

RELACIÓN ENTRE LAS ANOMALÍAS GEOTÉRMICAS Y LA AUSENCIA DE FORMAS GLACIARES Y PERIGLACIARES EN EL VOLCÁN EL MISTI (SUR DE PERÚ)¹

Nuria Andrés, David Palacios, José Úbeda y Jesús Alcalá

Departamento de Análisis Geográfico Regional y Geografía Física. Universidad Complutense de Madrid

RESUMEN

El volcán El Misti (16°17'S, 71°24'O, 5.822 m), situado a 18 km de Arequipa (S de Perú), carece de glaciares y de formas de relieve glaciar o periglaciar. El presente trabajo relaciona la ausencia de procesos geomorfológicos fríos con la influencia del calor geotérmico en las capas superficiales del suelo.

El tratamiento de las temperaturas capturadas por las sondas instaladas en las laderas del volcán (2004-2008) indica que en El Misti el calor geotérmico altera el régimen de la temperatura del suelo e influye en la del aire, por lo que no existe correlación entre la temperatura y la altitud.

Palabras clave: El Misti, formas periglaciares y glaciares, anomalías geotérmicas, temperatura del suelo.

ABSTRACT

El Misti volcano (16°17'S, 71°24'W, 5822 m), 18 km from Arequipa (S Peru) has no glaciers or any glacial or periglacial landforms. The aim of this study is to determine what influence geothermal heat may have on cold geomorphologic processes in El Misti.

The data (2004-2008) of the three sampling stations installed on the northern slope of the volcano show that on El Misti the geothermal heat completely changes the ground tempe-

Fecha de recepción: mayo 2011.

Fecha de aceptación: octubre 2011.

¹ Este trabajo se ha realizado dentro del Proyecto de Investigación CGL 2009-7343, financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación, cuyo investigador principal es el Dr. David Palacios.

perature regime and it even affects the air temperature. The geothermal alteration means that there is no relationship between temperature and altitude.

Key words: El Misti, glacial and periglacial landforms, geothermal anomalies, ground temperature.

I. INTRODUCCIÓN

La relación entre la acción del frío y la actividad volcánica es mal conocida en las grandes montañas volcánicas, en especial en las tropicales, aunque algunos autores han señalado su importancia. Por ejemplo, la presencia de permafrost en el suelo puede disminuir drásticamente la permeabilidad del suelo y facilitar la saturación de la capa activa, normalmente muy poco consistente y con fuertes pendientes en los grandes estratovolcanes, y provocar la formación de lahares (Palacios *et al.*, 1998, Kneisel y Käab, 2007). Por otro lado, el material expulsado por el volcán puede cubrir grandes cantidades de nieve o hielo y si la capa de sedimentos supera un determinado espesor —entre 2,0 y 2,4 cm en el Mt St Helens (Driedger, 1981); entre 1,5 y 4,0 cm en el sur de Islandia (Kirkbride y Dugmore, 2003)— protege al cuerpo congelado del calor atmosférico y de la insolación, con lo que se produce la agradación del permafrost (Kellerer-Pirklbauer *et al.*, 2007).

El Misti (16°17' S, 71°24' W, 5.822 m) (figura 1) está considerado entre los volcanes potencialmente más destructivos del continente americano. Su cráter se encuentra a 18 km

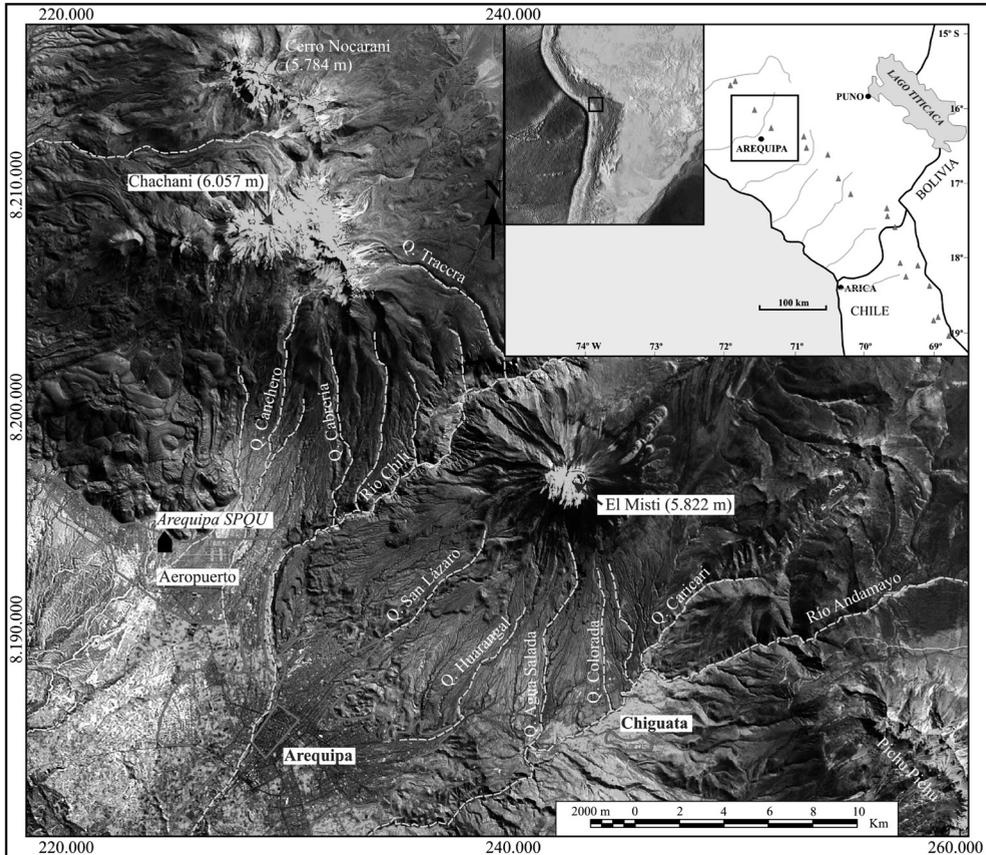
Figura 1
PANORÁMICA DEL ÁREA DE ESTUDIO DONDE SE PUEDEN VER LOS VOLCANES EL MISTI (DERECHA) Y EL CHACHANI (IZQUIERDA)



