

## Estudios Geofísicos en el techo de México

### *Geophysics at the roof of Mexico*

Katrin Sieron <sup>a</sup>

Blake Weissling <sup>b</sup>

Román Gutiérrez-Anguiano <sup>c</sup>

Julio César González-Hernández <sup>d</sup>

Cristián Martínez-Báez <sup>e</sup>

Edwin Ulices Monfil-León <sup>f</sup>

Francisco Córdoba-Montiel <sup>g</sup>

**Recibido:** 22 de septiembre de 2021.

**Aceptado:** 7 de octubre de 2021

---

<sup>a</sup> Observatorio Sismológico y vulcanológico, Centro de Ciencias de la Tierra, Universidad Veracruzana, México. Contacto: [ksieron@uv.mx](mailto:ksieron@uv.mx) | ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4036-9107>

<sup>b</sup> Departamento de Ciencias Geológicas, Universidad de Texas en San Antonio (UTSA), Texas, EUA. Contacto: [blake.weissling@utsa.edu](mailto:blake.weissling@utsa.edu)

<sup>c</sup> Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México. Contacto: [lyfors@gmail.com](mailto:lyfors@gmail.com)

<sup>d</sup> Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México. Contacto: [julio.igfbuap@gmail.com](mailto:julio.igfbuap@gmail.com)

<sup>e</sup> Centro de Ciencias de la Tierra, Universidad Veracruzana, México. Contacto: [crislian.mtz@gmail.com](mailto:crislian.mtz@gmail.com)

<sup>f</sup> Centro de Ciencias de la Tierra, Universidad Veracruzana, Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas (UNICACH), Instituto de Investigación en Gestión de Riesgos y Cambio climático, México. Contacto: [edwin.monfill@e.unicach.mx](mailto:edwin.monfill@e.unicach.mx)

<sup>g</sup> Observatorio Sismológico y vulcanológico, Centro de Ciencias de la Tierra, Universidad Veracruzana, México. Contacto: [fcordoba@uv.mx](mailto:fcordoba@uv.mx)

**RESUMEN:** En el año 2019 se llevaron a cabo estudios geofísicos en la montaña más alta de México, el volcán Pico de Orizaba con una altura de 5636 m sobre el nivel del mar (snm). Mediante la aplicación de las técnicas geofísicas sísmica de refracción y georradar se determinaron espesores actuales del glaciar Jamapa y de sedimentos no-consolidados en la cuenca superior Jamapa. Los resultados son de gran importancia para recaudar información de esta área en particular, que ha sido zona de origen de varias formaciones de lahares (flujos de escombros) en el pasado reciente.

**Palabras clave:** Pico de Orizaba; georradar; sísmica de refracción; cuenca Jamapa alta.

**ABSTRACT:** *In 2019, geophysical studies were carried out at the highest mountain of Mexico, Pico de Orizaba volcano with a height of 5636 m above sea level (asl). Through the application of seismic refraction and Ground Penetrating Radar (GPR) geophysical techniques, current thicknesses of the Jamapa glacier and unconsolidated sediments in the upper Jamapa watershed were determined. The results are of great importance in gathering information on this particular area, which has been the source of multiple lahars (debris flows) in the recent past.*

**Keywords:** *Pico de Orizaba; Ground Penetration Radar (GPR); seismic refraction; upper Jamapa watershed.*

## Introducción

Desde el año 2018, el proyecto «Peligros hidrometeorológicos y geológicos en el volcán Pico de Orizaba, México» financiado por la Sociedad de Geofísicos de Exploración (SEG por sus siglas en inglés) en el marco del proyecto permanente «Geo-científicos Sin Fronteras» (GWB por sus siglas en inglés) dio la oportunidad de colaborar con docentes, investigadores y muchos estudiantes de diferentes Facultades de la Universidad Veracruzana y otras Universidades Nacionales, como la BUAP e internacionales como la UTSA.

