

## La imposibilidad de pronosticar la extinción de un glaciar de montaña

### *The impossibility of forecasting the extinction of a mountain glacier*

Víctor Soto\*

Recibido: 10/07/2024. Aceptado: 29/07/2024. Publicado: 1/08/2024

**Resumen.** La criosfera, en particular la parte correspondiente a los glaciares de montaña, ha sido un claro indicador del cambio climático. En los últimos años se han documentado extinciones de glaciares en todo el mundo. Al menos dos factores han sido identificados como las principales causas de su retroceso y desaparición: la temperatura y las precipitaciones. Sin embargo, son también otros elementos, y las diferentes combinaciones entre ellos, los que determinan la evolución espacio-temporal de estos cuerpos de hielo dinámicos. La extinción de los glaciares, y sus impactos ambientales, ha preocupado a diferentes sectores de la población; esto ha provocado que entusiastas ambientalistas se aventuren a pronosticar el tiempo de vida que les queda a estos glaciares, sobre todo cuando hay decenas o cientos de miles de personas que dependen de su caudal de agua. Este artículo describe los diversos factores que impulsan la evolución de los glaciares y demuestra que, a diferencia de otros elementos ecosistémicos, los glaciares no tienen una evolución lineal. Por ello, la glaciología no pretende «pronosticar», sino comprender la compleja interacción entre factores climáticos y geomorfológicos.

**Palabras clave:** pronóstico, retroceso glaciar, cambio climático, glaciares de montaña, clima y geomorfología de montaña.

**Abstract.** The cryosphere, particularly the part corresponding to mountain glaciers, has been a clear indicator of climate change. In recent years, glacier extinctions have been documented throughout the world. At least two factors have been identified as the main causes of their retreat and disappearance: temperature and precipitation. However, it is also other elements, and the different combinations among them, that determine the spatio-temporal evolution of these dynamic ice bodies. Glacier extinction, and its environmental impacts, has worried different sectors of the population; this has caused enthusiastic environmentalists to venture into forecasting the remaining life span of these glaciers, especially when there are tens or hundreds of thousands of people who depend on their water flow. This paper describes the diverse factors that drive glacier evolution, and shows that unlike other ecosystemic elements, glaciers do not have a linear evolution. For this reason, glaciology does not seek to “forecast”, but to understand the complex interaction between climatic and geomorphological factors.

**Keywords:** forecasting, glacial retreat, climate change, mountain glaciers, climate and geomorphology of mountain.

---

\* Centro de Ciencias de la Tierra, Universidad Veracruzana. Edificio B Facultad de Instrumentación Electrónica, Circuito Gonzalo Aguirre Beltrán s/n, Zona Universitaria, 91090, Xalapa, Veracruz, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1633-0752>. Email: [visoto@uv.mx](mailto:visoto@uv.mx)

## INTRODUCCIÓN

El inicio del periodo Holoceno, hace ~12 mil años (ma), marca el punto de inflexión entre el final del Último Máximo Glaciar (UMG) y una nueva etapa interglaciar. A partir de ese momento la temperatura media del planeta se ha incrementado continuamente, y seguramente seguirá haciéndolo hacia valores cada vez mayores. Aunado al cambio natural del clima en el planeta, las actividades antropogénicas, concretamente las iniciadas a mediados del siglo XVIII con la llamada Revolución Industrial, han forzado e intensificado la tendencia creciente de los valores de temperatura, con anomalías que se reflejan en la variación en tiempo y espacio de las temporadas de lluvias y sequías, así como en la amplitud creciente entre los valores máximos y mínimos de la variable térmica, entre otras. Son diversos los efectos que estas condiciones cambiantes del clima han ocasionado en todos los ecosistemas terrestres; algunos de estos efectos son más notorios que otros, pero, en mayor o menor medida, promueven el desequilibrio ecosistémico. Uno de los componentes terrestres más importantes está representado por la criósfera, que entre otros servicios ecosistémicos ayuda a regular el clima terrestre.