Fotografía tomada por David Palacios, julio de 2007.

Figura 2

LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO EN LA ZONA VOLCÁNICA DE LOS ANDES CENTRALES EN AMÉRICA DEL SUR. EN LA IMAGEN LANDSAT DEL 2000 SE APRECIA LA CERCANÍA DE EL MISTI A LA CIUDAD DE AREQUIPA



del centro de la ciudad de Arequipa (2.335 m s.n.m.), que ha experimentado un gran crecimiento a partir de 1940, debido al éxodo rural, y tiene en la actualidad 864.692 habitantes (Censo del Instituto Nacional de Estadística e Informática del Perú, 2007). Desde 1970, la expansión de la ciudad se ha venido produciendo por la ladera suroeste de El Misti y por las terrazas del río Chili y sus tributarios, en forma de asentamientos ilegales sin planificar que se acercan hasta 9 km del cráter del volcán (Martelli *et al.*, 2008). También cabe mencionar el distrito de Chiguata, que con 2.686 habitantes censados en 2007 (INEI), se encuentra a 11 km al sur de la cima (figura 2). La ausencia de una política de emergencia y de un planeamiento urbano incrementa la vulnerabilidad de la ciudad y de sus habitantes ante las amenazas de El Misti.

El período de recurrencia de las erupciones de El Misti en los últimos cinco mil años se ha establecido entre 500 a 1.500 años (Thouret *et al.*, 2001), aunque el último periodo eruptivo significativo tuvo lugar hace 2.300-2.050 años y la última erupción, de menor intensi-

dad, se produjo entre los años 1440 y 1447. En la actualidad se puede observar todavía cierta actividad fumarólica en el cráter.

El Misti se sitúa en el borde del Altiplano, próximo a la rampa que le une con la costa del Pacífico y por lo tanto, queda bajo el radio de acción del sistema de altas presiones generado por la presencia de la corriente fría de Humboldt (2° S- 31° S). Así, nos encontramos en un área muy árida, donde por ejemplo, en la ciudad de Arequipa las precipitaciones anuales no superan los 100 mm (94,6 mm anuales de media en la serie 1949-1991, SENAMHI). A partir de los 4.500 m la cubierta vegetal es mínima y prácticamente desaparecen las plantas vasculares.

El objetivo del presente trabajo se centra en relacionar la ausencia de formas generadas por procesos geomorfológicos fríos con la influencia del calor geotérmico en las capas superficiales del suelo en El Misti, ya que en este volcán no se observan formas glaciares o periglaciares, ni actuales ni heredadas, mientras que en el Chachani (6.057 m s.n.m.), un volcán que no presenta actividad en la actualidad situado a 16,5 km al NW de El Misti, se han encontrado formas glaciares de la Pequeña Edad del Hielo y grandes glaciares rocosos activos (Palacios *et al.*, 2009).

II. METODOLOGÍA

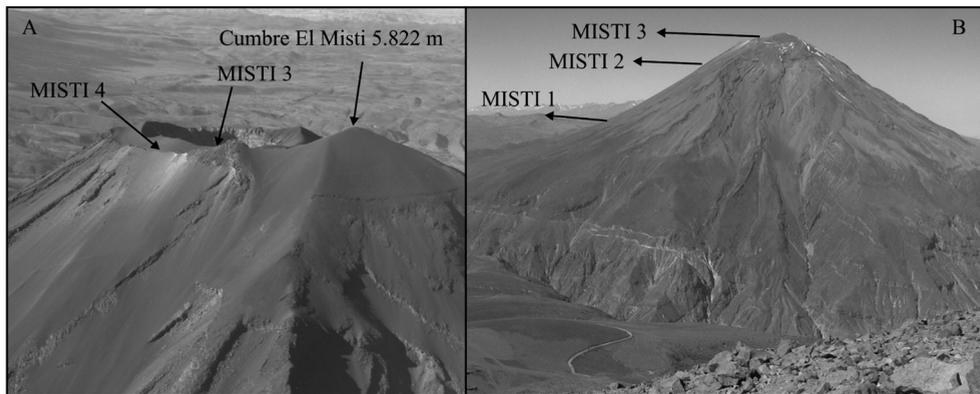
Para alcanzar el objetivo propuesto es necesario conocer el comportamiento térmico del aire y del suelo en el volcán, con la finalidad de determinar la existencia o ausencia de suelos permanentemente helados o de procesos hielo/deshielo. Pero en el inicio de esta investigación, la disponibilidad de datos térmicos en El Misti se reducía a los valores recogidos por la estación termoplumiométrica más cercana de la red nacional de meteorología, gestionada por el SENAMHI (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú), localizada en el aeropuerto de la ciudad de Arequipa a 2.508 m s.n.m. (Arequipa SPQU) (figura 2). Por ello, el primer paso fue la obtención de datos térmicos en el suelo y en el aire en una de las laderas del volcán. Se descartó el método BTS (Bottom Temperature Snow) propuesto por Haeberli (1973) y empleado con éxito en latitudes medias y altas, ya que la nieve permanece sobre el suelo tan solo unos pocos días al año. Tampoco se pueden hacer perforaciones profundas, ya que el acceso al cono superior es imposible con equipos pesados. Por ello se optó por emplear termómetros ligeros, sondas HOBO Pendant 64 K Temp/Light, dotados con termistores TMC-IT y encapsuladas en una envoltura impermeable. Los termómetros están equipados con una batería de litio de 3.6 V, con capacidad para tomar medidas durante 760 días cada 30 minutos, y tienen una precisión de $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$, y un rango de -20°C a $+50^{\circ}\text{C}$. En julio de 2004 se establecieron tres estaciones (tabla 1; figura 3B) en la ladera norte del volcán (a 4.726, 5.455 y 5.740 m s.n.m.) con una sonda del aire a +100 cm, y tres del suelo -10, -30 y -60 cm de profundidad (figura 4). Todas las estaciones se localizaron en superficies horizontales, en acumulaciones de cenizas traquíticas sobre lavas de litología similar. Los valores se fueron descargando con una periodicidad anual aproximada, en función de las posibilidades de realizar los trabajos de campo. El primer tratamiento de los datos se realizó tras la campaña de noviembre de 2006 y se detectó una marcada influencia de las fumarolas sobre las temperaturas recogidas en el suelo y en el aire en la estación más alta, MISTI 3. Por esa razón, se decidió mover la estación a una localización en la misma altitud y orientación,

