de Comte et al. (1985).

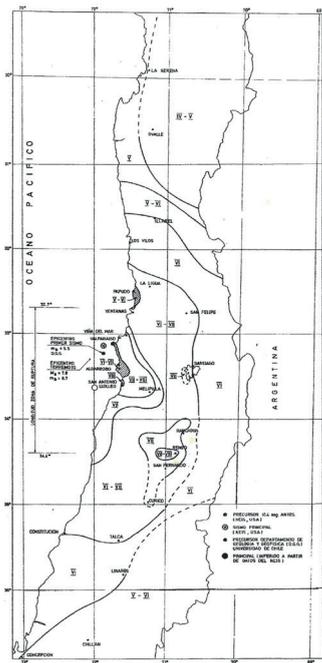


Figura 4. Isosistas del terremoto del 3 de marzo de 1985.

Considerando la posición relativa del epicentro del terremoto respecto de la superficie total de dislocación se concluyó que la ruptura se propagó principalmente de norte a sur unos 100 a 130 km, deteniéndose aproximadamente al llegar a la latitud 34.4°S. Esta dirección de ruptura explica la asimetría de las curvas isosistas que se extendieron más hacia el sur que al norte según Kausel (1985) (Figura 4).

En cuanto a las intensidades observadas entre la costa y la fosa marina, llamó la atención el desplazamiento de las curvas isosistas hacia el sur-este de la zona de ruptura que se explica por la dirección de propagación de la ruptura de norte a sur, pero el factor más importante fue la calidad del suelo. Por ejemplo las variaciones fueron observadas entre San Antonio y Cartagena los cuales tienen suelos diferentes.

## Nivelación y gravedad

El parámetro de deformación tectónica se obtuvo durante el proceso observado antes y después de haber ocurrido el evento cerca de la zona de ruptura. Esta particularidad se permitió detectar la existencia de líneas de nivelación de primer orden entre Papudo y Pichilemu, y líneas entre San Antonio-Algarrobo-Casablanca y Santiago. Se destaca que parte de las líneas de nivelación habían sido realizadas por el Instituto Geográfico Militar (IGM). Este proceso permitió en parte constatar los levantamientos entre Santiago, San Antonio, Casablanca y otras líneas medidas más al sur y al norte del área de interés sísmico.

La primera deformación observada después del sismo fue aquella ubicada entre San Antonio y Algarrobo (30 y 40 cm) respectivamente.

Importa mencionar que las primeras deformaciones fueron observadas mediante cambios de la gravedad en un pilar ubicado en San Antonio, el cual fue usado como base fundamental para las líneas antes mencionadas, Araneda, M. *et al.* (1985).

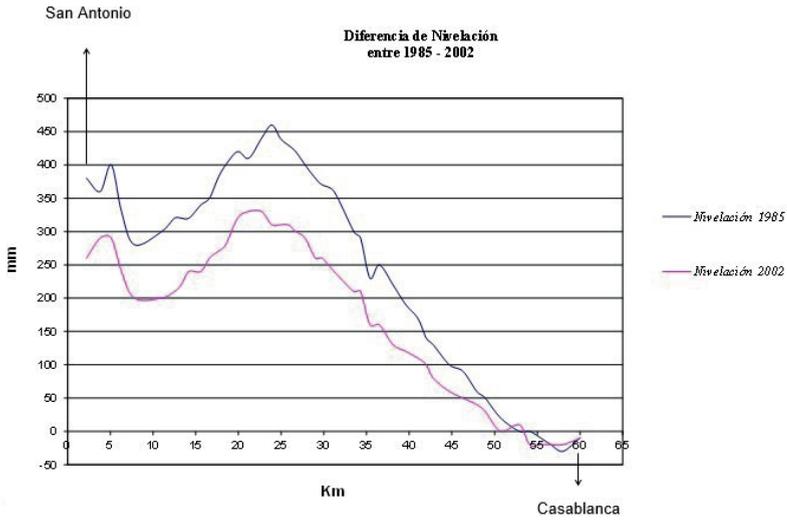
El análisis de los datos obtenidos entre los años 1982 y 1985 muestra que los valores de la gravedad disminuyeron 150 microgales en San Antonio, 75 microgales cerca de Algarrobo. Adicionalmente se detectaron variaciones cercanas a los 5 a 10 microgales en Casablanca, Araneda M., Avendaño M. S. (2006).

El proceso de acomodo del tectonismo de las deformaciones mediante los métodos geodésicos y geofísicos marca una tendencia que correlaciona de buena forma las nivelaciones de 1er. orden, Figura 5 y los valores de la gravedad, Figura 6.

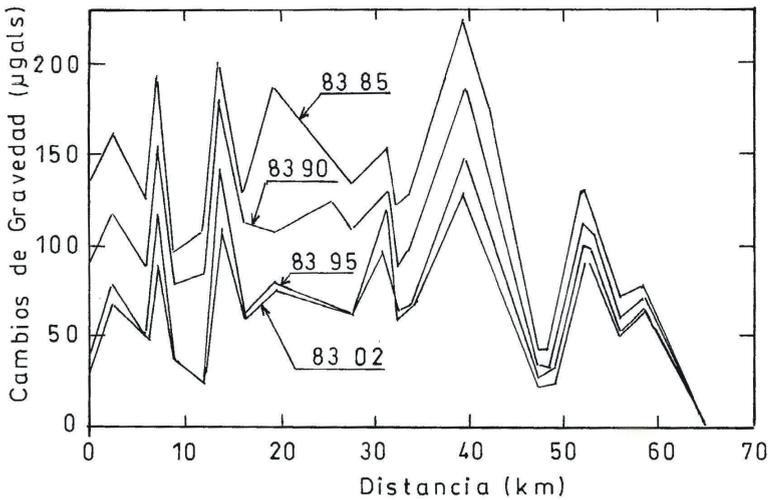
Adicionalmente la deformación cortical central parece haber inducido un cambio de nivel relativo del agua entre los extremos del lago Rapel de algunos centímetros en ambos sentidos NO-SE, datos procesados por Barrientos (1985).

Las mediciones continuas de las deformaciones producidas por los terremotos probablemente permitan reconocer el tiempo de relajación de las tensiones de dichos eventos. Las deformaciones corticales co-sísmicas normalmente bajo el agua son recuperadas en el tiempo por fluencia del material astenosférico situado bajo la litosfera, estos movimientos post-sísmicos y pre-sísmicos

producen deformaciones pre-sísmicas y co-sísmicas más alejadas de las placas, complementando de esta forma el ciclo intersísmico, Kausel (1985).



**Figura 5.** Variación de altura registrada en los años 1985 y 2002, tomando como referencia el año 1981 respecto al terremoto de marzo de 1985.



**Figura 6.** Variación de gravedad en el tiempo.

Las deformaciones experimentadas en el fondo marino en el sector de Valparaíso produjeron un pequeño maremoto que fue registrado en dichas costas, el cual habría tenido una altura máxima de 1.5 m. Adicionalmente se habría registrado en los mareógrafos de Iquique, Antofagasta y Caldera con alturas de 0.3 m. Finalmente se habrían registrado en los mareógrafos lejanos en el océano Pacífico, según Kausel (1985). Estos valores se muestran en Tabla 1.

Tabla 1

Guayaquil	15 cm
Papeete	10 cm
Hilo Hawai	48 cm
Honolulu	3 cm
Kushiro	10 cm
Adak, Alasca	12 cm
Kodiak, Alasca	4 cm

## Periodo de recurrencia

El historial sísmico de Chile Central ha sido afectado por los terremotos ocurridos en los años 1575, 1647, 1730, 1822, 1906 y 1985. Esta secuencia ha sido estudiada por diversos autores determinándose diferentes períodos de retorno de dichos eventos y definiéndose probables zonas de ruptura para los mismos eventos, lo que es mucho más complejo y poco exacto, Tabla 2.

Tabla 2

Autor	Período de retorno
Comte, D. <i>et al.</i>	83±9 años
Kausel E. <i>et al.</i>	82±7 años
Pardo M. <i>et al.</i>	86±4 años
Nichenko <i>et al.</i>	82±6 años
Sauter F.	84±5 años

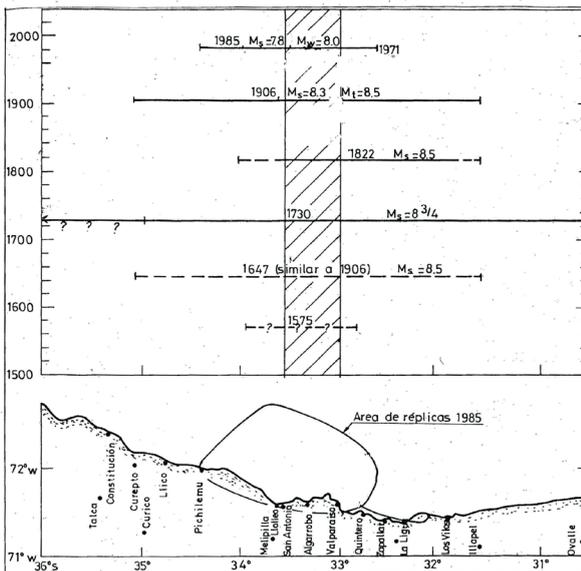
Comte *et al.* (1985) al analizar las dimensiones y efectos de los terremotos ocurridos entre los años 1575 y 1985, llegaron a la conclusión que un período de recurrencia tan regular de algo más de 80 años para sismos considerables en la zona de Chile Central, no concuerda con una razón de acumulación constante de tensiones y deformaciones generadas por el movimiento de la subducción de aproximadamente 6 cm/año de la placa de Nazca bajo la Sudamericana, ya que períodos de recurrencia constante implicarían sismos de tamaño constante.

Para resolver esta contradicción es necesario buscar modelos de ruptura algo distinto a los mecanismos clásicos de los ciclos sísmicos que predominan actualmente en esta zona.

Se debiera considerar como datos de entrada de dichos modelos, a) la velocidad de convergencia de la placa de Nazca y Sudamericana no puede ser sino constante dentro del corto período de 400 años de conocimiento de los terremotos en la zona (1575-1985) y que, b) el período de recurrencia entre sismos sea extremadamente regular ( $82 \pm 6$  años), la Figura 7 muestra ocho longitudes de ruptura "L" de la secuencia de grandes sismos de acuerdo a Comte *et al.* (1985). Se observan grandes diferencias en L. Sin embargo es interesante observar que hay una zona común de ruptura para todos ellos.

Esta zona de ruptura común se ubica entre las latitudes  $33^\circ\text{S}$  y  $33.5^\circ\text{S}$ , frente a Valparaíso y Algarrobo. Además en esta zona se ubica la iniciación de la ruptura del sismo de 1985, mediante los sismos precursoros ocurridos dos semanas antes y probablemente lo fue también para el sismo de 1906 debido a que Gutenberg y Richter estiman que el epicentro estuvo en la latitud  $33^\circ\text{S}$  y  $72^\circ\text{O}$ .

La Figura 7 muestra el diagrama espacio temporal de grandes terremotos en la zona de Chile Central, las líneas horizontales representan longitudes de ruptura "L". Las flechas indican que L se extiende más allá de los márgenes de la figura. Los asteriscos muestran la ubicación de inclinación de la ruptura (epicentro). Sismos de magnitud  $7.0 < M_s < 7.5$  con L desconocida aparece como círculos. Las magnitudes Richter (onda superficial) de Knamori (a partir de momento sísmico  $M_s$  y de Abe a partir de la altura de las olas del tsunamis.



**Figura 7.** Diagrama espacio-temporal de grandes terremotos en la zona de Valparaíso.

Generalmente la iniciación de la ruptura de un terremoto importante se produce por una aspereza considerable de la resistencia cuando la tensión local

supera un cierto nivel  $k$ . Una vez iniciada la falla se propaga hasta encontrar una barrera. Esta barrera puede ser una heterogeneidad o un cambio en la geometría de la subducción. También la propagación de la ruptura puede detenerse por que se ha llegado a una zona en que las tensiones se han relajado previamente a raíz de un gran sismo ocurrido en una zona vecina.

## Conclusiones

El estudio de la génesis y los efectos posteriores que generan los terremotos son de particular importancia. Esta inquietud se origina desde tiempos antiguos (Aristóteles siglo V A de C), teniendo directa relación con la dinámica de la tectónica del planeta tierra.

En la actualidad dicho interés no ha disminuido considerando la importancia que sería contar con expertos y capacidad técnica para pronosticar y prevenir terremotos en la tierra.

El análisis de los terremotos históricos ocurridos en la zona central de Chile permitió obtener información valiosa sobre la génesis y sus efectos, principalmente por relatos escritos de personas que vivieron esos movimientos telúricos antiguos y mediciones instrumentales realizadas en los eventos más nuevos en especial el terremoto de 1985. Dentro de las observaciones superficiales se destacan los daños observados en la infraestructura de cada época, desplazamientos verticales del terreno, zona de ruptura superficial y comportamiento de mareas en zonas costeras.

Se destaca el esfuerzo científico que se realizaron previo y posterior a la ocurrencia del terremoto de 1985, dentro de los cuales se distingue el control de líneas gravedad en pilares de nivelación realizados por el Instituto Geográfico Militar (IGM).

La precisión de las lecturas fue de 0.02 miligales tomados con 2 gravímetros LaCoste Romberg.

Se recomienda además realizar mediciones del nivel estático en aguas de sondajes profundos, estudio de la sismicidad precursora en áreas catalogadas como sísmicas, estudios de la calidad de los suelos ante el paso de las ondas S y P (ReMi y Nakamura).

Actualmente con la información disponible que se tiene de la génesis y su desarrollo de los procesos dinámicos de los terremotos, todavía no es posible predecirlos, el motivo es claro. Estos eventos son totalmente diferentes en otras palabras cada terremoto presenta variable propias, por lo tanto no tienen un comportamiento homogéneo.

De todas formas los datos que se obtienen son considerados como información física valiosa para conocer la génesis y evolución de los terremotos aun cuando todavía falta bastante tiempo para poder pronosticar dichos eventos.

