

vol. 4 núm. 1 2025



# GUÍA GEOLÓGICA DE EXCURSIÓN DE CAMPO (ASCENSO) AL VOLCÁN CITLALTÉPETL (PICO DE ORIZABA, RUTA CARA NORTE - GLACIAR DE JAMAPA)

# Alejandro Carrillo-Chávez<sup>1\*</sup>, Victor Soto<sup>2</sup>, Gerardo Carrasco-Núñez<sup>1</sup>, Lorenzo Vazquez-Selem<sup>3</sup>, Luisa Fernanda Rueda-Garzon<sup>1</sup> y Daniela Kristell Calvo-Ramos<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Geociencias, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Campus Juriquilla, Boulevard Juriquilla 3001, Juriquilla, C. P. 76230, Querétaro, Querétaro, México.

<sup>2</sup>Centro de Ciencias de la Tierra, Universidad Veracruzana, Circuito Gonzalo Aguirre Beltrán S/N, Col. Zona Universitaria, C.P. 91090. Xalapa, Veracruz, México.

<sup>3</sup>Instituto de Geografía, UNAM, Ciudad Universitaria, Alcaldía Coyoacán, C. P. 04510, Ciudad de México, México.

#### \*ambiente@geociencias.unam.mx; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3452-0576

#### RESUMEN

Una de las rutas de turismo de montaña más visitada en México es la de ascenso al volcán Citlaltépetl o Pico de Orizaba por su cara norte, Glaciar de Jamapa. En el presente trabajo se expone una breve descripción del registro geológico expresado en sus tipos de rocas y materiales volcánicos, su historia volcánica, los tres eventos de formación del cono volcánico, la cronología glaciar (historia de los glaciares evidenciada por depósitos y geoformas glaciares), los procesos paraglaciares actuales, como el deshielo y procesos periglaciares, y el impacto de las actividades industriales en las concentraciones de metales pesados y otros contaminantes potenciales contenidos en el hielo y nieve glaciar (glaciología química). El propósito de esta guía es hacer más aleccionadora y agradable la excursión de ascenso a la montaña a través del conocimiento de algunos datos geológico-geográficos importantes. Con esta base, el objetivo es invitar a todas las personas, experimentadas o sin experiencia en montañismo, a disfrutar y cuidar el entorno y a tener una idea clara de la geología y la geografía de este hermoso parque nacional.

Palabras clave: Citlaltépetl, Glaciar de Jamapa, cronología glaciar, glaciología física, glaciología química, excursión geológica de campo.

## ABSTRACT

One of Mexico's most visited mountain tourism routes is the ascent of the Citlaltépetl or Pico de Orizaba volcano on its north face, Glaciar de Jamapa. A brief description of the geological record is presented in terms of rock types and volcanic materials, volcanic history, three volcanic cone formation events, glacial chronology (glacial history as evidenced by glacial deposits and geoforms), current paraglacial processes, such as melting and periglacial processes, and the impact of industrial activities on the concentrations of heavy metals and other potential contaminants contained in glacial ice and snow (chemical glaciology). This guide aims to make the excursion up the mountain more enlightening and enjoyable by providing some important geological-geographical data. On this basis, the objective is to invite all people, experienced or inexperienced in mountaineering, to enjoy and take care of the environment and to have a clear idea of the geology and geography of this beautiful national park.

Keywords: Citlaltépetl, Jamapa Glacier, glacial chronology, physical glaciology, chemical glaciology, geological field trip.

Carrillo-Chávez, A., Soto, V., Carrasco-Núñez, G., Vazquez-Salem, L., Rueda-Garzón, L. F. y Calvo-Ramos, D. K. (2025). Guía geológica de excursión de campo (ascenso) al volcán Citlaltépetl (Pico de Orizaba, ruta cara norte - Glaciar de Jamapa). *Enseñanza y Comunicación de las Geociencias*, v. 4, núm. 1, p. 134-145. DOI: https://doi. org/10.22201/cgeo.29928087e.2025.4.1.81

# INTRODUCCIÓN

Estudios fundamentales revelan que las características abstractas del volcán Citlaltépetl (también conocido como el Pico de Orizaba, cuyo nombre proviene del náhuatl y significa "Montaña de la Estrella"), lo sitúan como la montaña más alta de México con 5636 metros sobre el nivel medio del mar (m s. n. m.) y la tercera en altura en Norteamérica. El Citlaltépetl es un estratovolcán activo con algunas manifestaciones térmicas menores y leve emisión de gases. Está ubicado en el sector oriental del Cinturón Volcánico Trans-Mexicano, provincia formada como resultado del choque oblicuo de la placa de Cocos (Océano Pacífico) por debajo de la placa de Norteamérica. Presenta una forma cónica bien desarrollada, aunque sus laderas muestran algunas irregularidades que testifican los restos de estructuras volcánicas ancestrales originadas tiempo atrás durante su evolución. Su historia geológica y eruptiva muestra un sistema volcánico dinámico influido por la actividad tectónica regional y complejos procesos magmáticos. Su altitud ha favorecido la acumulación de hielo glaciar desde el Último Máximo Glacial (UMG: aprox. hace unos 20,000 años) y en sus laderas existen evidencias de avances y retrocesos glaciares. El hielo glaciar es uno de los mejores medios para registrar las diferentes capas de hielo, cambios en el clima y cambios recientes en partículas aerosoles atmosféricas (polvo natural v/o contaminantes atmosféricos de origen antropogénico). En los últimos 10 años el Glaciar de Jamapa ha disminuido alarmantemente en su área y volumen de hielo glaciar, pero aún se observan algunos procesos periglaciares en la cercanía del glaciar que resultan muy interesantes.

En esta guía de campo de la ruta norte de ascenso al Citlaltépetl (Glaciar de Jamapa), se describen varias paradas en donde se pueden observar rocas y depósitos que atestiguan procesos volcánicos asociados a diferentes etapas que ha tenido el volcán, al registro de procesos de avance y retroceso glaciar y a procesos periglaciares. Asimismo, se proporciona información geoquímica de las concentraciones de metales pesados en nieve y hielo glaciar colectado durante dos décadas para estudios de geoquímica ambiental glaciar. Los objetivos de esta guía geológica son hacer más interesante el ascenso durante la caminata y escalada al Citlaltépetl al conocer datos sobre su historia volcánica, glaciar y ambiental, y contribuir en concientizar a las agencias de montañismo turístico, guías de montaña, montañistas independientes y turistas de una o varias ocasiones, a respetar, proteger, cuidar y amar a esta maravilla geológica-geográfica del Parque Nacional del Citlaltépetl.

#### Geología del Citlaltépetl

La evolución geológica del Citlaltépetl comprende tres etapas principales que revelan largos periodos de construcción y destrucción de la estructura volcánica que la integra (Carrasco-Núñez, 2000). La primera etapa inició hace 650 mil años y duró 400 mil años; consistió en la construcción del volcán ancestral Torrecillas (4800 m s. n. m., estructura visible en la cara sur frente al albergue Fausto González), dominada por erupciones efusivas de flujos de lava andesíticos y dacíticos, cuyos restos pueden identificarse en las laderas del sur del cono. Esta etapa termina con la catastrófica destrucción del edificio volcánico, cuyo colapso principal originó el emplazamiento de una avalancha de escombros dirigida hacia el oriente del volcán.