Dentro del contexto espacial, tanto la cobertura nival, el hielo marino, el permafrost y los glaciares han reducido su superficie desde el final del UMG, y existen claras evidencias que señalan que esta reducción se ha intensificado aún más por los efectos del calentamiento global antropogénico. Es precisamente por los cambios evidentes de cobertura que ha sufrido la criósfera con el tiempo que se emplea como un valioso indicador de cambio climático a escala mundial, y para territorios de zonas intertropicales, los cambios espacio-temporales de los glaciares de montaña son un recurso de gran referencia. No obstante, entender la interacción entre los factores ambientales y los glaciares de montaña es una tarea por demás compleja; en este trabajo veremos algunas de las razones.

## CARACTERÍSTICAS ÚNICAS DE LOS GLACIARES

El último medio millón de años (0.5 Ma), solo para hablar de una etapa relativamente reciente en términos geológicos, se ha caracterizado por registrar al menos cinco episodios de avance y retroceso de los hielos polares y de montaña a lo largo de la Tierra. Cada etapa de glaciación ha perdurado en promedio 100 ma, seguida de una recuperación térmica que ha durado entre 10 y 12 ma; esto deja ver que, del tiempo que ha demorado la superficie terrestre en enfriarse, su calentamiento ha ocurrido en una décima de ese tiempo aproximadamente. Esto último ha sido constante, cíclico y un tanto regular en la historia de nuestro planeta (Figura 1). Desde un punto de vista estadístico, lo anterior indicaría que, en teoría, el planeta debería estar cerca de un punto de cambio de dirección hacia temperaturas progresivamente más frías, para entrar durante los siguientes 100 ma, en un nuevo episodio de avance glaciar. No obstante, dadas las condiciones ambientales que imperan a consecuencia de las actividades antropogénicas, es difícil pensar en una nueva etapa de enfriamiento global; contrariamente, la tendencia deja ver un escalamiento a valores de temperatura cada vez mayores, con serias consecuencias ambientales, de las cuales, muchas son palpables y seguramente serán más intensas en el corto y mediano plazo.

Durante las últimas décadas ha sido comunes las alertas sobre las anomalías climáticas en todas las latitudes del planeta. Una de las principales consecuencias atribuidas al aumento continuo de la temperatura media global ha sido el continuo retroceso de la cobertura glacial, tanto de los polos como de las altas montañas; a este respecto, Hugonnet *et al.* (2021) señalan una pérdida a nivel planetario de  $266.6 \times 10^9$  t de hielo glaciar entre los años 2000 y 2020. De manera particular, y debido a la latitud en la que se encuentran, los sistemas montañosos de la región de los Alpes y de los Andes han manifestado una mayor evidencia de pérdida de su cobertura glacial (Vuille *et al.*, 2008); no obstante, resulta necesario señalar que, en esencia, esto es consecuencia de las características geomorfológicas y climáticas

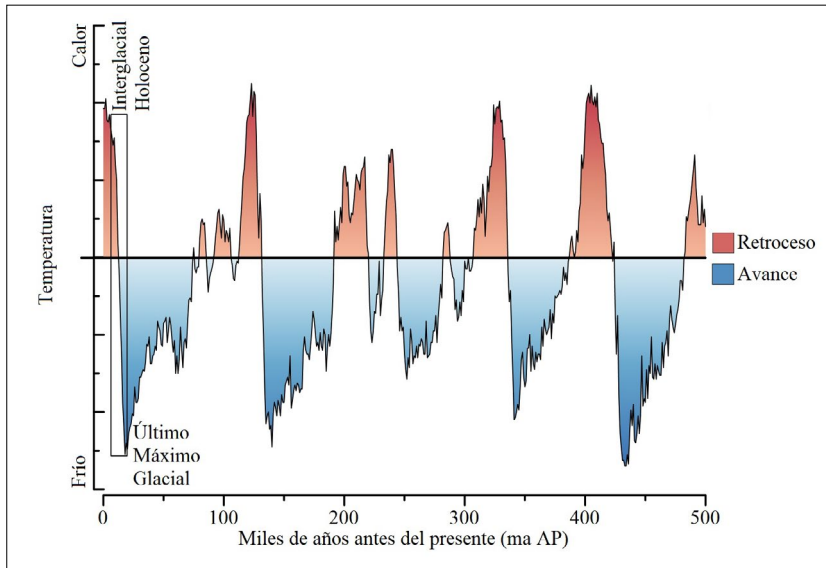


Figura 1. Periodos de avance y retroceso glaciar en los últimos 500 ma. Fuente: elaboración propia.

