

El calentamiento del permafrost en las montañas de Europa

Por Charles HARRIS¹ y Wilfried HAEBERLI²

Introducción

Se estima que el permafrost, o suelo permanentemente congelado, se extiende por debajo de alrededor del 25 por ciento de la masa continental del hemisferio norte, estando la mayor parte en latitudes altas de Canadá, China, Rusia y los EE.UU. Sin embargo, también está presente en altitudes altas de las regiones montañosas de latitudes más bajas, incluidas las montañas más altas de Europa. Muchos elementos de la criosfera mundial (nieve y hielo) son sensibles al clima (Haerberli y otros, 2002). El Sistema Mundial de Observación Terrestre (SMOT) perteneciente al Sistema Mundial de Observación del Clima (SMOC) ha identificado las seis variables criosféricas siguientes como indicadores del cambio climático (Cihlar y otros, 1997):

- Las temperaturas de perforación en zonas frías de neviza de los glaciares.
- El cambio de masa y de geometría en los glaciares y en los casquetes de hielo.
- El ritmo de la congelación y de la descongelación de lagos y ríos.
- La extensión y el equivalente en agua de la cubierta de nieve.
- La condición térmica del permafrost, su grosor de capa activa y su régimen térmico.

Las temperaturas del permafrost son sensibles tanto a los cambios en la temperatura de la atmósfera como a los cambios en la cubierta del suelo, en particular al espesor, ritmo y duración de la nieve (Anisimov y Nelson, 1996; Jin y otros, 2000; Hoelzle y otros, 2001). Se ha creado una Red Terrestre Mundial para el Permafrost (RTM-P), para organizar y gestionar un sistema mundial de observación del permafrost, interesado sobre todo en la evolución de la capa activa y en los cambios en la temperatura del suelo congelado (Burgess y otros, 2000). Uno de los principales desafíos es asociar las medidas locales detalladas para comprender mejor el proceso, con la cobertura mundial con una resolución de píxel.

Estrategia mundial de vigilancia

Haerberli y otros (2002) ofrecen un resumen de la Estrategia Jerárquica Mundial de Observación

(GHOST) adoptada para los glaciares dentro del SMOT/SMOC, y también se propone un sistema similar en cinco niveles para las medidas de la temperatura de perforaciones relacionadas con el clima a largo plazo en el permafrost, como se resume brevemente a continuación:

Nivel 1: Grandes cortes transversales de medidas realizados a lo largo de gradientes medioambientales

Lugares experimentales intensivos diseñados para investigar la variación espacial del régimen térmico del permafrost y las relaciones del proceso a través de los gradientes medioambientales.

Nivel 2: Estudios extensivos y de alta resolución orientados al estudio del estado térmico del permafrost profundo, los flujos de energía y los controles de superficie

Las medidas del equilibrio de energía permiten calibrar los modelos numéricos que relacionan los datos meteorológicos y los datos de nieve con las temperaturas del suelo (p. ej., Hoelzle y otros, 2001). Entonces, dichos modelos pueden usarse para reconstruir la evolución térmica pasada probable del permafrost y para predecir la respuesta térmica del permafrost a posibles escenarios futuros del clima.

Nivel 3: Observaciones regionales de temperaturas de perforación, en profundidades intermedias, (profundidad de amplitud cero e inferiores) en intervalos regulares de tiempo.

Los lugares del nivel 3 prueban los cambios seculares dentro de zonas o regiones climáticas. Las medidas de los gradientes geotérmicos del permafrost y el flujo de calor permiten reconstruir los cambios climáticos recientes y ofrecer datos para la calibración de estudios de modelización del nivel 2.

Nivel 4: Lugares donde los datos de vigilancia del permafrost pueden extrapolarse a zonas mayores a través del cartografiado, la modelización espacial y la prospección geofísica.

La representatividad espacial es la mayor prioridad. El acoplamiento de los materiales del suelo (lecho de roca, sedimentos de la superficie, contenido de hielo en suelo) y de la cubierta de la superficie (vegetación, cubierta y duración de la nieve) con las variables cli-

¹ Departamento de Ciencias de la Tierra de la Universidad de Cardiff, Gales, Reino Unido

² Departamento de Geografía de la Universidad de Zurich, Suiza

matológicas como la radiación solar y la temperatura del aire es crítico para las condiciones del permafrost. De esta forma, los lugares del nivel 4 deben muestrear una serie de escenarios geológicos, topográficos y climatológicos para que se puedan comprender completamente las respuestas del permafrost a las perturbaciones climatológicas.

