

Los glaciares del Popocatépetl: ¿huéspedes efímeros de la montaña?

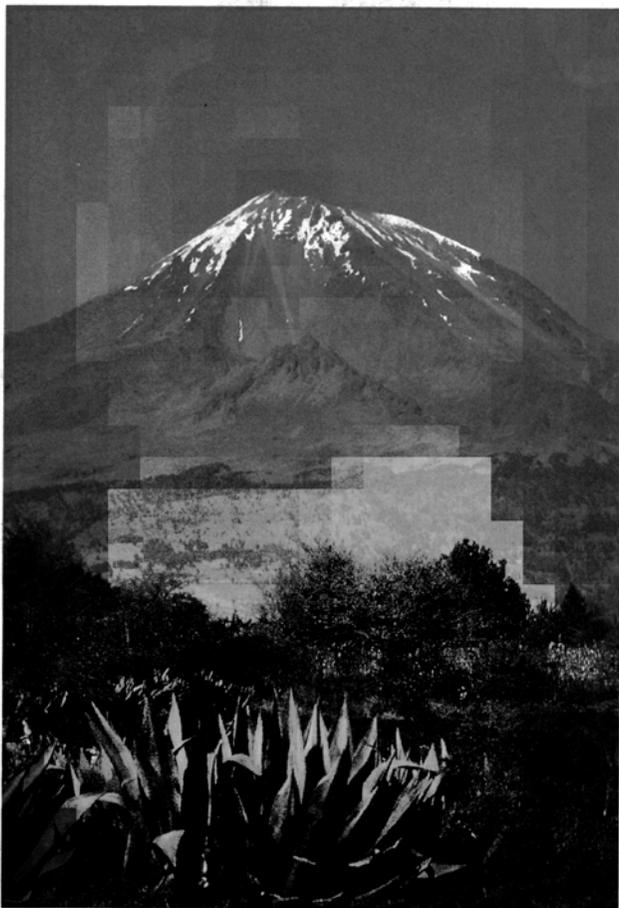


Foto: Fabio Ecardi

HUGO DELGADO GRANADOS

Un glaciar es una masa de hielo que se mueve; dicho movimiento es su rasgo principal, el cual conlleva que los glaciares sean agentes erosivos muy efectivos. Los glaciares erosionan y pulen de forma característica las rocas por donde fluyen. A las acumulaciones de los productos de tal erosión se les conoce como morrenas.

Los glaciares están formados por hielo magmático, sedimentario y metamórfico. Este hielo se acumula por periodos de tiempo prolongados en regiones de gran altitud y baja temperatura. En las regiones intertropicales los glaciares se forman en altitudes mayores a los 4 500 msnm (metros sobre el nivel del mar) y

en las latitudes ecuatoriales por encima de los 5 000 msnm, mientras que en las regiones polares existen a nivel del mar (Figura 1). Ahí las precipitaciones son en forma de cristales que se acumulan en los campos en forma de nieve, donde por medio de la congestificación se transforman en hielo glacial. Al incrementarse la precipitación, el hielo tiende a moverse hacia la pendiente debido a la acción de la gravedad (Figura 2).

Para comprender cómo es que un glaciar se puede mover es necesario mencionar sus zonas. Los glaciares poseen una zona de acumulación y otra de ablación. En la de acumulación se dan los procesos por medio de los cuales el hielo sólido y la nieve son agregados al glaciar, dicha acumulación se da principalmente por la precipitación de nieve, por la lluvia si ésta se congela, por avalanchas, por recongelación de agua líquida y condensación de hielo directamente del vapor (sublimación). Los procesos que causan la ablación, o sea la pérdida de hielo y nieve, incluyen la fusión, evaporación, separación de bloques, erosión eólica y remoción de hielo o nieve por avalanchas.

La zona de acumulación está separada de la zona de ablación por la línea de equilibrio (Figura 2), la cual no debe confundirse con la línea de congesta o línea de las nieves, que es la más alta sobre un glaciar a la cual las nevadas invernales se funden durante la temporada de ablación de verano. En glaciares templados (temperatura de hielo 0°C) se exhiben sólo las dos facies abajo de la línea de saturación. Una o ambas facies arriba de dicha línea están presentes en glaciares polares donde la temperatura del hielo es menor de 0°C.

El régimen de un glaciar, balance de masa o hídrico se refiere a la pérdida o ganancia de nieve en un glaciar (véase recuadro). Cuando el glaciar tiene un régimen positivo, está ganando hielo, y por lo tanto avanzará y crecerá. Lo inverso sucede cuando el régimen es negativo. Dicho régimen está íntimamente relacio-

nado con el clima y sus cambios. Además, en los glaciares hallamos datos hidrológicos importantes. Desde el punto de vista geomorfológico glacial, el régimen es de gran importancia, ya que el comportamiento del hielo puede relacionarse directamente con la formación de morrenas, que pueden marcar las etapas de equilibrio o de reactivación del avance, los límites de los glaciares, algunos canales de fusión y otras características.

Los glaciares de México

En México existen glaciares en el Pico de Orizaba (Citlaltépetl), en el Popocatepetl y en el Iztaccíhuatl, pues es en estas montañas, de más de 5 000 m donde la línea de las nieves está a más de 4 600 msnm. Los glaciares del Pico de Orizaba son los de mayor extensión y los del Popocatepetl los más pequeños.

En 1958, José Luis Lorenzo encontró que en el Pico de Orizaba o Citlaltépetl (Cerro de la Estrella) existían cuatro glaciares, cuya superficie total era de 9.5 km². Estos cuerpos de hielo siguen siendo el área glaciada más grande del país, aunque sus dimensiones se han reducido de manera alarmante en los últimos tiempos.

En el Iztaccíhuatl Lorenzo contó doce glaciares con un área aproximada de 1.2 km. En la actualidad, se sabe que varios de esos glaciares se han extinguido. Para 1982, los glaciares llamados "del cuello", "oeste-noroeste", "suroriental" y de "San Agustín" reportados por Lorenzo ya habían desaparecido. Durante este reconocimiento 8 glaciares fueron descritos, lo que representa una pérdida de casi 0.2 km² (16% del total), de área glaciada en el periodo comprendido entre 1958 y 1982.