La segunda etapa consistió en la construcción de un nuevo cono sobre los remanentes del volcán Torrecillas, denominado Espolón de Oro de 5150 m s. n. m., en cara norte, hace aproximadamente 210 mil años. En esta etapa se presenta una alternancia de actividad efusiva de flujos de lava dacíticos y andesítico-basálticos, y explosiva de flujos piroclásticos que se distribuye en todas direcciones alrededor del cráter, de los cuales el afloramiento más prominente es el Espolón de Oro. Hace aproximadamente 16 mil años ocurrió el colapso sectorial del cono Espolón de Oro hacia las laderas orientales, originando un gran flujo de escombros-avalancha conocido como Teteltzingo (Carrasco-Núñez et al., 1993; Figueroa-García et al., 2021) que se movilizó por la planicie costera del golfo alcanzando una distancia de unos 110 km. El origen de este evento es muy peculiar, ya que está asociado a la presencia de hielo glacial y a un sistema hidrotermal activo durante el periodo de deglaciación del Pleistoceno tardío a nivel mundial.

La tercera etapa consistió en la construcción del actual cono Citlaltépetl, arriba de los restos de los conos previos de Torrecillas y Espolón de Oro. El cono actual ha presentado una alternancia de actividad muy importante tanto explosiva, con flujos piroclásticos y depósitos de caída, como efusiva, con lavas dacíticas que han dado lugar a su actual configuración. Previo al inicio de esta última etapa ocurrió el emplazamiento de varios domos en la periferia del volcán denominados Chichimeco, Colorado, Chichihuale, Tecomate y Sillatepec, actividad que hasta el Holoceno emitió lavas de composición riolítica y dacítica, incluyendo flujos de obsidiana (Hoskuldsson y Robin, 1993). Esos flujos fueron una de las fuentes más importantes de ese material en los tiempos de esplendor de Mesoamérica (Pastrana y Gómez-Rueda, 1988). La Figura 1 presenta el mapa geológico con la distribución de las rocas pertenecientes a las principales etapas de evolución del volcán Citlaltépetl (Carrasco-Núñez, 1993).

#### Historia eruptiva

La actividad reciente del Citlaltépetl incluye episodios muy explosivos combinados con actividad efusiva en tiempos históricos. Los principales eventos explosivos ocurrieron hace 13 mil años con la emisión de un flujo piroclástico de pómez conocidos también como ignimbritas hacia el oriente del volcán. Sin embargo, la actividad explosiva más importante ocurrió en el periodo de 8500 a 9000 mil años a.C. con la formación de múltiples columnas eruptivas de tipo pliniano, con alturas de entre 23 y 28 km, que generaron la depositación de numerosos flujos piroclásticos de pómez y escorias, y de caída de pómez, conocidas en conjunto como "Pómez Citlaltépetl" (Carrasco-Núñez y Rose, 1995; Rossotti et al., 2006). Otro de los eventos explosivos importantes ocurrió hace 4200 años, con el emplazamiento repetitivo de un domo dacítico en el cráter central del Citlaltépetl, cuyos colapsos gravitacionales generaron la formación de varios flujos piroclásticos de bloques y cenizas que se dirigieron principalmente hacia el sector occidental (alrededores del caserío de Ávalos, Puebla) y al sureste del cráter (La Perla, Veracruz), con explosiones discretas que dieron mayor movilidad a los flujos (Carrasco-Núñez, 1999).

La actividad más reciente del volcán consistió en flujos de lava de composición dacítica emitidos desde su cima en diferentes direcciones alrededor del cráter (Carrasco-Núñez, 1997). Existen reportes compilados y analizados por Crausaz (1993) que señalan que esa actividad ocurrió en tiempos históricos (1537, 1545, 1566 y 1613).



#### Cronología glaciar

El Citlaltépetl ha albergado glaciares durante miles de años que registran un importante archivo de los cambios climáticos de México. Su historia glaciar está estrechamente ligada a eventos climáticos globales, que incluyen el Último Máximo Glaciar (entre 22,000 y 18,000 años), las fluctuaciones climáticas del final del Pleistoceno (13,000 a 11,000 años) y del Holoceno (últimos 11,000 años), así como el reciente retroceso de los glaciares impulsado por el calentamiento global de los últimos 80 años. Por ser un volcán con gran actividad eruptiva en los últimos 20 mil años, buena parte de las evidencias de glaciaciones pasadas del Citlaltépetl ha quedado sepultada bajo flujos de lava y gruesas capas de depósitos piroclásticos. No obstante, existen evidencias visibles de fluctuaciones de los glaciares que se reseñan a continuación (Carrillo-Chávez *et al.*, 2024).

#### El Último Máximo Glacial

Con base en lo que ocurrió en el Último Máximo Glacial (UMG) en otros volcanes inactivos, como el Cofre de Perote ubicado 50 km al

Figura 1. Mapa geológico de la cima del volcán Citlaltépetl (modificado de Carrasco-Núñez (2000). Con color gris oscuro se muestra el material remanente del primer cono volcánico (Torrecillas), con línea gris discontinua se muestra material del segundo cono volcánico (Espolón de Oro), y con blanco y símbolos > en varias direcciones se muestra el material del cono volcánico actual (Ver texto en la sección de "Historia eruptiva" para detalles; r. indica río, C. indica cerro y b. indica basalto). Elaboración propia.

norte y el Iztaccíhuatl a 140 km al oeste (Vázquez Selem y Heine, 2011), sabemos que en el Citlaltépetl existieron grandes glaciares que descendieron por todos los valles hasta altitudes cercanas a los 3500 y los 3400 m s. n. m. y cubrieron la mayor parte de las laderas por encima de los 3800 m s. n. m. En esta fase las temperaturas globales eran entre 6 y 8 °C más frías que las actuales (Vázquez-Selem y Heine, 2011). Sin embargo, en el Citlaltépetl el vulcanismo posterior cubrió la mayor parte de las huellas dejadas por los glaciares del UMG. Por ello, los valles típicamente glaciares son profundos, con laderas escarpadas y con fondo abierto, así como las morrenas (depósitos de bloques de roca, grava, arena y arcilla transportados por el hielo y acumulados en sus bordes, donde el hielo se funde) sólo son claramente visibles en algunos sectores. Uno de los mejores casos es el valle de Piedra Pintada, que se encuentra 2 km al NE del poblado Miguel Hidalgo. La intensa actividad eruptiva del final del Pleistoceno y el Holoceno también cubrió casi todas las huellas de glaciares de los últimos 13,000 años, periodo en el cual las temperaturas globales fueron en ascenso y los glaciares en las montañas de México fueron progresivamente más pequeños.