pero más alejada del foco de fumarolas. Así, en septiembre de 2007 se estableció la estación MISTI 4 (tabla 1; figura 3A) con una sonda situada en el aire, aunque las sondas del suelo no se pudieron instalar hasta finales del mes de noviembre, por lo que no se han conseguido series anuales. Los resultados del presente trabajo se basan en el tratamiento y análisis de las series termométricas recogidas hasta 2008.

Tabla 1
ESTACIONES TERMOMÉTRICAS INSTALADAS EN LA LADERA NORTE DE EL MISTI

NOMBRE	X (m)	Y (m)	ALTITUD (m)
Misti1	243.827,00	8.198.321,00	4.726
Misti2	243.413,00	8.197.142,00	5.455
Misti3	242.963,16	8.196.722,08	5.740
Misti4	243.060,00	8.196.827,00	5.740

Figura 3
LOCALIZACIÓN DE LAS ESTACIONES EN EL VOLCÁN EL MISTI



(Fotografías: A) D. Palacios, julio, 2007 y B) D. Palacios, julio, 2004).

Inicialmente, los datos fueron evaluados y se suprimieron los considerados erróneos. Del resto de los datos válidos, se seleccionaron series completas de un mismo año en todas las estaciones, con el objeto de poder hacer una comparación de todas las sondas instaladas. En concreto, en este trabajo se ha utilizado la serie desde el 1-9-2004 hasta el 31-8-2005 además de otras series anuales en estaciones específicas. En cada agrupamiento se han calculado los parámetros estadísticos más representativos (diarios, mensuales y anuales), siguiendo un proceso de simplificación a partir de los datos horarios. Especial importancia tuvo la obtención de la Temperatura Media Anual del Aire (TMAA) y la Temperatura Media Anual del Suelo (TMAS) de cada sonda.

Figura 4
 A. INSTRUMENTACIÓN DE LA ESTACIÓN MISTI 1 EN SEPTIEMBRE DE 2007
 B. ESQUEMA DE LA COLOCACIÓN DE LAS SONDAS



Fotografía: David Palacios.

Con las series de datos se llevaron a cabo dos tipos de análisis. Mediante el primer análisis se intentó establecer el modelo de comportamiento de las TMAA en relación con la profundidad para cada estación. Utilizando como base el modelo de distribución de temperaturas en el suelo propuesto por van Everdingen (1985) y ampliamente difundido entre la comunidad científica para el estudio de los ambientes periglaciares (French, 2007), se calcularon las líneas de tendencia con la profundidad de la temperatura media anual, de la temperatura media del mes más frío y de la temperatura media del mes más cálido. En un gráfico, las tres líneas de tendencia tienden a unirse en el punto de amplitud anual cero.

En el segundo análisis se calculó el gradiente altitudinal de las TMAA observadas en nuestras estaciones y en la estación de Arequipa SPQU. La ecuación de la recta de regresión que relaciona las temperaturas con la altitud se aplicó al Modelo Digital de Elevación (DEM) del Instituto Geográfico Nacional (IGN) de Perú (1:100.000) (1996), mediante el empleo de la herramienta de ArcGis *Raster Calculator*. Sobre el modelo de distribución espacial de las TMAA resultante se localizaron la isoterma de -2°C que marca el límite inferior de la acción predominante de la helada y la isoterma de $+3^{\circ}\text{C}$, que se corresponde con el límite inferior de la presencia de la acción de la helada (French, 2007).