Aquí presentamos algunos resultados de los estudios geofísicos realizados en el año 2019 en el Pico de Orizaba, la montaña más alta de México con 5636 m snm, entre los 4000 y los 5300 m snm (**Figura 1**). Los estudios geofísicos representaron la primera fase del proyecto y dieron resultados interesantes sobre espesores y tipos de materiales del glaciar Jamapa y los estratos geológicos entre el glaciar Jamapa y el albergue Piedra Grande en el flanco noreste del volcán. La zona estudiada es muy importante, ya que justamente se encuentra por encima de la línea de árboles (Lauer y Klaus, 1975), y está afectada por el retroceso constante (y ahora acelerado) del glaciar Jamapa desde la Pequeña Edad de Hielo por las consecuencias que este proceso conlleva en el contexto de cambios morfológicos y procesos geomorfológicos relacionados (Palacios et al., 1999; Palacios y Vázquez-Selem, 1996). De acuerdo con lo anteriormente descrito, esta zona ha sido, y es, muy susceptible a presentar procesos de remoción en masa, lo que ha ocurrido ya varias veces en el pasado reciente, como lo demuestran los flujos de escombros (detritos) desencadenados en esta zona en los años 90 (Palacios et al., 1999) y en el 2012 (Morales-Martínez et al., 2016; Sieron et al., 2021).

Cabe mencionar que cualquier estudio en estas altitudes requiere de inmensos esfuerzos técnicos y humanos por las condiciones de extrema altitud y climáticas. Agradecemos a todas las personas, dependencias e instituciones que nos hayan apoyado en el proceso y durante la fase de preparación.



**Figura 1.** Pico de Orizaba con zonas de estudio.  
Fuente: elaboración propia.

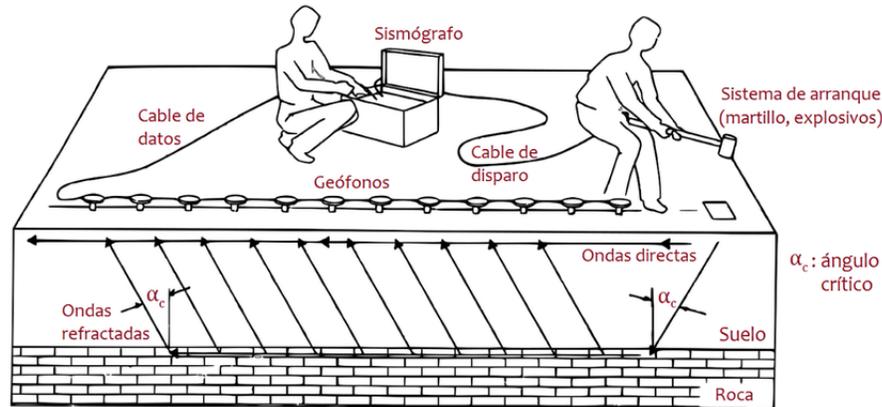
## 1. Metodología

En general, el trabajo se realizó en 3 etapas, la primera de planeación y elección de tipos de equipos geofísicos, seguido por la etapa de trabajo de campo para la adquisición de datos mediante diferentes métodos de prospección geofísica y una tercera que consiste en la corrección e interpretación de los datos adquiridos. En este trabajo se emplearon el Georradar (GPR por sus siglas en inglés), una técnica de exploración no invasiva del subsuelo, mediante ondas electromagnéticas de muy alta frecuencia (régimen radar: normalmente entre 10 y 1000 MHz; Annan, 2009). Dichas ondas son emitidas por una antena, se propagan en el subsuelo y al interceptar diferentes tipos de materiales, se producen eventos de reflexión, refracción y difracción, mismos que se pueden detectar por la antena receptora que capta la energía electromagnética posterior a su propagación. Con el Georradar, las propiedades determinantes de cada material del subsuelo son las electromagnéticas: la permitividad eléctrica, la conductividad y la permeabilidad magnética (García, 2004). Las reflexiones se producen debido a los contrastes de estas propiedades.

El segundo método empleado, la sísmica de refracción, es de utilidad para la estimación de velocidades sísmicas. Con esta técnica, a través de la elaboración y análisis de la relación tiempo-distancia en los estratos por los que se propagan las ondas sísmicas, se determina la velocidad de propagación de las mismas. A partir de esto, se estiman los espesores de los estratos y la ubicación en cuanto a profundidad. El método consiste en colocar una serie de geófonos sobre una línea recta con puntos de tiro colocados normalmente en los extremos y la parte central del tendido (**Figura 2**).