#### La Pequeña Edad de Hielo

La Pequeña Edad del Hielo (PEH) es una fase fría que afectó al planeta entre los años 1300 y 1850 d. C. Este es el período más reciente de expansión significativa de los glaciares en buena parte del mundo, sobre todo en el hemisferio norte, con temperaturas entre 1.5 y 2° C por debajo de los valores de mediados del siglo XX (Vázquez-Selem y Heine, 2011). En el Citlaltépetl los glaciares probablemente alcanzaron su mayor extensión del Holoceno durante esta fase. Las morrenas del Citlaltépetl y las del Iztaccíhuatl son, de hecho, una de las mejores evidencias de la Pequeña Edad de Hielo en México y en las montañas tropicales del mundo. Se preservaron gracias a que en los últimos dos siglos no ha ocurrido actividad volcánica significativa que las oculte.

Por ello, pueden observarse claras morrenas de este periodo en las laderas noreste, norte y oeste del volcán. Los resultados de fechamientos por medio de líquenes sugieren que estas morrenas se formaron a mediados del siglo XVIII (Alcalá Reygosa y Vázquez Selem, 2018). Estas geoformas indican que los glaciares descendieron hasta una altitud promedio de 4520 m s. n. m. en los tres flancos mencionados. En el resto de las laderas, muy probablemente, también existieron glaciares, pero debido a las fuertes pendientes no se construyeron o preservaron morrenas. Además, como ocurre en las montañas situadas al norte del Ecuador, las laderas orientadas hacia el sur reciben más insolación, son más calientes y por ello es más difícil que ahí existan glaciares en comparación con sus contrapartes orientadas hacia el norte. De hecho, los glaciares existentes en el Citlaltépetl hacia 1958, de acuerdo con el inventario de Lorenzo (1964), se encontraban en las mismas orientaciones arriba mencionadas -aunque a mayor altitud que durante la PEH- y no existía ninguno en el flanco sur. A mediados del siglo XIX, cuando las temperaturas globales empezaron a aumentar, los glaciares iniciaron su retroceso moderno.

#### Retroceso de los glaciares en los siglos XX y XXI

Desde fines del siglo XX se ha presentado el retroceso glaciar más rápido de la historia del Citlaltépetl, impulsado principalmente por el cambio climático inducido por el hombre.

- Décadas de 1950 a 1970: el Citlaltépetl aún tenía varios glaciares activos, incluidos el Glaciar Norte, el Glaciar Jamapa y el Glaciar Oriental. En 1958 la altitud media del frente de las 8 lenguas glaciares cartografiadas por Lorenzo (1964) era de 4920 m s. n. m., siendo la lengua de Jamapa la que llegaba más abajo (4640 m s. n. m.; línea blanca discontinua en la Figura 2).
- Década de 1980-1990: los glaciares comenzaron a reducirse rápidamente, perdiendo hasta el 50 % de su volumen, debido al aumento de las temperaturas y a la disminución de las nevadas.
- Década de 2000-2020: El retroceso de los glaciares se aceleró drásticamente. Los estudios realizados por Delgado-Granados y colaboradores (2007), estiman que más del 70 % del hielo de los glaciares se ha perdido desde mediados del siglo XX.

#### Proyecciones presentes y futuras

En el 2024, sólo quedaban pequeños restos del glaciar, básicamente en la cara norte del Citlaltépetl. Soto y colaboradores (2024 y 2025) calcularon su superficie en 0.37 km<sup>2</sup>. Se estima que los últimos glaciares del Citlaltépetl podrían desaparecer por completo en los próximos 10 ó 20 años si continúan las tendencias actuales de calentamiento. Esta pérdida tendrá importantes consecuencias hidrológicas y ecológicas que afectarán al suministro local de agua y a la biodiversidad.

#### Dinámica glaciar

Los glaciares de montaña son sistemas dinámicos formados por la acumulación y el movimiento del hielo bajo la influencia de la gravedad. Estos glaciares se forman cuando la acumulación de nieve es mayor que la fusión durante muchos años, comprimiendo la nieve en hielo glaciar denso. Una vez que un glaciar alcanza un espesor crítico, comienza a fluir ladera abajo debido a su propio peso. Este movimiento se produce a través de dos mecanismos principales: la deformación interna, en la que los cristales de hielo se desplazan lentamente y se deslizan unos sobre otros, y el deslizamiento basal, en el que el agua de deshielo en la base del glaciar reduce la fricción, permitiendo que el glaciar se desplace sobre la roca subyacente. La velocidad del movimiento glaciar varía en función de la pendiente, el grosor del hielo, el contenido de humedad y la temperatura (Soto y Cervantes, 2023).

A medida que se desplazan, los glaciares encuentran obstáculos y condiciones de tensión variables que provocan la formación de grietas y cuevas de hielo. Las grietas son fracturas profundas y abiertas en la superficie del glaciar que se forman cuando la tensión supera la resistencia a la tracción del hielo. Normalmente se desarrollan en tres tipos principales: grietas transversales, que se forman perpendicularmente al flujo del glaciar debido al estiramiento; grietas longitudinales, que corren paralelas al flujo debido a la extensión lateral y grietas radiales, que aparecen cerca de curvas o pendientes pronunciadas donde el hielo se expande hacia fuera. Las grietas pueden ser peligrosas, ya que pueden estar ocultas bajo puentes de nieve, lo que supone un riesgo para montañeros e investigadores.

Las cuevas de hielo se forman cuando el agua de deshielo, el calor geotérmico o las corrientes de aire caliente excavan túneles y cámaras dentro o debajo de un glaciar. Las cuevas de hielo generadas por el agua de deshielo suelen desarrollarse en verano, cuando el agua superficial se filtra por las grietas y vuelve a emerger en la base del glaciar, creando pasadizos que pueden expandirse con el tiempo. Las cuevas de hielo geotérmicas, que se encuentran en regiones volcánicas, son el resultado del calor que derrite el glaciar desde abajo, formando cavernas cerca de los respiraderos volcánicos. Además, las cuevas de hielo talladas por el viento pueden desarrollarse cuando las corrientes de aire caliente erosionan capas de hielo más blandas. Estas cuevas pueden evolucionar rápidamente, influidas por los ciclos estacionales de fusión y recongelación (Carrillo-Chávez y Soto, 2024)

El estudio de la dinámica de los glaciares, la generación de las grietas y las cuevas de hielo es crucial para comprender el cambio climático, ya que el retroceso de los glaciares permite comprender las tendencias de la temperatura global, así como en gran medida notar la diferencia temporal del régimen de precipitación. Además, las cuevas de hielo sirven como indicadores de los procesos de fusión, mientras que los patrones de las grietas ayudan a los investigadores a evaluar la estabilidad de los glaciares y los peligros potenciales. La vigilancia de estas características glaciares es esencial para la seguridad del montañismo, la hidrología y la climatología. A medida que aumenta la temperatura global, los glaciares de montaña se adelgazan y retroceden, alterando los paisajes y los recursos hídricos. Comprender esta dinámica ayuda a los científicos a predecir los cambios futuros y su impacto en los ecosistemas y las sociedades humanas.