III. COMPORTAMIENTO DE LA TEMPERATURA EN EL INTERIOR DEL SUELO EN CADA UNA DE LAS ESTACIONES

1. Gradiente térmico en la estación MISTI 1

En la estación MISTI 1 (4.726 m) se han extraído dos series anuales: la serie de referencia entre el 1-09-2004 y el 31-08-2005, para los datos registrados por los termómetros del suelo a -10 y -60 cm, y otra complementaria entre el 15-09-2007 y el 14-09-2008, para los valores de temperatura recogidos con las sondas de aire y -60 cm (tablas 2 y 3; figura 5). Lo más destacable es que durante la serie anual 2004/05 se observa que la TMAA aumenta ligeramente con la profundidad y en la serie 2007/08 la TMAA resultó ser 4,4°C inferior a la registrada en el suelo a -60 cm. Tan sólo, en la serie anual 2007/08 se contabilizaron 22 días en los que la temperatura del aire osciló alrededor de 0°C (de mayo a octubre), mientras que a -60 cm no se registró ninguna temperatura negativa, al igual que sucedió en el interior del suelo (-10 y -60 cm) durante el periodo analizado en 2004/05. Esto indica la escasa influencia de las temperaturas mínimas del aire en el interior del suelo.

Tabla 2

ESTADÍSTICOS ANUALES (EN °C) DE LAS TEMPERATURAS DIARIAS PARA LAS SERIES DE DATOS CAPTURADOS ENTRE SEPTIEMBRE DE 2004 Y AGOSTO DE 2005; Y ENTRE SEPTIEMBRE DE 2007 Y SEPTIEMBRE DE 2008 POR LAS SONDAJAS INSTALADAS EN EL AIRE Y EN EL INTERIOR DEL SUELO A -10 Y -60 CM, EN LA ESTACIÓN MISTI 1 (4.726 M S.N.M.)

Serie	Localización (cm)	T MEDIA			T ABSOLUTA		AMPLITUD		
		Media	Máx	Mín	Máx	Mín	Media	Máx	Mín
Sp2004/Ag05	SUELO: -10	12,0	16,6	8,0	21,1	4,2	8,6	12,1	1,6
Sp2004/Ag05	SUELO: -60	12,4	12,6	12,2	14,7	8,4	0,3	1,5	0,0
Sp2007/Sp08	AIRE: +100	7,1	13,7	2,6	18,8	-4,1	11,1	15,8	4,4
Sp2007/Sp08	SUELO: -60	11,5	11,7	11,2	14,1	6,8	0,6	1,1	0,2

Teniendo en cuenta los datos obtenidos en la serie anual 2004/2005 para las sondas de -10 y -60 cm se observa que la TMAA asciende con la profundidad en los primeros centímetros del suelo a razón de 0,08°C por cada 10 cm.

Si se supone una tendencia lineal de variación de las temperaturas medias mensuales del mes más frío y del más cálido (figura 6) se tiene que la amplitud anual cero se localiza a una profundidad aproximada de -182,8 cm, donde la temperatura media del mes más frío y la del mes más cálido coinciden en 13,3°C. Con estas observaciones no parece probable que en esta localidad se pueda desarrollar permafrost. Ni siquiera la superficie del suelo sufre ciclos de hielo/deshielo.

Tabla 3

ESTADÍSTICAS MENSUALES (EN °C) PARA LA SERIE ANUAL ENTRE SEPTIEMBRE DE 2004 Y AGOSTO DE 2005 DE LAS SONDAS SITUADAS A -10 Y -60 CM, Y ENTRE SEPTIEMBRE DE 2007 Y SEPTIEMBRE DE 2008 DE LAS SONDAS SITUADAS EN EL AIRE Y A -60 CM, EN LA ESTACIÓN MISTI 1 (4.726 M S.N.M). MD: TEMPERATURA MEDIA MENSUAL; MX: TEMPERATURA MÁXIMA MENSUAL; MN: TEMPERATURA MÍNIMA MENSUAL; AT: AMPLITUD TÉRMICA MENSUAL; MEDIA: PROMEDIOS DE LAS TEMPERATURAS MEDIAS; MÁXIMAS, MÍNIMA Y AMPLITUD MENSUALES; A ANUAL: AMPLITUD TÉRMICA ANUAL

Serie Sonda	Sp2004/Ag05 SUELO: -10 cm				Sp2004/Ag05 SUELO: -60 cm				Sp2007/Sp08 AIRE				Sp2007/Sp08 SUELO: -60 cm			
	MD	MX	MN	AT	MD	MX	MN	AT	MD	MX	MN	AT	MD	MX	MN	AT
<i>Sp</i>	12,3	18,1	7,7	10,4	11,8	12,0	11,7	0,3	7,8	15,1	2,7	12,4	12,2	12,5	11,9	0,5
<i>Oc</i>	13,2	19,2	8,2	11,0	12,8	12,9	12,6	0,2	7,9	14,6	3,4	11,3	12,9	13,1	12,7	0,5
<i>Nv</i>	13,8	19,3	9,1	10,3	13,7	13,8	13,6	0,2	6,9	13,1	2,7	10,3	12,9	13,2	12,6	0,5
<i>Dc</i>	13,1	17,9	8,7	9,2	13,5	13,7	13,3	0,3	6,6	12,3	3,3	9,0	12,8	13,0	12,5	0,5
<i>En</i>	11,3	15,4	7,6	7,8	12,2	12,5	12,0	0,5	4,8	9,5	2,4	7,1	9,6	10,0	9,4	0,6
<i>Fb</i>	10,3	13,8	7,3	6,4	11,6	11,8	11,3	0,5	6,3	12,4	3,4	9,0	11,3	11,7	11,0	0,7
<i>Mr</i>	13,2	17,9	9,2	8,7	13,4	13,6	13,2	0,5	7,4	13,9	3,9	10,0	12,0	12,4	11,6	0,7
<i>Ab</i>	12,4	17,2	8,1	9,1	13,1	13,3	12,8	0,5	8,2	15,2	3,5	11,7	12,1	12,4	11,8	0,6
<i>My</i>	11,6	16,4	7,5	8,9	12,3	12,5	12,1	0,4	7,3	14,5	1,9	12,7	10,9	11,2	10,6	0,6
<i>Jn</i>	10,4	14,6	6,7	7,9	11,4	11,5	11,2	0,3	7,3	14,8	1,7	13,0	10,3	10,6	10,1	0,5
<i>Jl</i>	10,6	13,7	7,6	6,1	11,2	11,3	11,1	0,3	7,3	14,7	1,3	13,4	10,4	10,7	10,2	0,5
<i>Ag</i>	11,9	15,3	8,4	6,9	12,0	12,1	11,9	0,2	7,2	14,4	1,3	13,1	10,4	10,7	10,1	0,6
Media	12,0	16,6	8,0	8,6	12,4	12,6	12,2	0,3	7,1	13,7	2,6	11,1	11,5	11,8	11,2	0,6
<i>A anual</i>	3,5				2,5				3,4				2,5			