En los puntos de tiro se generan, mediante impactos en el suelo (en este caso de un marro sobre una placa metálica), ondas sísmicas compresionales. Parte de las ondas generadas se desplazan directamente por la superficie (llamadas ondas directas), mientras que otras atraviesan el terreno

experimentando fenómenos de reflexión y refracción en las interfaces entre capas. Algunas de las ondas refractadas viajan a través de las interfaces presentes en los distintos medios y vuelven a la superficie.



**Figura 2.** Esquema de adquisición del método de refracción sísmica.  
 Fuente: Arias et al. (2017).

Después de una preevaluación de la geología del sitio, se realizaron varias campañas de trabajo de campo entre marzo y julio del año 2019. Con ambos métodos geofísicos se realizaron perfiles en la zona del albergue «Piedra Grande» (4200 m snm), la rampa proglacial a los 4400 m snm y sobre el glaciar Jamapa (>5000 m snm), en el flanco noreste del Pico de Orizaba.

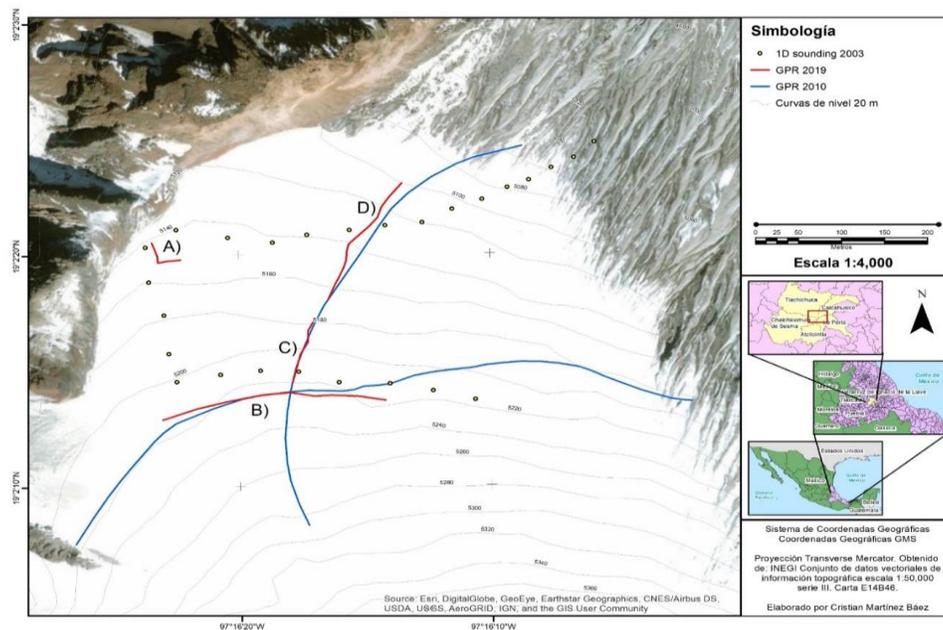
Se utilizaron dos diferentes equipos de Georradar (**Figura 3**), la unidad Zond 12e de la marca Radar Systems Inc., la cual se encuentra conformada por un sistema de control de radiación, una unidad de almacenamiento (laptop) que permite observar los datos conforme se van adquiriendo, una fuente de alimentación (batería de 12V), y en este caso, una antena de 300 MHz. Para el trabajo en el glaciar se utilizó el Georradar GSSI Utility Scan 350hs, el cual es de menores dimensiones (33.5 x 31 x 15 cm y peso de 5 kg) y más fácil de transportar.

Además, se empleó el sismógrafo GEODE de la marca GEOMETRICS®, conformado por 12 geófonos uniaxiales de 14 Hz, un cable de refracción de 12 canales, un sistema de disparo (trigger), un cable de extensión del sistema de disparo, un marro de 12 lbs, una placa de acero y una unidad de almacenamiento y control (laptop).