## Referencias

- Algermissen, T., Kausel, E. (1985). *El sismo de marzo 1985, Chile*. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Auspicio Grupo CAP.
- Araneda, M., Avendaño, M. S. y Kausel, E. (1989). Determinación de los parámetros del terremoto del 3 de marzo de 1985 a partir de la distribución de las deformaciones superficiales. *5tas Jornadas Chilenas de Sismología e Ingeniería Antisísmica 1*, Santiago, 303-310.
- (2010). Observaciones gravimétricas y nivelaciones en el proceso del terremoto del 3 de marzo de 1985, Chile. *Revista Geofísica*, 62.
- Baranzangi, M., Isack, B. I. (1976). Spatial distribution of earthquake and subduction of the Nazca plate beneath South America. *Geology*, 4, 686-692.
- Barrientos, S. (1988). *Slip distribution of the 1985 central Chile earthquake; Deformation process in the Andes*. Freie Universitat, Berlin.
- Comte, D., Lorca, E., Eisemberg, A., Pardo, M., Ponce, L., Saragoni, R., Singh, S., Suarez, G. (1986). *The central Chile earthquake of 3 March 1985; Repeat of the great Valparaiso earthquake of 1906*.
- Darwin, C., (1851). *Geological observation on coral reefs, volcanic island and on South America being the geologist of the voyage of Beagle under the command of captain Fitz Roy R.N. during the years 1831-1836*. London, 768 pp.
- Herve, F., Godoy, E., Miguel, A. P., Ramos, V., Rapela, C., Mpodozis, C. Davinson, J., (1987). A general view on the Chilean-Argentine Andes with emphasis on their early history. *Circum Pacific Orogenic Belts and evolution of the Pacific Ocean basin. Geodynamics series*, 18.
- Graham, M. (1824). *Diario de mi residencia en Chile en el año 1882*. Maria E. Martínez y Javiera Palma (trads.). Grupo Editorial Norma.
- Kausel, E. (2005). *Proceso sísmico, parámetros focales y réplicas del sismo del 3 de marzo 1985*. Auspicio Acero Comercial S. A. Empresa del Grupo CAP.
- Kelleher, J. (1972). Rupture zone of large South American earthquake and some prediction. *J. Geophy Res*, 77, 2097-2103.
- Lomnitz, C. (1971). Grandes terremotos y tsunamis en Chile durante el período 1535-1955. *Geofísica Panamericana*, 1, 151-178.
- Montessus de Ballore (1911). *Historia sísmica de los Andes Meridionales*. Biblioteca Nacional.
- Pardo, M., Comte, D., Eisemberg, A. (1985). Secuencia sísmica de marzo de 1985. *Gaceta de los Investigadores del Ambiente*, 1, 1-11.
- Plafker, G. (1985). *Geological reconnaissance of the March 3 1985 Chile earthquake. Published report*.

# **Evaluación hidrogeológica para localizar fuentes de abastecimiento en Concepción Buenavista, Estado de Oaxaca, México**

**Hydrogeological evaluation to locate sources of supply in Concepción Buenavista, State of Oaxaca, Mexico**

Martín Carlos Vidal García<sup>1</sup>

Martín Cárdenas Soto<sup>2</sup>

David Escobedo Zenil<sup>3</sup>

Andrés Tejero Andrade<sup>4</sup>

Alejandro García Serrano<sup>5</sup>

*Recibido el 3 de agosto de 2020; aceptado el 17 de noviembre de 2021*

## **Resumen**

El municipio de Concepción Buenavista se localiza en la Mixteca alta del estado de Oaxaca, México. Su población sufre escasez de agua debido al clima semiseco y a la limitada escorrentía superficial en la región. A fin de proponer alternativas de solución al problema de desabasto de agua, se realizó un estudio geológico-geofísico para determinar el sitio más adecuado para la perforación de un pozo que proporcione un caudal de 2 l/s, cantidad de agua necesaria para satisfacer las necesidades de la población. Los resultados permiten determinar un sitio que cumple las condiciones naturales favorables.

<sup>1</sup> Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Ciudad de México, México, correo electrónico: [mvidal@unam.mx](mailto:mvidal@unam.mx)

<sup>2</sup> Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Ciudad de México, México, correo electrónico: [martinc@unam.mx](mailto:martinc@unam.mx)

<sup>3</sup> Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Ciudad de México, México, correo electrónico: [dzenil@unam.mx](mailto:dzenil@unam.mx)

<sup>4</sup> Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Ciudad de México, México, correo electrónico: [atejero16@gmail.com](mailto:atejero16@gmail.com)

<sup>5</sup> Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Ciudad de México, México, correo electrónico: [agarcia@unam.mx](mailto:agarcia@unam.mx)

El sitio se caracteriza por la infiltración del agua superficial que proviene de un arroyo y de la recarga asociada al agua de lluvia.

Palabras clave: *unidades hidrogeológicas, acuífero libre, tomografía eléctrica, tomografía sísmica, prácticas de campo.*

## Abstract

The municipality of Concepción Buenavista is located in the area known as "Mixteca Alta" in Oaxaca state, Mexico. Its population suffers from water scarcity due to the climate semi-dry and limited superficial sources in the region. In order to propose alternative solutions to the problem of such scarcity, we carried out a geological-geophysical study to determine the most suitable site for drilling a well that provides an estimated flow rate of 2 l/s, quantity of water requirements for this population. The results allow to determine a site that meets the natural conditions favorable. The site is characterized as well by surface water infiltration that comes from a stream and from the recharge associated with rainwater.

Key words: *hydrogeological units, free aquifer, electrical tomography, seismic tomography, field work practices.*

## 1. Introducción

La localización de sitios propicios para la extracción del agua subterránea es uno de los problemas al que se enfrentan diversas comunidades rurales. Tradicionalmente los asentamientos humanos recurren al uso del agua potable cuando ésta se encuentra disponible en la superficie (ríos, lagunas, manantiales, norias), o existen las condiciones para extraerla de los acuíferos. Cuando el recurso hídrico se agota, y las necesidades del asentamiento urbano (comunidad o pueblo) demanda su suministro, es necesario llevar a cabo estudios hidrogeológicos que provean expectativas para contar con el líquido.

Los estudios hidrogeológicos consisten en caracterizar y cuantificar las variables hidráulicas contenidas en los tipos de estructuras geológicas en superficie y profundidad. Estos estudios adicionalmente requieren de métodos geofísicos que determinen el comportamiento o estado de las propiedades físicas del subsuelo a fin de estimar la presencia de agua. Uno de los métodos geofísicos más utilizados para ello es el método geoelectrico (Rolia y Sutjiningsih, 2018), el cual se caracteriza la distribución de resistividad en profundidad; bajas resistividades se pueden asociar a la presencia de materiales saturados, y altas resistividades pueden describir rocas que limitan o confinan el recurso hídrico. Cuando se trata de realizar exploraciones más profundas, los métodos de transitorios electromagnéticos (TEM) resultan complementarios (Fitterman y Stewart, 1986). Un método auxiliar es el de refracción sísmica, el cual puede definir el basamento de la estructura que presenta buena porosidad para la presencia de agua (Lankston, 1989).

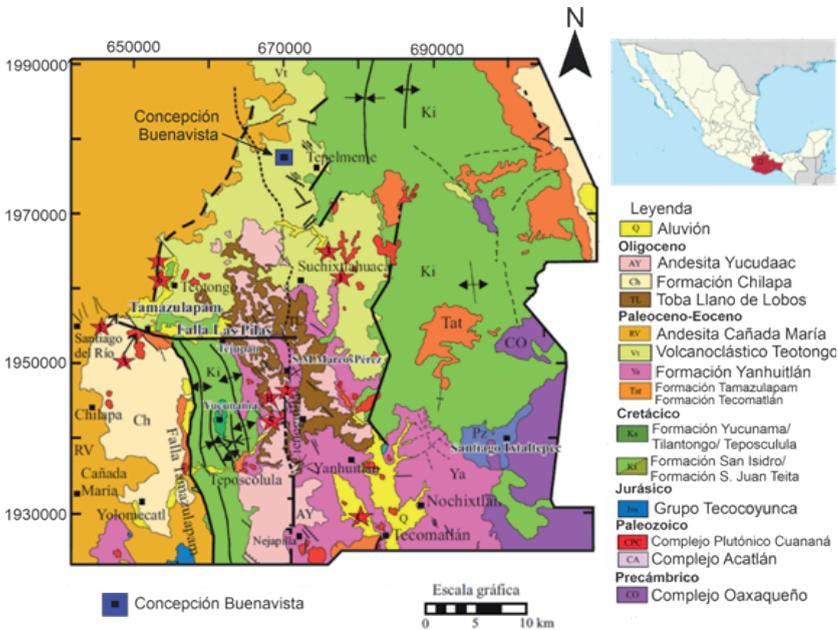
El cambio climático ha propiciado la escasez de agua. El problema se traduce en la falta del recurso hídrico para cubrir las necesidades sustanciales de la población. En el municipio de Concepción Buenavista, localizado en la Mixteca alta del estado de Oaxaca, sus habitantes sufren de escasez de agua debido al clima semiseco y a la limitada escorrentía superficial en la región. Aunque el municipio cuenta con dos norias y un manantial, éstos resultan insuficientes para abastecer a la población. En acuerdo con la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), se realizaron estudios con métodos directos e indirectos (geológico-geofísicos) para realizar una evaluación. El objetivo fue identificar y caracterizar las diferentes unidades hidrogeológicas y definir el sistema hidrogeológico local, a fin de localizar un sitio para la perforación de un pozo de agua que proporcione un caudal de 2 l/s que satisfaga las necesidades de la población del municipio. Este caudal es el necesario de acuerdo al estudio realizado por académicos y estudiantes del Departamento de Ingeniería Sanitaria y Ambiental de la Facultad de Ingeniería de la UNAM. Esa cantidad de agua fue determinada mediante una encuesta casa por casa, lo cual permitió conocer la problemática sobre el consumo doméstico del agua, además de averiguar el impacto de la escasez del agua en la realización de las actividades económicas de la población.

En una primera etapa realizamos un reconocimiento geológico para determinar las unidades de roca expuestas en el municipio de Concepción Buenavista. Posteriormente, se visitaron las captaciones subterráneas con las cuales se abastecen los habitantes, determinando el marco hidrogeológico, el caudal y calidad del agua que proporcionan a la población. En una segunda etapa se seleccionaron dos sitios denominados El Sauce y Llano Grande para la realización de líneas de Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE) y Tomografía de Refracción Sísmica (TRS). Estos métodos geofísicos fueron realizados a fin de conocer la distribución, lateral y a profundidad, de las propiedades físicas medibles para generar un modelo geológico/geohidrológico detallado de la zona de estudio.

## 2. Marco geológico

La geología en el estado de Oaxaca ha tenido una historia compleja debido a eventos tectónicos ocurridos en el Paleozoico y Mesozoico (Alaniz Álvarez *et al.*, 1994), y durante el Cenozoico se ha moldeado su estructura y morfología actual (Morán Zenteno *et al.*, 1996, Cerca *et al.*, 2004, Nieto Samaniego *et al.*, 2006). Concepción Buenavista se localiza en el Terreno Oaxaca, el cual se encuentra delimitado por fallas de basamento denominadas Caltepec y Oaxaca (Campa y Coney, 1983). La secuencia estratigráfica, llamada Complejo Oaxaqueño, está constituida por un basamento compuesto de rocas metasedimentarias y ortogneises en facies de granulita, cuya edad va de 990 a 1300 Ma (Solari *et al.*, 2003; Keppie *et al.*, 2003). En el Paleozoico se depositaron rocas sedimentarias marinas de las formaciones Tiñú, Santiago, Ixtaltepec y Yododeñe (Robinson y

Pantoja Alor, 1968; Navarro Santillán *et al.*, 2002) Sobre el Complejo Oaxaqueño y la secuencia paleozoica descansan en discordancia angular rocas sedimentarias del Cretácico inferior pertenecientes a la formación San Isidro constituidas por areniscas, conglomerados, lutitas y limolitas que se encuentran depositadas en abanicos aluviales, cuya edad asignada es del Berrisiano-Aptiano (López Ticha, 1970). También se encuentra la formación San Juan Teita, constituida por una secuencia de calizas, anhidritas, dolomías y horizontes de limolita intercalados con yeso. Esta formación aflora en la cercanía del arroyo Llano Grande en las poblaciones de Concepción Buenavista y Tepelmeme (Figura 1). La edad inferida para la formación San Juan Teita es Albiano debido a que subyace a la formación Teposcolula perteneciente al Cretácico superior (López Ticha, 1985).

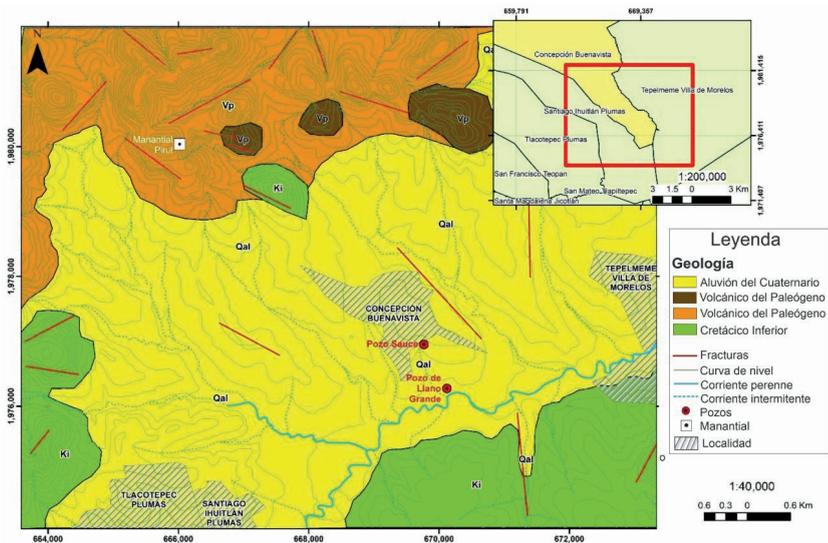


**Figura 1.** Mapa geológico del terreno Oaxaca en la porción norte (estrella de color azul) y localización del municipio de Concepción Buenavista. Modificado de Santamaría Díaz *et al.* (2008).

La estratigrafía en el municipio de Concepción Buenavista está representada por las siguientes unidades de roca (Figura 2):

1. Formación San Juan Teita (Cretácico inferior). Sobre el Complejo Oaxaqueño y la secuencia Paleozoica descansan en discordia rocas sedimentarias pertenecientes a las formaciones San Juan Teita y San Isidro del Cretácico Inferior (Ki). La formación San Juan Teita es una secuencia compuesta de yeso, anhidrita, calizas, dolomía y horizontes de limolita intercalados con yeso.

2. Volcanoclástico Teotongo (Paleógeno). Se encuentra sobreyaciendo en forma discordante a las rocas del Mesozoico. Las rocas afloran en el valle en donde se asienta la población de Concepción Buenavista, y éstas se observan en una serie de mesetas, cerros y lomeríos de origen volcánico de composición andesítica-dacítica pertenecientes al Oligoceno.
3. Aluvión (Cuaternario). Constituido por sedimentos del tamaño de arena, grava y conglomerado de color gris y blanco de edad reciente, los cuales se depositan en el arroyo Llano Grande, en escorrentías secundarias, y en la planicie en los alrededores de la población de Concepción Buenavista.



**Figura 2.** Mapa geológico del municipio de Concepción Buenavista, estado de Oaxaca. Modificado de Santamaría Díaz *et al.* (2008).

### 3. Marco hidrogeológico

La hidrogeología del área es parte de la provincia fisiográfica de la Sierra Madre del Sur que se encuentra dentro de la subprovincia de la Mixteca alta (Figura 1). El municipio de Concepción Buenavista se localiza en el acuífero Cuicatlán de acuerdo con la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2007), donde refiere que la información hidrogeológica es escasa. Por tal motivo, se realizó una visita a las captaciones de aguas subterráneas (un manantial y dos pozos someros) que abastecen de agua al municipio de Concepción Buenavista. En la Tabla 1, se muestran las características de los aprovechamientos subterráneos. Los valores fueron obtenidos en febrero de 2018 por académicos y estudiantes de la Facultad de Ingeniería de la UNAM.