Los trabajos glaciológicos que el Instituto de Geofísica lleva a cabo actualmente en el Iztaccíhuatl y en el Pico de Orizaba son un intento por actualizar el inventario publicado por Lorenzo.

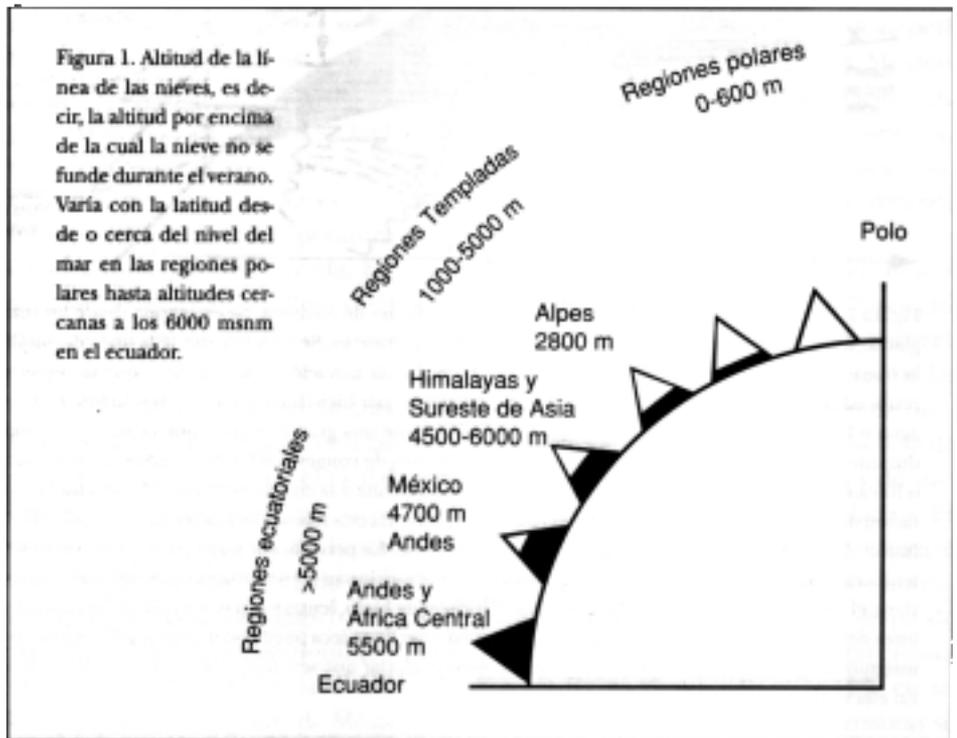
Los glaciares del Popocatepetl han sido considerados como "ventisqueros"

(campos de nieve) por varios autores, a pesar de que en 1923 Weitzberg los reconoce por primera vez como verdaderos glaciares. Durante la erupción del volcán, en la segunda década de este siglo, los glaciares llamaron poderosamente la atención de los observadores del evento, en particular las grietas del glaciar, que les hicieron pensar que el "ventisquero" se derrumbaría.

Los primeros trabajos serios sobre estos glaciares fueron llevados a cabo por Sidney E. White y José Luis Lorenzo en 1954 y en 1958, respectivamente, el primero describiéndolos y el segundo inventariándolos. José Luis Lorenzo describió tres glaciares con un total de 0.72 km² de área. Algunos trabajos más recientes han ayudado a reconocer no sólo a los glaciares del volcán sino también campos de suelos permanentemente congelados.

De acuerdo con el último inventario, los glaciares del Popocatepetl son muy pequeños, pues su área es de aproximadamente 0.5 km². Existen dos glaciares en este volcán (Figura 3): el glaciar del "ventorrillo" y el glaciar "noroccidental".

El del ventorrillo es un glaciar de montaña (Figura 4) que se encuentra en el flanco norte del volcán que comienza a los 5 380 msnm (cabecera) y termina a los 4 760 msnm (*terminus* o línea de las nieves). El basamento rocoso sobre el que descansa el glaciar del ventorrillo es un flujo de lava andesítica que muestra estratificaciones a altitudes menores de 4 300 msnm, lo cual indica que se movió a altitudes menores en el pasado reciente. El límite occidental del glaciar se ubica en un acantilado de 20 m a 5 000 msnm, donde se puede ver la interacción entre el glaciar y el basamento. El glaciar erosiona el fondo rocoso y estos depósitos son incorporados al glaciar. El *terminus* glacial tiene tres lenguas, una de ellas termina en un escarpe y las otras dos se adelgazan suavemente hasta alcanzar el basamento, la forma del glaciar del ventorrillo es de una cuenca simple caracterizada por una sola zona de acumulación con un perfil de glaciar colgante y una lengua lobulada. La fuente mayor de alimentación es la nieve estacional, el granizo, la lluvia, la escarcha y las heladas. El área



de ablación se distingue perfectamente debido a la presencia de una foliación muy desarrollada.

Este glaciar posee tres sistemas de grietas: el campo de grietas superior (5 300 msnm), representa la zona de despegue del glaciar (Figura 5) y consiste principalmente en una grieta maestra o rimaya de 250 m de largo y cerca de 5 m de ancho, y una profundidad de 3 m. Esta grieta representa un peligro para los alpinistas solitarios ya que en la época otoño-invierno se cubre de nieve. El campo de grietas inferior se encuentra entre 5 200 y 5 000 msnm con un patrón cóncavo en la dirección de flujo (Figura 5) debido a una serie de grietas más pequeñas con un arreglo en echelón en el límite occidental. Las grietas más grandes de este sistema forman escarpes hasta de 30

m por lo que se han convertido en las favoritas de los escaladores de hielo. Algunas de ellas alcanzan profundidades de hasta 10 y 20 m. Existe un sistema de grietas longitudinal, particularmente en la porción oriental del glaciar, que corre paralelamente a la dirección de flujo. Estas grietas son visibles solamente en la época de ablación y no tienen gran profundidad. El espesor máximo de este glaciar es de 70 m en la parte central, justo en el centro del campo de grietas inferior.