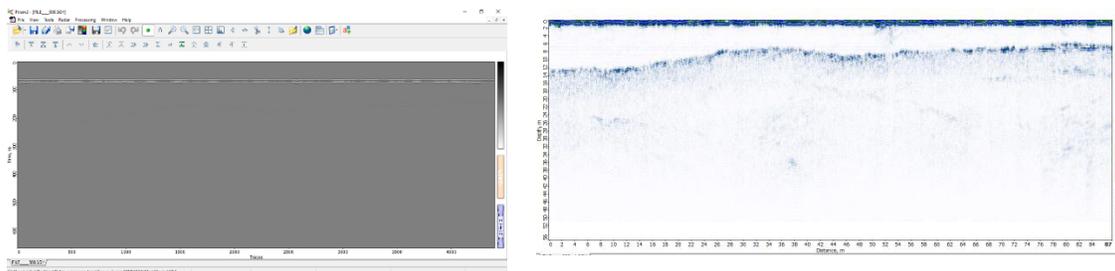


**Figura 3.** Fotos tomadas por Román Gutiérrez Anguiano (izq.) y Marco A. Morales Martínez (der.) de los dos tipos de Georradar empleados en la zona del albergue (izq.) y sobre el glaciar (der.).

Al planear los estudios en el glaciar, se tomaron en cuenta estudios anteriores realizados en los años 2003 y 2010 mediante Georradar (**Figura 4**), ya que, al efectuar los estudios sobre los mismos trazados, los espesores del glaciar se pueden comparar más adelante. La información se puede obtener de los radargramas, que son registros en tiempo de la variación de la amplitud de energía reflejada. Para el procesamiento de datos GPR se utilizó la aplicación de filtros y correcciones, los cuales permiten eliminar las señales no deseadas (ruido) generadas por diferentes factores, al momento de su adquisición (interferencias con señales de más alta frecuencia, movimientos bruscos, capa de aire, etc.) (**Figura 5**).

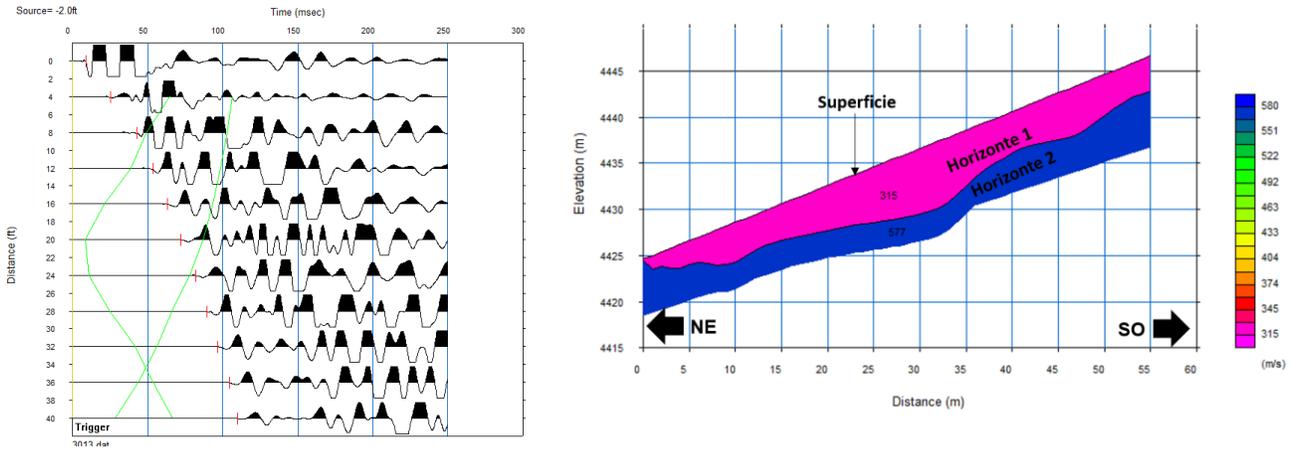


**Figura 4.** Trazas de las exploraciones con Georradar en los años 2003, 2010 y 2019 (Martínez-Báez, 2020; Brown et al., 2005)



**Figura 5.** Radargramas sin procesar (izq.) y después de la aplicación de retraso de pulso+ aplanamiento cero+ remoción del ruido de fondo + ganancia + filtro Ormsby+ filtro pasa bajas (der.) Fuente: Gutiérrez-Anguiano (2020).