**Tabla 1.** Aprovechamientos subterráneos en el municipio de Concepción Buenavista

Sitio	Coordenas UTM		MSNM	Caudal l/s	N i v e l estático m	Observaciones
	X	Y				
Manantial El Pirul	665,073	1,980,537	2,263	0.2		El agua se conduce a una cisterna
Pozo El Sauce	669,138	1,976,777	2,076	1.3	3.09	La calidad del agua no es apta para consumo
Pozo Llano Grande	669,376	1,985,891	2,074	1	2.90	La calidad del agua no es apta para consumo

Una evaluación hidrogeológica considera las diferentes rocas y su interacción con el agua subterránea, permitiendo diferenciarlas y clasificarlas de acuerdo con su capacidad de admitir, almacenar y transmitir el agua subterránea. Para el caso de la zona de estudio, se pueden definir las unidades hidrogeológicas siguientes, de acuerdo con litología, distribución en el subsuelo y la estratigrafía.

### **Unidad Hidrogeológica 1. Acuífero Granular**

Constituida por sedimentos aluviales de arenas, gravas, limos de origen volcánico y fragmentos de calizas producto de la erosión y transporte de sedimentos provenientes de las sierras y lomeríos que circundan a la población de Concepción Buenavista. Los espesores varían de 3 a 8 m y la unidad funciona como un acuífero de tipo libre en explotación mediante los pozos Llano Grande y el Sauce. El acuífero es heterogéneo debido a su granulometría variable y se considera limitado.

### **Unidad Hidrogeológica 2. Rocas carbonatadas**

Constituida por calizas y dolomías compactas con espesores mayores de 90 m. La porosidad es de tipo secundario originada por el fracturamiento, siendo una roca carbonatada de baja permeabilidad y funciona como un acuífero libre.

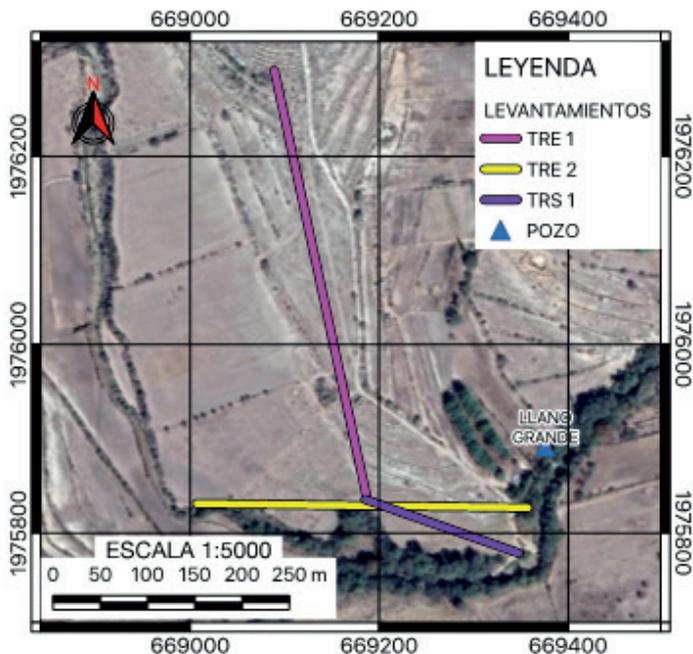
## **4. Estudios geofísicos**

Una vez definido el sistema hidrogeológico en la superficie, se realizaron los estudios geofísicos de TRE y TRS para determinar la distribución de la estratigrafía en el subsuelo y las zonas saturadas. Estos métodos fueron aplicados en los sitios El Sauce y Llano Grande, muy cerca de los pozos que se indican en la Figura 2. El equipo utilizado para TRE fue un Resistivímetro Syscal-Pro de 48 canales con cables inteligentes y separación de electrodos de 10 m. Para el caso de TRS se emplearon seis sismógrafos Seistronix de 12 canales modelo EX-12 con geófonos verticales de 4.5 Hz separados 5 m. Como fuente sísmica se utilizó un marro de 14 libras.

Los datos de TRE fueron procesados e interpretados mediante el software EarthImager (Advanced Geophysical Instruments). Este software resuelve el problema inverso para un modelo de distribución de resistividades del subsuelo. El proceso parte de un modelo inicial del subsuelo (2D o 3D) en el cual se ha definido una malla dividida en un número determinado de celdas. En cada celda se define un valor de resistividad después de reducir la diferencia entre las resistividades aparentes experimentales y las resistividades aparentes generadas por el modelo inicial. Para el caso de TRS, a partir de las secciones sísmicas se seleccionaron los primeros arribos de los registros sísmicos para construir curvas de tiempo de viaje o domocrónicas. Estos arribos fueron procesados por el método de tomografía de refracción mediante el software ZondST2D (Kaminsky, 2015). En este método se construye un modelo de estructura del subsuelo con las variaciones de velocidad producidas por el mejor ajuste de los tiempos de viaje observados con aquellos derivados del trazado de rayos (Sheehan et al., 2005; Zelt et al., 2013).

#### 4.1. Sitio Llano Grande

Este sitio se localiza a 1.5 km al sur de la población de Concepción Buenavista cerca al río Llano Grande. Se realizaron dos líneas de TRE (Figura 3); la primera (TRE 1) con una longitud de 470 m con una orientación SE-NW, y la segunda línea (TRE 2)

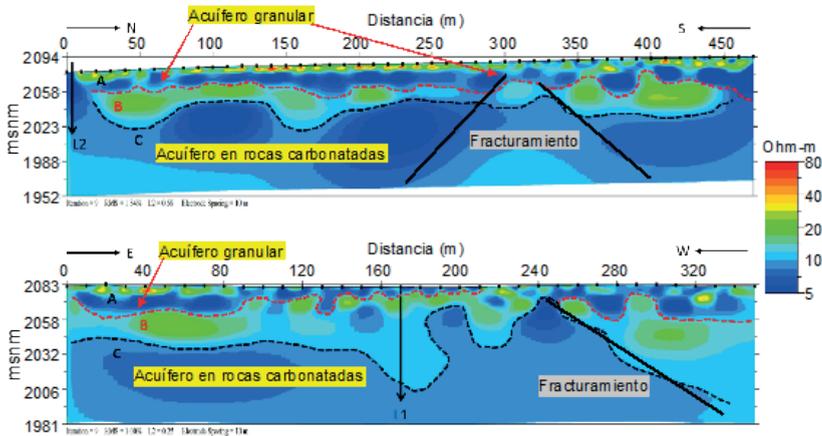


**Figura 3.** Mapa de localización de las líneas de Tomografía de Resistividad Eléctrica y el Tendidos de Refracción Sísmica en el sitio Llano Grande.

de 320 m de longitud con una orientación E-W. Ambas líneas con una separación de electrodos de 10 m para un objetivo de exploración de 80 m de profundidad. El tendido de TRS (TRS 1) tuvo una longitud de 175 con una orientación SE-NW (Figura 3).

Los resultados de TRE-2D se muestran en la Figura 4. De acuerdo con la distribución de resistividades se pueden definir tres horizontes geoelectrónicos:

- Horizonte A. Con un rango de resistividades altas de 30-80 (Ohm-m), asociado al suelo y sedimentos aluviales en los primeros 8 m.
- Horizonte B. Con un rango de resistividades de 10-20 (Ohm-m), asociado a roca carbonatada consolidada de los 8 m con espesores de 20 m.
- Horizonte C. Con un rango de resistividades bajos de 3-9 (Ohm-m), asociado a un medio totalmente saturado en el acuífero granular y en el acuífero de rocas carbonatadas.

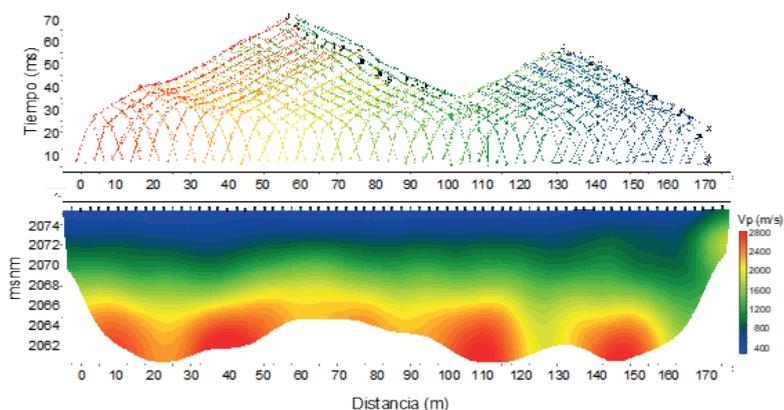


**Figura 4.** Secciones de Tomografía de Resistividad Eléctrica: de las líneas TRE 1 (panel superior) y TRE 2 (panel inferior) En el sitio Llano Grande.

El resultado del procesamiento de datos de refracción de la línea TRS 1 en este sitio muestra tres capas con velocidades diferentes (Figura 5):

- Capa 1. Capa somera de baja velocidad, la cual presenta un rango de velocidad 300 a 450 m/s con un espesor de aproximadamente 3 m asociado al acuífero granular.
- Capa 2. Una capa intermedia entre la zona de baja y alta velocidad con velocidades del orden de 500 a 1,800 m/s y un espesor no mayor a 6 m.
- Capa 3. Capa profunda posterior a los 6 m de profundidad; se observa una zona de mayor velocidad cuyo rango se encuentra entre los 2,000 a 2,800 m/s que se asocian al acuífero de las rocas carbonatadas.

Los resultados de la Figura 5 muestran que la unidad estratigráfica asociada a la capa 3 puede presentar zonas de fractura debido a la discontinuidad lateral de velocidad, como se observa en las secciones geoelectricas del sitio.



**Figura 5.** Domocronica (panel superior) y tomografía sísmica (panel inferior) de la línea TRS 1 en el sitio de Llano grande.

## 4.2 Sitio El Sauce

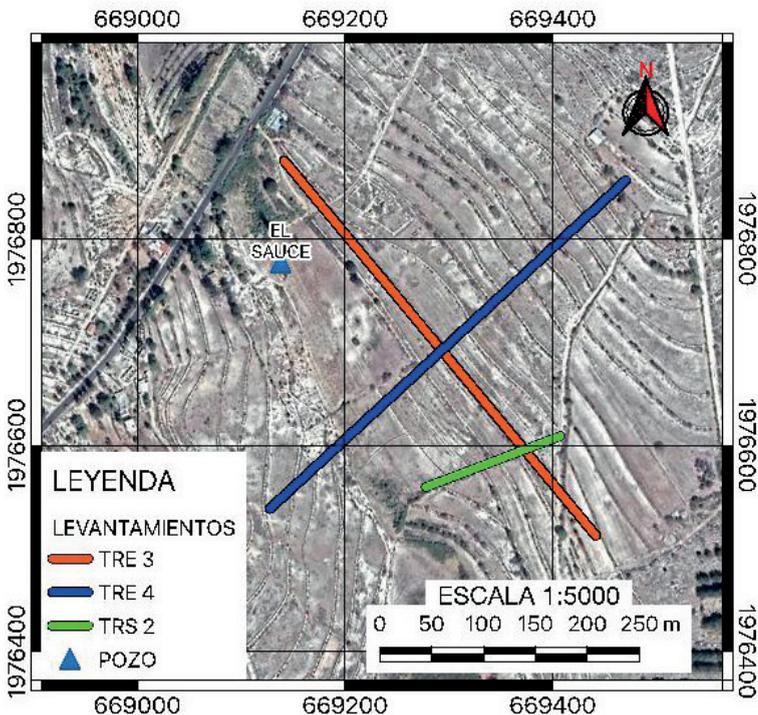
El sitio se localiza a 800 m al sur de la población de Concepción Buenavista. Ahí se realizaron dos líneas de TRE perpendiculares entre sí, con una longitud de 470 m cada una. La línea TRE 3 presenta una orientación NW-SE y la línea TRE 4 presenta una orientación SW-NE (véase Figura 6). La relación que guardan entre ellas es casi ortogonal, teniendo su punto de intersección en el cadenamamiento 240 m en ambas líneas. La profundidad de investigación es aproximadamente de 90 m. En cuanto al método de refracción, en el sitio se realizó el tendido TRS 2 con una longitud de 350 m.

En las líneas de TRE (Figura 7) se observa una distribución similar de resistividades asociada con los tres horizontes geoelectricos del sitio en Llano Grande, con incrementos menores en las resistividades en el horizonte A de 30 - 80 (Ohm-m). Esto se debe a que en el subsuelo se tiene el mismo acuífero en una distancia no mayor a 1 km entre ambas zonas de estudio.

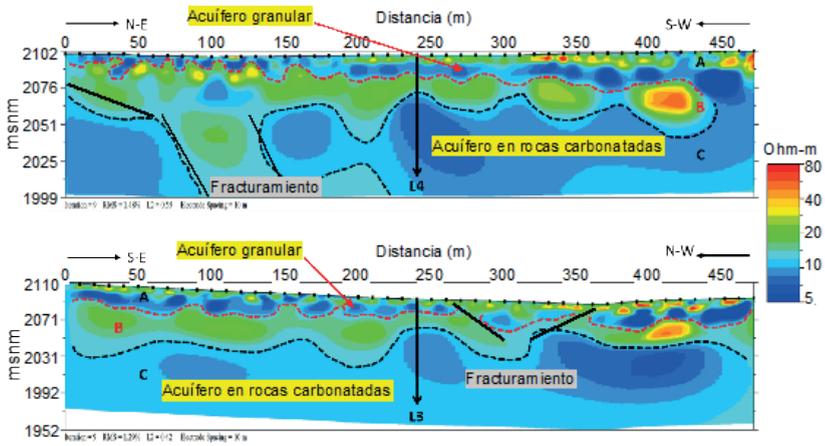
Las líneas de TRE 3 y TRE 4 (Figura 7) muestran una excelente correlación en sus valores de resistividad. En el horizonte A existe un espesor promedio de 7 m y se asocia con el acuífero granular; con los valores resistivos más altos en la zona sureste del estudio. También se observa la presencia del horizonte B con espesores variables con máximos de 40 m y un adelgazamiento de hasta 25 m en la intersección de ambas líneas. Este resultado indica un incremento en el horizonte C en el cadenamamiento 240 m de ambas líneas (Figura 7). La línea TRE 3

denota una discontinuidad en el horizonte A a partir del cadenamiento 0 al 180 m y en el 420 m. En el horizonte B se observan discontinuidades (fracturamientos) en los cadenamientos 100 m y 360 m, respectivamente, como se observa en la Figura 7. Con respecto a la línea TRE 4, en el horizonte A se observa una mejor distribución a lo largo del todo el perfil, a diferencia del horizonte B que muestra el adelgazamiento. Esta discontinuidad es congruente con la observado en la parte central, donde hemos indicado una gran discontinuidad (o fracturamiento) comprendida entre el cadenamiento 290 y 380 m.

