

GLACIARES DEL KILIMANJARO

El casquete de hielo del Kibo retrocede por efecto de la radiación solar

Philip W. Mote y Georg Kaser

El deshielo de un glaciar es uno de los símbolos del cambio climático global. Aunque el aumento de las temperaturas puede afectar a la vegetación, los cambios correspondientes en el paisaje no suelen resaltar a la vista. Por el contrario, un glaciar imponente reducido a una fracción de su extensión representa una prueba inequívoca de que el clima modela el aspecto del planeta. A los espectadores del documental *Una verdad incómoda* se les ilustra con pares de fotos del antes y el después de glaciares que están desapareciendo. Por si eso no fuera suficiente, las huellas que el retroceso de estos erosionadores de montañas gigantes deja atrás dan testimonio de su impotencia ante algo tan insustancial como el aire cálido.

Sin embargo, la opinión más extendida —y en general, correcta— de que los glaciares desaparecen a causa de los efectos del calentamiento pasa por alto los procesos físicos responsables de su desaparición. De hecho, el calentamiento no explica el comportamiento de los glaciares y del casquete de hielo del macizo africano del Kilimanjaro, sólo 3 grados al sur del ecuador, ni de otros glaciares tropicales de menor extensión.

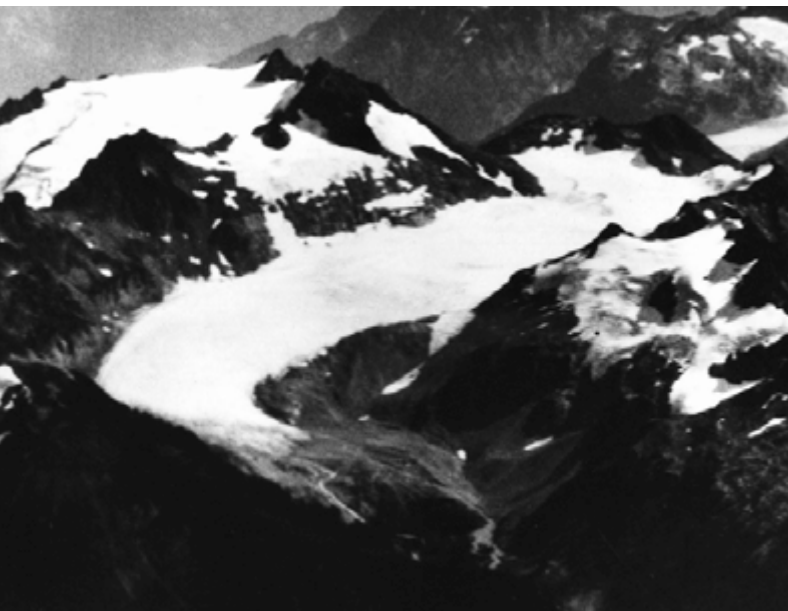
El menguante casquete de hielo de la “montaña reluciente”, que tanto destacaba en la película basada en la novela de Hemingway *Las nieves del Kilimanjaro*, no es la imagen adecuada para ilustrar el cambio climático global. El extenso trabajo de campo en glaciares tropicales realizado a lo largo de más de 20 años

por uno de los autores (Kaser) revela una historia más complicada e interesante. El Kilimanjaro, un conjunto de tres conos volcánicos que se alzan hasta la fría alta troposfera, ha ganado y perdido hielo mediante procesos que tienen vínculos sólo indirectos, si los tienen, con las recientes pautas del clima global.

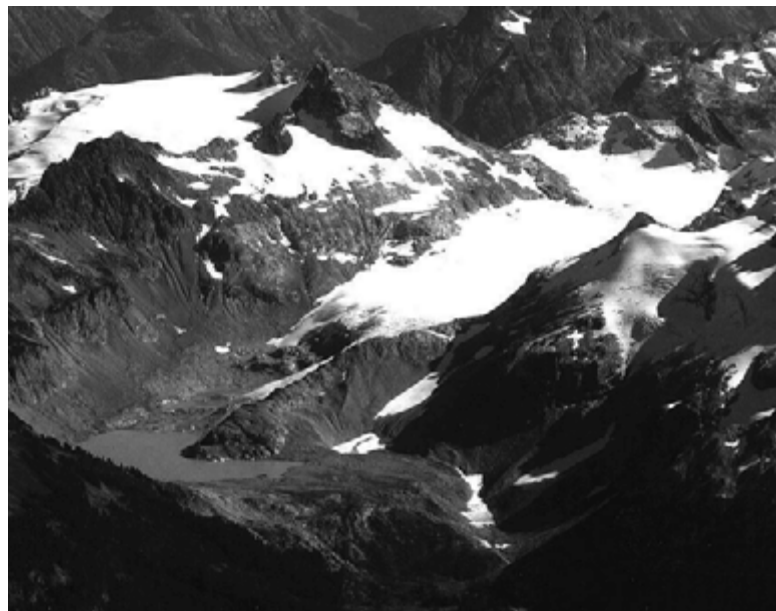
Cambio glacial

El hecho de que existan glaciares en toda la zona tropical merece alguna explicación. La temperatura de la atmósfera desciende unos 0,65 grados Celsius cada cien metros de altitud, por lo que la temperatura del aire en la cima de una montaña de 5000 metros puede ser 32,5 grados menor que la del aire a nivel del mar. Así pues, incluso en los trópicos, las temperaturas en alta montaña se encuentran bajo el punto de congelación. El escalador que asciende una montaña como ésta pasa de una exuberante vegetación tropical a comunidades arbustivas, de éstas a los pastos y, por fin, a una ausencia casi absoluta de vegetación por la falta de agua en estado líquido.

Las temperaturas en la cima de las montañas tropicales varían muy poco de una estación a otra, puesto que al mediodía el Sol está alto a lo largo de todo el año. Con estas temperaturas tan bajas, la nieve se acumula en forma de capas de hielo y glaciares sobre el Kilimanjaro, el monte Kenia y el Rwenzori en el este de Africa, sobre el Irian Jaya en Indonesia y especialmente en los Andes, donde se encuentra el 99,7 por ciento del hielo de los glaciares tropicales.