Figura 5

A) GRÁFICAS DE LOS DATOS TOMADOS POR LAS SONDAS INSTALADAS A -10 Y -60 CM EN EL SUELO DURANTE LA CAMPAÑA 2004/05 Y B) GRÁFICAS DE LOS DATOS TOMADOS POR LAS SONDAS INSTALADAS EN EL AIRE YA 60 CM DE PROFUNDIDAD EN LA ESTACIÓN MISTI 1 (4.726 M)

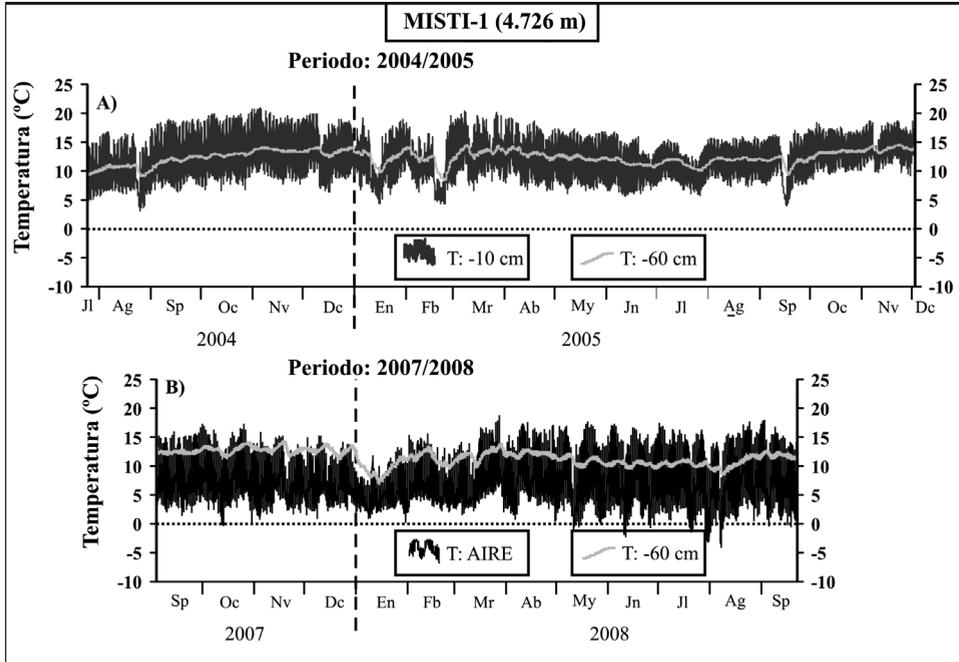
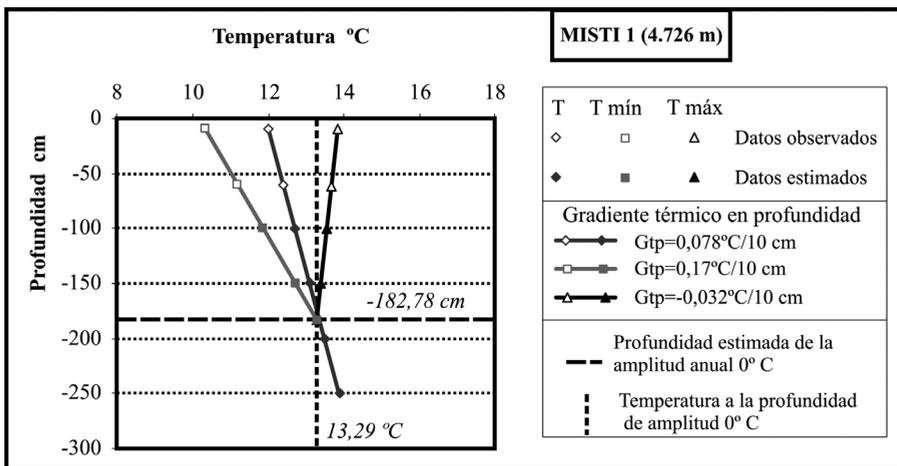


Figura 6

TEMPERATURA MEDIA ANUAL (T), TEMPERATURA MEDIA MENSUAL MÍNIMA (T MIN) Y TEMPERATURA MEDIA MENSUAL MÁXIMA (T MAX) OBSERVADAS Y ESTIMADAS SEGÚN TENDENCIAS LINEALES, EN LA ESTACIÓN MISTI 1 (4.726 M), CON LOS DATOS DE LA SERIE 1-09-04/31-08-05



2. Gradiente térmico en la estación MISTI 2

En la estación MISTI 2 (5.455 m s.n.m.) se han extraído las siguientes series anuales (figura 7; tablas 4, 5, 6 y 7):

- Entre el 1-9-2004 al 31-8-2005 para las sondas del aire, -10 y -30 cm
- Entre el 10-11-2005 y el 9-11-2006 para las posiciones del aire, -5 y -30 cm.
- Entre 1-9-2006 y el 31-8-2007 y entre el 1-9-2007 y el 31-8-2008 para las sondas del aire y de -30 cm.