en las que se han formado estos glaciares, ya que los cuerpos de hielo de montañas de latitudes medias, y más aún los de latitudes bajas, poseen un régimen térmico cercano al punto de fusión, por lo que son considerados como glaciares “cálidos”, situación que los vuelve aún más sensibles antes las anomalías climáticas vigentes. Contrariamente, los glaciares circumpolares, con una temperatura media superficial muy inferior a  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , son considerados como glaciares “fríos”, lo que les permite contar con cierto grado de estabilidad en comparación, al menos desde la perspectiva térmica (Cuffey y Petterson, 2010). Por el origen de su formación y por el régimen térmico que los caracteriza, no es difícil pensar que existen diferencias importantes en la dinámica de los glaciares de regiones circumpolares con respecto a los de alta montaña; por estas razones, y para fines específicos de este trabajo, se considera oportuno referirse únicamente a los glaciares de montañas de baja latitud.

Un régimen cercano al punto de fusión ha sido determinante para que los glaciares de zonas intertropicales (como los de la cordillera de los Andes, incluidos los mexicanos) registren cambios notorios en la altitud de su frente glaciar, en su superficie y en su espesor, como respuesta ante el incremento gradual de la temperatura del aire (Zagorodnov *et al.*, 2006). Sin embargo, si bien el aumento

de la temperatura es un elemento ambiental determinante, existen otros factores que inciden en la evolución espacio-temporal de cada glaciar de montaña. El conjunto de estas características determina el comportamiento particular de cada uno de los glaciares del planeta; por esta razón, se puede señalar que, si bien todos los glaciares comparten algunos elementos en común, sus características y dinámica propias los vuelven a la vez muy distintos entre sí.

Para entender mejor las propiedades únicas que determinan la dinámica de cada glaciar intertropical es necesario señalar los componentes que intervienen en su génesis y evolución; para esto existen parámetros y procesos que deben ser considerados de manera individual y al mismo tiempo de forma conjunta con el resto de los factores. En principio, es necesario abordar esta parte en dos principales vertientes: la geomorfológica y la climatológica.

### LA GEOMORFOLOGÍA, FACTOR DETERMINANTE PARA EL TIPO Y LA DINÁMICA GLACIAR

Desde el punto de vista geomorfológico, los glaciares tropicales se localizan a grandes alturas, comúnmente en montañas con más de 5000 msnm.

La orogenia de estas montañas puede ser de tipo tectónico o volcánico; para el caso de la zona andina, su proximidad al Cinturón de Fuego determina que la mayoría de los glaciares de esta vasta región hayan sido formados en edificios volcánicos activos o extintos, aunque algunos de ellos, como el caso del cerro Aconcagua (6960 msnm) sean de origen tectónico. La relevancia de un glaciar formado en la superficie de un volcán radica en la transferencia de calor geotérmico hacia el hielo basal. Durante la vida de un glaciar volcánico puede experimentar distintos episodios de incremento o disminución de actividad al interior del volcán que lo alberga, aunque no se trate propiamente de etapas eruptivas. El hecho de tratarse de un volcán activo, o al menos en etapa de reposo, supone cierta tasa de transferencia de calor hacia la base del glaciar, ocasionando fusión por valores de temperatura positivos; sobre todo si se considera el umbral de temperatura de un glaciar “cálido”. Como es sabido, hoy en día la vulcanología no permite anticipar las etapas de transferencia de energía geotérmica al hielo glaciar, ni mucho menos su magnitud. Un ejemplo claro, aunque un tanto extremo, ocurrió con la extinción del glaciar Ventorrillo del volcán Popocatepetl, cuya actividad eruptiva, intensificada a partir del año 1994, hizo notar que la principal causa que terminó por extinguir sus hielos permanentes fue el alto calor geotérmico transferido hacia la base del glaciar (Julio-Miranda *et al.*, 2008).