El glaciar occidental está situado en el lado noroeste del volcán (Figura 5). La cabecera de este glaciar se encuentra a 5 400 msnm y su *terminus* a 5 060 msnm, descansa sobre un basamento de lavas andesíticas y está bordeado por un acantilado en donde su lengua se interrumpe súbitamente. El glaciar, sin embargo, es

muy delgado, por lo que no forma un escarpe de hielo pronunciado. Al oriente se junta con el glaciar del ventorrillo y su frontera está marcada por la cresta denominada "El ventorrillo", la cual es seguida por los alpinistas para llegar a la cima por la ruta directa. Al oeste, el glaciar se desvanece en las laderas rocosas. Las únicas grietas que existen en este glaciar son las que provienen del sistema de rimaya del glaciar del ventorrillo cortando la parte oriental del glaciar noroccidental. La mayor parte del glaciar está constituida por hielo negro debido a su alto contenido lítico, lo que lo hace sumamente peligroso para los alpinistas no experimentados. La ausencia de grietas indica la naturaleza estacionaria de este glaciar pasivo. Éste es el remanente de un glaciar colgante mayor, alimentado principalmente por la nieve estacional, y comparte el área de acumulación con el glaciar del ventorrillo.

Los dos glaciares podrían ser considerados como uno solo, excepto debido al hecho de que el glaciar noroccidental drena hacia el Estado de México y el otro hacia el estado de Puebla. Un aspecto fundamental de los glaciares del Popocatepetl es que no se construyen morrenas. Esto significa que su actividad erosiva es sumamente baja, lo cual se debe a su reducido tamaño.

Existen cuatro campos de suelos permanentemente congelados (pergelisoles): Norte (0.069 km²), Yancuecole (0.043 km²), Las Cruces (0.119 km²), y Coyotes (0.008 km²) (Figura 3). Todos ellos están formados por cenizas volcánicas y escombros que han sido cementados por hielo, lo que les da un color negro. Durante la época de secas y el comienzo de la época de lluvias el hielo superficial se fun-