Nivel 5: Cobertura mundial basada en una combinación de medidas in situ, teledetección y modelos mundiales o regionales de circulación

La aplicación del nivel 5 requiere colaboración internacional para permitir integrar las observaciones terrestres (generalmente muestras puntuales) en el sistema mundial. El principal desafío relacionado con el permafrost es la ausencia continua de toda metodología de teledetección que ofrezca información directa del estado criológico de la superficie. La radiometría de microondas pasivos combinada con el efecto de la temperatura inferior de la nieve (TIN) (cf. Haeberli, 1978; Vonder Mühl y otros, 2001) parece ofrecer algún potencial para el futuro pero también pueden ser importantes los cambios relacionados con las condiciones de la superficie (nieve, vegetación).

La Red Europea PACE de Vigilancia del Permafrost

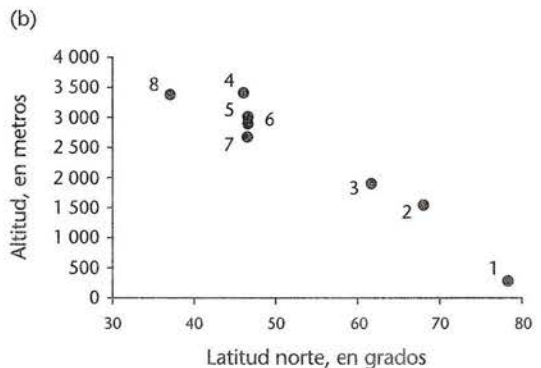
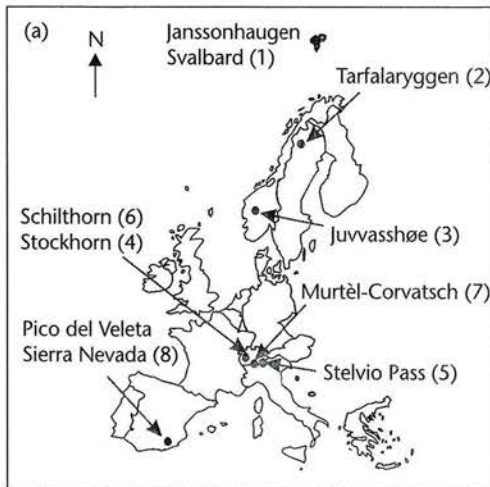
En diciembre de 1997, la Unión Europea patrocinó un programa multinacional de investigación a tres años llamado "Permafrost y Clima en Europa: cambio climático, degradación del permafrost de montaña y riesgo geotécnico (PACE)". Una componente crítica era crear un corte de medidas longitudinales de perforaciones de permafrost que tuvieran instrumentos a lo largo de las montañas más altas de Europa (Figura 1a), desde Svalbard, en el norte, a Sierra Nevada, en el sur (Harris y otros, 2001). Esta red de vigilancia forma el

centro de las investigaciones complementarias, incluidos estudios geofísicos, investigaciones microclimáticas, modelización numérica de la distribución del permafrost y modelización física de la inestabilidad de ladera, relacionada con el permafrost. El corte de medidas a lo largo del margen oriental de la región del Atlántico Norte cae en una zona clave en términos de circulación mundial atmosférica y oceánica. Se están desarrollando estudios detallados de flujo de energía en cada lugar de perforación junto con la vigilancia de los procesos relacionados, para que la red PACE cumpla con la mayoría de los requisitos de los niveles 1 a 4 de la estrategia de la RTM-P.

Las perforaciones

Se han hecho seis perforaciones de 100 m de profundidad, a las que se ha dotado de instrumentos, en lugares elegidos de permafrost en lo alto de las montañas. Además, se incorporó a la red PACE (Figura 1a) una perforación existente de permafrost de 58 m de profundidad, perforada en 1987 lentamente a través de roca congelada rica en hielo (un glaciar de roca) hasta el lecho de roca (Haeberli y otros, 1988). Los límites altitudinales del permafrost de montaña aumentan a medida que decrece la latitud y esto se refleja claramente en el corte de medidas PACE (Figura 1b). De hecho, se demostró que la localización más meridional (el pico del Veleta, en Sierra Nevada, España) estaba ligeramente baja para el permafrost, con temperaturas del suelo algunos grados por debajo de cero. Sin embargo, medidas geotérmicas profundas en la ladera norte del Pico del Veleta indican la presencia de permafrost discontinuo en localizaciones favorecidas (Gómez y otros, 2001). Había permafrost en todos los demás lugares PACE.