En el caso de la sismica de refracción, se utilizó el software Geometrics Seismodule Controller™ para la adquisición de los datos, para el procesamiento del arribo de las ondas P se utilizó el software PickWin™ y para el análisis de refracción se utilizó Plotrefa™; todos los softwares pertenecen a la paquetería de Seisimager® (Figura 6).



**Figura 6.** Sismograma con identificación de onda P (izq.) y perfil de sismica de refracción ya interpretado y con topografía incluido (der.). Fuente: Gutiérrez-Anguiano (2020).

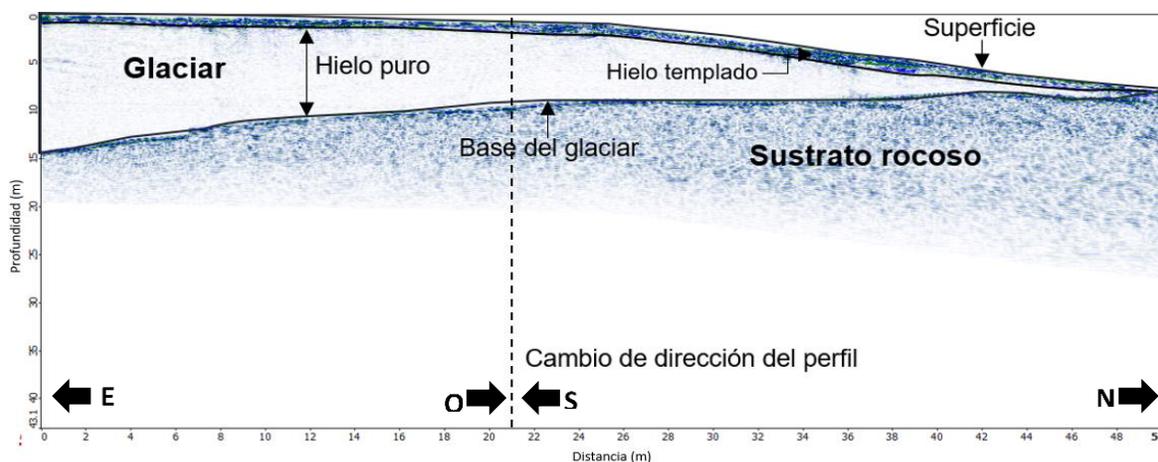
## 2. Resultados

Se realizó la caracterización geofísica en las zonas del albergue Piedra Grande, Rampa Proglacial y Glaciar Jamapa mediante perfiles realizados con los métodos de georradar y sismica de refracción. En la zona del albergue Piedra Grande con el método de GPR en los dos perfiles realizados se logró identificar un espesor de 8 metros de materiales no consolidados los cuales se encuentran conformados por 3 horizontes individuales. Aparentemente estos tres horizontes forman parte de un abanico, en el cual se han estado acumulando materiales provenientes de glaciaciones y erupciones anteriores, así como del constante aporte por procesos de erosión de las partes más altas. Con el segundo método, sismica de refracción, se identificaron dos estratos; el primer estrato de los 6 a los 8 metros, correspondiendo a los 3 horizontes identificados por GPR. Para el segundo, de acuerdo con las velocidades de onda P que presenta, también pudiera tratarse de materiales no consolidados, y los espesores que se registraron en los perfiles van de los 2 a los 3 metros. Dicho horizonte podría tener más profundidad, ya que con la profundidad alcanzada en este estudio no se logró identificar la base del mismo (o el contacto con la unidad subyacente).

En la zona de la Rampa Proglacial se identificó la zona de material no consolidado con un espesor total de 6 metros, conformada por 3 horizontes con el método de GPR. En mayores profundidades la señal se atenúa y no es posible identificar con certeza más horizontes. Con el método de sismica de refracción se identificaron dos horizontes: el primero que corresponde a lo registrado con el georradar con una geometría irregular (desde los 2 hasta los 5 metros). El segundo horizonte probablemente presenta un espesor mayor. Ambos horizontes presentan un rango de velocidades que se pudieran atribuir a materiales no consolidados.

Los espesores del material no consolidado junto con otros parámetros obtenidos mediante los diferentes estudios realizados en el proyecto bajo el cual se realizó esta investigación podrán utilizarse como valores mínimos del aporte de material no consolidados en el modelado de lahares.