#### Dinámica Post-Glaciar (geomorfología paraglaciar y periglaciar)

A medida que el glaciar del Citlaltépetl retrocede va dejando tras de sí un entorno inestable desde el punto de vista climático, el cual se caracteriza por constantes e intensos ciclos de congelamiento y descongelamiento superficial; al mismo tiempo, el congelamiento del agua y su fusión dan origen a la mecánica de gelifracción de las paredes y del basamento rocoso. En la vertiente norte del volcán, particularmente por arriba de 4200 m s. n. m., es común el desprendimiento de bloques de roca de distintos tamaños que se van acumulando en las laderas. A medida que se asciende en altitud esta dinámica es más intensa, por lo que a la altura de ~4800 m s. n. m., alrededor de la zona conocida como "Los Nidos" (parada 3), existen bloques de roca del tamaño de un auto compacto. Una explicación más detallada de esta mecánica en el lugar es abordada por Soto y colaboradores (2024 y 2025).

El proceso mecánico de destrucción de los flujos de lava existentes es de alta importancia en temas de seguridad para los montañistas. La conocida como "Barranca de Jamapa" se ha visto sumamente alterada por esta dinámica; de manera frecuente se altera la ruta de ascenso a la cima debido al desprendimiento de grandes porciones de sus paredes, obligando a los senderistas a que modifiquen el camino al pie de las paredes que existen a su mano derecha. Esto a su vez ocasiona un mayor riesgo por el potencial de caída de rocas desde las alturas. Es por esta razón que, en el ámbito de los montañistas que conocen la ruta, esta franja es quizá la más difícil en cuanto a los riesgos existentes por caída de rocas.

Existen otros procesos periglaciares no peligrosos, pero que al final modifican también el relieve de la montaña. El proceso de levantamiento por helada está caracterizado por el congelamiento de la humedad condensada e infiltrada a nivel de subsuperficie (algunos centímetros de profundidad). El hielo acicular que se forma, con orientación vertical, crece a medida que se alimenta de la humedad atmosférica depositada en los materiales no consolidados como cenizas y lapilli. El desarrollo y crecimiento de agujas verticales de hielo levantan la capa superior del suelo durante las horas nocturnas y se funden una vez que la radiación solar incide sobre ellas. Debido a lo que se conoce como drying ratio (tasa de secamiento del aire), este fenómeno ocurre esencialmente entre 4000 y 4800 m s. n. m., ya que por arriba de esta altitud la humedad atmosférica nocturna es casi imperceptible. El trabajo que detalla la distribución de humedad en la montaña es abordado por Soto y Cervantes (2023).

El último elemento presente en el sistema paraglaciar y periglaciar del CitlaltépetI lo representa el permafrost, o suelo permanentemente congelado, que se encuentra de manera aislada en la vertiente norte de la montaña por encima de los 4800 m s. n. m. Estudios recientes señalan que su origen se encuentra en el congelamiento de la capa rocosa del basamento durante el tiempo que el glaciar se encontraba por encima de sí. También por el sepultamiento de remanentes de hielo glaciario y por el recongelamiento del agua procedente de la fusión de la nieve y del hielo. En su mayoría, el permafrost del CitlaltépetI es de tipo

seco, aunque algunas porciones de hielo glaciario fósil favorecen la presencia esporádica de núcleos de hielo interno. Para comprender a mayor detalle la distribución del permafrost en el Citlaltépetl se recomienda la investigación de Soto-Molina y Delgado-Granados (2020).

Por último, el elemento criosférico vigente en la montaña está representado por la nieve estacional, la cual se presenta mayormente durante el verano y otoño, con duración de un par de días a unas semanas, y que posee un espesor máximo general de 30 cm. La mayoría de las nevadas ocurren por arriba de los 4600 m s. n. m., aunque eventualmente se presentan desde los 4000 m s. n. m., especialmente durante el invierno. No obstante, ha habido casos, aunque ya no tan recurrentes en la actualidad, en que se ha presentado precipitación nivosa a partir de los 3000 m s. n. m.; como referencia de ubicación, la comunidad de Miguel Hidalgo, Puebla, algunas ocasiones se ha visto afectada por esas nevadas, aunque solo de un par de centímetros de espesor y que únicamente se presentan ante el arribo de densas masas de aire polar, dando origen a algunos de los más intensos sistemas frontales del invierno. Este tema en el volcán es abordado con mayor profundidad por Soto-Molina y Delgado-Granados (2020) y por Soto y colaboradores (2024).

#### Geoquímica ambiental glaciar

La nieve se precipita en la zona de acumulación junto con partículas sólidas micrométricas (aerosoles atmosféricos) y gases que se acumulan en poros de la nieve. Una vez precipitada, la nieve experimenta muchos cambios físicos como alteraciones en su estructura cristalina nieve-hielo, transformándose en hielo de varios tipos. Este proceso forma parte de una especialidad dentro de la glaciología física y mineralogía glaciar, que no trataremos más en este artículo, pero que puede leerse en artículos especializados.

Entre los aerosoles atmosféricos precipitados en la nieve y acumulados en nieve-hielo glaciar tenemos: 1) Na, Cl, Mg, K, básicamente de fuente de brisa marina; 2) SiO<sub>2</sub>, Ca, Fe, Al, Mg y muchos más elementos y compuestos del polvo atmosférico; 3) C, Fe, Cd, Cr, Zn, Pb, Hg y algunos otros metales debido a incendios forestales; 4) SiO<sub>2</sub>, Ca, Mg, Fe y muchos compuestos y elementos más derivados de ceniza volcánica de eventos locales, regionales y hasta mundiales, ya que las grandes explosiones volcánicas arrojan ceniza volcánica micrométrica a alturas de 10 a 20 km, y puede dar vuelta a todo el planeta en unas cuantas semanas; 5) Fe, Ni, Pt y elementos del grupo del platino, Cr, Cd, Zn, Ag, Au, y algunos otros metales derivados de impactos de meteoritos; 6) todos los elementos y compuestos derivados de la actividad humana (industria, combustión de hidrocarburos, incendios, agricultura, pesticidas, fertilizantes, etc.); 7) gases atmosféricos (O2, CO2, CH4, SO2, NO2, CFC, etc.) que quedan atrapados en poros del hielo durante la transformación cristalina de nieve a hielo; 8) elementos cosmogénicos (isótopos cosmogénicos atmosféricos los cuales se forman debido a impacto de rayos cósmicos con átomos de gases atmosféricos, ejemplo: 14C, <sup>10</sup>Be, <sup>36</sup>Cl, y otros más); y 9) recientemente se han detectado microplásticos en nieve de alta montaña. También se puede determinar la temperatura de precipitación (invierno o verano) con base a isótopos estables en agua (<sup>2</sup>H y <sup>18</sup>O). A la fecha (2025), existen técnicas de isotopía estable de metales que nos permiten diferenciar fuentes de metales en el registro glaciar (natural o antropogénico; Carrillo-Chavez y colaboradores, 2023).