1928



2000



1912



2006

CORTESÍA DEL PROGRAMA GLACIAR Y NIEVE DEL SERVICIO GEOLOGICO DE EE.UU. (arriba); EDWARD DEHLER (abajo a la izquierda) GEORG KASER (abajo a la derecha)/American Scientist

1. GLACIARES DE TODO EL MUNDO han retrocedido en las últimas décadas. Es posible que el glaciar más estudiado de Norteamérica sea el Cascade Sur, en el estado de Washington, donde las fotografías tomadas por científicos del gobierno en 1928 y en 2000 proporcionan una prueba visible de la pérdida de la mitad de la masa del glaciar (arriba). Bases sólidas implican al calentamiento global en ese retroceso y en el de otros glaciares de zonas templadas. Sin embargo, existen escasos indicios de un vínculo directo entre las pautas climáticas globales actuales y la fusión del casquete de hielo del Kilimanjaro, en el este del Africa

tropical (abajo). Aunque las llanuras a sus pies sean cálidas y secas, las temperaturas en lo alto del macizo se mantienen debajo del punto de congelación. La observación indica que las caras del hielo se reducen a causa de la radiación solar, más que por efecto del calor del aire. En la actualidad, un río de agua de fusión fluye de la lengua del glaciar de Cascade Sur, mientras que apenas si se han observado desagües en el Kilimanjaro. Los campos blancos dispersos de la foto de abajo a la derecha proceden de una nevada reciente. Sólo los campos más blancos y cerrados son glaciares.

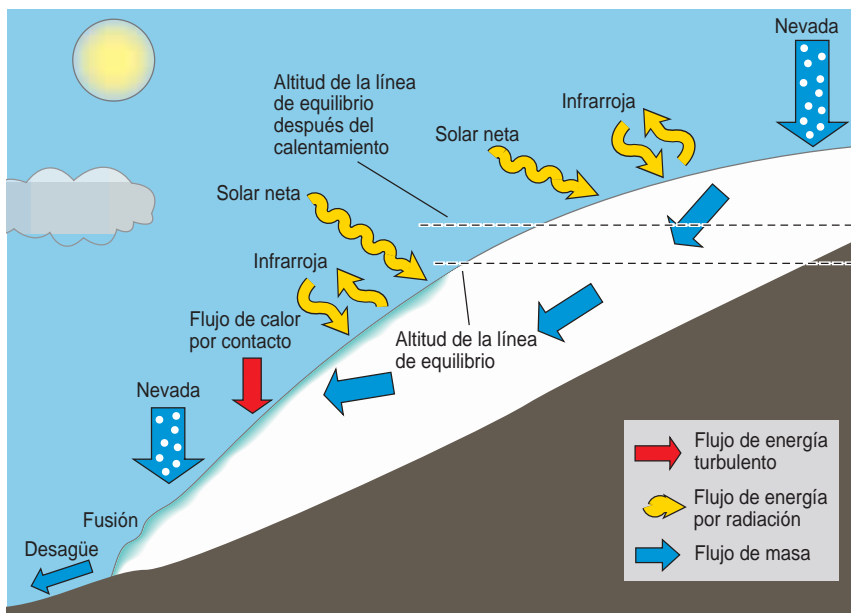
Un modo sencillo y físicamente preciso de entender los procesos que crean y controlan estos y otros glaciares es pensar en términos de los balances de energía y de masa.

El balance de masas es la mera diferencia entre acumulación (masa añadida) y ablación (masa restada). En este caso, la masa es el

agua en todas sus formas, sólida, líquida y vapor. La masa de un glaciar guarda una estrecha relación con su volumen, que puede calcularse multiplicando su área por la profundidad media. Sabemos si cambia el volumen de un glaciar a través de una prueba obvia y documentada: la modificación de su longitud. El

glaciar en retroceso Muir, de Alaska, un caso extremo, perdió más de dos kilómetros de longitud en el último medio siglo.

Los glaciares casi nunca alcanzan el “equilibrio”, antes bien se tambalean como un funambulista sobre la cuerda. Algunas veces, un cambio en el clima altera sustancialmente el



2. LA MAYORÍA DE LOS GLACIARES aumentan su masa a partir de las precipitaciones de nieve y la pierden con el desagüe del agua de fusión. Varios factores pueden afectar al balance de masas de un glaciar, en cuyo proceso la localización del glaciar desempeña una función protagonista. Un glaciar de latitudes medias típico (*en verano en este gráfico*) adquiere más masa en sus partes más altas y la pierde en su lengua. La altitud de la línea de equilibrio es el punto donde ambas tendencias se equilibran. Sobre esa línea, el glaciar gana energía de la radiación solar y la pierde por radiación infrarroja hacia la atmósfera. Bajo la línea, la transferencia de calor por contacto del aire, más cálido, hacia el glaciar aporta energía a éste. Con el calentamiento ambiental, la línea de equilibrio sube; se incrementan las aportaciones del flujo de calor por contacto y de la radiación infrarroja, con el consiguiente incremento de la fusión. Las gotas de agua llevadas por el viento y congeladas por contacto, la escarcha, contribuyen poco al aumento de la masa.

equilibrio del glaciar; su masa puede tardar decenios en alcanzar un nuevo equilibrio.

La masa añadida proviene en su mayor parte de la atmósfera, generalmente en forma de nieve, aunque también en forma de lluvia, que se congela. En raras ocasiones se incorpora convertida en escarcha: gotas transportadas por el viento tan frías, que se congelan por contacto.

El proceso más evidente de pérdida de masa nos lo ofrece el desagüe de agua fundida procedente de la superficie del glaciar. Se reduce también la masa glacial con la sublimación, proceso en el que el hielo se convierte directamente en vapor de agua. Puede darse a temperaturas muy por debajo del punto de fusión, aunque requiere ocho veces más energía que la fusión. A la sublimación, que ocurre cuando la humedad del aire es menor que la humedad procedente de la superficie del hielo, se debe que los alimentos

que no se guardan en la nevera en un recipiente bien sellado pierdan su humedad y se “quemem”.

Aire, hielo y equilibrio

La fusión, la sublimación y el calentamiento del hielo requieren energía. En la alta montaña, la energía proviene de varios flujos de energía que interaccionan de una manera compleja. El Sol, fuente de energía primaria, ejerce sus efectos directos durante el día. Aparte de la noche, otros factores que limitan la acción solar son la sombra y el grado en que la nieve refleja la luz visible. Sin embargo, la energía puede llegar al glaciar a través de *flujos de calor por contacto* —intercambio de calor entre una superficie y el aire en contacto con ella, en este caso calor extraído directamente del aire en contacto con el hielo— y de emisiones infrarrojas procedentes de la atmósfera y la superficie terrestre. Por otro lado,

la energía puede abandonar el hielo del glaciar de varias maneras: flujo de calor por el contacto del glaciar con aire frío, emisiones infrarrojas de la superficie de la nieve y el hielo, y “el calor latente” que necesita el agua para realizar el cambio de estado sólido a líquido (fusión) y de sólido a gas (sublimación).