Por otro lado, el sitio de generación de un glaciar determina su forma y a la vez es factor importante de su dinámica. Comúnmente cualquier depresión en alta montaña puede ser favorable para la acumulación de nieve y su transformación en hielo glaciar. Las cuencas semicirculares que están rodeadas por paredes de roca, como en el caso de los glaciares de circo, favorecen la acumulación de nieve y la preservación del hielo, ya que las paredes impiden la pérdida de masa por reptación; al mismo tiempo, estas paredes les brindan protección ante el viento y más aún les aportan valiosas horas de sombra al día, lo que limita el proceso de sublimación, uno de los principales causantes de pérdida de masa glaciar en zonas cercanas al ecuador. En contraste,

los glaciares formados como campos de hielo no poseen paredes que los protejan como en el caso de los glaciares de circo, y están más expuestos a la insolación y al viento principalmente, volviéndolos aún más susceptibles (Soto *et al.*, 2023a).

Adicionalmente, el relieve y la pendiente del basamento donde se ha formado un glaciar es determinante para la propia dinámica del cuerpo de hielo. Un lecho rocoso homogéneo y con pendiente pronunciada y continua resulta benéfico para el flujo constante de hielo desde la zona de acumulación hasta la zona de ablación; bajo estas condiciones, por encima del terreno la velocidad de reptación del hielo habrá de ser mucho mayor en comparación con un glaciar formado por encima de un terreno heterogéneo, rugoso y de menor pendiente; esto se debe a que una mayor rugosidad de la superficie ocasiona más fricción en la parte inferior del glaciar, propiciando una mayor diferencia en la velocidad de flujo del hielo entre la parte superior y el fondo del glaciar. Una de las principales consecuencias del flujo diferencial de hielo es la aparición de fracturas perpendiculares a la línea de flujo, las cuales pueden alcanzar la base, propiciando la fragmentación y la posible pérdida de masa por desprendimiento de bloques (*ice calving*).

El espesor de un glaciar rige el grado de densidad del hielo y, a su vez, de su viscosidad; al mismo tiempo es determinante para la velocidad de flujo. En glaciares de varias decenas o algunos cientos de metros de espesor, el nivel de densidad por compactación es mayor, pero paralelamente, la presión ocasionada por el peso de la columna de hielo da origen a la fusión del hielo del fondo por presión (Cuffey y Petterson, 2010); el agua procedente de esta fusión actúa como lubricante entre el hielo y la roca del fondo, facilitando la dinámica de flujo hacia la zona de ablación. Es entendible, por lo tanto, que las propiedades de espesor, densidad, temperatura y viscosidad de un glaciar para un punto específico (x, y) son distintas en todo momento; estas características físicas habrán de tener diferente comportamiento de cara a las distintas condiciones de los elementos atmosféricos con los que interactúan, condicionando, en conjunto, un grado de evolución también variable.

## EL CLIMA COMO CONDICIONANTE DE LA GÉNESIS Y LA EVOLUCIÓN GLACIAR

Las condiciones del clima inciden de distinta manera en los sistemas de alta montaña. El contenido de humedad en el aire, su temperatura y la presión atmosférica rigen el tamaño y la forma de los cristales de nieve (Furukawa y Wettlaufer, 2007) y, por lo tanto, de su posible transformación en nieve granular (neviza) y en hielo sólido. Otro factor determinante en la permanencia de la capa de nieve está dado por la temporada y hora de ocurrencia de las nevadas. Comúnmente, en la zona intertropical son frecuentes las temporadas de nevadas durante los meses más cálidos del año, favorecidas por el arribo de masas de aire cálido y húmedo que se condensa y precipita por el forzamiento del relieve. Para el caso particular de México, las nevadas en las altas montañas se presentan entre los meses de junio y octubre; esta situación representa una limitante para la transformación en hielo, ya que la nieve no dura más de un par de días en la superficie por la rápida recuperación térmica que ocurre tras cada evento de nevada (Soto y Delgado, 2024). Otro factor importante que altera la acumulación de nieve fresca lo representa el viento. El arribo de vientos anabáticos o catabáticos por arriba de los 5,000 msnm llegan a superar velocidades mayores a 70 km/h de manera frecuente. Estos vientos se encargan de remover la nieve nueva y depositarla muchas veces en sitios alejados del glaciar; por lo tanto, independientemente del factor térmico durante y después de cada nevada, el viento representa una variable aleatoria que condiciona la permanencia de nieve fresca, e impide su posible transformación en hielo glaciar.