Las TMAA de las cuatro series anuales son muy parecidas, con oscilaciones térmicas diarias medias que varían entre los 9,0°C y los 6,6°C. Las TMAS son más elevadas que las observadas en el aire y se puede observar que la temperatura aumenta con la profundidad. La amplitud diaria media es más acusada a -5 cm (13,6°C) en el suelo que en el aire (7,8°C). Esto es debido a que la sonda del aire se instala a la sombra, mientras que la superficie del suelo recibe la radiación solar de forma directa. Según aumenta la profundidad se observa una disminución en las amplitudes diarias (0,4°C a -30 cm en la serie Nv2005/Nv06).

Figura 7

A) GRÁFICA DE LOS DATOS TOMADOS POR LA SONDA DEL AIRE ENTRE EL 25-7-2004 Y EL 22-11-2006. B) GRÁFICAS DE LOS DATOS TOMADOS POR LA SONDA INSTALADA A -10 CM DURANTE LA CAMPAÑA 2004/05; POR LA SONDA -5 CM, DURANTE LA CAMPAÑA 2005/6; Y POR LA SONDA DE -30 CM, EN AMBAS CAMPAÑAS. C) GRÁFICAS DE LOS DATOS TOMADOS POR LAS SONDA DEL AIRE Y DE -30 CM DE PROFUNDIDAD EN EL SUELO DURANTE LAS CAMPAÑAS 2006/07 Y 2007/08. ESTACIÓN MISTI 2

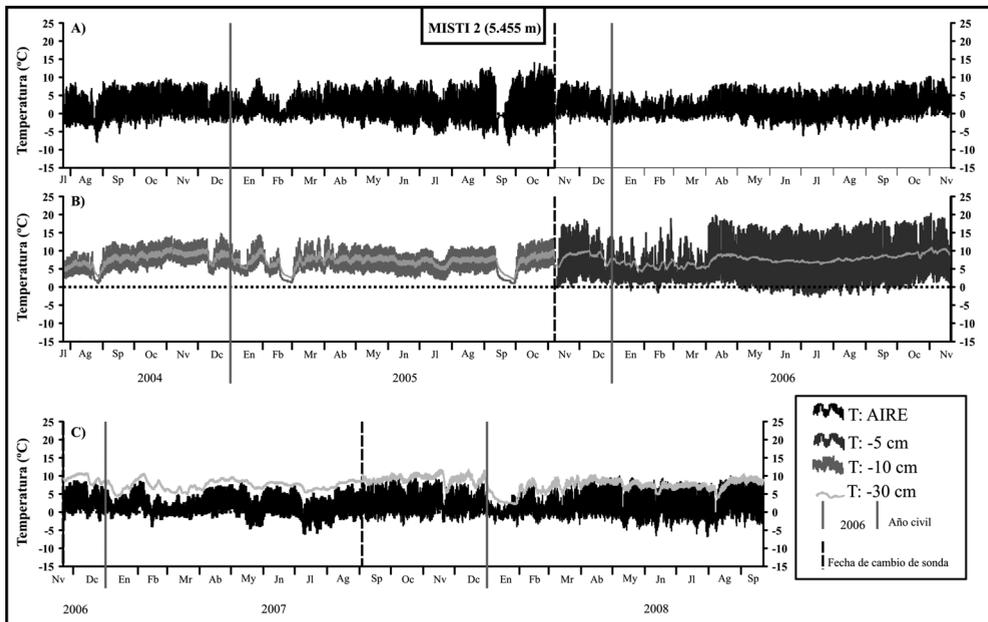


Tabla 4

ESTADÍSTICOS ANUALES DE LAS TEMPERATURAS DIARIAS (EN °C) PARA LAS SERIES ANUALES ENTRE SEPTIEMBRE DE 2004 Y AGOSTO DE 2005; ENTRE NOVIEMBRE DE 2005 Y NOVIEMBRE DE 2006; ENTRE SEPTIEMBRE DE 2006 Y AGOSTO DE 2007; Y ENTRE SEPTIEMBRE DE 2007 Y AGOSTO DE 2008, DE LAS SONDAS SITUADAS EN EL AIRE YA -5, -10 Y -30 CM, EN LA ESTACIÓN MISTI 2 (5.455 M S.N.M)