Todas las perforaciones excepto la de Murtèl-Corvatsch (en Suiza) se hicieron entre 1998 y 2001 hasta



(a) Localización de las perforaciones PACE
(b) Altitud de las perforaciones PACE

Figura 1 — La Red PACE de Vigilancia del Permafrost



Figura 2 — Realización de una perforación de permafrost de alta montaña en Stockhorn (3 410 m sobre el nivel del mar) cerca de Zermatt en los Alpes Suizos, julio 2000. Las cumbres del fondo son Castor (a la izquierda, 4 228 m sobre el nivel del mar) y Pollux (a la derecha, 4 092 m sobre el nivel del mar), las cuales están dentro de la zona fría del permafrost alpino. Como en otras perforaciones PACE, se utilizó aire frío a presión y no se permitió la entrada de agua en la misma. (Fotografía: Wilfried Haerberli)

una profundidad de al menos 100 m. En cada nuevo lugar se perforaba un agujero de 100 m (Figura 2) junto con una perforación de control de una profundidad de entre 15 y 20 m a unos 5-15 m del agujero principal. La segunda perforación se diseñó para corregir la influencia térmica de la estructura de protección situada en lo alto del agujero principal. El agujero profundo suplementario también ofrece una resolución mejor de las variaciones térmicas anuales del suelo. Las temperaturas de las perforaciones se miden con termistores de coeficiente negativo de temperatura (NTC); instrumentos de Yellow Spring YSI 44006 con una resistencia de unos $2,95 \times 10^4 \Omega$ a 0°C , con un coeficiente de temperatura de alrededor del 5% por $^\circ\text{C}$. Las perforaciones se revistieron de tubos de plástico para permitir una calibración periódica de los termistores. Los datos se registran cada seis horas en los 5 m superiores y cada 24 horas en profundidades mayores. La vigilancia a largo plazo aportará datos a la RTM-P. Los lugares de prueba están equipados con una estación meteorológica cercana a la perforación que mide velocidad y dirección del viento, temperatura y humedad relativa del aire, radiación neta y altura de la nieve, para su uso en estudios de flujo de energía.

Temperaturas del permafrost y cambio climático

Es probable que la respuesta térmica del permafrost se produzca a tres escalas de tiempo y de profundidad distintas (Haerberli y otros, 1993; Haerberli y Beniston, 1998); (a) espesamiento y calentamiento de la capa activa (entre uno y varios años (Anisimov y otros, 1997)); (b) desarrollo de un perfil no lineal (curvado) de temperatura en profundidades de varias decenas de metros (en decenas de décadas (Lachenbruch y Marshall, 1986)); y (c) estrechamiento del permafrost debido al deshielo en la base (en decenas de décadas, siglos o miles de años, dependiendo del espesor inicial del permafrost). Es probable que una consecuencia de la primera y más rápida de estas respuestas térmicas del permafrost sea una subsidencia de deshielo extensa en el permafrost ártico rico en hielo (Nelson y otros, 2001) y una inestabilidad de ladera mayor en las montañas altas de latitudes más bajas (Haerberli, 1992; Haerberli y otros, 1997; Haerberli y Beniston, 1998; Harris y otros, 2001). Por lo tanto, es probable que las implicaciones medioambientales del cambio climático continuado sean importantes, y que impliquen riesgo para las infraestructuras, los asentamientos y las comunicaciones.

Resultados iniciales

Con la excepción de la perforación suiza de Murtèl-Corvatsch, en la red europea PACE de perforaciones de permafrost se han tomado muestras durante un tiempo insuficiente para proporcionar series temporales. Sin embargo, las medidas iniciales de temperatura permiten una interpretación preliminar de los perfiles térmicos (cambios de la temperatura con la profundidad). Como se ha indicado anteriormente, se espera que el calentamiento de la superficie del suelo origine el desarrollo de un perfil geotérmico no lineal en períodos de décadas a siglos. Los perfiles geotérmicos observados en la red PACE de perforaciones se presentan en la Figura 3. En todos los lugares los gradientes térmicos eran pequeños, así que el permafrost era más grueso de lo que se esperaba. Todos los perfiles de temperatura del permafrost por debajo de la profundidad de penetración de la señal térmica estacional (entre 15 y 20 m) son curvos, con una desviación hacia el lado cálido desde el aumento lineal hacia la superficie.