En caso de perdurar algunas semanas, o meses, la nieve ejerce un efecto aislante entre la atmósfera y el hielo glaciar. Las condiciones de temperatura por debajo de una capa de nieve igual o mayor a 30 cm determinan una temperatura constante de 0 °C en la superficie glaciar (Soto y Delgado, 2024), protegiéndolo tanto de la fluctuación térmica diurna, como de los efectos de la insolación. Al mismo tiempo, limita el paso de energía calórica hacia la capa activa, dentro de los primeros metros subsuperficiales de hielo (Zagorodnov *et al.*, 2006).

Durante los meses del verano, la sublimación del hielo y nieve ocurre como respuesta a la gran tasa de insolación que se presenta a grandes alturas, la cual puede llegar a ser tan alta como la tasa de evaporación del agua en estado líquido. Además de la protección aislante de la nieve, la presencia de cobertura nubosa limita la tasa de sublimación del hielo; sin embargo, la presencia de nubes por encima de las cimas, como ya se mencionó, está determinada por el arribo de masas de aire ascendente, ocasionando que las nubes permanezcan sobre la capa de nieve y hielo, con duración que va desde unos minutos hasta algunos días.

El desplazamiento o estancamiento del viento en sistemas montañosos también depende de la orografía. Las depresiones rodeadas por paredes de roca, y las sombras orográficas que estas brindan, favorecen el estancamiento de masas de aire en un solo sitio, incluso durante varios días; las condiciones físicas del aire, más frío o cálido que el del entorno, ocasionan la existencia de microclimas en áreas muy específicas que difieren dramáticamente entre sitios adyacentes. Como referencia, y de acuerdo con Soto y Delgado (2020), es la existencia de estos microclimas los que determinan la presencia de permafrost esporádico de alta montaña. Estas propiedades térmicas del aire influyen en la nieve y hielo del lugar, determinando su rápida fusión o preservación.

Otro factor importante está representado por las partículas transportadas por el viento. Las cenizas volcánicas, el polvo y partículas procedentes de la combustión son frecuentemente depositados en la superficie glaciar. Esto trae consigo una disminución del albedo del hielo y al mismo tiempo favorece el almacenamiento de energía en la capa de partículas, transfiriéndola a los primeros centímetros de hielo y nieve, situación que refuerza la fusión del hielo superficial.

A escala más regional, las distintas fases de ENSO (el Niño o la Niña), han sido determinantes para el régimen de precipitación de las altas montañas del país. Soto *et al.*, (2023b) señalan que el régimen de precipitación difiere significativamente entre las montañas del centro de México como consecuencia de las fases positiva y negativa del ENSO; por lo que las nevadas son mayores, tanto en frecuencia como

en volumen, durante la fase positiva. Adicionalmente, la continentalidad es un factor más que está estrechamente relacionado con el ENSO y con la aportación de humedad oceánica al aire, y por lo tanto, incide también en el régimen de precipitación.

Como puede observarse, la conjugación de los diversos factores que intervienen en la dinámica de un glaciar intertropical provoca que la interacción entre todos sus elementos resulte más que compleja, y al mismo tiempo ocasiona que se creen distintas combinaciones mecánicas. Es por esta razón que cada glaciar posee una dinámica espacio-temporal única, la cual varía incluso entre glaciares de una misma montaña. Debido a que la magnitud de influencia de cada componente varía entre un instante y otro, la respuesta del glaciar es también distinta en cada momento; por lo tanto, los cambios tanto en volumen de hielo, así como en la cobertura glaciar no asumen un comportamiento regular y predecible. Es debido a las razones anteriores que, para caracterizar cualquier parámetro de un glaciar, es necesario estimarlo considerando la masa de hielo en estado estático (Cuffey y Petterson, 2010; Soto *et al.*, 2019); es decir, eliminando toda interacción y dinámica a la que está sujeto, ya que de lo contrario, las estimaciones solo serían válidas para un momento dado, volviéndose distintas al día siguiente, o incluso, horas más tarde. Es por esto que, a diferencia de otras disciplinas, la glaciología no busca “pronosticar” la evolución de un glaciar; sino que su principal labor es la de caracterizar la interacción de todos los elementos que en ella intervienen, con la intención de comprender y justificar, en la mayor medida de lo posible, el grado de evolución de un cuerpo de hielo dinámico.