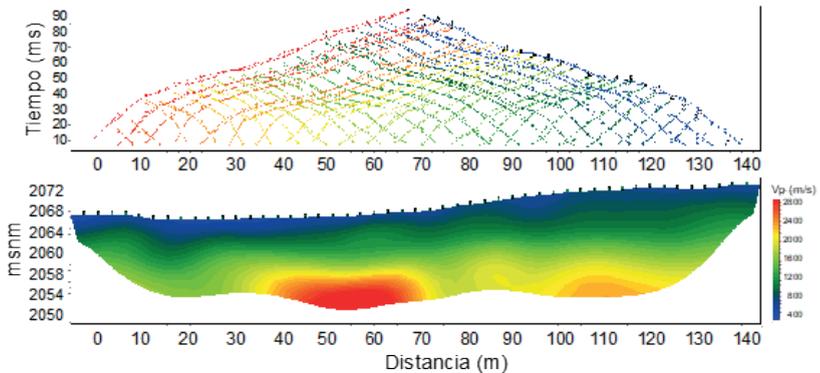
La Figura 8 muestra los resultados de TRS 2 en El Sauce. En esa figura se puede observar una capa de baja velocidad, la cual tiene un espesor entre 2 a 4 m que se asocia al acuífero granular; con velocidades del orden de 400 m/s. Posteriormente, entre 4 y 12 m de profundidad se observan velocidades altas cuyo rango esta comprendido entre 1,000 a 2,000 m/s. Los resultados permiten identificar zonas de muy alta velocidad a profundidades mayores de 12 m que se asocia a rocas sedimentarias compactas de origen carbonatado.



**Figura 6.** Mapa de localización de las dos líneas de Tomografía de Resistividad Eléctrica y el Tendido de Refracción Sísmica en el sitio el Sauce.



**Figura 7.** Secciones de Resistividad Eléctrica de las líneas TRE 3 (panel superior) y TRE 4 (panel inferior), en el sitio El Sauce .



**Figura 8.** Domocronica (panel superior) y tomografía sísmica (panel inferior) de la línea TRS 2 en el sitio del Sauce.

## 5. Discusión de resultados

Los resultados obtenidos con las dos metodologías geofísicas tanto en la zona de Llano Grande como en El Sauce, indican que existe una correlación en la respuesta entre 3 y 6 m de profundidad. Se observan altos resistivos (30 a 80 Ohm-m) que se asocian a velocidades de  $V_p$  bajas del orden de 200 a 400 m/s. Estos resultados se relacionan con la Unidad Geohidrológica 1 (acuifero granular constituido por gravas, arenas y limo de diverso origen). Posteriormente se encuentra una zona de transición, observada en los perfiles sísmicos con velocidades del orden de 1,000 a 1,800 m/s, que corresponde a la transición de la Unidad Geohidrológica 1 y la Unidad Geohidrológica 2; siendo el contacto entre el sedimento y las rocas

carbonatadas. Los resultados de TRE permiten inferir que las rocas carbonatadas se encuentran con un grado de intemperismo y fracturamiento alto debido a sus bajas resistividades. En ambos sitios estos resultados muestran la existencia de tres horizontes geoelectrónicos; A, B y C, siendo el horizonte C el más profundo con mayor saturación.

La TRS define unidades de roca en la parte somera hasta 15 m de profundidad, donde se encuentra el contacto entre el acuífero granular con el acuífero en rocas carbonatadas. Por otra parte, se aprecia que la roca carbonatada a profundidad muestra más competitividad por sus velocidades del orden de 2,200 a 3,400 m/s a partir de los 15 metros de profundidad.

Así, los resultados obtenidos mediante la geología del subsuelo con apoyo de las técnicas de TRE y TRS, indican que el sitio de Llano Grande, cumple con las condiciones de presentar saturación de agua en el subsuelo en la Unidad Geohidrológica 2 en las rocas carbonatadas de baja permeabilidad. Además, este sitio presenta la condición de una recarga permanente del arroyo Llano Grande y del agua precipitada en la temporada de lluvias; recargando al acuífero somero granular y el de rocas carbonatadas.

## 6. Conclusiones

Los resultados obtenidos por las dos técnicas geofísicas realizadas en los dos sitios, aunado al análisis de la correlación de la geología del subsuelo, y de las unidades geohidrológicas definidas, permiten concluir que existen las condiciones en dos sitios para la localización de un pozo de agua.

El primer sitio es en Llano Grande; pues se considera una recarga de agua periódica proveniente de la precipitación que se infiltra y almacena en el subsuelo. Además, del aporte de la corriente superficial del arroyo Llano Grande. En el subsuelo el agua subterránea se encuentra almacenada en el acuífero granular, constituido por sedimentos aluviales de granulometría variada y un espesor reducido y parcialmente saturado en una roca carbonatada fracturada con porosidad secundaria entre profundidades de 8 a 50 m.

El segundo sitio se localiza en el Sauce; el agua subterránea se presenta en una roca carbonatada fracturada a una profundidad entre los 40 a 50 m. Sin embargo, el agua está condicionada a que exista una recarga permanente proveniente del agua de lluvia, condición desfavorable debido a que el sitio se localiza en una región árida.

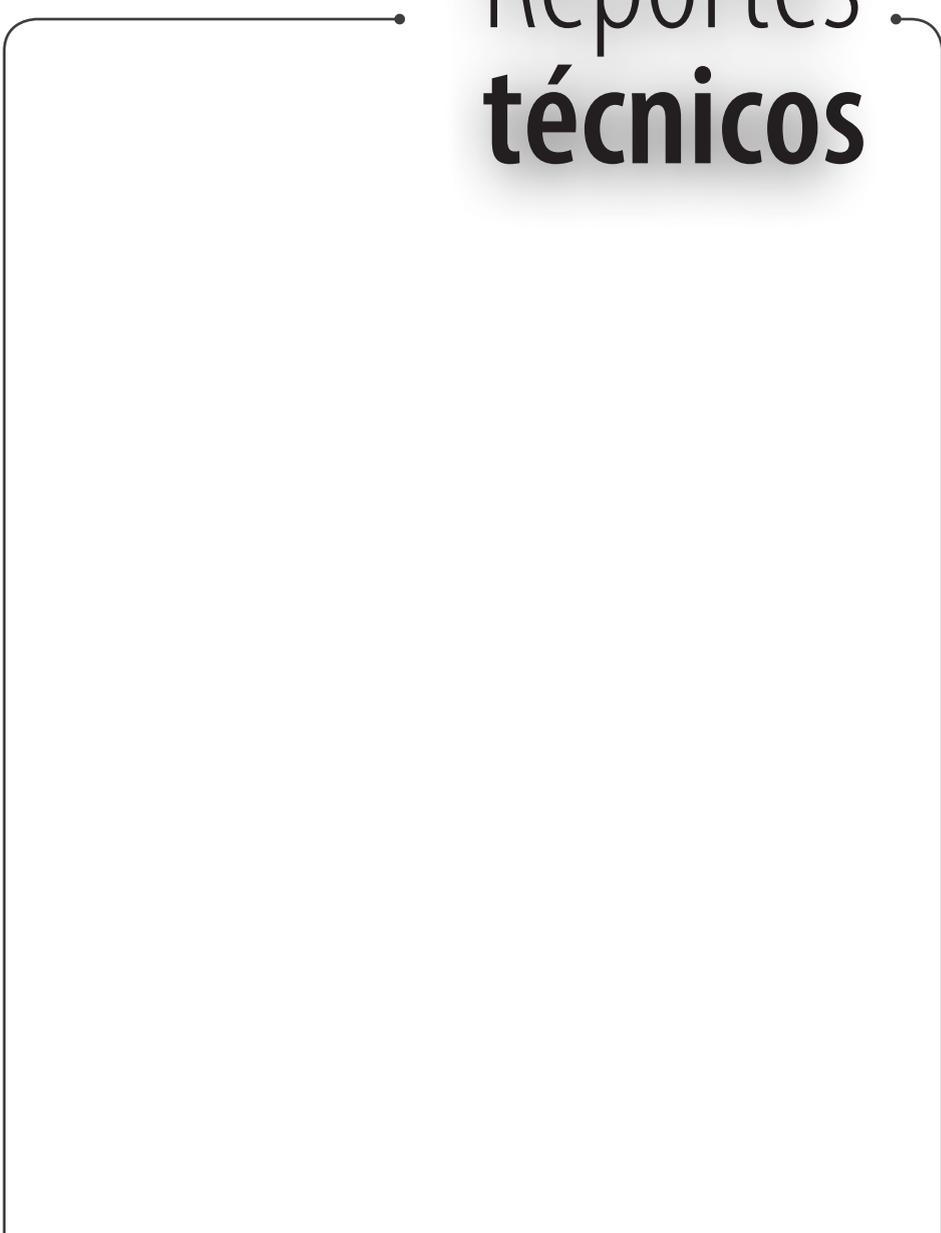
## Agradecimientos

Este trabajo ha sido apoyado por el proyecto UNAM-DGAPA-PAPIME PE105520. Gracias a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México por las facilidades para llevar a cabo los experimentos de campo. Agradecemos la participación de Valeria Gaspar Peña y Pablo Aguirre Díaz por su apoyo en la adquisición de datos geofísicos.

## Referencias

- Alaníz Álvarez, S., Nieto Samaniego, A., Ortega Gutiérrez, F. (1994). Structural evolution of the Sierra of Juárez mylonitic complex, state of Oaxaca. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 11 (2), 147-156.
- Campa, M. F., Coney, P. (1983). Tectono-stratigraphic terranes and mineral resource distributions in Mexico: Canadian. *Journal Earth Science*, (20), 1040-1051.
- Carrera Aguilar, A., Sepúlveda Hirose, R., Vidal García, M., Escobedo Zenil, D., Alfonso Romero, M. (2019). Diagnóstico multidisciplinario de la situación actual del servicio de agua en Concepción Buenavista, Oaxaca. Coloquio académico por la Equidad de Género en la FI-2018. Docencia, Investigación y Desarrollo Tecnológico realizado del 28 al 31 de enero de 2019. Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México.
- Cerca M. (2004). *Deformación y magmatismo Cretácico tardío-Terciario temprano en la zona de la Plataforma Guerrero, Morelos, Querétaro* [Tesis de Doctorado, Centro de Geociencias, UNAM], México.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) (2007). *Determinación de la disponibilidad de agua subterránea en el acuífero Tehuacán, estado de Puebla* (p. 39). México.
- Coney P. Jones, & Monger, J. W. H. (1980). Cordilleran suspect terranes. *Nature*, (288), pp. 329-333.
- Fitterman, D. V., & Stewart, M. T. (1986). Transient electromagnetic sounding for groundwater. *Geophysics*, 51 (4), 995-1005.
- García E. (1970). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen*. Instituto de Geografía, UNAM, México.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) (2001). *Sistema de clasificación y levantamiento fisiográfico, escala 1: 1,000,000*. Aguascalientes, México, p. 21.
- Kaminsky, A. (2015). ZondST2D [Software]. Retrieved from <http://zond-geo.com/english/>
- Keppie, J. D., Dostal J., Cameron, K. L., Solari, L. A., Ortega Gutiérrez, F. (2003). Geochronology and geochemistry of Grenvillian igneous suites in the northern Oaxca Complex, southern Mexico. Tectonic implication. *Precambrian Research*, 120, pp. 365-389.
- Lankston, R. W. (1989). The seismic refraction method: A viable tool for mapping shallow targets into the 1990s. *Geophysics*, 54 (12), 1535-1542.
- López Ticha, D. (1969). Evaluación petrolífera de la cuenca de Tlaxiaco, estado de Oaxaca. Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros, mesa redonda.
- López Ticha, D. (1985). Revisión estratigráfica y potencial petrolero de la cuenca de Tlaxiaco. *Boletín Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros*, 37, 49-92.
- Morán Zenteno, D., Corona Chávez, P., Tolson, G. (1996). Uplift and subduction erosion in southwestern Mexico since the Oligocene: Pluton geobarometry constraints. *Earth and Planetary Science Letters*, (141) 51-56.
- Navarro Santillán, D., Sour Tovar, F., Centeno García, E. 2002. Lower Missisipian (Osagean) brachiopodos from Santiago formation, Oaxaca, Mexico: Stratigraphic and tectonic implications. *Journal of South American Earth Sciences*, 15, 327-336.

- Nieto Samaniego, A., Alaniz Álvarez, S., Silva Romo, G., Eguiza Castro, M., Mendoza Rosales, C. (2006). Latest Cretaceous to Miocene deformation events in the Eastern Sierra Madre del Sur, México, inferred from the geometry and age of the major structures. *Geological Society of American Bulletin*, (118), 238-252.
- Robinson, R., Pantoja, Alor J. (1968). Tremadocian trilobites from Nochixtlán region Oaxaca, Mexico. *Journal Paleontology*, 42, 767-800.
- Rolia, E., & Sutjningsih, D. (2018). Application of geoelectric method for groundwater exploration from surface (A literature study). *In AIP Conference Proceedings*, 1977 (1), 020018
- Santamaría Díaz et al. (2008). Deformaciones cenozoicas en la cobertura de la falla Caltepec en la región de Tamazulapam, sur de México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 25 (3), 494-516.
- Solari, L. A., Keppie, D. J., Ortega Gutiérrez, F., Cameron, K. L., Lopez R., Hames, W. E. (2003). 990 and 1,100 Ma. Grenvillian tectonothermal events in the northern Oaxacan Complex, southern Mexico: roots and orogen. *Tectonophysics*, 365, 257-282.
- Sheehan, J. R., Doll, W. E., & Mandell, W. A. (2005). An Evaluation of Methods and Available Software for Seismic Refraction Tomography Analysis. *J. Environ. Eng. Geophys.*, 10 (1), 21-34.
- Zelt, C. A., Haines, S., Powers, M. H., Sheehan, J., Rohdewald, S., Link, C., Hayashi, K., Zhao, D., Zhou, H.-w. H.-w., Burton, B. L., Petersen, U. K., Bonal, N. D., & Doll, W. E. (2013). Blind Test of Methods for Obtaining 2-D Near-Surface Seismic Velocity Models from First-Arrival TraveItimes. *J. Environ. Eng. Geophys.*, 18 (3), 183-194.



# Reportes **técnicos**



## Actividad sísmica y volcánica en El Salvador: el caso del terremoto y la erupción del volcán de San Salvador en 1917

### Participantes:

Denis Legrand, Instituto de Geofísica,  
Universidad Nacional Autónoma México, México  
Griselda Marroquín, Observatorio de Amenazas y Recursos Naturales,  
Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales, El Salvador

El objetivo del proyecto es entender la relación entre la actividad sísmica y volcánica en El Salvador, con un enfoque al terremoto de 1917 en particular.

Descripción del trabajo: el proyecto se desarrolló de manera presencial con la visita de cada responsable en el país anfitrión y también de manera remota. El proyecto tuvo una duración de dos años (2019 y 2020), debido a la anulación de estaciones de intercambio de trabajo por la pandemia de COVID-19. Los principales logros del proyecto fueron un artículo científico publicado en la revista *Journal of South American Earth Sciences*, en la traducción de un libro sobre Montessus de Ballore, un sismólogo francés quien vivió cuatro años en El Salvador y cuyos trabajos fueron usados en nuestro trabajo (no previsto en el proyecto original, pero se pidió autorización para realizar ese trabajo extra) y en la formación de varias personas (estudiantes y personal del Ministerio del Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN)) de El Salvador.

### **Preparación de bases de datos sísmicos y volcánicos (tres meses)**

Con ayuda del programa Common Vulnerability Score System (CVSS), se recopilaron todos los datos de sismos tanto aislados como en enjambres, de los 10 últimos años y de la descripción de la actividad volcánica para construir una base de datos (fecha, localización y magnitud de cada evento sísmico y volcánico). Se clasificó también las variaciones de la actividad volcánica en los registros de monitoreo visual, geoquímico y de gases. Además de la información existente del sismo del 6 de junio de 1917 en bases de datos sísmicos locales e internacionales, así como la información histórica detallada de la erupción del volcán Boquerón (CVSS).