# GUÍA DE RASGOS GEOLÓGICOS-GEOGRÁFICOS DE LA RUTA DE ASCENSO CARA NORTE

La ruta norte, que asciende a través del Glaciar de Jamapa, ofrece a los escaladores una oportunidad única de observar diversas características geológicas y glaciológicas. El vehículo 4x4 que sube al albergue de Piedra Grande (parada 2) puede tomar dos rutas desde el poblado de Miguel Hidalgo (3470 m s. n. m., el poblado de mayor altitud en México): la Ruta Curva de las Lajas o la Ruta del Río. Ambas rutas van por brecha entre el hermoso bosque de pinos por unos 10 km que se recorren en una hora aproximadamente. Si se sigue la Ruta del Río, aproximadamente 2 km adelante de Miguel Hidalgo, el camino encuentra el valle de Piedra Pintada, visible a la izquierda, a 3700 m s. n. m. y lo sigue por su borde sur.

Durante el UMG, hace unos 20 mil años, este valle estuvo modelado por un glaciar que tenía un espesor aproximado de 120 m y llegaba hasta la cota de 3500 m s. n. m. (Vázquez-Selem y Heine, 2011). Como es característico de los valles modelados por glaciares, el perfil tiene una forma de "U", es decir, laderas escarpadas y fondo amplio. El camino continúa su ascenso y cruza el fondo del valle en la cota de 3740 m s. n. m. De ahí en adelante los cortes de camino exponen sobre todo capas de piroclastos como ceniza, bloques y piedra pómez de varios metros de espesor formados durante las erupciones explosivas del Citlaltépetl en el Holoceno. La Ruta de las Lajas sube por lavas antiguas del volcán, cubiertas por las mismas capas de piroclastos del Holoceno.

#### Parada 1. Entronque de rutas 4x4, Curva de las Lajas y Ruta del Río (19°04'04"N; 97°16' 24"W; altitud: 4093 m s. n. m.; Figura 2)

Ambas rutas se unen un poco arriba del límite superior del bosque, que se encuentra a 4000 m s. n. m., aunque con árboles aislados que sobreviven a 4100 m s. n. m. Este bosque es de los más altos en las montañas del mundo. El punto de unión de ambas rutas está a poco más de 1 km antes de llegar al albergue de Piedra Grande. Entre las paradas 1 y 2, la terracería asciende sobre una pendiente formada por una gruesa capa de depósitos piroclásticos del Holoceno que incluyen abundante piedra pómez.

Desde el sitio de la parada 1 se puede observar una hermosa panorámica de toda la ruta a la cumbre del Citlaltépetl por el Glaciar de Jamapa (Figura 2, ver detalles en el pie de figura). Como se mencionó anteriormente, el Citlaltépetl es un estratovolcán, lo que significa que se formó mediante erupciones de lava y materiales piroclásticos. La ruta norte expone capas de flujos de lava andesítica y dacítica. A la derecha se observa la roca del Farallón (Espolón de Oro, 5120 m s. n. m.), remanente de la segunda etapa explosiva del volcán con su característica estructura estratificada, capas intercaladas de lavas y material piroclástico, con diferentes colores en la Figura 2. Al centro de esta misma Figura 2 se aprecia una gran colada de lava (dacita, en línea azul irregular) que baja desde los 5000 m s. n. m. y hasta los 4400 m s. n. m. y cubre parcialmente coladas de lava más antiguas (se aprecian a la izquierda). La línea roja indica, de manera general, la ruta desde el albergue Piedra Grande (parada 2), la salida de El Laberinto (parada 5), sigue por el glaciar y hasta la cumbre (parada 8). La línea amarilla representa la



Figura 2. Parada 1. Vista general de la cara norte del Citlaltépetl y toda la ruta de ascenso del Glaciar de Jamapa. Los números rojos indican la parada que se describe en el texto; la línea roja indica la ruta a seguir; se aprecia la roca del Espolón de Oro y sus diferentes capas (estratos) de diferente roca volcánica; la línea azul indica la extensión de la colada de lava; la línea amarilla indica la extensión del glaciar durante la Pequeña Era Glaciar; y la línea blanca punteada indica la extensión aproximada del glaciar en 1960-1970. Elaboración propia.

extensión del glaciar durante la Pequeña Era Glaciar y la línea blanca punteada indica el límite del glaciar en 1960.

# Parada 2. Campo Base (Albergue Piedra Grande; 19°03'28"N; 97°16'11"W; altitud: 4260 m s. n. m.; Figura 3)

Alrededor del Albergue se observan enormes rocas de varios metros de altura conocidos en glaciología como bloques erráticos glaciares. Estos son bloques de roca arrancados por el glaciar de las paredes de la montaña a alturas mayores, y transportados por el glaciar en su movimiento hacia abajo del valle. Cuando el frente del glaciar se funde y retrocede deja en el terreno esparcidos estos bloques que ponen de manifiesto el movimiento histórico del glaciar. En algunas otras localidades se pueden observar bloques alineados que indican el frente del antiguo glaciar. Otra evidencia de que sean bloques erráticos es que algunos son de diferente roca volcánica.

Al observar hacia la montaña, del lado izquierdo se tiene la cañada de Jamapa (lado derecho de la Figura 3), la cual se alimenta del deshielo glaciar y es el punto de inicio del Río Jamapa, que desemboca al Golfo de México en Boca del Río, al sur del Puerto de Veracruz. Como se mencionó anteriormente, durante el Pleistoceno y durante el máximo glaciar, hace unos 20 mil años, el glaciar llegaba un poco más abajo del Albergue.

La ruta de escalada empieza sobre un acueducto de concreto parcialmente destruido. Al final del concreto, y cuando la pendiente cambia, toda la escalada hasta la parada 3 (Primer Nido) se desarrolla sobre sobre depósitos de morrenas.

#### Parada 3: Primer Nido (19°03'06"N; 97°16'15"W; altitud: 4540 m s. n. m.; Figura 4)

A unos 20 ó 30 metros del cambio de pendiente de la ruta se suaviza la pendiente y se tiene el paraje conocido como el Primer Nido, donde se pueden poner tiendas de campaña. Avanzando otros 20 m, se pueden observar grandes rocas planas y alienadas a la ruta; estas rocas no son bloques erráticos, son parte de la roca firme de la montaña (*bed rock*, en inglés). Deteniéndose y observando detalladamente se pueden ver marcas de líneas paralelas sobre las rocas (Figura 4, ver pie de figura para detalles). Estas marcas inglés). Deteniéndose y observando detalladamente se pueden ver marcas de líneas paralelas sobre las rocas (Figura 4, ver pie de figura para detalles). Estas marcas se conocen como estrías glaciares y se forman como producto del lento movimiento del glaciar con toneladas de presión y algunas rocas en el glaciar que "lijan" la roca firme de la montaña.

Como dato interesante, cuando la roca de montaña queda expuesta a la atmósfera porque el glaciar, que antes tenía decenas de metros de espesor y la cubría, se ha retraído, las rocas reciben radiación solar, pero más importante, reciben radiación cósmica (rayos cósmicos de alta energía que tienen su origen en explosiones de supernovas). Cuando una partícula cósmica se impacta con un núcleo de un elemento que compone a la roca, se dan reacciones nucleares y se forman elementos nuevos como el berilo de masa 10 (<sup>10</sup>Be) y el cloro de masa 36 (<sup>36</sup>Cl). Estos isótopos nuevos se llaman cosmogénicos y empiezan a acumularse en la roca. Después de miles (millones) de años se acumulan cantidades que podemos determinar con instrumentación muy especializada como el espectrómetro de masas con acelerador de particulas (accelerator mass spectrometry (AMS)). Conociendo la tasa de formación de <sup>10</sup>Be y <sup>36</sup>Cl podemos determinar el tiempo que lleva expuesta esa roca debido a un retroceso glaciar. Este es uno de los métodos modernos para datar retrocesos glaciares (cronología glaciar).