Los glaciares de montaña acumulan nieve a gran altitud, se deslizan por las laderas —algunos a velocidades de dos metros por día— y en verano se funden a baja altitud. Algunos glaciares de latitud media alcanzan el mar gracias, en parte, a copiosas precipitaciones de nieve, de más de tres mil litros de equivalente líquido por metro cuadrado al año.

En algún lugar entre el extremo superior y el inferior de un glaciar de montaña hay una altura por encima de la cual la acumulación supera la ablación y bajo la cual la ablación es mayor que la acumulación: la “altitud de la línea de equilibrio” (ALE). El aumento de la temperatura del aire incrementa el flujo de calor por contacto desde el aire hasta la superficie del glaciar y la radiación infrarroja absorbida por el glaciar, por lo que la fusión es más rápida y se da sobre una porción mayor del glaciar.

Por tanto, la elevación de la temperatura también eleva la altitud de la línea de equilibrio. En latitudes con estaciones muy diferenciadas aumenta así la parte del glaciar que se funde cada verano y, en algunos casos, puede disminuir la parte del glaciar capaz de retener la masa acumulada durante el invierno. Apenas si hay glaciares en el mundo que no hayan retrocedido en cuanto importante durante el transcurso de los últimos 150 años, y algunos de los más pequeños han desaparecido del todo. El calentamiento parece ser la principal causa de estos cambios, hasta el punto de que se han utilizado los registros de la extensión de los glaciares para estimar las temperaturas del pasado, con resultados que concuerdan con los datos obtenidos de los anillos de los árboles y otras mediciones indirectas.

Sin embargo, las condiciones de los glaciares son muy distintas en los trópicos, donde la diferencia de temperatura es mucho mayor entre el día y la noche que entre el mes más cálido y el más frío. La característica

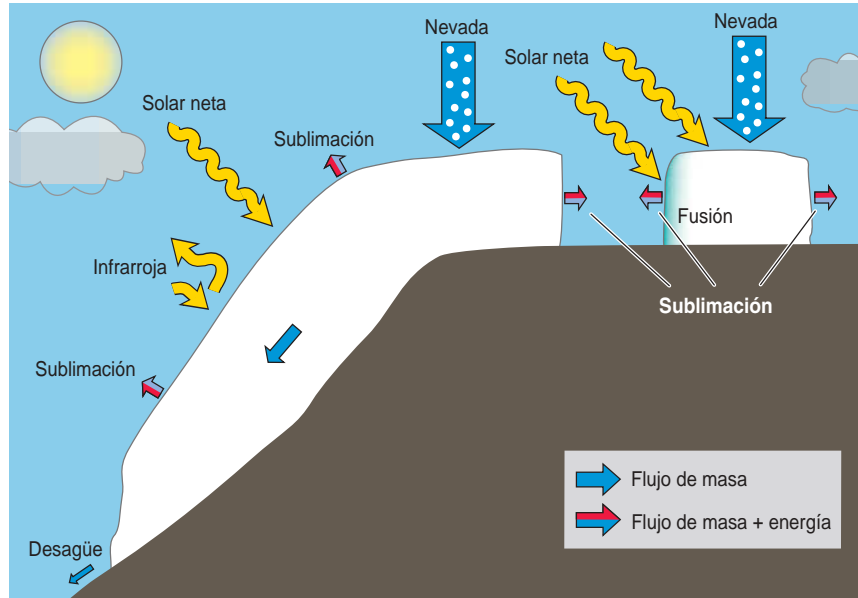
estacional más marcada en los trópicos estriba en la existencia de una o dos estaciones de lluvias, cuando la acumulación glacial es mayor y, a causa de la nubosidad, menor la radiación solar.

Dado que en los glaciares tropicales apenas si existe fluctuación estacional de la ELA, una porción mucho menor del glaciar se encuentra a altitudes más bajas que esa cota. Es decir, como los procesos que merman los glaciares operan casi a diario, extienden su eficacia sobre una superficie mucho menor. Esa superficie menor implica, también, que los márgenes superior e inferior de los glaciares tropicales ofrecerán una respuesta más rápida a los cambios que sufra el balance de masas.

Otra importante distinción en los glaciares tropicales es la diferencia entre regímenes secos y húmedos. En los regímenes húmedos, los cambios de la temperatura del aire tienen importancia para el cálculo del balance de masas; en los regímenes secos del este de África, importan más los cambios de la humedad atmosférica. Los vínculos entre estos cambios y los incrementos globales de gases de efecto invernadero resultan más débiles en los regímenes tropicales. La variabilidad anual y las tendencias a largo plazo de la distribución estacional de la humedad responden a la influencia de la temperatura de la superficie de los océanos tropicales, los cuales, a su vez, responden al clima global. En muchos de los glaciares tropicales, lo mismo el efecto directo del calentamiento global que el indirecto —las variaciones de la humedad atmosférica— son responsables de la pérdida de masa observada. El solo hecho de que el hielo esté desapareciendo no aporta luz sobre el mecanismo responsable. De la mayoría de los glaciares no existen registros observacionales ni mediciones detalladas. A esa carencia hay que añadir la dificultad para distinguir entre uno y otro agente causal.

La montaña resplandeciente

¿Qué ocurre en el Kilimanjaro? Aunque la relación entre el clima y los glaciares tropicales varía según los lugares, el régimen glacial del Kilimanjaro es único. Su hielo se encuentra en un casquete de hielo de hasta cuarenta metros de espesor, si-



3. LA UBICACION DEL KILIMANJARO en una zona climática tropical fría y árida varía su ecuación de balance de masas. En los trópicos, los glaciares no van y vienen de veranos a inviernos, de nevadas a fusiones; las temperaturas cambian más de la mañana a la noche que de unas estaciones a otras. El casquete de hielo del Kilimanjaro se encuentra en su llana cumbre, a 5700 metros de altitud; presenta bordes verticales y diversos glaciares de vertiente, la mayoría de ellos a altitudes en las que las temperaturas se mantienen por debajo del punto de congelación y en las que la principal fuente de energía es la radiación solar. La superficie glacial emite hacia el aire circundante una cantidad considerable de radiación infrarroja. Los glaciares del Kilimanjaro pierden masa por sublimación, la transformación directa del hielo en vapor de agua. Apenas si se observa agua procedente de la fusión del hielo.

tuado en una meseta bastante llana de su pico volcánico más alto, el Kibo, entre 5700 y 5800 metros sobre el nivel del mar, y en varios glaciares de vertiente situados más abajo. Los glaciares de vertiente se extienden y bajan hasta unos 5200 metros (uno de ellos, en una ladera umbría, llega hasta los 4800 metros).