Bajo condiciones de equilibrio, siempre que las propiedades térmicas del sustrato sean constantes con la profundidad, se puede esperar un gradiente térmico lineal bajo la profundidad de variación estacional de la temperatura, y una proyección a la superficie del suelo indicaría la predominante Temperatura Superficial Media Anual (TSMA) (Gold y Lachenbruch, 1973). Suponiendo propiedades geotérmicas uniformes con la

profundidad en cada perforación, los gradientes térmicos más profundos previstos (100-70 m) dan una indicación de la TSMA que había probablemente alrededor de la primera parte del siglo XX, que puede compararse con la TSMA indicada por una proyección hacia arriba similar de los gradientes geotérmicos más cercanos a la superficie (30-20 m), que reflejan los cambios recientes en las temperaturas del permafrost cercano a la superficie. Las diferencias ofrecen una primera aproximación de la tendencia secular del calentamiento de la frontera superior (Lachenbruch y Marshall, 1986). En todas las perforaciones de permafrost de la PACE la TSMA prevista por el gradiente térmico entre 30 y 20 m es más alta que la prevista por el gradiente entre 100 y 70 m, variando la diferencia entre 0,5 y 1,0°C (véase la tabla de más adelante). La mayor variabilidad se observa en los lugares montañosos alpinos escarpados. En las localizaciones más septentrionales, donde el relieve es menos extremo, un calentamiento superficial progresivamente mayor viene indicado por la latitud creciente (Juvasshøe, en Noruega, +0,5; Tarfalaryggen, en Suecia, +0,6°C; Janssonhaugen, en Svalbard, +1,0°C).

Como en el permafrost el agua está, por definición, generalmente congelada e inmóvil, es imposible que se produzca advección de calor por migración de agua. La condición térmica es, por lo tanto, función sólo de la conducción de calor y se facilita la modelización de la inversión (donde los primeros cambios en las temperaturas del límite superficial se infieren de las desviaciones de la linealidad observadas en el gradiente térmico). Este enfoque se ha aplicado mucho a los gradientes térmicos observados de perforaciones (Beltrami y Harris, 2001; Beltrami y Mareschal, 1995). En el caso de lugares de montaña de alto relieve con pendientes escarpadas, es claro que la geometría del límite térmico superior (superficie del suelo) puede ser compleja, y que el flujo de calor no es necesariamente vertical. Por lo tanto, antes de modelizar la inversión de los cambios de temperatura cercanos a la superficie es necesario un análisis en tres dimensiones de los campos geotérmicos basado en modelos digitales del terreno con la correspondiente parametrización de las temperaturas de la superficie (Kohl y Gruber, en im-

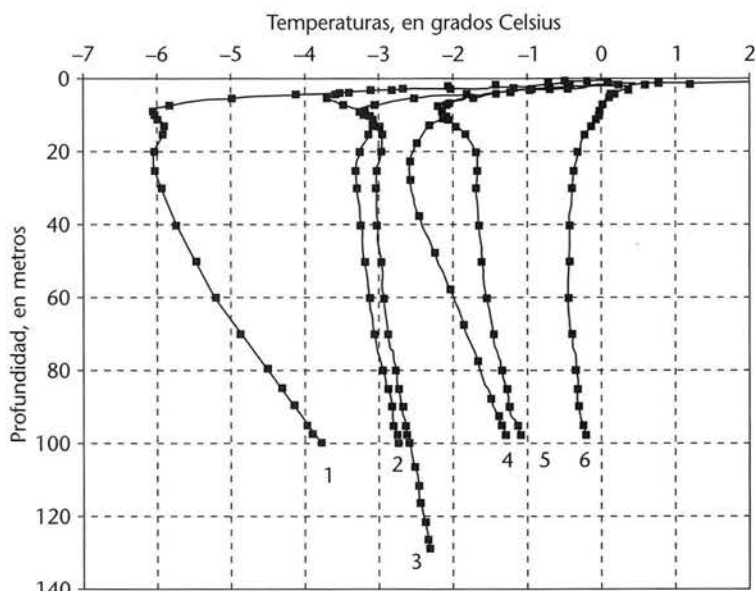


Figura 3 — Perfiles geotérmicos medidos en la red PACE de perforaciones de permafrost: 1 — Janssonhaugen, Svalbard, agosto de 2001; 2 — Tarfalaryggen, Suecia, junio de 2000; 3 — Juvasshøe, Noruega, agosto de 2001; 4 — Stockhorn, Suiza, enero de 2001; 5 — Puerto de Stelvio, Italia, julio de 2000; 6 — Schilthorn, Suiza, enero de 2001

prenta). Actualmente, la investigación está centrada en este problema, y los resultados serán aplicados a la red PACE de la que hablamos en este artículo.