La ruta sigue por depósitos de morrenas en forma de lomas longitudinales. A la izquierda se pasa por enormes bloques de basaltos que forman parte de la colada de lava (línea azul, Figura 2). Estos son bloques caídos de la colada y algunos son erráticos glaciares. Por este valle se observa a la izquierda la colada de lava y a la derecha los diferentes estratos de rocas y material volcánico de tonos grises, amarillos, rojizos del evento explosivo del Farallón. A la derecha de la ruta se observan pequeños barrancos en el material de la morrena que ha sido removido por la acción del viento y el agua. En 1970, la lengua del glaciar llegaba un poco más abajo de la entrada del laberinto. Actualmente, el glaciar inicia a los 5120 m s. n. m. aproximadamente, evidenciando el dramático retroceso y fusión glaciar en los últimos 50 años. En unos 350 m se llega a la entrada a El Laberinto.



Figura 3. Parada 2. Albergue Piedra Grande. Se aprecian grandes bloques de diferentes tipos de roca que corresponden a bloques erráticos depositados por el retroceso glaciar de la Pequeña Era Glaciar. Elaboración propia.



Figura 4. Parada 3. Primer Nido. Afloramientos de roca volcánica (*bed rock*) con estrías glaciares (flechas azules delgadas) que indican la dirección del flujo del hielo, D. Elaboración propia.



Figura 5. Parada 4. La foto corresponde a una sección de El Laberinto, a unos 50 metros adelante de la entrada. Es notable el cambio de pendiente y la escalada se lleva a cabo en terreno mixto, roca y a veces hielo y/o nieve. Esta sección de la ruta entra de lleno en la colada de lava (línea azul, Figura 2). Elaboración propia.

# Parada 4. Entrada a El Laberinto (19°03'00"N; 97°16'13"W; altitud: 4607 m s. n. m.; Figura 5)

Esta sección de la ruta va sobre la colada de lava (línea azul en la Figura 2). En esta sección, la escalada se vuelve más técnica y peligrosa (Figura 5). Hace unos 50 años (1975) el glaciar cubría esta parte con una decena de metros de hielo. Hace unos 30 años, en 1990 aproximadamente, se empezó a perder el hielo glaciar y dejó una ruta mixta de hielo, roca y nieve. En los últimos 10 años, esta sección de la ruta se quedó sin hielo. Sin embargo, gracias a las nevadas de temporada y el escurrimiento del glaciar, en algunas ocasiones puede observarse una hermosa cascada de agua del lado izquierdo de la ruta actual, y en las madrugadas algunas hermosas cascadas congeladas. Se pueden presentar zonas con humedad congeladas en la madrugada que pueden ser muy resbaladizas y peligrosas. Es fácil salirse de la ruta marcada con montículos de piedra (patitos), por eso recibe su nombre de El Laberinto.

Al salir de esta sección se aprecia toda la ruta en el glaciar. La ruta actual pasa por un bloque de unos dos metros de longitud por un metro y medio de altura balanceado sobre su base de unos 50 cm o menos. Este es un bloque errático que quedó balanceado al fundirse el hielo a su alrededor. Entre los guías de montaña, esta roca se conoce como "la roca de El Coyote y el Correcaminos", en alusión a la famosa serie de dibujos animados y que mostraba paisajes desérticos con rocas balanceadas.

#### Parada 5: salida de El Laberinto (19°02'36"N; 97°16'00"W; altitud: 4903 m s. n. m.; Figura 6 y Figura 7).

Existe un marcado cambio de pendiente al salir de El Laberinto, se hace mucho más suave. A la izquierda se extiende una amplia zona con pendiente de unos 15 grados que corresponde a depósitos de morrena. Del lado derecho se aprecia en todo su esplendor el Espolón de Oro y su estructura estratificada (Figura 6). Como se mencionó anteriormente, esta roca vertical con estructura estratificada corresponde a los remanentes de la segunda etapa eruptiva del Citlaltépetl, que formó y destruyó el cono del Espolón de Oro. La ruta continúa directa al glaciar con pendientes de unos 30 a 40 grados y sobre pequeñas lomas longitudinales correspondientes a morrenas con material caótico (rocas de varios tamaños, arena, arcillas y pequeñas barrancas producto del escurrimiento de agua, ver Figura 7). Si se desvía unos 200 metros hacia la derecha, pasando una loma de rocas que conectan con el Espolón de Oro, se llega al Campo Plazoleta, un hermoso lugar para acampar y pasar la noche a 5100 m s. n. m.

# Parada 6: terminal del Glaciar Jamapa - 5.100 metros (Campo Plazoleta; 19°02'24"N; 97°16'16"W; altitud: 5100 m s. n. m.; Figura 8)

El Campo Plazoleta es un plano en forma ovalada de unos 190 m de longitud y unos 40 m de ancho. Está entre el Espolón de Oro y el cono actual del Citlaltépetl y el Glaciar Jamapa. En invierno la temperatura mínima puede ser de unos -10° C y no es raro tener vientos de 80 km/h. Sin embargo, las noches son espectaculares si



Figura 6. Parada 5. Salida de El Laberinto donde la pendiente se hace mucho más suave y escalada es menos técnica pero la respiración es más difícil por la altura. Se aprecian claramente las diferentes capas de roca volcánica del Espolón de Oro. Elaboración propia.



Figura 7. Parada 5. Salida del Laberinto, mismo sitio que Figura 6 pero viendo hacia la montaña. Se aprecia en todo su esplendor al mermado Glaciar de Jamapa. La ruta va ahora sobre depósitos caóticos de morrena en forma de pequeñas lomas longitudinales. Elaboración propia.



Figura 8. Parada 6. Campo Plazoleta, un sitio ideal para acampar para aquellos que deciden hacer el ascenso al Citlaltépetl en dos días. Se acampa justo frente a la base del glaciar. Durante el día se puede colectar agua de deshielo y en la noche todo se congela. Elaboración propia.



Figura 9. Parada 7. Mitad del glaciar. Aquí se han perforado núcleos de hielo para estudios de geoquímica ambiental glaciar. Se aprecia la roca del Espolón de Oro a la izquierda y la Sierra de Veracruz al fondo. Elaboración propia.

uno se abriga muy bien y se aventura a estar unos 15 minutos afuera del campamento observando las estrellas en una noche despejada. La Figura 8 muestra un campamento en el Campo Plazoleta y el frente del Glaciar de Jamapa. Este sitio se usa como campo base para las expediciones de varios días de los grupos de glaciología de varias universidades.