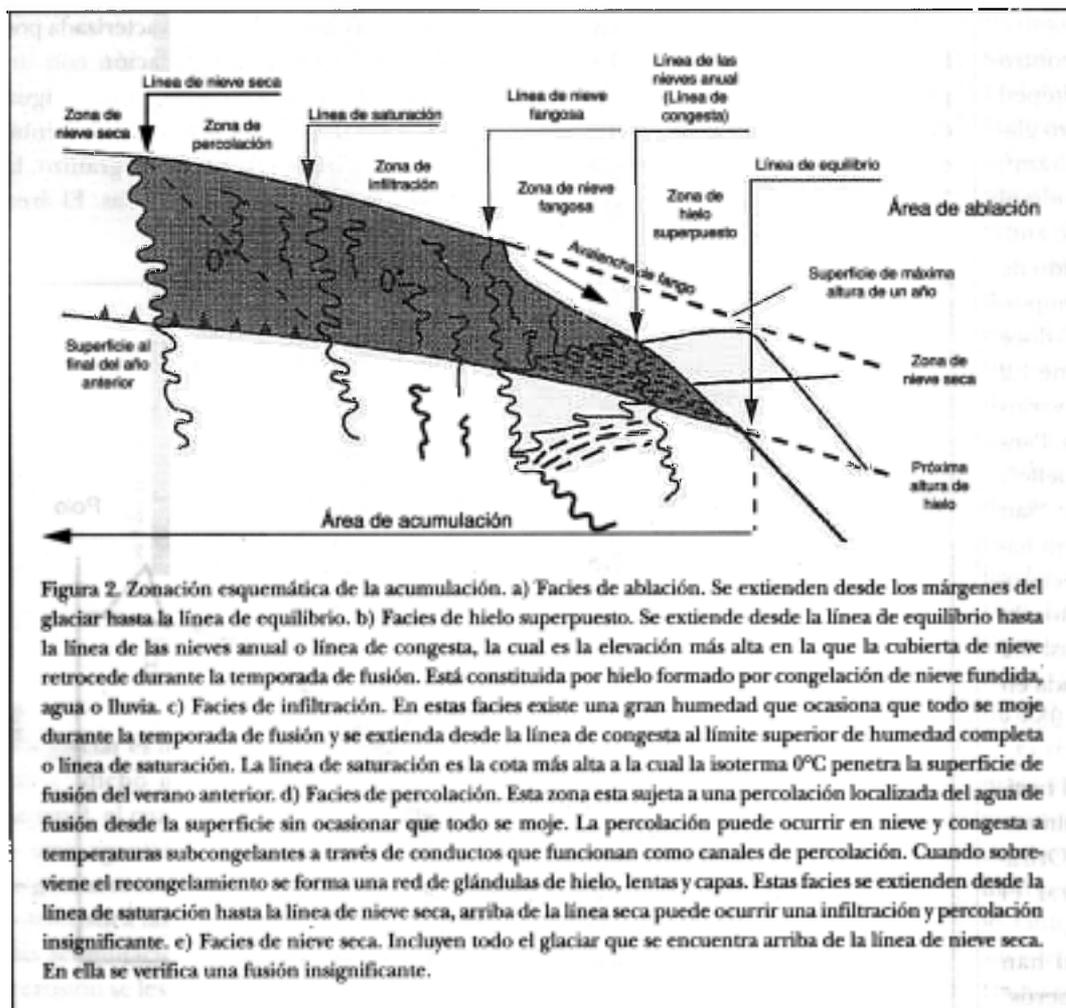


Figura 2. Zonación esquemática de la acumulación. a) Facies de ablación. Se extienden desde los márgenes del glaciar hasta la línea de equilibrio. b) Facies de hielo superpuesto. Se extiende desde la línea de equilibrio hasta la línea de las nieves anual o línea de congesta, la cual es la elevación más alta en la que la cubierta de nieve retrocede durante la temporada de fusión. Está constituida por hielo formado por congelación de nieve fundida, agua o lluvia. c) Facies de infiltración. En estas facies existe una gran humedad que ocasiona que todo se moje durante la temporada de fusión y se extienda desde la línea de congesta al límite superior de humedad completa o línea de saturación. La línea de saturación es la cota más alta a la cual la isoterma 0°C penetra la superficie de fusión del verano anterior. d) Facies de percolación. Esta zona está sujeta a una percolación localizada del agua de fusión desde la superficie sin ocasionar que todo se moje. La percolación puede ocurrir en nieve y congesta a temperaturas subcongelantes a través de conductos que funcionan como canales de percolación. Cuando sobreviene el recongelamiento se forma una red de glándulas de hielo, lentas y capas. Estas facies se extienden desde la línea de saturación hasta la línea de nieve seca, arriba de la línea seca puede ocurrir una infiltración y percolación insignificante. e) Facies de nieve seca. Incluyen todo el glaciar que se encuentra arriba de la línea de nieve seca. En ella se verifica una fusión insignificante.

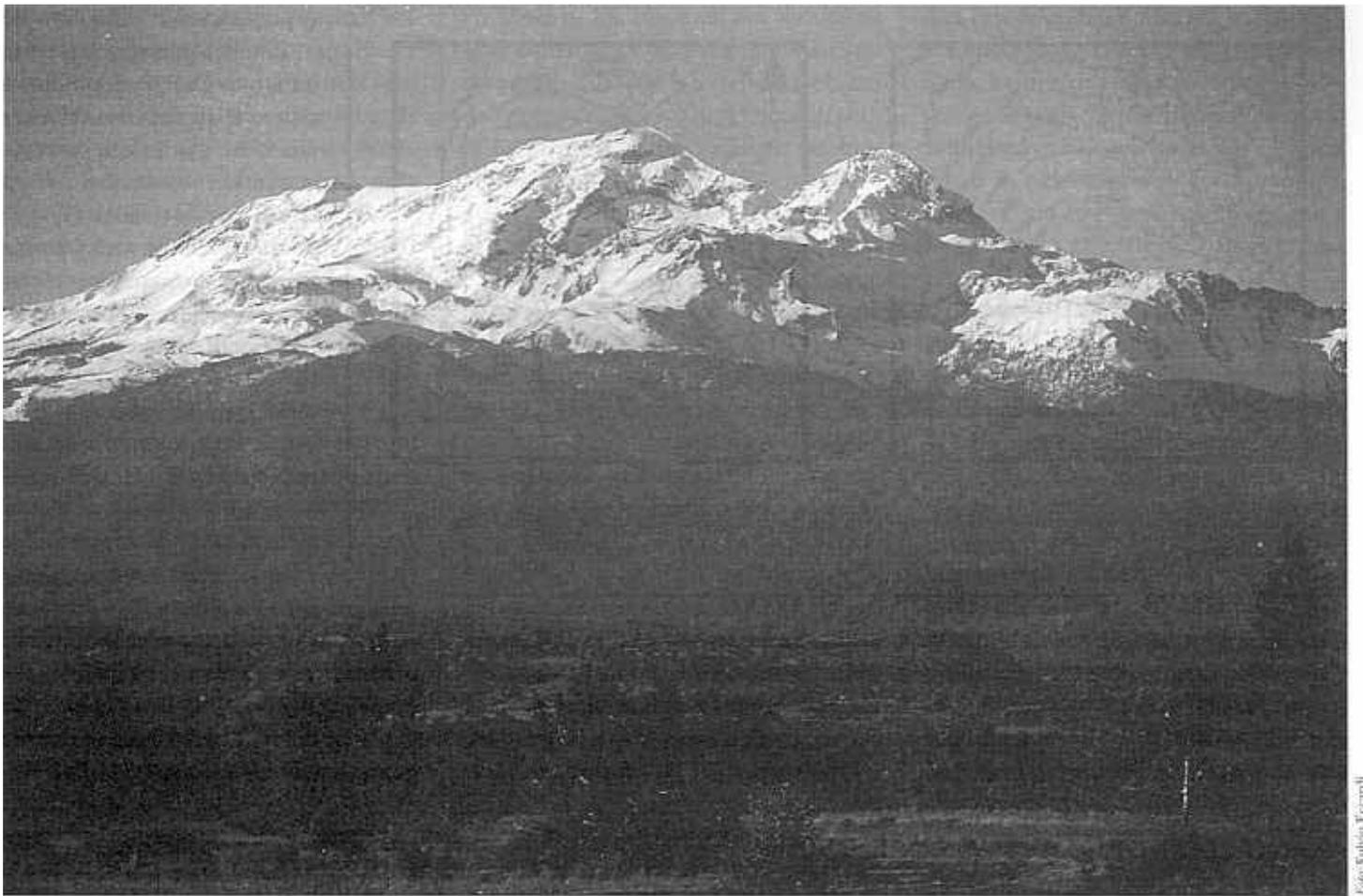


Foto: Fátima Escarill

de y se presentan procesos de soliflujión debido a la presencia de un lodo con alta concentración de sólidos. Al movilizarse este lodo se crean grandes surcos. Estos pergelisoles se encuentran distribuidos alrededor de los glaciares y representan los restos de extensiones mayores de los mismos en etapas recientes.

¿Por qué retroceden los glaciares del Popocatepetl?