Serie	Localización (cm)	T MEDIA			T ABSOLUTA		AMPLITUD		
		Media	Máx	Mín	Máx	Mín	Media	Máx	Mín
Sp2004/Ag05	AIRE: +100	1,7	6,8	-2,1	12,6	-6,1	9,0	18,1	2,2
Sp2004/Ag05	SUELO: -10	7,2	7,2	4,5	14,7	1,2	5,9	9,1	0,0
Sp2004/Ag05	SUELO: -30	7,6	8,4	6,9	11,1	2,6	1,5	2,6	0,0
Nv2005/Nv06	AIRE: +100	1,7	6,1	-1,7	10,3	-6,3	7,8	11,6	1,6
Nv2005/Nv06	SUELO: -5	6,1	14,1	0,5	20,5	-2,8	13,6	19,4	2,0
Nv2005/Nv06	SUELO: -30	7,5	7,7	7,3	11,1	4,2	0,4	1,0	0,0
Sp2006/Ag07	AIRE: +100	2,0	5,5	-1,0	10,3	-6,2	6,6	11,2	1,9
Sp2006/Ag07	SUELO: -30	8,0	8,1	7,8	11,1	4,4	0,4	1,4	0,0
Sp2007/Ag08	AIRE: +100	1,8	6,7	-2,0	10,2	-6,9	8,7	12,9	2,3
Sp2007/Ag08	SUELO: -30	7,7	8,5	7,0	12,0	2,2	1,4	2,7	0,0

Tabla 5

ESTADÍSTICOS MENSUALES (EN °C) PARA LAS SERIES ANUALES ENTRE SEPTIEMBRE DE 2004 Y AGOSTO DE 2005 DE LAS SONDAS SITUADAS EN EL AIRE YA -10 Y -30 CM EN LA ESTACIÓN MISTI 2 (5.455 M S.N.M).

Serie Sonda	Sp2004/Ag05 AIRE				Sp2004/Ag05 SUELO: -10 cm				Sp2004/Ag05 SUELO: -30 cm			
	MD	MX	MN	AT	MD	MX	MN	AT	MD	MX	MN	AT
<i>Sp</i>	1,8	7,4	-2,6	10,1	7,6	11,3	4,4	6,8	7,7	8,5	6,9	1,6
<i>Oc</i>	2,5	8,2	-1,9	10,1	8,8	12,3	5,5	6,8	8,8	9,6	8,0	1,7
<i>Nv</i>	2,8	7,8	-1,2	9,0	9,5	12,6	6,5	6,1	9,5	10,2	8,8	1,5
<i>Dc</i>	1,9	6,4	-1,8	8,2	8,3	11,4	5,6	5,9	8,6	9,4	7,9	1,5
<i>En</i>	1,6	5,4	-1,3	6,7	7,0	9,9	4,6	5,3	7,3	8,1	6,6	1,5
<i>Fb</i>	0,4	3,2	-1,8	5,0	4,4	5,6	3,2	2,4	5,5	6,0	5,1	0,9
<i>Mr</i>	1,8	6,0	-1,2	7,2	7,0	9,8	4,5	5,3	7,1	7,9	6,4	1,5
<i>Ab</i>	2,2	7,3	-1,3	8,6	7,4	10,9	4,5	6,3	7,8	8,6	7,0	1,6
<i>My</i>	2,0	7,8	-2,2	9,9	7,4	11,1	4,2	6,9	7,9	8,6	7,1	1,6
<i>Jn</i>	1,1	7,5	-3,4	10,9	6,2	9,6	3,2	6,4	7,0	7,7	6,2	1,5
<i>Jl</i>	0,7	6,6	-3,5	10,1	6,0	9,1	3,1	6,0	6,6	7,2	5,9	1,4
<i>Ag</i>	1,3	8,1	-3,5	11,5	7,3	10,7	4,1	6,5	7,6	8,3	6,8	1,5
Media	1,7	6,8	-2,1	9,0	7,2	10,3	4,4	5,9	7,6	8,4	6,9	1,5
A anual	2,4				5,1				4,0			

MD: temperatura media mensual; MX: temperatura máxima mensual; MN: temperatura mínima mensual; AT: amplitud térmica mensual; Media: promedios de las temperatura medias, máximas, mínima y amplitud mensuales; A anual: amplitud térmica anual.

Tabla 6

ESTADÍSTICOS MENSUALES (EN °C) PARA LAS SERIES ANUALES ENTRE NOVIEMBRE DE 2005 Y NOVIEMBRE DE 2006 DE LAS SONDAS SITUADAS EN EL AIRE YA -5 Y -30 CM, EN LA ESTACIÓN MISTI 2 (5.455 M S.N.M)

Serie Sonda	Nv2005/Nv06 AIRE				Nv2005/Nv06 SUELO: -5 cm				Nv2005/Nv06 SUELO: -30 cm			
	MD	MX	MN	AT	MD	MX	MN	AT	MD	MX	MN	AT
<i>Nv</i>	3,2	7,7	-0,3	8,1	7,3	15,5	1,7	13,7	8,7	9,0	8,5	0,5
<i>Dc</i>	2,0	6,0	-1,2	7,2	6,8	13,1	2,0	11,1	8,7	8,9	8,4	0,5
<i>En</i>	0,6	3,7	-1,7	5,4	4,1	8,9	1,1	7,8	6,4	6,5	6,2	0,4
<i>Fb</i>	0,7	4,1	-1,5	5,5	4,5	10,2	1,0	9,1	5,9	6,1	5,7	0,4
<i>Mr</i>	0,7	3,8	-1,3	5,1	4,0	8,6	1,2	7,5	5,8	6,0	5,7	0,3
<i>Ab</i>	2,5	6,9	-0,8	7,8	7,6	16,4	1,5	15,0	8,1	8,3	7,9	0,4
<i>My</i>	1,9	6,9	-1,9	8,9	6,5	16,0	-0,3	16,3	8,0	8,2	7,8	0,4
<i>Jn</i>	1,2	6,2	-2,8	9,0	5,9	15,5	-0,9	16,4	7,2	7,3	7,0	0,4
<i>Jl</i>	0,7	6,0	-3,3	9,3	5,5	15,2	-1,6	16,8	6,8	7,0	6,6	0,4
<i>Ag</i>	1,7	6,8	-2,1	8,9	6,4	16,1	-0,5	16,7	7,6	7,7	7,4	0,3
<i>Sp</i>	1,9	7,1	-2,1	9,2	6,7	16,4	0,1	16,3	8,3	8,4	8,1	0,3
<i>Oc</i>	2,9	8,1	-0,9	9,0	7,5	17,0	1,0	16,1	9,0	9,2	8,8	0,4
Media	1,7	6,1	-1,7	7,8	6,1	14,1	0,5	13,6	7,5	7,7	7,3	0,4
<i>A anual</i>	2,5				3,5				3,2			