El casquete de hielo es demasiado delgado para que se deforme y la meseta demasiado llana para que deslice por ella. Los flancos de la cumbre, muy abruptos, presentan una pendiente media de 35 grados. Sin embargo, los glaciares de vertiente, que se mueven poco en comparación con los de las latitudes medias y templadas, adquieren y pierden masa a lo largo de sus inclinadas superficies. El hielo de la meseta tiene dos tipos de cara que interactúan, cada uno de manera bastante distinta, con la atmósfera y, por lo tanto, con el clima: superficies casi horizontales y escarpes casi verticales (los bordes laterales del hielo de la meseta).

¿Qué factores explicarían el declive del hielo del Kilimanjaro? El calentamiento global es un sospechoso evidente: ha participado claramente en el declive glacial de otros lugares, según estudios detallados del balance de masas (de los pocos glaciares en los que se han hecho esos estudios) y conforme a las correlaciones entre la extensión de los glaciares y la temperatura del aire (en muchos más glaciares). El ascenso de las temperaturas del aire modifica el balance energético de la superficie mediante la potenciación de la transferencia de calor por contacto entre la atmósfera y el hielo, el incremento de la radiación infrarroja y, finalmente, la elevación de la ELA, con la consiguiente ampliación de la superficie en que se produce la pérdida de masa. (El primer y único artículo que ha asociado el retroceso del glaciar del Kibo al aumento de la temperatura del aire fue el publicado en el año 2000 por Lonnie G. Thompson y otros, de la Universidad estatal de Ohio.)

Otra causa posible es el descenso en la acumulación combinado con el aumento de la sublimación, fenómenos ambos dirigidos, posiblemente, por la variación en la frecuencia y cantidad de la nubosidad y las precipitaciones de nieve. Lo barruntaron ya los exploradores europeos del siglo XIX. Mejoraron sustancialmente el argumento los trabajos de campo de Kaser, Douglas K. Hardy, del Centro de Investigación del Clima de la Universidad de Massachusetts en Amherst, Tharsis Hyera y Juliana Adosi, de la Agencia Meteorológica de Tanzania, y otros.

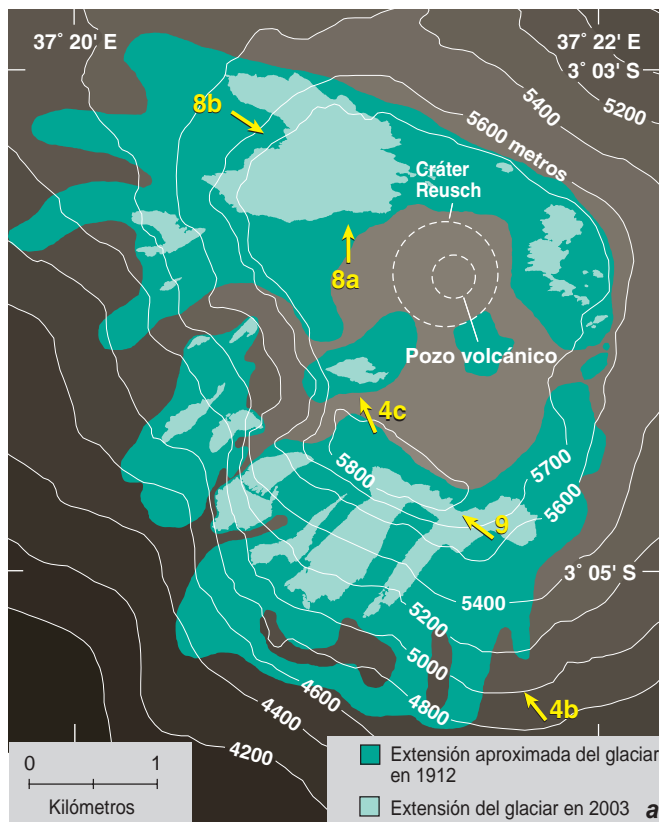
Hardy invitó en 2001 a Kaser y a unos periodistas de televisión a colaborar con él en el rodaje de un documental sobre el retroceso del hielo del Kibo. Los instrumentos que Hardy había dejado en la meseta del Kibo llevaban alrededor de año y medio tomando datos meteo-

rológicos. Kaser estudiaba los glaciares tropicales desde hacía más de quince. El equipo instaló sus tiendas justo debajo de uno de los más impresionantes escarpes del campo de hielo Norte, en su borde meridional. Durante cinco días con sus noches observamos allí el hielo y debatimos sobre los mecanismos que controlaban los cambios, estimulados una y otra vez por las incisivas preguntas de los dos periodistas. Las cenizas volcánicas del Kibo nos proporcionaron la pizarra sobre la que dibujamos y un bastón de esquí nos sirvió de lápiz a medida que el régimen de los glaciares del Kibo nos iba quedando más claro. Así fue como se planteó la hipótesis básica que todavía hoy domina nuestra investigación y que las subsecuentes mediciones de campo sobre los balances de masas y energético han confirmado con claridad: que la temperatura local del

aire y sus cambios ejercían un efecto menor. Aquí está la prueba.

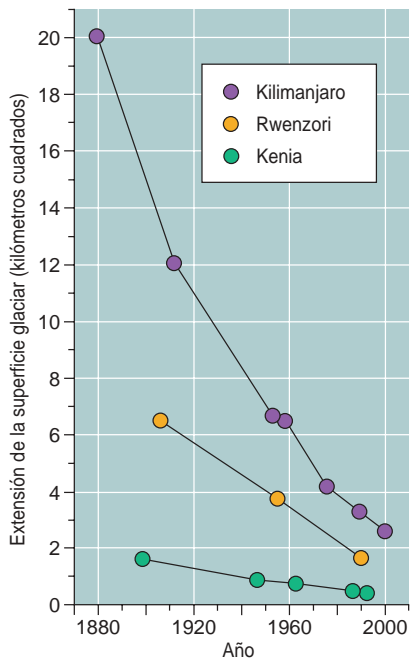
Tiempo y temperatura

Las observaciones existentes del hielo del Kilimanjaro desde 1880 hasta 2003 nos permiten cuantificar las variaciones de la superficie, pero no las de la masa y el volumen. Hans Meyer y Ludwig Purtscheller alcanzaron la cima, los primeros, en 1889. Basándose en sus informes y anotaciones, pero sobre todo en las morrenas identificadas mediante series de fotografías, Henry Osmaston calculó en 1989 que la superficie medía 20 kilómetros cuadrados en 1880. En 1912, un preciso mapa a escala 1:50.000, basado en fotogrametría terrestre (la determinación de distancias y tamaños a partir de mediciones en fotografías tomadas en tierra), obra de Edward Oehler y Fritz Klute, estableció la superficie en 12,1