Variación estacional e interanual

La perforación de 58 m de profundidad Murtèl-Corvatsch (Alpes suizos) se ha vigilado desde 1987, con lo que este registro continuo es el más largo de las temperaturas de permafrost de montaña europeo (Haerberli y otros, 1988; Vonder Mühl y otros, 1998; Vonder Mühl, 2001). El registro pone de manifiesto un calentamiento rápido de los 25 m superiores del permafrost entre 1987 y 1994 (Figura 4). A lo largo de este período, se estima que la temperatura media anual de la superficie del suelo ha aumentado de -3,3°C (en 1988) a -2,3°C (en 1994). Sin embargo, la escasa precipitación en forma de nieve en diciembre y enero durante los inviernos de 1994-1995 y de 1995-1996 originó un intenso enfriamiento del suelo y las temperaturas del permafrost volvieron a valores similares a los de 1987. Los espesores de la nieve también fueron pequeños en diciembre-enero de 1998-1999, 1999-2000 y 2001-2002, y las temperaturas del suelo volvieron a responder descendiendo. Las temperaturas del permafrost en Murtèl aumentaron y disminuyeron 1,0°C a 11,5 m y 0,4°C a 19,5 m durante los 15 años del período de observación, siendo la variable dominante la cubierta de nieve, en vez de las temperaturas atmosféricas medias. De esta forma, aunque la modelización de la inversión basada en los perfiles térmicos de las perforaciones PACE puede ofrecer la historia de la fluctuación de la temperatura de la superficie a lo largo

Gradientes geotérmicos observados desde profundidades de 100 m-70 m y 30 m-20 m en las perforaciones de permafrost PACE y temperaturas medias superficiales indicadas por la proyección de los gradientes térmicos en profundidades de 100 m-70 m y 30 m-20 m

Localización de la perforación PACE	Gradiente térmico entre 30 m y 20 m de profundidad	Gradiente térmico entre 100 m y 70 m de profundidad	Temperatura superficial media extrapolada del gradiente geotérmico entre 70 m y 100 m	Temperatura superficial media extrapolada del gradiente geotérmico entre 30 m y 20 m	Tendencia aparente de calentamiento secular (diferencia)
	$^{\circ}\text{C m}^{-1}$	$^{\circ}\text{C m}^{-1}$	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$
Jansshaugen, Svalbard, Noruega	0,017	0,036	-7,4	-6,4	+1,0
Tarfalaryggen, Suecia	-0,004	0,011	-3,8	-3,2	+0,6
Juvasshøe, Noruega	-0,0015	0,009	-3,5	-3,0	+0,5
Schilthorn, Suiza	-0,0055	0,0046	-1,0	-0,2	+0,8
Stockhorn, Suiza	0,0045	0,0183	-3,1	-2,6	+0,5
Stelvio, Italia	0,0065	0,011	-2,2	-1,5	+0,7

272

del último siglo y más allá, esto no se puede traducir sin más a las temperaturas atmosféricas, ya que debe tenerse en cuenta el fuerte efecto de modulación de las condiciones de la nieve. En conjunto, el calentamiento del permafrost durante los 15 años de observaciones en Murtèl-Corvatsch fue de unos $0,4^{\circ}\text{C}$ a $11,6\text{ m}$ (dentro del intervalo de profundidad de una fuerte variabilidad estacional de la temperatura) y de $0,2^{\circ}\text{C}$ a $19,5\text{ m}$ (por debajo de la profundidad de variación estacional), indicando un calentamiento continuado, si no acelerado, en los últimos años. Si esta tendencia es representativa de las otras perforaciones, entonces el calentamiento del

permafrost en el siglo XX puede haber excedido considerablemente 1°C y podría ser similar al calentamiento atmosférico, o más rápido que él, durante el mismo período de tiempo. Las temperaturas de perforación medidas en Murtèl pueden utilizarse también para calibrar modelos estadísticos relacionados con las temperaturas del permafrost cerca de la superficie con variables meteorológicas como la temperatura del aire y las condiciones de la nieve. Entonces, los modelos resultantes pueden permitir la reconstrucción de las temperaturas pasadas del permafrost cercano a la superficie basadas en los registros largos de las estaciones meteorológicas.