### *Comentarios*

Hemos realizados una base de datos sísmicos, en particular de los enjambres sísmicos de 1965 a 2017. Habíamos planificado hacerla sobre una duración de 10

años, pero nos dimos cuenta de que era importante extenderla a un poco más de 50 años (Figura 1).

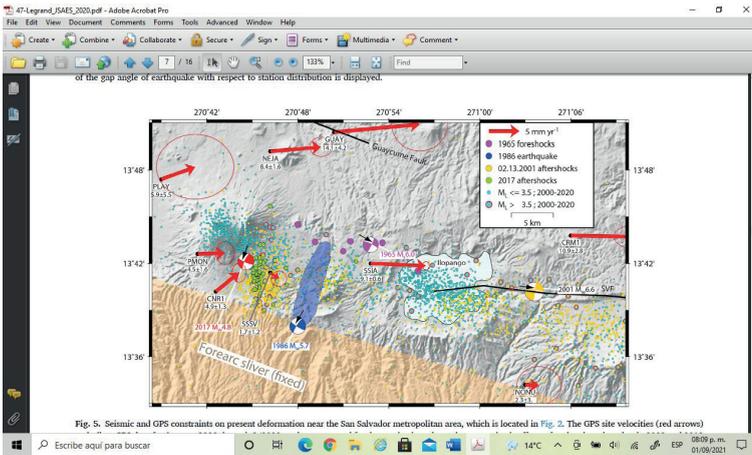


Figura 1. Sísmos de 1965 a 2017, correspondiendo a la base de sísmos compilada.

Se hizo también una compilación de los grandes terremotos que afectaron la ciudad de San Salvador, de 1526 a 2017. Respecto a la información sísmica y volcánica del volcán Boquerón de 1917, se recopiló la información que se relató en el artículo en la Tabla 1 mencionada y en la introducción y la discusión del artículo (Figura 2).

**Table 1**  
List of earthquakes from 1526 that affected San Salvador metropolitan area from 1526 to 2017.

Year	Month	Day	Magnitude	References
1526	July	20		1
1556	?	?		1
1575	June	2		1,3,3
1576	it is in fact the 1575 earthquake			4,5
1581	?	?		1
1594	April	21	M <sub>s</sub> = 6 - 7	1,3,4
1650	September	30		1, 10
1656 or 1658	?	?		1
1659	September	30		3,5
1671	August	16		1
1707?	?	?		1,5
1712	December	14	M <sub>l</sub> = 6.2	6
1719	March	6	M <sub>w</sub> = -7+	1,5,7
1748	March	3	M <sub>l</sub> = 6.4	6
1765	April	?	M <sub>l</sub> = 6.1	6
1776	July	6	M <sub>l</sub> = 6.0	1
1776	November	15	M <sub>l</sub> = 7.0	1
1783	November	29	M <sub>l</sub> = 5.9	6
1790	February	2	M <sub>l</sub> = 6.2	3,5,6
1831	?	?		1
1839	March	22	M <sub>l</sub> = 6.2	3,5,6
1839	October	1	M <sub>l</sub> = 5.9	3,5,6
1847	June	23	M <sub>l</sub> = 6.3	6
1854	April	16	M <sub>l</sub> = 6.6	3,5,6,0
1854	June	11	M <sub>l</sub> = 6.2	3,5,6,0
1857	November	6	M <sub>l</sub> = 6.4	6
1860	June	21	M <sub>l</sub> = 6.1	6
1867	March	21	M <sub>l</sub> = 5.0	6
1867	June	30	M <sub>l</sub> = 7.1	1
1872	December	29	M <sub>l</sub> = 5.0	6
1873	February	22		3,0
1873	March	4	M <sub>l</sub> = 6.4	3,5,6,0
1873	March	19	M <sub>l</sub> = 7.1	1,3
1879	December	27		11
1879-1880	Several between 20 December and 19 March			4,5,11
1899	March	25	M <sub>l</sub> = 6.1	6
1917	June	0	M <sub>s</sub> = 6.4	3,5,6,0
1917	June	0	M <sub>s</sub> = 6.3	3,5,6,0
1919	April	23	M <sub>l</sub> = 6.0	3,5,6
1936	December	20	M <sub>l</sub> = 6.1	6
1965	May	3	M <sub>l</sub> = 6.0	3,5,6
1966	October	10	M <sub>w</sub> = 5.7	3,6
2001	February	13	M <sub>w</sub> = 6.6	9
2017	April	10	M <sub>w</sub> = 4.8	

Figura 2. Lista de los grandes terremotos que afectaron la ciudad de San Salvador, de 1526 a 2017.

## Tratamiento de datos (5 meses)

La base de datos generada en la etapa anterior e implementación y aplicación de los métodos para la discriminación de la sismicidad tectónica y de la sismicidad volcánica, con *software* especializado disponible en el Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México (IGF, UNAM), que será facilitado a la Dirección General del Observatorio de Amazonas (DGOA). Esta etapa iniciará con una asesoría presencial del especialista de la UNAM a la DGOA-MARN (El Salvador), para validar la base de datos y capacitar al personal de este centro y a los estudiantes involucrados en el uso del *software*. Se incluyó el tratamiento de datos, los sismos de junio de 1917. Los resultados de esta etapa son la depuración de la base de datos, la obtención de los mecanismos fuente de los sismos y la capacitación del personal participante.

## Comentarios

Se procesaron los datos de la etapa 1 de diferentes maneras. Primero la información fue presentada como en la figura presentada anteriormente donde están presentados también los mecanismos fuente de los sismos (en forma de pelotas blancas y negras). Hemos también analizado en particular el enjambre de 2017 para entender el origen (tectónico o volcánico) de ese enjambre. Los resultados de este análisis están representados en la Figura 3. La Figura a la izquierda a) representa la distribución de las magnitudes de los sismos a lo largo del tiempo; b) es un zoom sobre los sismos precursorales al evento principal; c) es la energía sísmica liberada a lo largo del tiempo. A la derecha se representa arriba el número de sismos ( $N(t)$ ) en función de la magnitud y abajo el número de sismos a lo largo del tiempo.

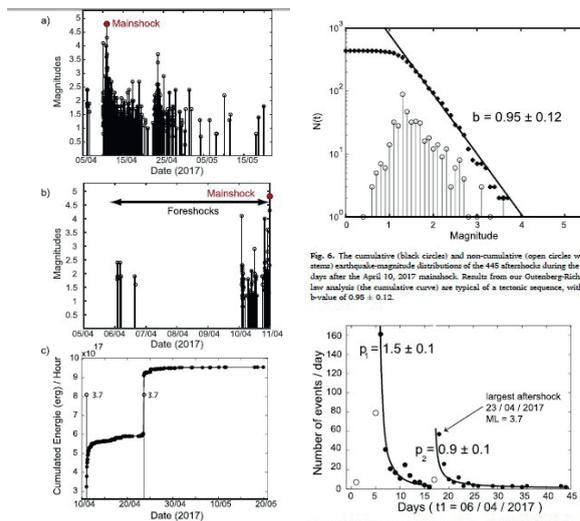


Fig. 6. The cumulative (black circles) and non-cumulative (open circles with error bars) earthquake-magnitude distributions of the 445 aftershocks during the 99 days after the April 10, 2017 mainshock. Results from our Gutenberg-Richter law analysis (the cumulative curve) are typical of a tectonic sequence, with a b-value of  $0.95 \pm 0.12$ .

Figura 3.

a) distribución de las magnitudes de los sismos a lo largo del tiempo (b) zoom sobre los sismos precursorales al evento principal (c) energía sísmica liberada a lo largo del tiempo, así como el número de sismos en función de la magnitud y del tiempo (en la figura inferior).

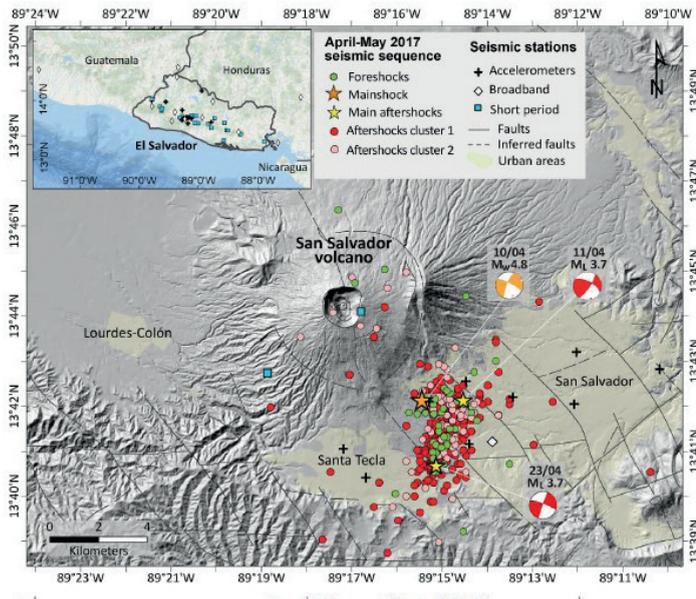
En este trabajo se formó personal y comparto experiencia con las personas del MARN, incluyendo estudiantes, que están en la lista de los coautores del artículo mencionado.

### **Interpretación de los resultado (5 meses)**

Estudio detallado para la discriminación entre la sismicidad tectónica y volcánica. El técnico especialista en sismicidad volcánica de la DGOA-MARN visitó el IGF, UNAM para revisar todo el trabajo desarrollado en la etapa anterior y concluirlo, junto con dos especialistas en México (un sismólogo y una volcanóloga para la parte interpretación).

### **Comentarios**

Los resultados fueron interpretados y publicados en un artículo científico. Se resume a continuación. Sin entrar en los detalles, la interpretación de los datos es que el origen de la sismicidad es tectónico, a pesar de estar cerca (a 5-7 km) del volcán San Salvador/Boquerón que erupcionó en 1917. Esa conclusión fue importante porque en general enjambres sísmicos tan cerca de un volcán pueden resultar de origen volcánico e indicar una reactivación del volcán muy cerca de San Salvador. Pero no fue el caso del enjambre de 2017. Se muestra a continuación la distribución espacial de estos sismos cerca del volcán San Salvador/Boquerón.



**Figura 4.** Distribución espacial de los sismos del enjambre del 2017.

## Preparación de productos finales (5 meses)

Se propone sistematizar el trabajo realizado elaborando un manual para el observatorio sobre la aplicación de los métodos, así como los informes del proyecto. También se trabajó el índice de contenidos de un artículo científico sobre los resultados obtenidos, el cual se escribirá en los tres últimos meses del proyecto.

Hemos dejado la metodología para poder procesar otros enjambres sísmicos de El Salvador y se prevé hacerlo en los próximos años y publicado los resultados en un artículo mencionado, en 2020, que ya fue citado por un grupo de geólogos españoles expertos de El Salvador.

## Traducción del libro sobre Montessus de Ballore

Esa parte no era contemplada en la propuesta original, pero debido a la pandemia COVID-19, hemos decidido usar los recursos para presentar en español la labor de ese sismólogo quien trabajo cuatro años en El Salvador. Este libro tiene como título: *Fernand de Montessus de Ballore (1851-1923)*, pionero francés de la ciencia de los terremotos.

Escrito por el doctor Jean-Paul Poirier, miembro de la Academia de Ciencias de París. Es un libro muy interesante porque habla de uno de los primeros sismólogos del mundo. El empezó su carrera científica, una vez jubilado, a vivir en El Salvador, donde experimentó su primer terremoto, lo que motivó su pasión futura. Después fue a crear el Observatorio Sismológico de Santiago de Chile. Hizo un catálogo de los sismos de América Latina, de México a Chile, que usamos en nuestro proyecto. Fui en contacto con el autor (que nos otorgo los derechos de autores) y Hervé Le Ferrand.

Debo mencionar que fui también en contacto con un nieto de Montessus de Ballore en Chile, y con Hervé Le Ferrand nos gustaría presentar el libro durante un homenaje que se hará en 2023 en Chile para conmemorar los 100 años de su muerte.

## Visitas

- Se realizaron los siguientes intercambios:
- Visita de Denis Legrand, del 25 marzo al 3 abril 2019, al MARN, El Salvador.
- Visita de Griselda Marroquín, del 20 al 24 de mayo 2019 al Instituto de Geofísica, UNAM.
- Visita de Denis Legrand, del 30 de septiembre al 4 de octubre 2019 al MARN, El Salvador.



## (Re)Evaluación de la amenaza y el riesgo por lahares en volcanes activos de El Salvador y Guatemala, con nuevas herramientas de simulación

Participante:  
Lucía Capra Pedol

El presente informe detalla las actividades realizadas en el marco del proyecto: “Reevaluación de la amenaza y el riesgo por lahares en volcanes activos de El Salvador y Guatemala con nuevas herramientas de simulación”, financiado por el Instituto Panamericano de Geografía e Historia (IPGH) en la convocatoria de Proyectos de Asistencia Técnica 2020, durante el año y medio de implementación de la iniciativa, entre febrero de 2020 a junio de 2021.

Como se reportó en el primer informe parcial, presentado en agosto de 2020, los países latinoamericanos en general y El Salvador, Guatemala y México en particular, abordaron diferentes medidas de reducción de la movilidad y distanciamiento social por la contingencia sanitaria derivada de la pandemia por el nuevo coronavirus SARS-COV-2. Estas medidas se prolongaron hasta el primer trimestre de 2021 y en concreto la Universidad Nacional Autónoma de México no ha regresado a actividades de docencia e investigación presenciales hasta el momento de presentar este reporte. En este contexto, todas las actividades del proyecto se desarrollaron en la modalidad a distancia, a través de reuniones por videoconferencia y la asignación de tareas a los diferentes integrantes de los equipos de trabajo en los tres países, que cada uno realizó desde su domicilio o desde los diferentes centros de trabajo, cuando fue posible el regreso escalonado.

Las actividades de intercambio y asistencia técnica planteadas en la iniciativa (viajes de las especialistas mexicanas a los países y estancias de investigación de los profesionales salvadoreños y guatemaltecos a la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) no pudieron realizarse tal y como estaban planteadas. Aun así, a través del trabajo en línea, se logró el objetivo general del proyecto: la mejora las capacidades de los observatorios de El Salvador y Guatemala para la caracterización, simulación y análisis de la amenaza por lahares y el fortalecimiento la red de colaboración entre especialistas centroamericanos y mexicanos en el ámbito del análisis de amenazas volcánicas.

### **Modificación de las áreas de estudio**

En la propuesta del proyecto GEOF-06 se consideró trabajar en el Cerro El Picacho del volcán de San Salvador en El Salvador, y en el volcán de Fuego en Guatemala.