Actualmente, en todo el mundo los glaciares se encuentran en retroceso. Son pocos los que tienen balances de masa positivos, y sólo aquéllos ubicados en lugares con climas que les son favorables presentan un avance, aún cuando éste es muy pequeño. Los glaciares de México no son la excepción y, como la mayoría, se encuentran en retroceso. Pero además de

retroceder, dichos glaciares se encuentran en un proceso de adelgazamiento, lo que es un factor que representa una pérdida mayor de volumen de hielo. Los pequeños avances, como los registrados entre los años 1968-1978, se deben a condiciones especiales de temperatura y precipitación durante esa década. En la actualidad, los glaciares del Popocatepetl se encuentran en retroceso nuevamente y a un ritmo mayor al de 1968. La influencia, no sólo de los cambios climáticos globales en nuestros glaciares sino también de los cambios locales, no es fácil de evaluarse todavía, aunque existe la posibilidad de que los efectos de fenómenos como El Niño hayan afectado temporalmente el balance hidrológico. La información climatológica disponible indica que existe un incremento sistemático de la temperatura en el Valle de México. En

el caso de los glaciares del Popocatepetl, la influencia de la Ciudad de México, principalmente de la contaminación ambiental que llega a grandes altitudes (mayores que 6 000 msnm), puede afectarlos debido a un aumento de temperatura por el llamado efecto invernadero.

Se han documentado cambios fundamentales en los glaciares del Popocatepetl en función de la reducción del área glaciada y del retroceso de la línea de las nieves o *terminus*. La reducción de área glaciada está indicada por la presencia de estrías en el basamento rocoso y de suelos permanentemente congelados. Es posible apreciar los cambios en el área al comparar el mapa preparado por Lorenzo en 1958 (Figura 3) con el mapa de 1982. En el glaciar noroccidental encontramos una disminución de 12% en su tamaño. No obstante que su *terminus* se



Figura 3. a) Mapa topográfico del volcán Popocatepetl, que muestra glaciares y campos pergelisoles en 1982. b) Mapa publicado por Lorenzo en 1964 donde se aprecian los glaciares del Popocatepetl.

(y por extensión, del volumen).

Lorenzo pensaba que existía un tercer glaciar en el Popocatepetl: el glaciar norte. En realidad, ese glaciar era parte del glaciar del ventorrillo, pero al reducirse éste en área, sólo quedó un campo de suelos permanentemente congelados (el campo Norte). La reducción en área representa casi un 25 por ciento.

El área glaciada total en el volcán Popocatepetl se ha visto reducida en 0.161 km² (cerca de 22%).

El cambio en la morfología y altitud de la línea de las nieves o *terminus* ha sido documentada durante varios años. La figura 9

muestra el cambio en las diferentes lenguas del glaciar del ventorrillo. En 1958, el glaciar del ventorrillo tenía cuatro lenguas, una de ellas ocupaba la Barranca

encuentra a la misma altitud de entonces (ligeramente arriba de los 5 000 msnm), lo que permite clasificarlo como un glaciar estacionario, la forma y área del glaciar ha cambiado muchísimo principal-

mente en su porción centro-occidental. Estos cambios indican que el retroceso del glaciar noroccidental no es evidente en cuanto al retroceso de su lengua, sino en la disminución del espesor y del área

Nieve y hielo

El hielo es una masa sólida y cristalina que puede llegar a ser tan dura como algunas rocas, pero debido a su composición química es mucho menos densa; como las rocas ígneas, puede originarse como un fluido congelado; como las rocas sedimentarias, puede depositarse en grandes cantidades; y como las rocas metamórficas se puede recrystalizar debido a la presión y transformarse.

La nieve está formada por cristales de hielo que se desprenden de las nubes, los cuales, agrupándose al caer, llegan al suelo en copos blancos. Existen dos tipos principales de nieve: el que cae durante las nevadas (nieve precipitada) y el producido por cambios posteriores en la nieve depositada (nieve metamórfica). Todos los tipos de nieve comienzan siendo del primer tipo, para después perder su identidad original y transformarse en el segundo.

Nieve precipitada. Los cristales de nieve son diminutas partículas que se forman alrededor de núcleos de atmósfera de aire supersaturado que caen cuando alcanzan determinado tamaño. La estructura cristalina del hielo posee una simetría hexagonal que comienza en un plano basal (a) y sigue a lo largo de tres ejes cristalográficos separados 60°. Su eje cristalográfico es perpendicular a los ejes. La longitud de estos ejes es lo que determina el tipo de cristal que se formará, lo que depende de la temperatura y de la cantidad de vapor de agua. Una clasificación útil de la nieve precipitada es la de la Comisión Internacional de la Nieve y el Hielo.

Nieve Metamórfica. Los cristales de nieve son formas termodinámicamente inestables. El cociente área/volumen es grande, lo que significa que las moléculas superficiales del cristal poseen una gran energía potencial debida a la atracción intermolecular, por lo cual existe la tendencia a que la energía libre superficial de los cristales se reduzca al mínimo, esto significa que la forma de los cristales cambia cuando el cociente área/volumen se reduce al mínimo. La forma ideal es la esfera. Por ello, aun los cristales de nieve más intrincados tienden a formar partículas redondeadas de hielo (metamorfismo isotérmico o metamorfismo destructivo). El producto inicial de este metamorfismo son pequeños granos de hielo, lo que da una apariencia de grano fino a la "nieve vieja", y el proceso se completa cuando las partículas de nieve han sido reducidas a granos redondos. Esta nieve normalmente tiene una densidad de 500 - 600 kg/m³. El proceso por el cual la nieve incrementa su densidad se le denomina congestificación, y puede ser de dos maneras: 1) recongelamiento del agua de fusión atrapada entre los granos de nieve por capilaridad; 2) compactación de la matriz de nieve debido a la presión. Estos procesos generalmente se dan en los glaciares. El hielo de glaciar es el producto final del metamorfismo de la nieve.

Además de estos dos tipos de nieve existen las formas no precipitadas, como es el caso de la escarcha, que se deposita sobre objetos expuestos al viento cuando las nubes están superenfriadas, o durante las heladas en las que la escarcha se forma por la sublimación de cristales sólidos de hielo directamente del vapor de agua en el aire.

del ventorrillo. Los cambios son más evidentes al comparar una fotografía de principios de siglo (Figura 6) con la aquí mostrada. La información disponible de la altitud de la línea de las nieves muestra el retroceso que el glaciar ha tenido en forma sistemática y continua desde principios de siglo (Figura 7). El glaciar del ventorrillo ha experimentado un retroceso en la altitud de la línea de las nieves a un ritmo de 0 a 10 m/año entre 1906 y 1968. El glaciar avanzó, entre 1968 y 1978, a un ritmo de 10 m/año, pero posteriormente volvió a retroceder, pero en este caso a un ritmo de 40 m/año (¡seis veces más rápido que de 1906 a 1968!).