## EL CASO ESPECÍFICO DEL GLACIAR DEL PICO DE ORIZABA

Desde 1958, año en que se realizara el primer inventario de glaciares en México (Lorenzo, 1964), los glaciares del Iztaccíhuatl (5220 msnm), Popocatepetl (5500 msnm) y Citlaltépetl (5610 msnm) han variado negativamente en su cobertura hasta el día de hoy. Debido a la actividad eruptiva del

Popocatepetl, y por la menor altitud del Iztaccíhuatl, en la actualidad el último glaciar del país está albergado en la vertiente norte del también conocido como Pico de Orizaba; el llamado “Glaciar Norte” o “Glaciar Jamapa” se localiza por arriba de los 5000 msnm, formado a manera de campo de hielo. Se han realizado diversos estudios sobre las condiciones actuales de su superficie y de los factores climáticos que predominan en su entorno, lo que ha permitido entender en cierta medida cómo ha evolucionado con el tiempo este cuerpo de hielo. Soto *et al.* (2019) han estimado la temperatura superficial e interna del glaciar, corroborando lo anteriormente señalado en cuanto a su proximidad al punto de fusión. En su más reciente trabajo, Soto (2023) señala una pérdida del 23% de su superficie durante los últimos cinco años, al mismo tiempo determinó una cobertura glaciar de 0.46 km<sup>2</sup>; inclusive, se ha notado que esta extensión se ha ido reduciendo aún más hasta el día de hoy. De acuerdo con el autor, es posible que, adicionalmente a los factores climatológicos que inciden en el glaciar, la disminución o desaparición de su zona de acumulación sea la principal causa del acelerado retroceso que ha mostrado en los últimos años.

Adicionalmente, debido a la más reciente etapa eruptiva ocurrida durante el siglo XVII, el Pico de Orizaba es considerado un volcán activo en fase de reposo; prueba de ello es que actualmente existen evidencias de fumarolas en las cercanías a su cima. Esta situación sugiere la posible transferencia de calor geotérmico a la base del glaciar, lo que hace suponer que el hielo esté siendo afectado tanto a nivel de superficie como desde su base. Por lo tanto, y como consecuencia de las condiciones climatológicas, geomorfológicas, así como vulcanológicas, es probable que las características físicas del glaciar sean muy heterogéneas y variables a lo largo del cuerpo de hielo, siendo en ocasiones más o menos susceptible ante los patrones del clima, con distintos niveles de balance energético, de contenido de agua líquida, con variación en su viscosidad y en la velocidad de flujo, experimentando distintas tasas de transferencia de hielo desde la región de acumulación (en caso de existir aún) hacia la zona de ablación.



Para brindar una idea de las condiciones en que se encuentra, la Figura 2 muestra el estado más reciente del glaciar.

Recientemente algunos ambientalistas entusiastas se han aventurado a señalar la cantidad de años que le restan de vida al último glaciar del país; sin embargo, como hemos visto, esta labor de “pronóstico” puede resultar quizá un tanto pretenciosa, y no deja de ser más que especulativa. En todo caso, de cumplirse estas conjeturas, no serían más que un resultado coincidente. Lo verdaderamente im-

portante del caso es que, independientemente del tiempo que le reste de vida al glaciar, es imperativo comprender la magnitud de su evolución mediante el estudio de los parámetros que la han provocado. La importancia de esta tarea radica en que, si el glaciar del Pico de Orizaba se extingue en cinco, diez o más años, es necesario dejar los precedentes climatológicos y geomorfológicos que lo propicien. Esto resulta de gran valor para el ámbito de la evolución del clima del país, y ayuda al conocimiento de la transformación del clima y del paisaje de la