Para ambos países, durante las reuniones iniciales del proyecto, se analizó que existían un conjunto importante de trabajos previos o bien iniciativas en desarrollo, que, si bien no eran exactamente iguales en los objetivos planteados, sí tenían como meta obtener avances en la caracterización de lahares y/o en la elaboración de mapas de peligro por lahares. Con el proyecto IPGH, el observatorio de El Salvador solicitó trabajar en el volcán de San Vicente (Figura 1a), situado en la parte central del país, donde, en 2009, el impacto de la depresión tropical Ida generó lahares de moderada y gran magnitud que afectaron las poblaciones de Guadalupe y Verapaz, al norte del edificio volcánico, con la pérdida de decenas de vidas humanas y severos daños a la infraestructura de estas poblaciones. De forma similar, en Guatemala, los técnicos del INSIVUMEH plantearon la posibilidad de trasladar la iniciativa IPGH del volcán Fuego al volcán Santiaguito (Figura 1b), uno de los volcanes más peligrosos y riesgosos del país y del mundo (Ranking de volcanes de Guatemala, INSIVUMEH, 2019), en el que durante las últimas cuatro décadas se registraron eventos de gran magnitud y que en años recientes ha presentado eventos de lahar casi anualmente, también con impactos severos a poblaciones cercanas.

Para el volcán de San Vicente (El Salvador) existe un mapa de peligros por lahares elaborado en 2001 por el Servicio Geológico de los Estados Unidos en 2001, que se busca actualizar con este proyecto y otras iniciativas de los años recientes. Para el caso del volcán Santiaguito (Guatemala) existe un mapa elaborado por la Comisión Nacional de Reducción de Desastres (CONRED) y la Agencia de Cooperación Internacional del Japón (JICA) basado en datos de campo y orientado a mostrar rutas de evacuación, pero que no es propiamente un mapa de peligros volcánicos.



**Figura 1.** a) Ladera norte del volcán de San Vicente en el sector central de El Salvador. En primer plano la ciudad de Verapaz afectada por los lahares ocurridos en 2009. b) Volcán de Santiaguito, a los pies del volcán Santa María. En primer plano el cauce del río Nimá II, parcialmente relleno de depósitos de flujos de escombros.

Por otra parte, la finalidad principal de la iniciativa era trasladar y capacitar en metodologías para la simulación de lahares en volcanes activos. A la conclusión del proyecto, los integrantes de los observatorios cuentan con herramientas para

la simulación, con productos preliminares de evaluación de amenaza por lahares en los volcanes estudiados y serán capaces de reproducir las metodologías de trabajo en cualquier área volcánica de sus países.

## **Modificación del cronograma de actividades y de ejecución de los fondos**

El proyecto GEOF-06 aprobado por el IPGH se implementó entre febrero de 2020 y junio de 2021, en la modalidad en línea. La iniciativa, aprobada inicialmente por un año, se extendió por seis meses (de febrero a julio 2021) después de solicitar la prórroga a la Comisión de Geofísica y la Secretaría General del IPGH en agosto de 2020.

La prórroga se solicitó con el fin de poder reprogramar las actividades de intercambio: capacitación en campo y estadía de personal de los observatorios al Centro de Geociencias en México durante la primera parte del año 2021. Sin embargo, no fue posible realizar actividades presenciales debido a que la Universidad Nacional Autónoma de México continuó trabajando en la modalidad en línea durante 2021 y desincentivó la movilidad de los integrantes de la comunidad universitaria. Por otra parte, aunque los observatorios de El Salvador y Guatemala regresaron escalonadamente a actividades presenciales, la incidencia de la pandemia en estos países, además de la ocurrencia de varios fenómenos geológicos e hidrometeorológicos (erupción del volcán Pacaya (Guatemala), flujo de escombros de Nejapa (El Salvador) requirieron la atención del personal de los observatorios en sus países.

Durante la ejecución del proyecto, en las reuniones por videoconferencia, el curso *on-line* y los trabajos de análisis de eventos y simulación de lahares en cada uno de los centros de trabajo, se ejecutaron parcialmente los fondos aportados por las entidades copatrocinadoras de la iniciativa, aproximadamente en un 70%.

La aportación del IPGH, destinada inicialmente a las actividades de intercambio de experiencias, fue reasignada a la compra de insumos para el desarrollo de la iniciativa. Estas compras fueron gestionadas directamente por la Secretaría General del IPGH, a solicitud de la responsable del proyecto y con la aprobación del coordinador de la Comisión de Geofísica, a través de dos desembolsos (Tabla 1).

- Con los fondos del primer desembolso se adquirió una licencia permanente del software FLO2D para los observatorios de El Salvador y Guatemala. Esta licencia es perpetua y permite el uso por parte de diversos usuarios, de aplicaciones no solo en el campo de la geología, sino también de hidrogeología y el acceso a materiales de formación continua a través de la página web e intranet de la compañía que lo comercializa.
- Con el segundo desembolso se adquirieron tres imágenes estereoscópicas de satélite Pleiades con 50 cm de resolución del volcán Santiaguito. A partir de estas imágenes se obtuvieron un modelo de elevación digital (DEM) y un modelo de superficie (DSM) de alta resolución (2 m), insumos principales para la realización de simulaciones con el software FLO2D. Una vez adquiridas

las imágenes fueron tratadas en UN-SPIDER de las Oficina de las Naciones Unidas para Asuntos del Espacio Exterior (UNOOSA), en Bonn (Alemania) para la obtención del DEM y el DSM. El Salvador contaba con un DEM de alta resolución (Lidar con resolución de 5 m) del área del volcán de San Vicente, que estuvo disponible para la realización del proyecto.

**Tabla 1.** Aprovechamiento de los recursos otorgados por el IPGH

<i>Fecha</i>	<i>Ejecución</i>	<i>Acceso a los productos para los observatorios</i>
25 de febrero de 2020	Compra del software FLO2D	Entrega de los códigos de acceso a los observatorios
octubre de 2020	Compra de imágenes satelitales Pleiades	Drive compartido con INSIVUMEH

## Objetivos planteados y alcances de la iniciativa

El objetivo general planteado en la iniciativa era mejorar las capacidades de los observatorios de El Salvador y Guatemala para la caracterización, simulación y análisis de la amenaza por lahares, a través del uso de herramientas especializadas de cómputo, específicamente el software FLO2D y de la transferencia y adaptación de las metodologías implementadas en diversos volcanes mexicanos para la elaboración de mapas de amenaza.

Al término de la iniciativa se mejoraron las capacidades de los observatorios para la simulación del fenómeno de lahares, tanto en términos de recursos de cómputo, con la adquisición del software para los observatorios y de la imagen satelital para la elaboración de un modelo de elevación digital de buena resolución para el volcán Santiaguito, como de recurso humano, a través de las capacitaciones y reuniones de trabajo para su uso. Si bien, no se lograron finalizar todas las etapas para la elaboración de los mapas de amenaza por lahares, si se tuvo un buen avance en la calibración del software para las zonas de trabajo (volcanes de San Vicente y Santiaguito), que permitirá en relativamente poco tiempo abordar la elaboración de los mapas.

De los objetivos específicos planteados en la iniciativa, se abordaron la mayor parte de ellos y se obtuvieron los alcances de la Tabla 1.

Durante la ejecución del proyecto, el uso de las herramientas de simulación mencionadas permitió obtener información de las áreas susceptibles a ser inundadas en el flanco norte del volcán de San Vicente (El Salvador) bajo las actuales condiciones de las barrancas en un escenario similar al de 2009. De forma similar, para el volcán Santiaguito se obtuvieron las áreas susceptibles de ser inundadas en las barrancas San Isidro, Cabello de Ángel, Nimá I y San José. Estos resultados podrán integrarse en mapas de amenaza preliminares una vez

realizadas otras series de simulaciones en aquellas barrancas, de ambos volcanes, que no fueron consideradas durante la etapa de calibración del software. Los mapas que se elaboren deberán ir acompañados de una memoria que explique la metodología de elaboración.

El desarrollo del proyecto en la modalidad a distancia no permitió ahondar en el objetivo de capacitar al personal de los observatorios en la identificación y reconocimiento de depósitos de lahar en campo. Esta limitante trató de solventarse, al menos parcialmente, con la descripción e interpretación de depósitos de flujos de escombros e hiperconcentrados en fotografías de buena resolución durante las capacitaciones en línea. En los proyectos de colaboración planteados para los próximos años con ambos observatorios se ha considerado continuar trabajando en este aspecto, una vez la situación de contingencia sanitaria en cada país lo permita.

**Tabla 1**

<i>Objetivos específicos</i>	<i>Alcances</i>
Revisar y compilar la información existente sobre eventos de lahares (geológicos e históricos) en los volcanes de San Vicente (El Salvador) y Santiaguito (Guatemala) y los productos de evaluación de amenazas ya existentes (investigaciones y mapas previos)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Compilación de todos los trabajos previos, de los modelos de elevación digital disponibles, de datos de espesores, granulometría y distribución de depósitos de lahar recientes, de fotografías y de datos de lluvia para el volcán de San Vicente</li> <li>• Compilación de fotografías y datos de campo de eventos de lahar recientes para el volcán Santiaguito</li> <li>• Identificación de la necesidad de contar con un modelo de elevación digital de buena resolución para el volcán Santiaguito</li> </ul>
Establecer escenarios de amenaza por lahares para las dos áreas de trabajo según tipos y volúmenes de material volcánico susceptible de ser removilizado y según los regímenes de lluvia en la región	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se describieron y establecieron las características de un escenario de amenaza por lahares en cada una de las zonas de estudio, como punto de partida para la calibración del software. Para el caso de El Salvador, la ocurrencia de un evento de lahar en caso de lluvias intensas asociadas a la ocurrencia de fenómenos hidrometeorológicos extremos (depresión tropical o huracán), similar al de 2009. Para el caso del volcán Santiaguito en Guatemala, se estableció como escenario para la calibración el de un evento similar al de los lahares ocurridos en 2019</li> </ul>
Capacitar a personal de los observatorios centroamericanos en el uso del código computacional FLO2D para la simulación de lahares	Adquisición de una licencia permanente del software FLO2D para el INSIVUMEH en Guatemala y el Observatorio de Amenazas y Recursos Naturales de El Salvador Capacitación en la modalidad a distancia del personal de los observatorios y de entidades socias (universidades)Un técnico de cada observatorio capacitado y entrenado en el uso del software FLO2D

<i>Objetivos específicos</i>	<i>Alcances</i>
Preparar la información necesaria para la alimentación de los parámetros de entrada del software (modelos de elevación digital, volúmenes de material volcánico susceptible a ser removilizado y condiciones de lluvias) y desarrollar series de simulaciones para cada escenario establecido	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Preparación de datos para su uso como parámetros de entrada (límites de cuenca, lluvias, coeficiente de Manning, infiltración, entre otros) y preparación de los dominios de simulación a partir de los modelos de elevación digital de diferentes resoluciones</li> <li>• Realización de series de simulaciones de lluvia-escorrimento para las cuencas de interés identificadas</li> <li>• Calibración del software FLO2D para el volcán de San Vicente (El Salvador): se reprodujeron con éxito los lahares ocurridos durante el evento hidrometeorológico Ida en 2009</li> <li>• Adquisición de 3 imágenes satelitales Pleiades del volcán Santiaguito. Las imágenes fueron obtenidas por el satélite en diciembre del 2020</li> <li>• Obtención de un DEM de alta resolución (2 m) a partir del procesamiento del triplete estereoscópico a 50 cm de resolución</li> <li>• Calibración del software FLO2D para el volcán Santiaguito: se reprodujeron con éxito los alcances y las trayectorias de los lahares que se formaron en los drenajes principales durante 2020</li> </ul>
Generar los mapas de susceptibilidad a inundación por lahares para los volcanes de San Vicente (El Salvador) y Santiaguito (Guatemala)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Obtención de información de las áreas susceptibles a ser inundadas en el flanco norte del volcán de San Vicente (El Salvador) bajo las actuales condiciones de las barrancas, en un escenario similar al de 2009 (lluvias extremas), para algunas cuencas seleccionadas</li> <li>• Obtención de áreas susceptibles de ser inundadas en el volcán Santiaguito, en un escenario que corresponde a eventos de lluvias de 60-100 mm de acumulación</li> </ul>
Fortalecer la red de colaboración entre especialistas centroamericanos y mexicanos en el ámbito del análisis de amenazas volcánicas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se ha establecido colaboración con los departamentos de vulcanología y geología de INSIVUMEH y del Observatorio de Amenazas y Recursos Naturales de El Salvador para la formulación de nuevos proyectos con objetivos complementarios a los de la presente iniciativa</li> </ul>
Formar estudiantes de ingeniería y carreras afines de El Salvador y de geología en Guatemala en el análisis de amenazas volcánicas, en colaboración con universidades salvadoreñas (Universidad Nacional de El Salvador) y guatemaltecas (Universidad de San Carlos)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Participación de estudiantes de la Universidad Nacional de El Salvador (UES) y del Centro Universitario del Norte de la Universidad de San Carlos de Guatemala (CUNOR-USAC) en las capacitaciones desarrolladas en el marco de la iniciativa</li> <li>• Incorporación de 3 estudiantes de la UES (El Salvador) en el proceso de trabajo del observatorio, realizando tareas de preparación de datos para las simulaciones de lahares</li> <li>• En Guatemala, INSIVUMEH ha incorporado y capacitado a estudiantes de la CUNOR</li> </ul>

Cabe señalar, además, que los observatorios centroamericanos debieron atender sus tareas habituales de vigilancia de fenómenos naturales en el contexto de la pandemia (home-office, dificultad para salidas de campo). Estas labores se intensificaron durante la segunda parte del año 2020 por la temporada de lluvias especialmente intensa y en el primer trimestre de 2021, por la erupción del volcán Pacaya en Guatemala, además de un evento eruptivo del volcán de Fuego con emisión de corrientes de densidad piroclástica en febrero. Por todo ello el avance durante la segunda parte del proyecto fue más lento.