La historia resultante de las temperaturas del permafrost cercano a la superficie se puede comprobar frente a los perfiles profundos de las temperaturas de perforación disponibles en la actualidad.

Conclusiones

Aunque se instalaron hace muy poco, como para obtener una serie temporal de las medidas de la temperatura del permafrost, los perfiles térmicos que aporta la red europea PACE de perforaciones de permafrost de montaña ayudan a comprender los cambios en las temperaturas de la superficie a lo largo del último siglo y más allá. En el contexto de la vigilancia mundial (RTM-P), la red PACE contribuye actualmente a los niveles 1 y 3 (vigilancia de grandes gradientes medioambientales e investigación de la variabilidad regional del último

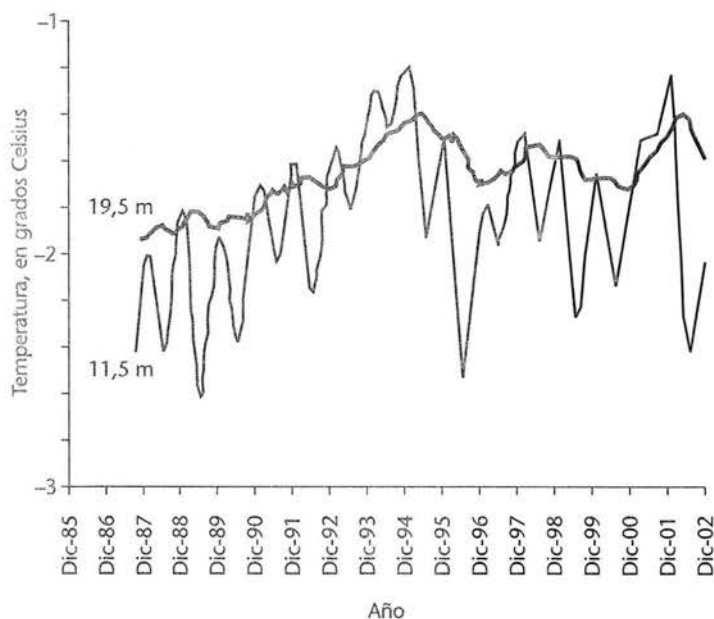


Figura 3 — Temperaturas del permafrost a profundidades de 11,5 m y de 19,5 m, Murtèl-Corvatsch (Alpes suizos), 1987-2002

cambio climático secular). El análisis inicial de los perfiles térmicos de las perforaciones PACE muestra un modelo consistente, pero el relieve y el aspecto llevan a una variabilidad mayor entre las perforaciones alpinas que entre las de Escandinavia y Svalbard. Las primeras aproximaciones del calentamiento de la superficie van de 0,5°C en Stockhorn, en Suiza, a 1,0°C en Janssonhaugen, en Svalbard.

La vigilancia a largo plazo ofrecerá indicaciones tempranas de los efectos del futuro cambio climático a lo largo del punto de intersección entre la provincia oceánica atlántica y la zona continental eurasiática, un área proclive a reaccionar de forma sensible a los cambios en la circulación atmosférica mundial. Un registro de 15 años de las temperaturas del permafrost de la perforación de Murtèl-Corvatsch, en Suiza, de 58 m de profundidad, muestra una tendencia general de calentamiento, pero grandes variaciones interanuales. La cubierta de nieve a principios del invierno parece ser el factor dominante que afecta a las temperaturas del permafrost cercano a la superficie en ese lugar, en vez de las temperaturas medias del aire. Por lo tanto, hay que considerar cuidadosamente la importancia de la cubierta de nieve para el régimen térmico del límite superior del permafrost al interpretar el resultado de los modelos de inversión de los perfiles geotérmicos del permafrost de la PACE.

El valor de los datos de la red de vigilancia aumentará a medida que crezca la longitud del registro. Es probable que la evidencia de mayores índices y profundidades del deshielo estacional sea particularmente importante, ya que esto puede llevar a un riesgo mayor de derrumbamiento de laderas, caída de rocas y daños para los cimientos de estructuras de ingeniería construidas dentro de la zona del permafrost de montaña.

Agradecimientos

Esta investigación fue financiada por la Comunidad Europea a través del 4.º Proyecto Marco PACE (contrato ENV4-CT97-0492)

Referencias

ANISIMOV, O.A. y F.E. NELSON, 1996: Permafrost distribution in the northern hemisphere under scenarios of climate change. *Global and Planetary Change*, 14, 59-72.