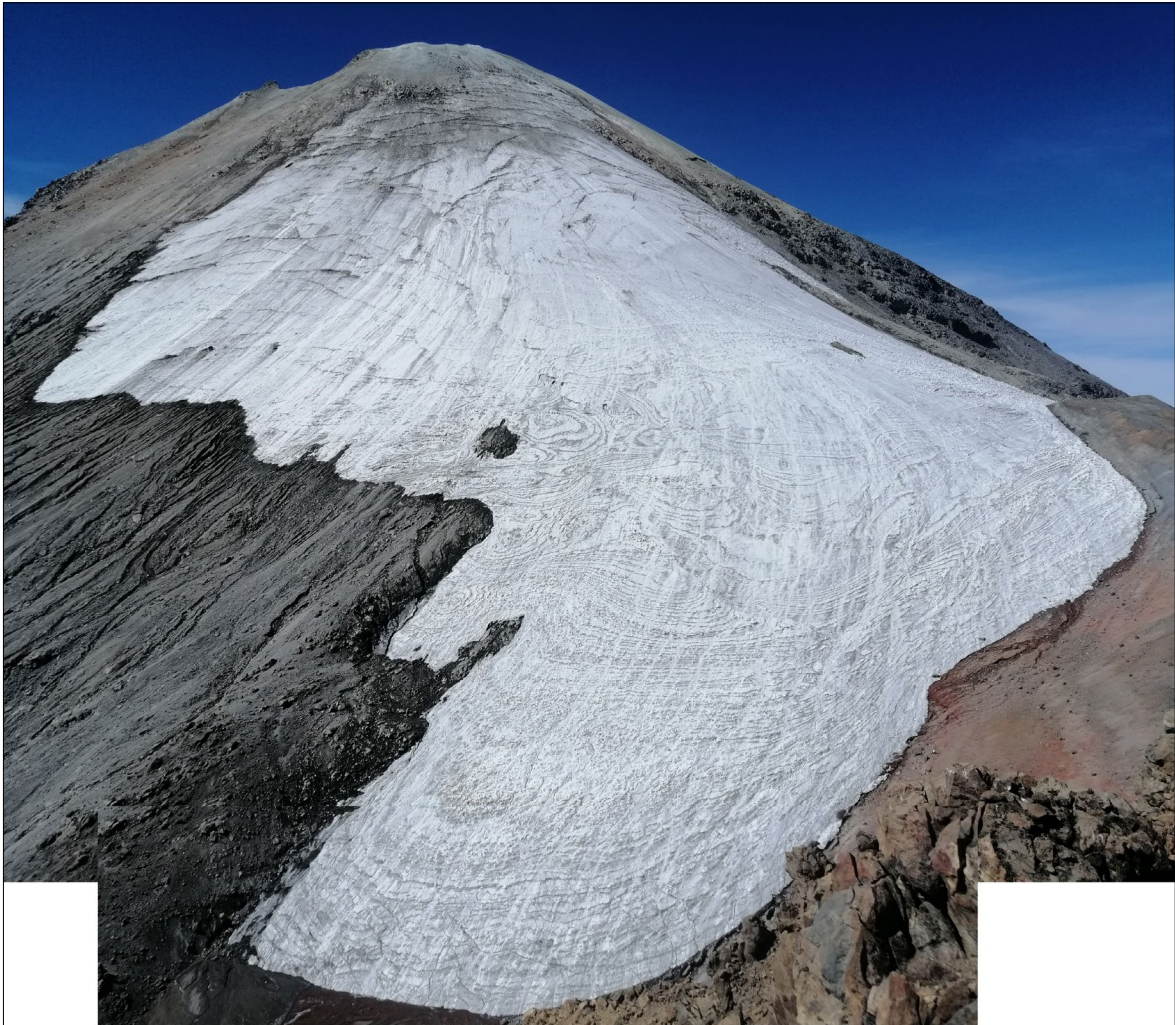


Figura 2. Imagen compuesta de dos fotografías digitales del estado actual del Glaciar del Pico de Orizaba. Fuente: Samael Oliver, tomadas el 15 de junio de 2024 desde la cima del “Sarcófago”.

región intertropical del planeta.