## Actividades realizadas

Para la consecución de estos objetivos se desarrollaron capacitaciones estructuradas en un curso corto y reuniones para el trabajo colaborativo mediante videoconferencias. A continuación, se presenta en la Tabla 2 el detalle de estas actividades:

**Tabla 2**

<i>Descripción de actividad</i>	<i>Fecha prevista</i>	<i>Reprogramación</i>
1. Preparación del plan de trabajo y discusión sobre las áreas de estudio. Compilación de información y trabajos previos en las áreas de trabajo	febrero-marzo de 2020	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dos reuniones por videoconferencia: 16 de febrero de 2022 con El Salvador y el 17 de febrero de 2020, con Guatemala para la presentación de todos los miembros de la iniciativa, la preparación de la solicitud del primer desembolso de fondos y la discusión sobre las áreas de trabajo</li> <li>• Creación de un espacio de trabajo compartido en drive</li> </ul>
2. Presentación del proyecto a las direcciones de los observatorios	1-4 abril de 2020	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Videoconferencia el día 13 de mayo de 2020 para presentación del proyecto a las nuevas autoridades del INSIVUMEH</li> </ul>
3. Preparación de bases de datos: 1) de eventos geológicos e históricos de lahar en las áreas de estudio; 2) características y volúmenes de materiales volcánicos involucrados y 3) de precipitaciones (pluviometría).	abril-mayo 2020	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Recopilación de información sobre trabajos previos disponibles, sobre eventos de lahar históricos y recientes, de datos de lluvia y de modelos de elevación digital, que han alimentado el espacio de drive compartido</li> <li>• Dos reuniones por videoconferencia: 20 de mayo de 2020 (DGOA- MARN) y 21 de mayo de 2020 (INSIVUMEH) para la presentación por parte de los observatorios de eventos de lahar y trabajos previos en las áreas de estudio</li> </ul>

<i>Descripción de actividad</i>	<i>Fecha prevista</i>	<i>Reprogramación</i>
4. Capacitaciones sobre el software de simulación (FLO-2D) y el uso de otras herramientas para la obtención de los datos de entrada (cálculo de volúmenes y construcción de hidrogramas)	8-19 junio 2020	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Curso corto (cuatro sesiones) sobre caracterización de lahares, su monitoreo y la evaluación de peligrosidad, con énfasis en el uso de simuladores para la elaboración de mapas de amenaza y la introducción al simulador FLO2D (ver programa del curso en Anexo 1). Participaron técnicos de los observatorios vulcanológicos y personal de universidades y entidades socias (23 personas, lista de asistencia en Anexo 2)</li> <li>• Para esta parte del proyecto se utilizó la licencia del software disponible en el Centro de Geociencias de la UNAM</li> </ul>
5. Informe parcial de actividades	julio de 2020	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Presentación del informe durante la primera quincena de agosto 2020</li> </ul>
6. Preparación de parámetros de entrada para las simulaciones de calibración (DEM, lluvia-escurrimiento, infiltración, coeficiente de Manning)	agosto-noviembre de 2020	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 1-2 reuniones de trabajo por videoconferencia para la discusión de avances y la distribución de tareas entre los equipos de trabajo mixtos de los observatorios y de la UNAM</li> <li>• Series de simulaciones con diferentes parámetros de entrada para cuencas seleccionadas en las áreas de trabajo</li> </ul>
7. Adquisición del software	septiembre-octubre de 2020	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Compra de licencia perpetua del software FLO2D por parte de la Secretaría General del IPGH con el 1r desembolso de fondos del proyecto.</li> <li>• Entrega a los observatorios de El Salvador y Guatemala</li> </ul>
8. Adquisición de insumos para elaboración de DEM de alta resolución	noviembre de 2020	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Adquisición de imagen satelital del volcán Santiaguito por parte de la Secretaría General del IPGH con el segundo desembolso de fondos del proyecto</li> </ul>
9. Elaboración del DEM de alta resolución para el volcán Santiaguito.	Diciembre de 2020 y mayo-junio de 2021	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Procesamiento de imagen satelital Pleiades para elaboración de un DEM de alta resolución del área de trabajo en el volcán Santiaguito.</li> </ul>
10. Calibración del software FLO2D para las áreas de estudio	febrero-junio de 2021	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Series de simulaciones para la reproducción de eventos de lahar en las áreas de estudio.</li> <li>• Obtención de áreas preliminares susceptibles a ser inundadas por eventos de lahar, en el marco de un escenario similar a los seleccionados para la fase de</li> <li>• calibración</li> </ul>

<i>Descripción de actividad</i>	<i>Fecha prevista</i>	<i>Reprogramación</i>
11. Participación en la Reunión de la Comisión de Geofísica del IPGH 2021	junio de 2021	• Presentación del seminario "Sistema de monitoreo y alerta temprana de lahares" en la reunión de la Comisión de Geofísica del IPGH en Lima (Perú)
12. Informe final	junio-julio de 2021	• Preparación de informe final de la implementación de la iniciativa

## Resultados técnicos preliminares

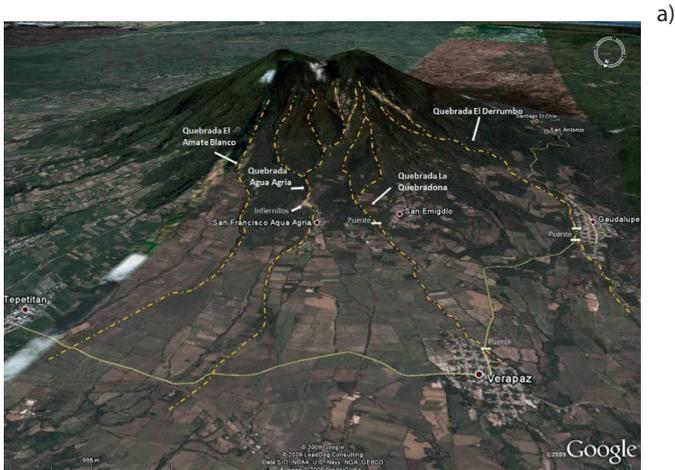
### 1. Volcán de San Vicente (El Salvador)

El volcán San Vicente o Chichontepec es uno de los 21 volcanes activos del arco volcánico Centroamericano en El Salvador, situado 50 km al este de la ciudad capital San Salvador. No hay registrada actividad volcánica histórica en este volcán, sin embargo, por su envergadura (2,180 m), sus empinadas laderas y la presencia de materiales alterados, sí ha presentado diferentes eventos de deslizamientos y ocurrencia de lahares intra-eruptivos. Se han identificado depósitos de lahares geológicos e históricos, en muchas de las barrancas y quebradas que surcan el conjunto de sus laderas, algunos con volúmenes de más de 100,000 m<sup>3</sup> y alcances de más de 6 km. Los eventos históricos más importantes ocurrieron en 1774, 1934, 1996, 2001 y 2009, desencadenados por sismos y/o por precipitaciones intensas. Las características y los depósitos de este último evento, ocurrido en noviembre de 2009, se tomaron de referencia para la calibración del software FLO2D en El Salvador.

#### 1.1. Selección de cuencas de interés y simulaciones de lluvia-escurrimiento

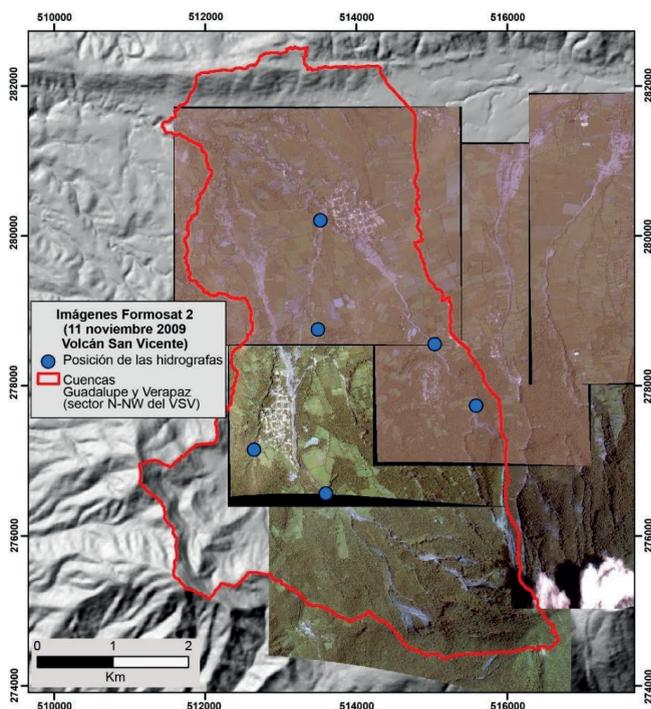
Con relación a este último evento, después del paso del huracán Ida por la costa atlántica de América Central, en noviembre de 2009, un sistema de baja presión con su origen sobre el Pacífico se movió hacia la parte central de El Salvador. Según información del Servicio Nacional para Estudios Territoriales (actual observatorio de Amenazas y Recursos Naturales), este sistema de baja presión provocó lluvias muy intensas durante la noche del sábado 7 de noviembre y madrugada del domingo 8 de noviembre, descargando alrededor de 355 mm de lluvia; 80% de los cuales precipitaron en un lapso de 6 horas. Estas lluvias causaron enormes pérdidas y daños por inundaciones en la cuenca del río Lempa y deslizamientos y flujos de escombros en diversas partes del territorio de El Salvador. La zona más afectada se localizó en las subcuencas con origen en la ladera norte del volcán de San Vicente (Figura 2a), que afectaron los municipios de Guadalupe y Verapaz. La entrada de los lahares al caso urbano de Verapaz (Figura 2b) provocó la pérdida de vidas humanas, numerosos damnificados y cuantiosas pérdidas materiales.

Los deslizamientos principales ocurrieron a una cota topográfica de 1800 msnm en el volcán y los flujos de escombros se desarrollaron al menos en cuatro quebradas en el flanco norte: El Derrumbo, en dirección a la ciudad de Guadalupe; La Quebradona, en dirección a la ciudad de Verapaz; El Infiernillo y Amate Blanco, ambas en dirección a la ciudad de Tepetitán (Figura 2a) Los flujos observados tuvieron la capacidad de ensanchar y profundizar los cauces preexistentes de las quebradas (SNET-MARN, 2009).



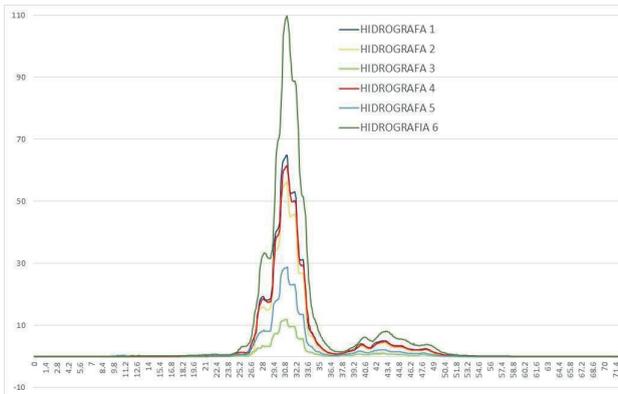
**Figura 2.** a) Quebradas de la ladera norte del volcán de San Vicente donde se desarrollaron flujos de escombros durante el evento de noviembre de 2009. b) El flujo de escombros desarrollado en la quebrada La Quebradona inundó el casco urbano del municipio de Verapaz (imágenes del informe técnico preliminar realizado por SNET-MARN en noviembre de 2009).

Se seleccionaron e integraron en única área de trabajo (dominio computacional) las subcuencas de La Quebradona y El Derrumbo para la realización de simulaciones de lluvia-escorrimento, primera etapa para la calibración del software FLO2D (Figura 3). El observatorio de El Salvador proporcionó los modelos de elevación digital (Lidar con resolución de 5 m y otro previo con resolución de 10 m obtenido de la topografía 1:50,000) y los datos de precipitaciones obtenidos de la estación San Vicente, ubicada en la cota 2100 msnm. Se calculó una lluvia total acumulada de 484 mm que precipitó entre las 7h del día 6 de noviembre a las 19 h del día 8 de noviembre.



**Figura 3.** Subcuencas La Quebradona y el Derrumbo en el sector norte del volcán de San Miguel, sobre las imágenes satelitales Formosat 2 obtenidas pocos días después de los eventos de flujos de escombros de noviembre de 2009 y donde pueden observarse sus alcances y áreas de inundación. Las subcuencas se integraron en un único dominio computacional para las simulaciones de lluvia-escorrimento para 5 hidrografías en diferentes puntos de la red de drenaje.

En la red hidrográfica de las subcuencas consideradas se calcularon cinco hidrografías con el objetivo de tomar en cuenta todos los aportes de escorrentía que pudieron haber influido en la ocurrencia, desarrollo y coalescencia de los flujos de escombros que alcanzaron el casco urbano de Verapaz (Figura 3). En la Figura 4 se muestran las hidrografías calculadas.



**Figura 4.** Hidrógrafas calculadas per el evento de los días 6 al 8 de noviembre de 2009. El eje “x” indica el tiempo (horas), el eje “y” muestra la descarga (m<sup>3</sup>/s) de agua en cada uno de los puntos de ubicación de las hidrógrafas.

## 1.2. Simulaciones de calibración con el DEM de 10 m de resolución

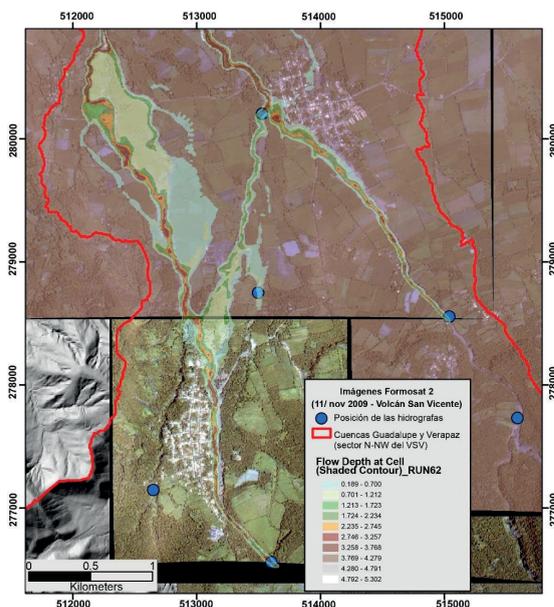
Una vez obtenidas las hidrógrafas se calcularon las curvas de descarga (incluyendo la carga de sedimento) y se realizaron una serie de simulaciones de prueba-error para reproducir los alcances y áreas inundadas del evento de flujo de escombros ocurridos la madrugada del 8 de noviembre de 2009.

Para estas simulaciones de calibración se utilizó el DEM de 10 m de resolución, ya que reproducía con mayor precisión la configuración de las barrancas en el sector norte del volcán de San Vicente, previa a la ocurrencia de los lahares en noviembre de 2009 durante el paso de la tormenta tropical Ida.

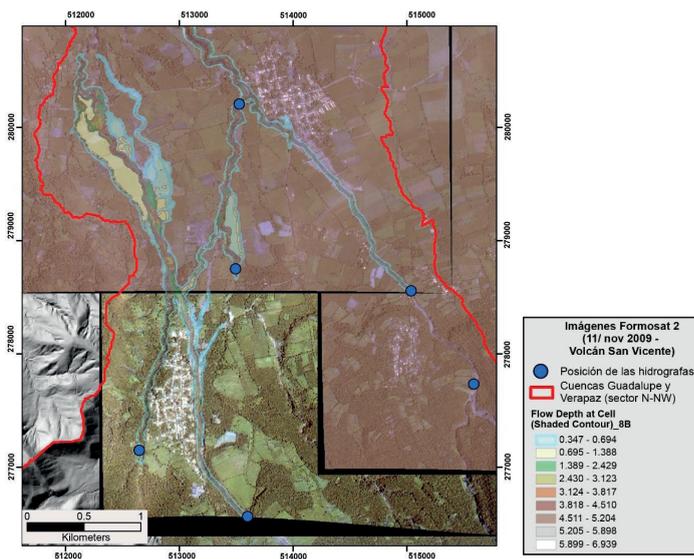
Se obtuvieron buenos resultados de las simulaciones en las barrancas que drenan el volcán hasta los municipios de Guadalupe y Verapaz, tal y como se muestra en la Figura 5. Sin embargo, estas simulaciones no lograron reproducir por completo el área de inundación de los flujos de escombros en el casco urbano de Verapaz. Se atribuye este problema al hecho que los modelos de elevación no reproducen de forma exacta la configuración de las barrancas en el momento de ocurrencia del evento de 2009.

## 1.3. Simulaciones para la obtención de posibles áreas de inundación con el DEM de 5 m de resolución

Se realizaron también series de simulaciones utilizando el DEM Lidar con resolución de 5m para obtener los alcances y áreas de inundación que tendrían flujos de escombros de magnitud similar a los ocurridos en 2009, en caso de producirse en un futuro cercano con la actual configuración de las barrancas y bajo el supuesto de un escenario de lluvias intensas similar. En la Figura 6 se muestran parte de los resultados de estas simulaciones.