### Parada 7: ruta en el Glaciar Jamapa (de 5100 a 5636 m s. n. m.; Figura 9)

La ruta entra a su sección más técnica de escalada (se requiere de cordadas, botas de hielo, crampones y piolet). Si se inicia el ascenso desde el albergue de Piedra Grande, el recorrido dura entre 4 y 5 horas (a paso promedio) para llegar a la base del glaciar. En el glaciar, el recorrido es cercano a 1 km con pendiente promedio de 45°. Desde esa altura es impresionante ver los poblados y las zonas agrícolas. En días despejados se observan el Popocatépetl, el Iztaccíhuatl, la Malinche, el Cofre de Perote y la Sierra de Veracruz. Estas 4 ó 5 horas pudieran parecer monótonas, pero aparte del paisaje, se puede observar un hermoso amanecer y la sombra del Citlaltépetl hacia el oeste (un cono perfecto). Cabe mencionar que en el glaciar se han desarrollado varias investigaciones sobre glaciología física (dinámica-movimiento del glaciar) y geoquímica de muestras de hielo y nieve para determinar contaminantes atmosféricos. La Figura 9 muestra el trabajo realizado para extraer núcleos de hielo somero (1.5 m de profundidad) para estudios de geoquímica ambiental glaciar por parte del equipo del Instituto de Geociencias de la UNAM en Juriquilla.

El hielo glaciar está altamente agrietado en ciertas áreas. Las grietas se forman en respuesta a las variaciones de tensión en el glaciar. Son especialmente frecuentes cerca de las pendientes más pronunciadas del glaciar, donde el hielo se estira y se fractura. En algunas ocasiones, las grietas más grandes y profundas pueden tener flujo de agua que las amplía y puede formar temporalmente pequeñas cuevas de hielo con hermosas estalactitas de hielo.

#### Parada 8. Cumbre y cráter del Citlaltépetl 5.636 metros (19°01'49"N; 97°16'11"W; altitud: 5636 m s. n. m.; Figuras 10 y 11).

Dependiendo de la ruta elegida, se puede llegar al borde del cráter en el labio medio (5530 m s. n. m.) o directo a la cima (labio superior del cráter a 5636 m s. n. m.). En Norteamérica sólo hay dos montañas más altas que el Citlaltépetl, Monte Denali (6190 m s. n. m., en la Cordillera de Alaska), y el Monte Logan (5959 m s. n. m., en el Yukon provincia al norte de Canadá y colindante con Alaska). En algunos tramos de la cumbre, en la travesía labio medio a labio superior-cumbre, puede haber "penitentes" (formaciones de hielo altas en forma de cuchilla), sobre todo en zonas expuestas a luz solar intensa y condiciones secas. Estas estructuras se forman debido a la sublimación, en la que el hielo se transforma directamente en vapor.

En días despejados, el horizonte se extiende hasta el Nevado de Toluca (más allá de Malinche, Popocatépetl e Iztaccíhuatl) con una vista de 360 grados de unos 300 km a la redonda. En días muy despejados, sin nubes ni humedad atmosférica, es posible visualizar la franja azul del Golfo de México, a solo unos 110 km de distancia.

El cráter es prácticamente circular con cerca de 350 m de diámetro y una profundidad de unos 300 m desde el labio superior (cumbre). El cráter está inclinado hacia el oeste. La Figura 11 muestra una panorámica desde la cumbre hacia el labio inferior al oriente. Se aprecian muy bien los estratos que indican los diferentes periodos eruptivos del edificio volcánico moderno y parte de la Sierra de Orizaba. La nubosidad obstruye la vista al Golfo de México.



Figura 10. Parada 8. Cráter del Citlaltépetl viendo hacia el este. Elaboración propia



Figura 11. Parada 8. Vista hacia el suroeste, se aprecia el volcán Sierra Negra y el Gran Telescopio Milimétrico en la cima. Elaboración propia.

Hacia el suroeste se puede apreciar el volcán Sierra Negra. Esta montaña alberga en su cumbre el Gran Telescopio Milimétrico Alfonso Serrano (GTM), el mayor radiotelescopio del mundo en su rango de frecuencia. Con sus 4580 m s. n. m., se trata de la quinta cima más alta del país. No obstante, por encontrarse adyacente al Citlaltépetl (5636 m s. n. m.), la Sierra Negra es frecuentemente pasada por alto y excluida de guías mexicanas de montañismo. En la planicie entre el Citlaltépetl y la Sierra Negra, y a 4090 m s. n. m., se encuentra el observatorio de rayos gamma High Altitude Water Cherenkov, el cual utiliza tanques de agua en oscuridad para detectar el efecto luminoso Cherenkov, que se da cuando un rayo gamma impacta una molécula de agua. Estos rayos gamma provienen de explosiones de supernovas (High Altitude Water Cherenkov Gamma-Ray Observatory, s. f.).

# CONCLUSIONES

La ruta norte del Citlaltépetl a través del Glaciar Jamapa ofrece a los escaladores una vista excepcional y la oportunidad de observar características geológicas (procesos volcánicos y erosivos) y glaciológicas (avances y retrocesos del glaciar) muy interesantes. El continuo retroceso del glaciar es un fuerte recordatorio del impacto del cambio climático en los entornos de gran altitud y de lo frágil de este sistema ante la influencia humana. Para los escaladores, no sólo suponen un reto, sino que también añaden belleza, aprecio e importancia científica durante el ascenso.

#### Recomendaciones de equipo y seguridad

- Equipo estándar de montañismo y escalada: crampones, piolets, arneses, cascos.
- Herramientas de campo para geología: martillos para roca, lentes de mano, unidades GPS, brújulas, cuadernos para observaciones de campo.
- Equipo de seguridad: botiquines de primeros auxilios, balizas de avalancha (para cruzar glaciares) y ropa adecuada resistente a la intemperie.
- Condiciones meteorológicas: asegurarse de que se realizan comprobaciones meteorológicas antes de la ascensión para evitar condiciones severas.
- Aclimatación: los participantes deben estar adecuadamente aclimatados para evitar el mal de altura.
- Protocolos de seguridad: hacer hincapié en la seguridad, especialmente en zonas con roca volcánica suelta o pendientes glaciares pronunciadas.
- Monitoreo: recordar que por tratarse de un volcán activo, existen sistemas de monitoreo permanente que permiten conocer su actividad, por lo que es recomendable contactar a las autoridades de Protección Civil para saber cual es su estado actual

## AGRADECIMIENTOS

Este artículo se realizó gracias a los recursos del proyecto UNAM-PAPIIT IN110421 (Alejandro Carrillo Chávez; proyecto 2021-2023) "Concentraciones y fraccionamiento isotópico de Zn y Hg en agua de lluvia y hielo glaciar de alta montaña: procesos geoquímicos, fuentes y trayectorias de metales en el centro de México", y al proyecto CONAHCyT CBF2023-2024-1068 (Alejandro Carrillo Chávez; proyecto 2024-2026) "Geoquímica isotópica estable de metales pesados (Zn, Cu, Hg): aplicaciones ambientales, exploración minera y ciencias de la salud (geoquímica médica)".