En el contexto de la glaciología y de la climatología generales, la labor de monitorear la evolución de los hielos polares y de alta montaña es de medular importancia, debido a que durante décadas han sido uno de los principales indicadores de cambio climático; ya que justamente estos cambios en las normales climatológicas a través del tiempo han venido a generar, consecuentemente, una mayor heterogeneidad en el clima de muchas regiones, incluidos los de los sistemas de alta montaña, alterando el equilibrio ecosistémico de los elementos y especies que albergan; entre ellos los glaciares tropicales.

## REFERENCIAS

- Cuffey, K. M. y Paterson, W. S. B. (2010). *The physics of glaciers*. Academic Press.
- Furukawa, Y. y Wettlaufer, J. S. (2007). Snow and ice crystals. *Physics today*, 60(12), 70-71. <https://doi.org/10.1063/1.2825081>
- Hugonnet, R., McNabb, R., Berthier, E., Menounos, B., Nuth, C., Girod, L., ... y Käab, A. (2021). Accelerated global glacier mass loss in the early twenty-first century. *Nature*, 592(7856), 726-731. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03436-z>
- Julio-Miranda, P., Delgado-Granados, H., Huggel, C. y Käab, A. (2008). Impact of the eruptive activity on glacier evolution at Popocatepetl Volcano (México) during 1994–2004. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 170(1-2), 86-98. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2007.09.011>
- Lorenzo, J. L. (1964). *Los glaciares de México*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Soto, V., Granados, H. D. y González, G. O. (2019). Estimación de la temperatura basal del “Glaciar Norte” del volcán Citlaltépetl, México. Modelo para determinar la presencia de permafrost subglaciar. *Estudios Geográficos*, 80(287), e019-e019. <https://doi.org/10.3989/estgeogr.201936.016>
- Soto, V. y Delgado, H. (2020). Distribution and current status of permafrost in the highest volcano in North America: Citlaltépetl (Pico de Orizaba), Mexico. *Geofísica internacional*, 59(1), 39-53. <https://doi.org/10.22201/igeof.00167169p.2020.59.1.2079>
- Soto, V. (2023). Bedrock outcropping in the accumulation zone of the largest glacier in Mexico (Glaciar Norte of Citlaltépetl), as evidence of a possible accelerated extinction. *Journal of Mountain Science*, 20(2), 338-354. <https://doi.org/10.1007/s11629-021-7216-2>
- Soto, V. y Delgado, H. (2024). Occurrence and characteristics of snowfall on the highest mountain of Mexico (Citlaltépetl volcano) through the ground's surface temperature. *Atmósfera*, 38. <https://doi.org/10.20937/atm.53204>
- Soto, V., Granados, D. H., Welsh, C. M. y Yoshikawa, K. (2023a). Glacial reconstruction and periglacial dynamics at the end of Late Pleistocene on the surface of Cofre de Perote volcano, México: a climatological retrospective. *Journal of Mountain Science*, 20(9). <https://doi.org/10.1007/s11629-023-8230-3>
- Soto, V., Alanís, J. L., Pech, J. M. y Chagoya, J. L. (2023b). Distribution and spatio-temporal variation of temperature and precipitation in Sierra de Otontepec Ecological Reserve, Veracruz, Mexico, through GIS modeling. *Atmósfera*, 37. <https://doi.org/10.20937/atm.53124>
- Vuille, M., Francou, B., Wagnon, P., Juen, I., Kaser, G., Mark, B. G., & Bradley, R. S. (2008). Climate change and tropical Andean glaciers: Past, present and future. *Earth-Science Reviews*, 89(3-4), 79-96. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2008.04.002>
- Zagorodnov, V., Nagornov, O. y Thompson, L. G. (2006). Influence of air temperature on a glacier's active-layer temperature. *Annals of Glaciology*, 43, 285-291. <https://doi.org/10.3189/172756406781812203>