4. EL HIELO DEL KILIMANJARO se circunscribe a su pico volcánico más alto, el Kibo. Sus glaciares se exploraron a finales del siglo XIX y se estudiaron ya en 1912, casi un cuarto de siglo antes de que Ernest Hemingway les proporcionara fama literaria al titular una de sus novelas *Las nieves del Kilimanjaro*. En 1912 los glaciares ocupaban una superficie total de 12,1 kilómetros cuadrados; para 2003 la superficie se había

reducido a 2,5 kilómetros cuadrados (a). El retroceso más rápido pudo tener lugar entre 1912 y 1953, año en que la superficie era de 7 kilómetros cuadrados. Las flechas señalan la posición de los puntos de vista de las dos fotografías de la derecha —una vista aérea del Kibo desde el suroeste (4b) y una vista del hielo de la meseta desde el sur-sureste (4c) con el Campo de Hielo Norte al fondo— y de las expuestas en las figuras 8 y 9.



gistros de temperatura sugieren un calentamiento de 0,5-0,8 grados entre 1901 y 2005, una cifra nada trivial aunque probablemente superior a la del calentamiento en el Kibo.

En la troposfera libre, extensa capa donde se encuentra el Kibo, el ritmo de calentamiento durante el período 1979-2004 para la zona comprendida entre los 20 grados de latitud N y S fue menor de 0,1 grados por década, menor que el de la superficie a nivel del mar en el mismo período y estadísticamente no diferente de cero. Las medias sobre toda esa gruesa capa de la atmósfera, sin embargo, pueden ser una pobre estimación del calentamiento en el Kilimanjaro, si bien se ha sostenido que el calentamiento quizá haya sido casi el mismo en todas las longitudes tropicales,

5. LAS MEDICIONES DE SU EXTENSION indican que todos los grandes glaciares del este del Africa tropical (el ecuador es la *línea discontinua*) están retrocediendo. El ritmo de este retroceso no se ajusta a la velocidad de cambio de temperaturas global. Muchos glaciares que en actualidad están en rápido retroceso alcanzaron el equilibrio, e incluso crecieron, en la los setenta. El casquete de hielo del Kilimanjaro, por el contrario, parece haber retrocedido con especial rapidez durante la primera mitad del siglo xx.

dado que los efectos rotacionales son pequeños, lo que impone estrictas limitaciones dinámicas.

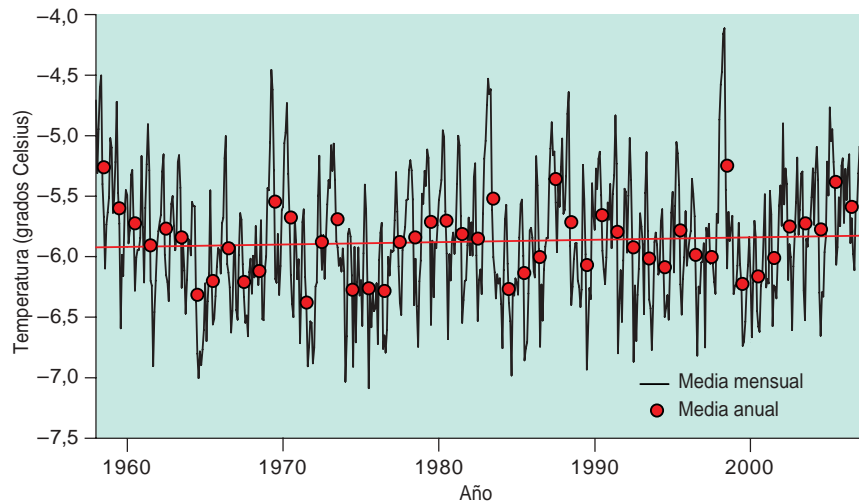
A partir de las medidas de la temperatura del aire en la superficie de 500 milibares de presión atmosférica (aproximadamente a 5500 metros de altitud), obtenidas de globos sonda, un artículo deduce una tendencia al calentamiento en la troposfera media tropical desde alrededor de 1960 hasta 1979, seguido de un enfriamiento de 1979 a 1997. Pero el estudio en cuestión no se ha actualizado.

Dos de los grupos de datos utilizados para calcular dichas medias tropicales son "reanálisis" de información previa: las observaciones se incluyen

kilómetros cuadrados. Hacia 2003, la superficie era de sólo 2,5 kilómetros cuadrados, una reducción de casi el 90 por ciento. Sin embargo, el grueso de la reducción se había producido ya para 1953, cuando la extensión era de 6,7 kilómetros cuadrados (un retroceso de un 66 por ciento desde 1880). Durante ese mismo período, el movimiento del hielo ha sido casi nulo en la meseta y muy pequeño en las laderas. Existen indicios de que los glaciares de vertiente, al menos, están a punto de conseguir el equilibrio.

Esta pauta de cambio no coincide con el ritmo a que han ido variando las temperaturas mundiales: tras un período de estabilidad, vienen experimentado un fuerte incremento desde la década de los setenta. Otros glaciares sí han seguido el paso de las temperaturas; muchos alcanzaron el equilibrio, o incluso avanzaron, hacia los años setenta, antes de empezar un gran retroceso.

Cuesta establecer la tendencia de las temperaturas a causa de la escasez de mediciones. En cualquier caso, tomados en su conjunto, los datos presentados en el informe de 2007 del IPCC (Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático) apenas si descubren alguna en la temperatura local a lo largo de las últimas décadas. En los altiplanos del Africa oriental, a mucha menor altura que las cimas del Kilimanjaro, los re-



6. SE DISPONE DE ESCASOS REGISTROS de las temperaturas de la zona del Kilimanjaro. Lo que no empece que contemos ahora con un registro de las lecturas de globos meteorológicos a la altura de su cima, ampliadas por un "reanálisis", el uso de un modelo dinámico global que genera información coherente de la temperatura allá donde no existen observaciones. Los datos resultantes muestran que las temperaturas medias mensuales alrededor de la cima del Kilimanjaro han fluctuado entre -4 y -7 grados Celsius desde 1958; cuando se traza una línea a través de esos puntos no se observa una tendencia al calentamiento significativa.

en un modelo dinámico global que proporciona información dinámicamente coherente sobre las temperaturas, los vientos y demás fenómenos meteorológicos, incluso donde no se han efectuado observaciones. En el punto de reanálisis más cercano a la cima del Kilimanjaro parece no haber una tendencia desde finales de los años cincuenta. De todos modos, al igual que la información procedente de los globos sonda y los satélites, los datos del reanálisis pueden no ser los apropiados para establecer tendencias a lo largo del tiempo.