En el caso del glaciar Jamapa, en los extremos analizados en el perfil 8 y 5, presenta espesores mínimos que desde los 0.80 hasta los 2 metros. Por otra parte, en el perfil que mayor altitud se realizó (parte central del glaciar) presenta un espesor máximo de 17.20 metros. Así que en promedio el glaciar presenta espesores en el orden de los 10 metros (**Figura 7**).



**Figura 7.** Ejemplo de un radargrama ya procesado e interpretado para el glaciar Jamapa (Pico de Orizaba; Fuente: Gutiérrez-Anguiano [2020])

## Agradecimientos

Financiamiento del trabajo por: **Geoscientists Without Borders® (GWB) Program** of the Society of Exploration Geophysicists (SEG), a través del proyecto «Hydrometeorologic and geologic hazards at Pico de Orizaba volcano, Mexico».

## Referencias

- Annan, A.P.** (2009). Chapter 1 – Electromagnetic Principles of Ground Penetrating Radar. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53348-7.0001-6>
- Arias, J., Mendoza, A., Nestor, A.** (2017). Obtención de propiedades mecánicas a partir de la relación  $V_p/V_s$  para depósitos superficiales de ceniza volcánica en Manizales Colombia Obtaining mechanical properties from  $V_p/V_s$  ratio of superficial volcanic ash soils in Manizales city Colombia.
- Brown, S., Weissling, B., and Lewis, M.J.** (2005). An Ice Thickness Study Utilizing Ground Penetrating Radar on the Lower Jamapa Glacier of Citlalpetel (El Pico de Orizaba), Mexico. Workshop on Radar Investigations of Planetary and Terrestrial Environments, Houston, Texas. <https://ntrs.nasa.gov/citations/2005016197>.

- García, F.** (2004). La técnica geofísica de ground penetrating radar (Georradar) aplicada al patrimonio. *Actas de los XIV cursos Monográficos sobre el Patrimonio Histórico* (Reinosa)(pp.175.196). Universidad politécnica de Valencia, España.
- Gutiérrez-Anguiano, R.** (2020) Caracterización geofísica del subsuelo en la sub-cuenca Jamapa mediante radar de penetración terrestre y sísmica de refracción para la determinación de espesores del material de un ambiente igneo-glacial en el volcán pico de Orizaba, México, Tesis de licenciatura, BUAP.
- Lauer, W., Klaus, D.** (1975) Geocological investigations on the timberline of Pico de Orizaba Mexico. *Arctic and Alpine Research*, 315-330.
- Martínez-Báez, C.** (2020). Modelo 3D del glaciar Jamapa en el volcán Pico de Orizaba, México. Tesis de Licenciatura, Fac de Ciencias Químicas, UV
- Morales-Martínez, M.A., Welsh-Rodríguez, C.M., Ruelas-Monjardín, L.C., Weissling, B., Sieron, K., Ochoa-Martínez, C.A.** (2016). Afectaciones por posible asociación de eventos hidrometeorológicos y geológicos en los municipios de Calchualco y Coscomatepec, Veracruz. *Teoría y Praxis*, octubre, 31-49, Universidad de Quintana Roo Cozumel, México. E-ISSN: 1870-1582
- Palacios, D., y Vázquez-Selem, L.** (1996). Geomorphic Effects of the Retreat of Jamapa Glacier, Pico de Orizaba Volcano (Mexico). *Geografiska Annaler. Series A, Physical Geography*, 78(1), 19-34.
- Palacios, D., Parrilla, G., y Zamorano, J.J.** (1999). Paraglacial and postglacial debris flows on a Little Ice Age terminal moraine: Jamapa Glacier, Pico de Orizaba (Mexico). *Geomorphology*, 28(1-2), 95-118.
- Sieron, K., Weissling, B., Morales-Martínez, M.A., Teran S.** (2021) Reconstruction of the upper slope conditions of an extraordinary hydro-meteorological event along the Jamapa glacier drainage system, Citlaltépetl (Pico de Orizaba) volcano, Mexico. *Frontiers in Earth Sciences*. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.668266>