Los cambios de los glaciares del Popocatepetl pueden deberse a: a) un incremento en el flujo de calor debido a un aumento de la actividad; b) cambios climáticos locales; c) cambios climáticos globales; o d) una combinación de cualquiera de estas causas.

En algunas regiones volcánicas, como

en México, los volcanes son montañas muy elevadas, de manera que sus cumbrones están cubiertas por hielo. En el caso de volcanes activos como el Popocatepetl, dicha actividad puede producir cambios en los glaciares, acelerando su retroceso o incluso destruyéndolos. Los glaciares, por su parte, pueden influir en la actividad volcánica al representar una fuente de agua con la cual puede entrar en contacto un cuerpo de magma en ascenso o fluidos hidrotermales asociados al mismo y provocar erupciones freáticas. Este tipo de eventos normalmente no son de gran envergadura. El Popocatepetl es un volcán activo que ha tenido repetidas erupciones explosivas y efusivas. La actividad fumarólica se ha visto incrementada a partir de 1991, hasta que el 21 de diciembre de 1994 ocurrió un evento explosivo de carácter vulcaniano sin que se emitiera material juvenil. La emisión de cenizas persistió por varios meses hasta que en el mes de julio de 1995 cesó la activi-

dad explosiva. Sin embargo, la actividad volcánica no puede considerarse terminada. Existen dos aspectos de la relación vulcanismo-glaciación: uno se refiere a la influencia que tiene el volcán para determinar la reducción del tamaño del glaciar y la otra es el papel que puede desempeñar una masa de hielo durante una erupción volcánica.

A largo plazo el incremento del flujo de calor en el basamento del volcán Popocatepetl podría producir una fusión de los glaciares. Por otra parte, al aumentar la temperatura del sustrato, la sustentación del glaciar se vería amenazada al disminuir el coeficiente de fricción, lo cual causaría el derrumbe del glaciar que, si bien no sería suficiente para originar una avalancha de lodo, afectaría el ecosistema, pues desaparecería una gran porción de hielo. Por otro lado, el aumento de temperatura del sustrato podría ocasionar un incremento en la fusión que aceleraría el retroceso y el adelgazamiento



Foto: Pablo Escantón

¿Cómo se determina el balance hídrico de un glaciar?

Para determinar el balance hídrico se deben tener en cuenta los siguientes conceptos:

1. **Acumulación bruta anual.** Volumen total de agua equivalente que se ha agregado al glaciar durante un año de balance.
2. **Acumulación neta anual.** Cantidad de agua equivalente que se agrega a un glaciar y que se encuentra presente todavía al final del año del balance.
3. **Ablación bruta anual.** Cantidad total de agua equivalente de nieve y hielo que se ha consumido durante un año de balance por todos los procesos de ablación.
4. **Ablación neta anual.** Volumen de agua equivalente que pierde un glaciar en un momento dado durante un año de balance.

La diferencia entre la ablación anual neta y la bruta se encuentra en aquellos procesos tales como el recongelamiento de agua de fusión sobre o dentro del glaciar, la fusión de la acumulación temporal en el área de ablación y el almacenaje interno de agua.

El balance hídrico de un glaciar depende entonces del balance entre la acumulación y la ablación. En una localidad dada, la relación neta de acumulación es la diferencia entre la acumulación (superposición de nieve, lluvia congelada, helada o ventisca, escarcha y agua de fusión recongelada) y la ablación (fuga de agua de fusión, evaporación y la recarga total) y es la relación neta integrada en toda el área del glaciar. Desde las últimas décadas del siglo XIX la mayoría de los glaciares han tenido una recarga total negativa. No obstante, en algunos glaciares se ha dado un aumento en la recarga desde los años cuarenta.

Para conocer el movimiento de un glaciar es necesario conocer la velocidad a la que éste se mueve. Esto es posible saberlo por medio de la colocación de una serie de marcas en su superficie. Dichas marcas deben ser controladas constantemente desde puntos fijos en las rocas que bordean al glaciar. En algunas áreas se hacen estudios con base en fotografías aéreas tomadas periódicamente para detectar cambios que revelen movimiento. Se ha observado que la mayoría de los glaciares experimentan cambios estacionales en la velocidad del flujo y que, ordinariamente, el promedio de velocidad anual cambia lentamente como respuesta a los cambios del clima. También suele utilizarse la fotogrametría terrestre.

El movimiento que se mide en la parte más superficial es producido por el deslizamiento del glaciar sobre el lecho rocoso y por el flujo plástico dentro de la masa rocosa. En la mayoría de los glaciares el deslizamiento del fondo es el que provoca la mayor parte del movimiento, mismo que depende de la inclinación de la superficie, de la temperatura del hielo y de otras propiedades físicas. Generalmente la velocidad del movimiento relacionado con el flujo plástico es mayor cerca del centro y decrece hacia los lados y en el fondo del glaciar. En la mayoría de los glaciares dicho movimiento no excede de unas decenas de metros al año.

El origen, permanencia y extinción de los glaciares está dado por el balance de su masa, ya que su tamaño aumenta o disminuye dependiendo de la acumulación o pérdida de esta última. Un glaciar puede mantener su forma y tamaño en un estado de equilibrio dinámico, pero una alteración en la tasa de acumulación o una pérdida pueden provocar inestabilidad y con ello cambios en el tamaño del glaciar.

Si un glaciar se encontrara en equilibrio (acumulación anual = ablación anual) la zona de acumulación crecería continuamente y la zona de ablación disminuiría hasta desaparecer, lo cual es difícil que ocurra, pues la transferencia de masa de la primera zona a la segunda (flujo activo y pasivo) ocasiona que los glaciares siempre se encuentren en movimiento. Una consecuencia del flujo de los glaciares es la formación de diferentes tipos de grietas según la distribución de fuerza de la masa de hielo y la topografía que los contiene.