La combinación de estas líneas de investigación dispares no dan a entender que haya habido calentamiento en la cumbre del Kilimanjaro suficiente para explicar la desaparición de la mayor parte de su hielo, ni a lo largo de todo el siglo XX ni durante el período mejor medido, los últimos 25 años.

En el congelador

Se ha observado también que las temperaturas del aire a la altura de los glaciares y el casquete de hielo del Kilimanjaro son casi siempre bastante inferiores al punto de congelación (rara vez superan los -3 grados). Así

pues, el aire no puede, por sí mismo, calentar el hielo y fundirlo, ni por flujo de calor por contacto, ni por radiación infrarroja: en las ocasiones en que hay fusión, la produce la radiación solar, con muy poco viento, circunstancia que permite la generación de una capa cálida de aire muy cerca del hielo.

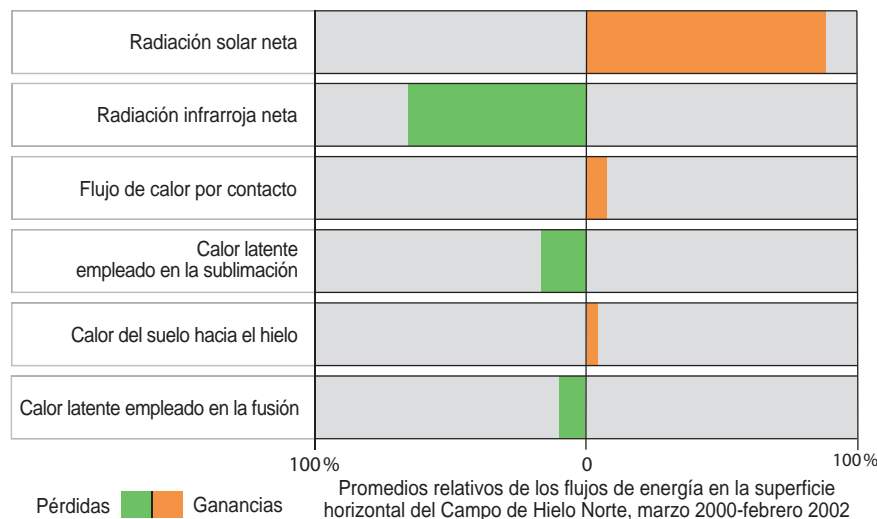
Otros indicios que guardan relación con éste son los relativos a la forma y la evolución del hielo. Espectaculares muros de hielo de alturas asombrosas (de más de 40 metros en algunos lugares) se levantan ante el visitante de la cima del Kibo. Esos bordes no pueden crecer horizontalmente, pero sí pierden sin cesar masa por ablación (primero por sublimación e intermitentemente por fusión) cuando quedan expuestos al Sol, aunque la temperatura del aire se halle por debajo del punto de congelación. Una vez se han desarrollado, los bordes casi verticales retrocederán hasta que desaparezca el hielo, ya que la nieve no puede acumularse en esas paredes.

El observador atento se percató de otro hecho sorprendente: las paredes tienen una orientación predominante este-oeste. Esta característica guarda

relación con la radiación solar, cuya intensidad viene regulada por las pausas diarias y estacionales de la nubosidad: el ciclo diario de convección atmosférica profunda que tiene lugar sobre el África central supone que las tardes, cuando el Sol se encuentra al oeste, sean muy nubosas. En las estaciones equinocciales, cuando el Sol está casi en la normal, las tardes son también nubosas, mientras que cuando el Sol se halla al norte o al sur (durante los solsticios), la cumbre aparece libre de nubes. Por la misma razón, los bordes del hielo retroceden más lentamente por las caras oeste, noroeste y suroeste.

El papel de la radiación solar en el modelado de los bordes del hielo es evidente en otros aspectos. Mientras el hielo retrocede horizontalmente, puede dejar tras de sí vestigios verticales de poco grosor, como cuchillas; llegan a ser tan delgados, que se desmoronan y desaparecen. Al igual que otros exploradores que llegaron antes que ellos, Kaser y Hardy vieron en el casquete de hielo del Kibo, en más de una ocasión, unas formaciones esculpidas llamadas *penitentes*. También se han observado penitentes en muchos lugares de los Andes y el Himalaya, donde algunas veces son mucho mayores. Estas estructuras digitiformes se producen cuando las irregularidades iniciales de una superficie plana crean en oquedades acumulaciones de polvo, lo que acelera la fusión del hielo al aumentar allí la absorción de la radiación solar. Los huecos entre los penitentes quedan a refugio del aire, aun cuando el viento que azota las puntas de las agujas que se están formando favorece la sublimación, que enfría la superficie.

Si la radiación infrarroja y la transferencia de calor por contacto fueran factores dominantes, estas formaciones esculpidas no durarían tanto. La radiación solar y la sublimación esculpen; la radiación infrarroja y la transferencia de calor por contacto son difusas, actúan en todas las direcciones y, por lo tanto, allanan las formas. La persistencia de estas abruptas formaciones en la cima del Kilimanjaro constituye una prueba fehaciente de que no actúan los factores que allanan las formas, estrechamente relacionados, desde un punto de vista energético, con la temperatura del aire.



7. SE HA PROCEDIDO AL REGISTRO INSTRUMENTAL de los flujos de energía de y hacia la superficie del glaciar de la cumbre del Kibo. Los flujos de energía por radiación constituyen la base del intercambio de calor. El flujo neto infrarrojo es claramente negativo porque la radiación infrarroja está controlada por la temperatura, y la temperatura de emisión de la atmósfera es mucho menor que la de la superficie del glaciar. El tercer gran flujo de energía es el calor latente que abandona la superficie en la sublimación. La energía necesaria para la fusión es menos de la mitad y, además, el agua de fusión se vuelve a congelar en las capas inferiores del hielo. Otros flujos apenas si contribuyen al proceso.



8. LOS VISITANTES DE LA CUMBRE DEL KILIMANJARO son recibidos por escarpes de hielo de hasta 40 metros de altura en algunos lugares (a) (Para hacerse una idea de la escala, véase el científico que controla instrumentos al pie de una pared de 30 metros de altura). La cara meridional del Campo de Hielo Norte, como se aprecia aquí, retrocede cuando el Sol se encuentra al sur; la cara septentrional retrocede cuando el Sol está al norte.



La convección profunda diaria sobre el África central hace que la mayoría de las tardes, cuando el Sol está al oeste, sean nubosas y que los márgenes oeste, noroeste y suroeste retrocedan más lentamente. Esta pauta refuerza la idea de que la responsable de la merma es la radiación solar. El retroceso deja formaciones de hielo sueltas (b) que acaba por menguar tanto, que se desmoronan.