ANISIMOV, O.A., N.I. SHIKLOMANOV y F.E. NELSON, 1997: Global warming and active-layer thickness: results from transient general circulation models. *Global and Planetary Change*, 15, 61-77.

BELTRAMI, H. y R.N. HARRIS (Eds.), 2001: Inference of climate change from geothermal data, *Global and Planetary Change*, 29, 149-348.

BELTRAMI, H. y J.-C. MARESCAL, 1995: Resolution of ground temperature histories inverted from borehole temperature data. *Global and Planetary Change*, 11, 57-70.

BURGESS, M.M., S.L. SMITH, J. BROWN, V. ROMANOVSKY y K. HINKEL, 2000: Global Terrestrial Network for Permafrost

(GTNet-P): permafrost monitoring contributing to global climate observations. *Geological Survey of Canada, Current Research*, 2000-E14, 1-8.

CIHLAR, J., T.G. BARRY, E. ORTEGA GIL, W. HAEBERLI, K. KUMA, J.M. LANDWEHR, D. NORSE, S. RUNNING, R. SHOLES, A.M. SOLOMON y S. ZHAO, 1997: GCOS/GTOS plan for terrestrial climate-related observation. SMOC 32, versión 2.0, OMM/DT-796, PNUMA/DEIA/IT, 97-7.

GÓMEZ, A., D. PALACIOS, M. RAMOS, L.M. TANARRO, L. SCHULTE y F. SALVADOR, 2001: Location of permafrost in marginal regions: Corral del Valeta, Sierra Nevada, Spain, *Permafrost and Periglacial Processes*, 12, 93-110.

GOLD, L.W. y A.H. LACHENBRUCH, 1973: Thermal conditions in permafrost—A review of North American literature, *Proceedings Second International Conference on Permafrost*, Yakutsk, URSS, North American Contribution, Washington, US National Academy of Sciences, 3-25.

HAEBERLI, W., 1978: Special aspects of high mountain permafrost methodology and zonation in the Alps. *Proceedings of the Third International Conference on Permafrost*, NRC de Ottawa, 1, 379-384.

HAEBERLI, W., 1992: Construction, environmental problems and natural hazards in periglacial mountain belts, *Permafrost and Periglacial Processes*, 3, 111-124.

HAEBERLI, W. y M. BENISTON, 1998: Climate change and its impacts on glaciers and permafrost in the Alps, *Ambio*, 27, 258-265.

HAEBERLI, W., M. HOELZLE, F. KELLER, W. SCHMID, D. VONDER MÜHLL y S. WAGNER, 1993: Monitoring the long-term evolution of mountain permafrost in the Swiss Alps. *Proceedings of the Sixth International Conference on Permafrost*, 1, 214-219.

HAEBERLI, W., J. HUDER, H.-R. KEUSEN, J. PICA y H. ROTHLISBERGER, 1988: Core drilling through rock-glacier permafrost. *Proceedings of the Fifth International Conference on Permafrost*, Tapir, Trondheim, 937-942.

HAEBERLI, W., M. MAISCH y F. PAUL, 2002: Glaciales de montaña en redes de observación relacionada con el clima mundial. *Boletín de la OMM*, 51, 1, 19-27.

HAEBERLI, W., M. WEGMANN y D. VONDER MÜHLL, 1997: Slope stability problems related to glacier shrinkage and permafrost degradation in the Alps. *Eclogae geologicae Helveticae*, 90, 407-414.

HARRIS, C., M.C.R. DAVIES y B. ETZELMÜLLER, 2001: The assessment of potential geotechnical hazards associated with mountain permafrost in a warming global climate. *Permafrost and Periglacial Processes*, 12, 145-156.

HARRIS, C., W. HAEBERLI, D. VONDER MÜHLL, D. y L. KING, 2001: Permafrost monitoring in the high mountains of Europe: the PACE Project in its Global Context, *Permafrost and Periglacial Processes*, 12, 3-11.

HOELZLE, M., C. MITTAZ, B. ETZELMÜLLER y W. HAEBERLI, 2001: Surface energy fluxes and distribution models of permafrost in European mountain area: an overview of current developments. *Permafrost and Periglacial Processes*, 12, 53-68.

HOUGHTON, J.T., L.G. MEIRA FILHO, B.A. CALLANDER, N. HARRIS, A. KATTENBERG y K. MASKELL, 1996: *Climate Change 1995: The Science of Climate Change*, IPCC, Cambridge University Press, Cambridge, 572 pp.