El tamaño de un glaciar siempre está cambiando, pues el equilibrio entre acumulación, ablación y movimiento del hielo generalmente dura muy poco tiempo. Si la masa se conserva, un glaciar puede expandirse sobre un área mayor o retroceder si la ablación es mayor. Los factores que controlan la localización de la línea de equilibrio son los mismos que afectan la estabilidad de la masa de hielo: la temperatura media anual y la variación estacional de la temperatura. Si se toma esto en cuenta, es posible explicar por qué las líneas de equilibrio de los glaciares son altas en las zonas ecuatoriales y bajas en altas latitudes.

Los glaciares son sumamente sensibles a los cambios climáticos, su zona de ablación y la posición de la línea de equilibrio se expande o contrae para restablecer un equilibrio entre la acumulación y la ablación. Un cambio climático podría provocar una disminución en la tasa de precipitación de la nieve y esto a su vez un cambio en el balance de la masa, que ocasionaría que el glaciar retrocediera haciéndose más delgado, la superficie disminuiría y el área de acumulación se haría más pequeña. En estas condiciones el glaciar se haría más y más inestable y retrocedería a una velocidad cada vez mayor hasta desaparecer. Las consecuencias de que esto ocurriera serían: desertificación, aumento de la temperatura global y elevación del nivel del mar en aproximadamente cien metros.

del cuerpo de hielo, lo que aceleraría su extinción.

El mayor peligro que representan los glaciares durante las erupciones volcánicas es la posible formación de flujos hiperconcentrados o lahares (término acuñado en Indonesia para describir flujos de lodo donde la proporción de detritos es muy grande). Estos flujos se forman cuando la actividad volcánica produce flujos piroclásticos erosivos que funden el hielo glacial. La mezcla de material piroclástico y el agua da lugar a flujos que se

mueven por las barrancas a gran velocidad y que son generalmente de mayor alcance que el flujo piroclástico inicial.

Los lahares, en países como Indonesia o las Filipinas, son fenómenos comunes y sumamente destructivos. Una de las tragedias más grandes de nuestro siglo, asociada con este tipo de eventos, ocurrió después de la erupción del Nevado de Ruiz (5 200 msnm) en Colombia en 1985. Este volcán es el más activo localizado en la parte septentrional de los Andes, y su cumbre se encuentra ocu-

pada por glaciares. Aún cuando el Nevado de Ruiz ha dado lugar a varios lahares de grandes dimensiones en el pasado (notablemente en 1595 y en 1845), la población ha recolonizado los valles circundantes al volcán durante el último siglo. En noviembre de 1984, una renovada actividad volcánica comenzó en el Nevado de Ruiz, acompañada de fusión parcial del glaciar. Sin embargo, la erupción principal no tuvo lugar sino hasta un año después, la cual causó una fusión más rápida y de mayor escala, que origi-

nó un gran lahar que corrió rápidamente a lo largo del Valle de Lagunillas, arrastrando con árboles, rocas, suelo y todo cuanto encontró a su paso. Después de haber recorrido 50 km abajo, el lahar cubrió la ciudad de Armero, que fue cubierta por un depósito de lodo de 3 a 8 m de espesor, y casi 22 000 personas perdieron la vida en unos cuantos minutos. Algunos de los sobrevivientes fueron atrapados a la altura de los hombros por un lodo con la consistencia del concreto, y permanecieron atrapados por dos días antes de poder ser rescatados.

Es factible que este tipo de peligrosos eventos volcánicos ocurran en nuestro país, pues existen las condiciones para que éstos se desarrollen, pues las cumbres de nuestras montañas cuentan con masas de hielo. Volcanes como el Popocatepetl, cuya actividad pueden ser de magnitud variable, pueden generar lahares como el del Nevado de Ruiz de 1985. De hecho, existen evidencias en el registro geológico del Popocatepetl de que este tipo de eventos ya han sucedido en el pasado. Las poblaciones amenazadas por este tipo de fenómenos son principalmente las que se encuentran en el flanco nor-oriental del volcán.

Las causas por las cuales retroceden estos glaciares aún no han sido determinadas, por lo que es necesario realizar las investigaciones necesarias para arrojar luz sobre estos aspectos.

El futuro de los glaciares del Popocatepetl

Las tasas de retroceso de estos glaciares no auguran un futuro prometedor. Por ello, vale la pena reflexionar un poco al respecto y preguntarnos: ¿realmente desaparecerán estos glaciares?; si es así, ¿cuándo ocurrirá esto?, ¿qué sucedería si desaparecieran?, ¿podemos hacer algo para detener este proceso?, ¿se puede prever su extinción?; o bien, ¿podemos aminorar las consecuencias?, ¿qué debemos hacer al respecto?; en caso de erupción volcánica, ¿cuáles podrían ser la consecuencias?,



Figura 4. Vista del Popocatepetl desde el norte (Tlamacas) en abril de 1984. Se observa el glaciar del ventorrillo y parte del noroccidental.



Figura 5. Fotografía del Popocatepetl que muestra el campo de grietas superior, así como la rimaya del glaciar del ventorrillo y el campo de grietas inferior. Tomada el 27 de diciembre de 1994.

¿qué hacer para mitigar el impacto de fenómenos que no es posible detener?

Parece ser un hecho la desaparición de los glaciares del Popocatepetl, a menos de que las condiciones climáticas globales y locales cambien súbitamente y

produzcan un avance a gran escala. Los patrones de temperatura en la región circundante indican un incremento sistemático en la temperatura media anual. El ritmo de retroceso sostenido que se ha observado en el presente podría ocasio-



Figura 6. Fotografía de Weitzberg, 1923.

nar su desaparición durante la segunda mitad del siglo XXI, aunque una mejor estimación deberá basarse en mayores estudios glaciológicos.