Balace de masas

¿Qué se sabe del balance de masas del hielo del Kibo? La investigación reciente sobre los flujos de masa y de energía ha puesto de manifiesto que el balance de masas en las superficies horizontales del Kibo viene regido por la presencia o ausencia de precipitaciones de nieve abundantes y frecuentes. Hardy ha venido midiendo directamente la estratificación anual de nieve en el Kilimanjaro desde el año 2000 con hitos. De acuerdo con los datos recabados, la superficie horizontal del Campo de Hielo Norte ha experimentado dos años de balance de masas casi nulo. La mayor ganancia neta de masa correspondió al año 2006, que terminó en África oriental con lluvias excepcionales, fuertes y prolongadas, asociadas a anomalías de la temperatura de la superficie del océano Índico. Durante meses, la nieve cubrió casi por entero la cumbre del Kilimanjaro.

La precipitación de nieve es el principal proceso que incrementa la masa de hielo, pero las nevadas intervienen también en el balance energético, función cuya importancia aumenta aún más por el papel prominente de la radiación solar. Con la pérdida de masa tienen que ver la cantidad y, sobre todo, la frecuencia de las precipitaciones de nieve: la superficie de la nieve antigua o ensuciada es oscura y absorbe bastan-

te más energía de la radiación solar que la superficie blanca de la nieve reciente.

Cuando hay más energía disponible en la superficie de un glaciar, aumenta la sublimación. Mas, incluso con temperaturas inferiores al punto de congelación, la misma energía puede incrementar la fusión si no sopla el viento. Es de suponer que el agua de fusión de la superficie volverá a congelarse en capas de hielo inferiores, por lo que la fusión no constituye, necesariamente, una pérdida para la capa de hielo en su conjunto: un observador de un glaciar de vertiente difícilmente verá saliendo del pie del glaciar algo más que un hilo de agua de fusión.

La comparación de fotografías históricas indica que a lo largo del siglo pasado el adelgazamiento del glaciar de la meseta ha sido de unos 10 metros, ritmo de pérdida de masa que puede explicarse por unas precipitaciones de nieve que no compensan la sublimación. Sin embargo, la reducción observada de la extensión de la superficie de hielo se da principalmente por los bordes verticales, detalle que la pauta de las nevadas no explica.

El balance de masas de los glaciares de vertiente difiere algo del que se observa en el hielo de la meseta. Los glaciares en retroceso de las latitudes medias pierden la

mayor parte de su masa por debajo de la ELA y poca o ninguna por encima. Los glaciares de vertiente del Kibo, en cambio, retroceden por el límite superior y por el inferior. Su historia nos dice que en 1900 se encontraban muy lejos del equilibrio, si bien parece que su reducción se está frenando. Esto, junto a su forma convexa, sugiere que están cerca de alcanzar un nuevo equilibrio, con un tamaño menor, entre las pérdidas hasta cierto punto constantes y la acumulación disminuida.

Los glaciares y el cambio climático

Las observaciones descritas hasta aquí apuntan a una combinación de factores distintos del calentamiento del aire —principalmente, una mayor sequedad del aire del macizo, que redujo la acumulación y aumentó la ablación— como causa de la desaparición del hielo del Kilimanjaro desde los días de las primeras observaciones, efectuadas en el penúltimo decenio del siglo XIX. El balance de masas está dominado por la sublimación, que requiere mucha más energía por unidad de masa que la fusión; esa energía la proporciona la radiación solar.

Estos procesos son casi insensibles a la temperatura y, por ello, al calentamiento global. Si la temperatura del aire acabara por superar



9. LAS FORMACIONES DIGITIFORMES llamadas “penitentes” se integran en el casquete de hielo del Kibo. Son una prueba más de que el calentamiento no actúa allí. La radiación solar y la sublimación suelen crear este tipo de estructuras; la radiación infrarroja y la transferencia de calor por contacto, en cambio, las suavizan. La silueta que se ve es la de Nicolas Cullen, de la Universidad de Otago de Nueva Zelanda.

el punto de congelación, el flujo de calor por contacto y las emisiones atmosféricas de onda larga tomarían el relevo de la sublimación y la radiación solar. Como los glaciares de la cima no están sombreadas, pronto desaparecerían todas las formaciones afiladas. Sin embargo, estas formas han permanecido más de un siglo. Del mismo modo, cuando los exploradores del siglo XIX llegaron a la cima del Kilimanjaro las paredes verticales de hielo ya se habían desarrollado y se habían puesto en marcha los procesos de pérdida de masa que han continuado hasta la actualidad.

Una pista más sobre el ritmo de la merma de hielo proviene del nivel del agua del vecino lago Victoria. Los registros históricos y otros datos representativos del nivel del

lago indican un descenso sustancial de las precipitaciones regionales a finales del siglo XIX, tras decenios de intensa pluviosidad. En general, lo que sugieren los registros históricos disponibles es que el enorme casquete de hielo descrito por los exploradores de la época victoriana debíase a un período inusualmente húmedo, no a unas temperaturas globales más frías.

Si el calentamiento global inducido por la Humanidad ha desempeñado alguna función en el retroceso del hielo del Kilimanjaro, habrá sido bastante tarde, cuando el resultado estaba ya definido; como mucho, habrá desempeñado un papel accesorio, con una influencia indirecta. Las investigaciones del calentamiento y sus causas que establecen que la influencia humana en el clima mun-

dial empezó a manifestarse con nitidez algo después de 1950, llegan a esa misma conclusión acerca de la temperatura del este de África a altitudes mucho menores que la cima del volcán.

El hecho de que la pérdida de hielo en el monte Kilimanjaro no valga como prueba del calentamiento global no significa que la Tierra no se esté calentando. Existen numerosos indicios, muy sólidos, de que la temperatura media de la Tierra ha aumentado en los últimos 100 años; el retroceso de los glaciares de latitudes altas y medias constituye una parte importante de la prueba. Sin embargo, las condiciones especiales que se dan en el Kilimanjaro lo distinguen de las montañas de latitudes mayores, cuyos glaciares retroceden a causa de la subida de la temperatura del aire. Los balances de masas y energético, así como las formas que adopta el hielo, apuntan en la misma dirección: a un papel insignificante de la temperatura atmosférica en las fluctuaciones del hielo del Kilimanjaro.