- JIN, H., L. SHUXUN, C. GUODONG, W. SHAOLING y X. LI, 2000: Permafrost and climatic change in China, *Global and Planetary Change*, 26, 387-404.
- KOHL, T. y St. GRUBER (en imprenta): Evidence of paleotemperature signals in mountain permafrost areas. 8th International Conference on Permafrost, Zurich, Suiza: Extended Abstracts on New Information and Current Research. (W. Haeberli y D. Brandová (Eds.)).
- LACHENBRUCH, A.H. y B.V. MARSHALL, 1986: Changing climate: geothermal evidence from permafrost in the Alaskan Arctic. *Science*, 234, 689-696.
- LACHENBRUCH, A.H., T.T. CLADOUHOS y R.W. SALTUS, 1988: Permafrost temperature and the changing climate. *Proceedings of the Fifth International Conference on Permafrost*, Tapir, Trondheim, Vol. 3, 9-17.
- LACHENBRUCH, A.H. y B.V. MARSHALL, 1986: Changing climate: geothermal evidence from permafrost in the Alaskan Arctic. *Science*, 234, 689-696.
- NELSON, F.E., O.E. ANISIMOV y O.I. SHIKLOMANOV, 2001: Subsidence risk from thawing permafrost. *Nature*, 410, 889-890.
- VONDER MÜHLL, D., 2001: Thermal variations of mountain permafrost: An example of measurements since 1987 in the Swiss Alps. *Global Change in Protected Areas*, editado por G. Visconti, M. Beniston, E. D. Iannorelli, D. Barba, 83-95, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- VONDER MÜHLL, D., T. STUCKI y W. HAEBERLI, 1998: Borehole temperatures in alpine permafrost: a ten year series. *Proceedings of the Seventh International Conference on Permafrost*, editado por A. G. Lewkowicz y M. Allard, 1089-1095, Collection Nordicana, 57, Québec.
- VONDER MÜHLL, D., C. HAUCK, H. GUBLER, R. McDONALD y N. RUSSELL, 2001: New geophysical methods of investigating the nature and distribution of mountain permafrost with special reference to radiometry techniques. *Permafrost and Periglacial Processes*, 12, 27-38.

Estudio de los centros de predicción de ciclones tropicales: usos y necesidades de datos de satélite

Por Russell L. ELSBERRY* y Chris VELDEN**

Introducción

La sesión principal del quinto Cursillo Internacional sobre Ciclones Tropicales (IWTC-V) se ocupó de los usos actuales, los productos inminentes y las oportunidades futuras para utilizar datos de satélite para la predicción y la investigación de ciclones tropicales. Era el quinto de una serie de cursillos patrocinados por la OMM que reúnen a predictores e investigadores de ciclones tropicales cada cuatro años. Los objetivos principales son evaluar el progreso realizado durante los cuatro años anteriores y planificar el futuro. Debido a la importancia de los datos de satélite para la predicción de ciclones tropicales y a un incremento enorme e inminente de las corrientes de datos de satélite, era natural que los satélites fueran el tema de la sesión principal, que estuvo organizada principalmente por Chris Velden, del Instituto de Cooperación para Estudios Meteorológicos por Satélite de la Universidad de Wisconsin (UW-CIMSS).

La primera parte de la sesión principal regional de ciclones tropicales de la OMM consistió en cinco charlas invitadas a cargo de predictores de ciclones tropicales que proporcionaron los antecedentes de los usos actuales de los datos de satélites. Como estas charlas venían principalmente de centros regionales de ciclones tropicales de la OMM, podrían clasificarse como relativamente bien provistas en términos de observaciones y productos de satélites. En algunos centros, se daba el problema de que tenían más datos de satélites de los que sus sistemas de proceso y visualización podían ofrecer de forma oportuna y cómoda para el predictor para que extrajera los beneficios óptimos!

Se sabía desde el principio que los centros a los que representaban las cinco charlas invitadas no eran representativos de los usos y necesidades mundiales de los datos de satélite. Sin embargo, los aproximadamente 45 participantes predictores en el IWTC-V representaban a 36 centros de aviso. La mayor parte de estos predictores fueron seleccionados para representar a los cinco organismos regionales de ciclones tropicales de la OMM y fueron financiados por la OMM. Así que se decidió preparar un estudio para explorar cómo utilizaban los datos de satélite estos 36 centros de avi-

* Escuela Naval de Postgrado, Monterrey, California

** Instituto de Cooperación para Estudios Meteorológicos por Satélite, Madison, Wisconsin