**Figura 5.** Mapa con las áreas de inundación obtenidas con el software FLO2D de la simulación sobre los depósitos previos.



**Figura 6.** Mapa con las áreas de inundación obtenidas de las simulaciones realizadas con el software FLO2D utilizando el DEM Lidar de 5 m de resolución, que muestra la actual configuración de drenaje, y considerando un escenario de lluvias similar al del evento de noviembre de 2009.

Se tiene previsto continuar con el trabajo colaborativo entre la UNAM y el Observatorio de Amenazas y Recursos Naturales de El Salvador, hasta finales de este año, para simular condiciones de diferentes escenarios de lluvias y en diferentes barrancas entorno al volcán.

## 2. Volcán Santiaguito (Guatemala)

El volcán Santiaguito se caracteriza por actividad volcánica efusiva y explosiva frecuente que da lugar a la generación de depósitos de flujos piroclástico en las principales barrancas que drenan hacia el sur del volcán (Figura 7). Este material es fácilmente removilizado durante los eventos de lluvia originando lahares, cuya magnitud depende principalmente del volumen de material disponible y del total de lluvia acumulada. Después de una erupción, la frecuencia y magnitud de estos eventos será mayor e irá disminuyendo de manera progresiva a medida que las laderas del edificio se estabilizan. Por la elevada dinámica del relieve, la morfología de las barrancas es muy cambiante, por lo que, para poder realizar simulaciones ante un posible escenario en las condiciones actuales, es necesario contar con un modelo de elevaciones del terreno lo más reciente posible y con alta resolución.



**Figura 7.** Imagen satelital del Complejo Santa María – Santiaguito, con la red de drenaje que discurre en sentido N-S, desde los domos del volcán Santiaguito hasta la planicie costera. Las simulaciones de calibración para el volcán Santiaguito se realizaron en las barrancas de los ríos San Isidro, San José y Nimá I. El recuadro en blanco marca la zona descrita en la Figura 8.

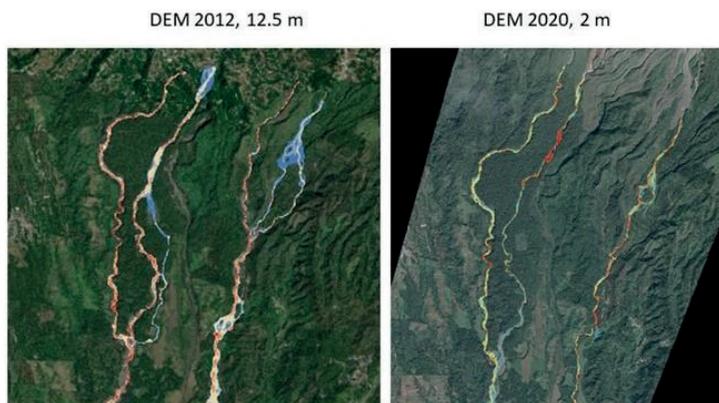
### 2.1. Entrenamiento del software con los DEM's disponibles

Las primeras simulaciones se realizaron en la segunda mitad de 2020 utilizando los modelos de elevaciones disponibles: DEM de 12.5 m de resolución de AlosPalsar

del 2011 y un DEM de 10 m de resolución elaborado por el INSIVUMEH utilizando un mosaico de datos adquiridos en tiempos diferentes. Los dos productos fueron procesados para definir la dirección y la acumulación en la red de drenaje (hidrografía). En ambos casos, los drenajes calculados no reproducen las corrientes principales, sobre todo en la parte alta de las cuencas y a lo largo del río San Isidro. Se realizaron algunas simulaciones de prueba y no se logró reproducir la trayectoria de los lahares en la zona próxima al volcán. Por lo anterior fue necesario la adquisición de un producto satelital que permitiera obtener un modelo de elevación de alta resolución, pero, sobre todo, que pudiera reproducir la red de drenaje actual (Figura 8).

## 2.2. Preparación de un DEM de alta resolución

Se adquirió un triplete estereoscópico de imágenes Pleiades, tomadas por el satélite en diciembre del 2020. Estas imágenes reproducen la configuración actual de Volcán Santiaguito, ya que desde la adquisición a la fecha no se ha registrado el emplazamiento de flujos de lava o de depósitos de flujos piroclásticos y/o lahares. Las imágenes tienen una resolución de 50 cm y fueron procesadas para la preparación de un Modelo Digital de Superficies (MDS). Considerando el tamaño de la imagen y la capacidad de cómputo disponible se optó por procesar los datos para obtener un MDS a 2 m de resolución. El MDS fue tratado posteriormente para eliminar la vegetación (5-10m) y producir así un Modelo Digital de Elevación (MDE o DEM) a una resolución de 5m.

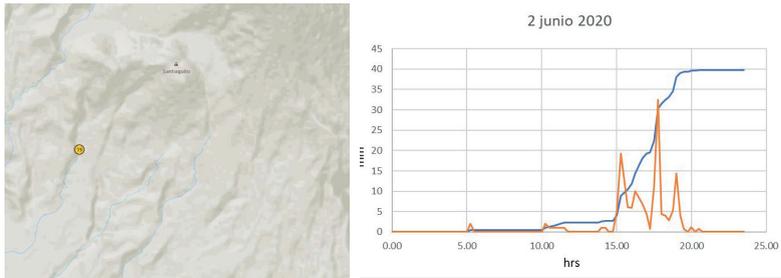


**Figura 8.** Ejemplo de simulaciones realizadas utilizando el DEM del 2012 (izquierda) y el DEM obtenido a partir de las imágenes Pleiades adquiridas en el 2020 (derecha).

## 2.3. Simulaciones para la calibración

Para la calibración de las simulaciones con el código FLO2D se decidió trabajar con los eventos de lahar registrados durante la temporada de lluvia del año 2020. Para la construcción de la curva hidrográfica se utilizaron los datos de la estación de

lluvia Desarenador Concepción, localizada hacia el SW del volcán y muy cerca de la barranca San Isidro (Figura 9a), en donde se detectaron los eventos en los meses de junio y agosto del 2020. Con los datos disponibles (Figura 9b) fue posible definir una curva de descarga (Figura 10) que reprodujo las profundidades observadas en varios puntos a lo largo del río San José.



**Figura 9.** a) Localización de la estación de lluvia Desarenador Concepción (izquierda) y b) Lluvia registrada el 2 de junio del 2020 (línea naranja) y lluvia acumulada (línea azul) utilizada para definir la curva de descarga para el evento observado en el río San Isidro (derecha).



**Figura 10.** Curva de descarga calculada per el evento del día 2 de junio del 2020.

A partir de los resultados preliminares y con el DEM del 2020 a alta resolución, ya se cuenta con las bases para poder realizar simulaciones para otros escenarios syn- y pos eruptivos observados en la historia eruptiva reciente del volcán Santiaguito, así como eventos asociados a fenómenos hidrometeorológicos extraordinarios como han sido los huracanes Stan, Mitch y ETA, entre otros.

## **Consideraciones finales**

El presente proyecto ha sido de suma importancia para fortalecer las colaboraciones entre México, Guatemala y El Salvador para el estudio y evaluación de la amenaza por lahares, fenómeno natural que, por la posición geográfica y las características geodinámicas, son eventos muy frecuentes en Centro América y que, en años pasados, han provocados ingentes daños y pérdidas humanas. A pesar de las restricciones para la realización de estancias académicas, la nueva planeación de las actividades, y la autorización para un uso alternativo de los recursos, ha permitido lograr los objetivos principales del proyecto. Actualmente el personal de El Salvador y del INSIVUMEH cuentan con los insumos y las herramientas necesarias para poder seguir con la evaluación de la amenaza por lahares en ambos países. El éxito alcanzado con este primer proyecto asienta las bases para poder seguir colaborando entre las partes, en la propuesta de nuevos proyectos de colaboración, así como en el acompañamiento para dar continuidad a la evaluación de la amenaza por lahares y en la construcción de los mapas de amenaza.

## Anexo 1.

### Sesiones de capacitación (curso corto, junio de 2020)

Sesiones de capacitación sobre lahares y su simulación  
Horario: de 14h a 16h (hora de Guatemala y El Salvador), 15h a 17h (México)

<i>Sesión</i>	<i>Contenidos</i>	<i>Fechas*</i>	<i>Impartida por:</i>
Lahares: clasificación, dinámica y depósitos	Nomenclatura y clasificación Dinámica de los lahares Características principales de los depósitos de flujo de escombros e hiperconcentrados	17 de junio de 2020	Lizeth Caballero Dolors Ferrés
Monitoreo de lahares	El uso de imágenes satelitales (fuentes de datos, métodos de tratamiento y principales aplicaciones) Monitoreo de Lahares en el volcán de Colima	19 de junio de 2020	Lucía Capra Norma Dávila
Simulación de lahares	Tipos de códigos. Ventajas y limitaciones. Parámetros relevantes para la reproducción de la trayectoria de lahares. Importancia de la resolución de los DEM	24 de junio de 2020	Lizeth Caballero Dolors Ferrés
Flo2D	Instalación del programa* Módulos del programa Parámetros de entrada Aplicaciones en volcanes mexicanos	26 de junio de 2020	Lucía Capra Lizeth Caballero

Sesiones teóricas de 2-2.5 h, que incluyeron la exposición de contenidos y su discusión con base en las preguntas de los participantes. En cada sesión se propusieron actividades prácticas.

Las sesiones se desarrollaron en la plataforma Zoom. Se enviaron los enlaces para la conexión a los coordinadores del proyecto en El Salvador y Guatemala (Mario Reyes y Amílcar Roca), que los hicieron llegar al resto de participantes en cada país.

La instalación del programa FLO2D se realizó previo al inicio de la 4ª sesión (sesión de la licencia del CGEO). Fue necesario revisar los requerimientos del sistema para la instalación y valorar si en la situación actual (trabajo desde los domicilios) era viable el trabajo remoto.

## Anexo 2.

### Participantes

#	Nombre	Puesto	Institución
<b>EL-SALVADOR</b>			
1	Mario Reyes	Técnico en geología	MARN
2	Cecilia Polio	Técnico en monitoreo geológico	MARN
3	Rodolfo Castro	Técnico en monitoreo geológico	MARN
4	Valeria García	Geóloga	MARN
5	Francisco Montalvo	Vulcanólogo	MARN
6	Jacqueline Rivera	Especialista en pronóstico por impactos	MARN
7	Rodrigo Alfaro	Estudiante de Geofísica	UES/MARN
8	José Alexander Chávez	Especialista ambiental	OPAMSS
9	Ingrid Alfaro	Jefe Unidad Ambiental	OPAMSS
10	Alonso Alfaro	Especialista de la Subdirección de Geotecnia	MOP
11	Mónica Gutiérrez	Especialista de la Subdirección de Geotecnia	MOP
<b>GUATEMALA</b>			
12	Peter Darwin Argueta Ordoñez	Lic. Física. Área Vulcanología	INSIVUMEH
13	Gustavo A. Chigna Marroquín	Área de Vulcanología	INSIVUMEH
14	Edgar Roberto Mérida Boogher	Ingeniero Geólogo. Área de Vulcanología	INSIVUMEH
15	José Juan Ochoa Quezada	Geólogo. Área Vulcanología	INSIVUMEH
16	Amilcar Elías Roca Palma	Lic. Física. Área Vulcanología	INSIVUMEH
17	Fredy Daniel Monterroso Alonzo	Estudiante de Geología	Centro Universitario del Norte, CUNOR
18	María Moncada	Geóloga	ONG Vivamos Mejor
19	Daniel Secair	Máster en Geociencias	ONG Vivamos Mejor
20	Carla Ma Fernanda Chun Quinillo	Geóloga e Investigadora	Servicio Sismológico de Guatemala, Universidad Mariano-Gálvez
21	Dulce Ma González Domínguez	Geóloga e investigadora	Servicio Sismológico de Guatemala, Universidad Mariano-Gálvez
22	Amy Guicela Molina Estrada	Ingeniera Agrónoma	Instituto Privado de Cambio Climático (ICC)
23	Claudia Maricela Méndez de León	Ingeniera Agrónoma	Acción contra el Hambre (ACH)

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

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

- 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:

Dr. Juan Esteban Hernández Quintero  
 Instituto de Geofísica  
 Universidad Nacional Autónoma de México  
 Ciudad de México  
 Correo electrónico: [geofisica\\_editor@ipgh.org](mailto:geofisica_editor@ipgh.org)  
[Revista Geofísica \(revistasipgh.org\)](http://Revista_Geofisica_(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.

Mayor información, favor de comunicarse con:

Secretaría General del IPGH  
 Departamento de Comunicación Social  
 Ex-Arzobispado 29 | Colonia Observatorio | 11860 Ciudad de México  
 Tels.: (+52-55) 5277-5888 | 5277-5791 5515-1910  
 Correo electrónico: [publicaciones@ipgh.org](mailto:publicaciones@ipgh.org)  
<https://ipgh.org>  
<https://revistasipgh.org/>

Edición del  
Instituto Panamericano de Geografía e Historia  
realizada en su Departamento de Comunicación Social,  
Ex Arzobispado núm. 29, Col. Observatorio  
11860, Ciudad de México, México  
Tels.: 5277-5791 / 5277-5888 / 5515-1910  
[publicaciones@ipgh.org](mailto:publicaciones@ipgh.org)  
2022

**ESTADOS MIEMBROS  
DEL  
INSTITUTO PANAMERICANO DE GEOGRAFÍA E HISTORIA**

**EL IPGH, SUS FUNCIONES Y SU ORGANIZACIÓN**

**Argentina**

**Belice**

**Bolivia**

**Brasil**

**Chile**

**Colombia**

**Costa Rica**

**Ecuador**

**El Salvador**

**Estados  
Unidos  
de América**

**Guatemala**

**Haití**

**Honduras**

**México**

**Nicaragua**

**Panamá**

**Paraguay**

**Perú**

**República  
Dominicana**

**Uruguay**

**Venezuela**

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

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

El *Estatuto Orgánico* del IPGH cita en su Capítulo II, artículo 2, su Misión:

1. Fomentar, coordinar y difundir los estudios pertenecientes a sus áreas de interés, las cuales son Cartografía, Geografía, Historia, Geofísica y las ciencias afines en beneficio de América;
2. Apoyar la iniciativa, innovación y generación de conocimiento en sus áreas de interés, a través de estudios, capacitaciones y trabajos de sus Comisiones;
3. Promover la cooperación interdisciplinaria entre los institutos de América y organizaciones internacionales afines.

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

El IPGH se compone de los siguientes órganos panamericanos:

1. Asamblea General;
2. Autoridades;
3. Secretaría General; y
4. Comisiones.

Además, cada Estado Miembro designa y crea oficialmente una Sección Nacional, órgano establecido para el cumplimiento de la misión, visión y estrategia científica del IPGH en el ámbito nacional, contando para ello con el apoyo financiero de su gobierno.

# VOLCÁN CASAQUALA

Mulacorral

Chiquiurco

Río Calamanca

Río Ambato

## Simbología

— Ríos principales

— Vías

■ Represas

● Población

● Puente

ISSN 2663-3981