Es posible, sin embargo, que exista una conexión indirecta entre la acumulación de gases de efecto invernadero y la desaparición del hielo del Kilimanjaro. Hay indicios muy sólidos de una asociación a lo largo de los últimos 200 años entre las temperaturas de la superficie del océano Índico y la circulación atmosférica y las pautas de precipitación que alimentan o reducen el hielo del Kilimanjaro. Estas pautas han hecho retroceder el hielo desde finales del siglo XIX, o quizá sería más preciso decir que han revertido el exceso en el crecimiento del hielo del tercer cuarto del siglo XIX. Cualquier participación de los cada vez más abundantes gases de efecto invernadero en este modelo de circulación habrá tenido lugar, necesariamente, sólo en las últimas décadas; por lo tanto, será responsable, como mucho, de una parte del retroceso reciente del hielo y de una parte mucho menor del retroceso total.

¿Está condenado a desaparecer el casquete de hielo del Kilimanjaro? Es posible. Los altos bordes del hielo que aún existe dificultan la expansión horizontal del casquete. Aunque en el curso de meses y años puedan acumularse nevadas sobre el hielo, las que caigan sobre las rocas de la meseta se sublimarán o fundirán en cuestión de días (con la notable excepción del período de varios meses de cobertura continua de nieve que empezó a finales de 2006 y continuó en 2007), en parte porque una fina capa de nieve sobre roca oscura no se mantiene por mucho tiempo, ya que los procesos de pérdida reducen la nieve reflectante y exponen roca que absorbe radiación solar. Si la capa de hielo fuera mucho más gruesa y tuviese una forma que permitiera al hielo deslizarse hacia fuera, se podrían desarrollar suaves pendientes a lo largo de los bordes del casquete; las nuevas aportaciones de nieve estarían protegidas de las pérdidas y se acumularían. Sin embargo, los bordes escarpados no permiten semejante tipo de expansión.

Por otro lado, si la atmósfera alrededor del Kilimanjaro se calentara ocasionalmente por encima de los 0 grados, la transferencia de calor a la superficie del hielo, por contacto y por radiación infrarroja, erosionaría las aristas del casquete de hielo y se

desarrollarían presto pendientes más suaves. Si, además, se incrementara la precipitación, la nieve podría acumularse en las vertientes y permitiría crecer al casquete.

Paradójicamente, un calentamiento global considerable, acompañado de un incremento en la precipitación, podría salvar el hielo del Kilimanjaro. Podría salvarse también con un gran incremento de la precipitación de nieve, como el experimentado en las nevadas de 2006-2007, que

cubriera la superficie formada por oscuras cenizas con un grosor tal, que no se sublimara por completo antes de la siguiente estación de lluvias. Una vez iniciado, un cambio así permitiría que la capa de hielo creciese. Esté el casquete de hielo del Kibo desapareciendo, o esté creciendo y convirtiéndose en algo distinto mientras usted lee estas palabras, no se trataría, nos dice la glaciología con bastante seguridad, ni de la primera vez, ni de la última.

Los autores

Philip W. Mote es investigador de la Universidad de Washington, integrado en su grupo de impactos climáticos y docente en el departamento de ciencias atmosféricas. Es coautor de otro artículo de este número, *El fundamento físico del cambio global*. El y **Georg Kaser** se conocieron durante la confección del el IV Informe Evaluador del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático. Kaser, glaciólogo, enseña en la Universidad de Innsbruck. Estudiante de los glaciares tropicales, ha dirigido también trabajos de campo en el Kilimanjaro (Tanzania), el Rwenzori (Uganda), la cordillera Blanca (Perú) y en los Alpes. Preside la Comisión de Ciencias Criosféricas de la Unión Internacional de Geodesia y Geofísica.
©American Scientist Magazine.

Bibliografía complementaria

- GLACIERS, GLACIATION AND EQUILIBRIUM LINE ALTITUDES ON KILIMANJARO. H. OSMASTON en *Quaternary and Environmental Research on East African Mountains*, dirigido por W. C. Mahaney, págs. 7-30. Brookfield; Rotterdam, 1989.
- A REVIEW OF MODERN FLUCTUATIONS OF TROPICAL GLACIERS. G. Kaser en *Global and Planetary Change*, vol. 22, n.ºs 1-4, págs. 93-103; 1999.
- MULTIDECADAL CHANGES IN THE VERTICAL TEMPERATURE STRUCTURE OF THE TROPICAL TROPOSPHERE. D. J. Gaffen, B. D. Santer, J. S. Boyle, J. R. Christy, N. E. Graham y R. J. Ross en *Science*, vol. 287, págs. 1242-1245; 2000.
- ICE-CORE PALEOCLIMATE RECORDS IN TROPICAL SOUTH AMERICA SINCE THE LAST GLACIAL MAXIMUM. L. G. Thompson, E. Mosley-Thompson y K. A. Henderson en *Journal of Quaternary Science*, vol. 15, págs. 377-394; 2000.
- KILIMANJARO ICE CORE RECORDS: EVIDENCE OF HOLOCENE CLIMATE CHANGE IN TROPICAL AFRICA. L. G. Thompson *et al.* en *Science*, vol. 98, págs. 589-593; 2002.
- SOLAR-RADIATION-MAINTAINED GLACIER RECESSION ON KILIMANJARO DRAWN FROM COMBINED ICE-RADIATION GEOMETRY MODELING. T. Mölg, D. R. Hardy y G. Kaser en *Journal of Geophysical Research*, vol. 108(D23), págs. 4731; 2003.
- MODERN GLACIER RETREAT ON KILIMANJARO AS EVIDENCE OF CLIMATE CHANGE: OBSERVATIONS AND FACTS. G. Kaser, D. R. Hardy, T. Mölg, R. S. Bradley y T. M. Hyera en *International Journal of Climatology*, vol. 24, págs. 329-339; 2004.
- ABLATION AND ASSOCIATED ENERGY BALANCE OF A HORIZONTAL GLACIER SURFACE ON KILIMANJARO. T. Mölg, y D. R. Hardy en *Journal of Geophysical Research*, vol. 109, págs. D16104; 2004.
- EXTRACTING A CLIMATE SIGNAL FROM 169 GLACIER RECORDS. J. Oerlemans en *Science*, vol. 308, págs. 675-677; 2005.
- KILIMANJARO GLACIERS: RECENT AREAL EXTENT FROM SATELLITE DATA AND NEW INTERPRETATION OF OBSERVED 20TH CENTURY RETREAT RATES. N. J. Cullen, T. Mölg, G. Kaser, K. Hussein, K. Steffen y D. R. Hardy en *Geophysical Research Letters*, vol. 33, pág. L16502, 2006.
- OBSERVATIONS: SURFACE AND ATMOSPHERIC CLIMATE CHANGE. Capítulo 3 en *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. K. E. Trenberth *et al.* Contribution of Working Group 1 to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press; Cambridge, y Nueva York; 2007.