## REFERENCIAS

- Alcalá-Reygosa, J. y Vázquez-Selem, L. (2018). Primeros datos cronológicos del glaciarismo durante la Pequeña Edad del Hielo en el Pico de Orizaba (México) [Conferencia]. XI Reunión Nacional de Geomorfología. Sociedad Mexicana de Geomorfología, Oaxaca, Oaxaca, México.
- Carrasco-Núñez, G., Vallance, J. W. y Rose, W. I. (1993). A voluminous avalanche-induced lahar from Citlaltépetl volcano, Mexico: Implications for hazard assessment. Journal of Volcanology and Geothermal Research. *59*(1–2), p.35-46. https://doi.org/10.1016/0377-0273(93)90076-4
- Carrasco-Núñez, G. y Rose, W. I. (1995). Eruption of a major Holocene pyroclastic flow at Citlaltepetl volcano (Pico Orizaba), México, 8.5-9.0 ka. Journal of Vulcanology and Geothermal Research. 69(3-4), p. 197-215. <u>https://doi.org/10.1016/0377-0273(95)00023-2</u>
- Carrasco-Núñez, G. (1997). Lava flow growth inferred from morphometric parameters: a case study of Citlaltépetl volcano, Mexico. Geological Magazine. *134*(2), 151-162. <u>https://doi.org/10.1017/S0016756897006614</u>
- Carrasco-Núñez, G. (1999). Holocene block-and-ash flows from summit dome activity of Citlaltépetl volcano, Eastern Mexico, Journal of Volcanology and Geothermal Research. *88*(1–2), 47-66. <u>https://doi.org/10.1016/S0377-0273(98)00110-3</u>
- Carrasco-Nuñez, G. (2000). Structure and proximal stratigraphy of Citlaltépetl Volcano (Pico de Orizaba), Mexico. En H. Delgado-Granados, G. J. Aguirre-Díaz y J. M. Stock (Eds). Cenozoic tectonics and volcanism of Mexico. Geological Society of America (GSA). <u>https://doi.org/10.1130/0-8137-2334-5.247</u>
- Carrillo-Chávez, A., Delgado-Granados, H., Vázquez-Selem, L., Ontiveros-González, G., Cortes-Ramos, J., Soto, V., Muñoz-Torres, C. y Calvo-Ramos, D. K. (2024). Glaciological studies in Mexico, 60 years of academic work: A summary. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 41(1), 53-65. <u>https://doi.org/10.22201/ cgeo.20072902e.2024.1.1706</u>
- Carrillo-Chavez A., Calvo-Ramos D. K., Muñoz-Torres C. y García R. (2023). Geoquímica glaciar: Registro climático ambiental que se pierde. Enseñanza y Comunicación de las Geociencias, 2(1). 10-15. <u>https://doi.org/10.22201/cgeo.29928087e.2023.2.1.3</u>
- Carrillo-Chávez, A. y Soto, V. (2024). Cuevas de hielo en glaciar del Pico de Orizaba; maravillas efímeras producto de los procesos de la dinámica y fusión del glaciar. Revista Maya de Geociencias, Abril, p. 9-15. <u>https://revistamaya.com/?page\_id=73</u>
- Crausaz, W. (1993). Pico de Orizaba, or, Citlaltépetl: Geology, archaeology, history, natural history and mountaineering routes: with additional material on the high Mexican volcanoes. Geopress International.
- Delgado-Granados, H., Julio-Miranda, P., Huggel, C., Ortega del Valle, S. y Alatorre-Ibargüengoitia, M. A. (2007). Chronicle of a death foretold: Extinction of the small-size tropical glaciers of Popocatépetl volcano (México): Global and Planetary Change, 56(1-2), 13-22. <u>https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2006.07.010</u>

- Figueroa-García, J. E., Franco-Ramos, O., Bodoque, J. M., Ballesteros-Cánovas, J. A. y Vázquez-Selem, L. (2021). Long-term lahar reconstruction in Jamapa Gorge, Pico de Orizaba (Mexico) based on botanical evidence and numerical modelling. Landslides. 18, 3381-3392. https://doi.org/10.1007/s10346-021-01716-3
- High Altitude Water Cherenkov Gamma-Ray Observatory (s. f.) Water Cherenkov Tanks. <u>https://www.hawc-observatory.org/observatory/tanks.php</u>
- Hoskuldsson, A. y Robin, C. (1993) Late Pleistocene to Holocene eruptive activity of Pico de Orizaba, Eastern Mexico. Bulletin of Volcanology, 55, 571-587. https://doi.org/10.1007/BF00301810
- Lorenzo, J. L. (1964). Los glaciares de México. Monografías del Instituto de Geofísica. Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Pastrana, A. y Gómez-Rueda, H. (1988). Las Minas de obsidiana de Pico de Orizaba, Ver. Arqueología, *3*, 7-28. <u>https://www.revistas.</u> <u>inah.gob.mx/index.php/arqueologia/article/view/13487</u>
- Rossotti, A., Carrasco-Núñez, G., Rosi, M. y Di Muro, A. (2006). Eruptive dynamics of the "Citlaltépetl pumice" at Citlaltépetl volcano, eastern Mexico. Journal of volcanology and geothermal research, 158(3-4), 401-429. <u>https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2006.07.008</u>
- Soto, V. y Cervantes, J. (2023). The influence of mountainous relief on the vertical gradient of precipitation and pluvial zoning in the central slope of the Gulf of Mexico. Singapore Journal of Tropical Geography, 44(1). p. 112-129. <u>https://doi.org/10.1111/ sjtg.12467</u>
- Soto, V., Welsh-Rodríguez., C. M. y Yoshikawa, K. y Delgado-Granados, H. (2024). Freeze-thaw cycles and associated geomorphology in a post-glacial environment: Current glacial, paraglacial, periglacial and proglacial scenarios at Pico de Orizaba volcano, Mexico. Journal of Mountain Science, 21, 1954–1977.<u>https:// doi.org/10.1007/s11629-024-8662-4</u>
- Soto, V., Welsh-Rodriguez, C. M., Torres-Orozco, R., Cordoba-Montiel, F. y Delgado-Granados, H. (2025). Retraction status of "Glaciar Norte" of Pico de Orizaba, México. Journal of South American Earth Sciences. 151. <u>https://doi.org/10.1016/j. jsames.2024.105267</u>
- Soto-Molina, V. H. y Delgado-Granados, H. (2020) Distribution and current status of permafrost in the highest volcano in North America: Citlaltepetl (Pico de Orizaba), Mexico. Geofísica Internacional, *59*(1), 39–53. <u>https://doi.org/10.22201/</u> igeof.00167169p.2020.59.1.2079
- Vázquez-Selem, L. y Heine, K. (2011). Late Quaternary glaciation in Mexico. En: J. Ehlers, P.L. Gibbard, P.D. Hughes (Eds.), Quaternary Glaciations - Extent and Chronology. A closer look. Developments in Quaternary Science. Elsevier, Amsterdam, pp. 849-861.

Manuscrito recibido: 8 de abril de 2025 Manuscrito corregido recibido: 19 de mayo de 2025 Manuscrito aceptado: 30 de mayo de 2025