Actualmente, los glaciares del Popocatepetl son fuente de recarga de los mantos acuíferos del Valle de Puebla y de algunas regiones del Estado de México, junto con los del Iztaccíhuatl, durante la época de secas. La eventual desaparición de los glaciares cortaría el suministro de agua en esa época a dichos mantos acuíferos, los cuales están considerados en el desarrollo industrial y económico de la región. La sobreexplotación de mantos acuíferos cuya recarga se ve disminuida puede ocasionar un proceso de desertificación que se vería acelerado con la disminución de las áreas boscosas al haber menos agua en el subsuelo. Este proceso de desertificación afectaría profunda-

mente la vida humana y la actividad económica de la región. Un proceso natural de este tipo no es reversible por otro medio que no sea natural aunque la influencia del hombre puede acelerarlo por medio de la contaminación ambiental en la región circunvecina, que provoca un aumento inusual de la temperatura por el efecto invernadero. Si bien este proceso de extinción glacial no se puede detener, es necesario estudiar el fenómeno y monitorearlo con el fin de evaluar las posibles consecuencias y preverlas. Al saber más sobre los glaciares, se pueden tomar medidas que ayuden a mitigar los efectos de su desaparición.

Agradecimientos

Pablo Cervantes Laing y Lucio Cárdenas González colaboraron en la elaboración de tablas y figuras. Lucio Cárdenas, además, ha sido un pilar fundamental en la nueva etapa de investigación glaciológica que se realiza en el Instituto de Geofísica. Los actuales estudios glaciológicos son llevados a cabo con el apoyo de la Secretaría de Gobernación a través de el Centro Nacional de Prevención de Desastres, dentro de un paquete de estudios multidisciplinarios sobre el volcán Popocatepetl que contemplan su estudio y vigilancia. 🏔️

Bibliografía

- Delgado, H. The glaciers of Popocatepetl Volcano (Mexico), Proceedings of the First International Conference on Climatic Change in Mexico, Taxco Gro. México 1993, S. Metcalfe y J. Urrutia (eds.). En prensa.
- Delgado, H., R. Arciniega y D. Calvario. 1985. "Los glaciares del Popocatepetl e Iztaccíhuatl", en *Memorias de la Reunión Anual de la Unión Geofísica Mexicana*, Oaxaca, México, pp. 178-193.
- Embleton, C. y King. 1968. *Glacial and Periglacial Geomorphology*, Edward Arnold Publishers, Inglaterra.
- Flint, R.F. 1971. *Glacial and Quaternary Geology*, John Wiley & Sons, Nueva York.
- Freudentberg, W. 1911. "The ascent of Iztaccíhuatl from the south". *Memorias de la Sociedad Científica Antonio Alzate* 31:71-75.
- Haerberli, W. 1987. "Fluctuations of Glaciers", en *Permanent Service on the Fluctuations of Glaciers*, UNESCO, Intl. Commission on Snow and Ice, V.
- La Chapelle, E.R. 1977. *Field Guide to Snow Crystals*, J.J. Douglas, Vancouver, Canadá.
- Lorenzo, J. L. 1964. "Los Glaciares de México", en *Monografías del Instituto de Geofísica*, I.
- Müller, F. 1962. Zonation in the accumulation areas of the glaciers of Axel Heiberg Island. *Glaciology* 3:392-397.
- Müller, F., T. Cafilisch y G. Müller. 1977. "Instructions for compilation and assemblage of data for a World Glacier Inventory", en *World Glacier Inventory*, UNESCO, International Commission on Snow and Ice, Zurich.
- Press, F. y R. Siever. 1982. *Earth*, W.H. Freeman and Co., San Francisco.
- Robinson, E.S. *Basic Physical Geology*, John Wiley & Sons, Nueva York.
- Shumskii, P.A. 1964. *Principles of Structural Glaciology*, Dover Publications Inc., Nueva York.
- Waitz, P. 1910. Observaciones geológicas acerca del Pico de Orizaba. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* 7:67-76.
- Waitz, P. 1921. La nueva actividad y el estado actual del Popocatepetl. *Memorias de la Sociedad Científica Antonio Alzate* 37:295-313.
- Weitzberg, F. 1923. El ventisquero del Popocatepetl. *Memorias de la Sociedad Científica Antonio Alzate* 41:65-90.
- White, S. E. 1954. The firn field on the volcano Popocatepetl, México. *Journal of Glaciology* 2:389-392.
- White, S. E. 1981. Neoglacial to recent glacial fluctuations on the volcano Popocatepetl, México. *Journal of Glaciology* 27:359-363.

Hugo Delgado Granados: Instituto de Geofísica, UNAM.

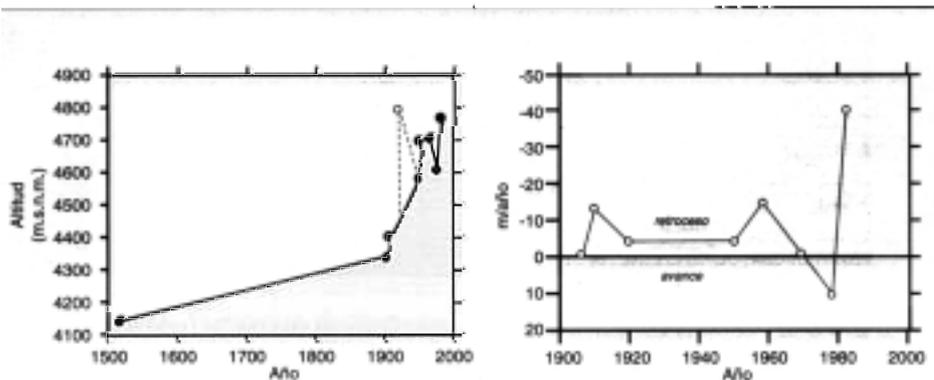


Figura 7. a) Altitud de la línea de las nieves desde el siglo XVI. Se observa un retroceso sistemático del glaciar del ventorrillo con una etapa de avance. La línea punteada indica un retroceso que coincide con la erupción del Popocatepetl entre 1920 y 1927 que no está bien documentada. b) Tasa de retroceso del glaciar del ventorrillo. Se muestra una tasa fluctuante entre 0 y 20 m/año después de 1982. También se muestra el avance de 1968-78 a razón de 10 m/año.