MD: temperatura media mensual; MX: temperatura máxima mensual; MN: temperatura mínima mensual; AT: amplitud térmica mensual; Media: promedios de las temperatura medias, máximas, mínima y amplitud mensuales; A anual: amplitud térmica anual.

Tabla 7

ESTADÍSTICOS MENSUALES (EN °C) PARA LAS SERIES ANUALES ENTRE SEPTIEMBRE DE 2006 Y AGOSTO DE 2007; Y ENTRE SEPTIEMBRE DE 2007 Y AGOSTO DE 2008 DE LAS SONDAS SITUADAS EN EL AIRE YA -10 Y -30 CM EN LA ESTACIÓN MISTI 2 (5.455 M S.N.M)

Serie Sonda	Sp2006/Ag07 AIRE				Sp2006/Ag07 SUELO: -30 cm				Sp2007/Ag08 AIRE				Sp2007/Ag08 SUELO: -30 cm			
	MD	MX	MN	AT	MD	MX	MN	AT	MD	MX	MN	AT	MD	MX	MN	AT
<i>Sp</i>	1,9	7,1	-2,1	9,2	8,3	8,4	8,1	0,3	2,3	7,2	-1,6	8,8	8,8	9,4	8,2	1,2
<i>Oc</i>	2,9	8,1	-0,9	9,0	9,0	9,2	8,8	0,4	2,7	8,0	-1,4	9,4	9,6	10,3	9,0	1,3
<i>Nv</i>	3,3	7,5	0,1	7,5	9,8	10,0	9,5	0,5	2,5	7,5	-1,4	8,9	9,4	10,1	8,6	1,5
<i>Dc</i>	3,2	6,6	0,1	6,5	9,4	9,6	9,1	0,5	2,2	6,5	-1,3	7,8	9,2	10,2	8,3	1,9
<i>En</i>	1,6	4,1	-0,4	4,6	6,7	6,9	6,5	0,4	0,2	2,5	-1,7	4,2	3,7	4,0	3,6	0,4
<i>Fb</i>	1,5	4,3	-0,7	4,9	8,1	8,4	7,9	0,5	1,1	4,8	-1,7	6,5	6,5	7,3	5,8	1,5
<i>Mr</i>	0,7	2,8	-1,0	3,7	6,1	6,3	5,9	0,4	1,4	5,6	-1,8	7,4	7,6	8,6	6,9	1,7
<i>Ab</i>	2,6	6,0	-0,2	6,2	8,1	8,3	8,0	0,4	2,8	8,3	-1,3	9,6	8,7	9,6	7,8	1,8
<i>My</i>	1,5	5,2	-1,5	6,7	8,1	8,2	7,9	0,4	1,7	7,7	-2,8	10,5	7,8	8,5	7,0	1,5
<i>Jn</i>	2,4	5,9	-0,9	6,8	7,8	7,9	7,6	0,3	1,4	7,4	-3,1	10,5	7,0	7,7	6,3	1,4
<i>Jl</i>	0,1	3,6	-3,0	6,6	6,6	6,8	6,4	0,3	1,7	7,6	-3,0	10,6	7,4	8,1	6,6	1,5
<i>Ag</i>	1,7	5,4	-1,6	7,0	7,7	7,9	7,6	0,3	1,9	7,5	-2,6	10,1	7,3	8,1	6,4	1,6
Media	2,0	5,5	-1,0	6,6	8,0	8,2	7,8	0,4	1,8	6,7	-2,0	8,7	7,7	8,5	7,0	1,4
<i>A anual</i>	3,2				3,7				2,7				5,9			

MD: temperatura media mensual; MX: temperatura máxima mensual; MN: temperatura mínima mensual; AT: amplitud térmica mensual; Media: promedios de las temperatura medias, máximas, mínima y amplitud mensuales; A anual: amplitud térmica anual.

En todos los casos, tanto las medias mensuales máximas como las mínimas son más elevadas en el interior del suelo que en el aire. La diferencia entre las máximas del aire y las del suelo es especialmente acusada, por lo que las amplitudes anuales del suelo son superiores a las del aire. En esta estación se observa la presencia de nieve en el suelo únicamente entre los días 19 de febrero y 1 de marzo del 2005 y en la segunda mitad de septiembre (figuras 8 y 9).

En todas las series analizadas la sonda instalada en el aire recogió un elevado número de días con ciclo de hielo/deshielo (figura 10), de forma que en el 75,1% (Sp2006/Ag07), y el 97,3% (Sp2007/Ag08) de los días del año la temperatura osciló alrededor de los 0°C (figuras 10.D y E). Aunque el termómetro llegó a recoger una mínima absoluta de -6,9°C (31-7-2008), son escasos los días que registran temperaturas máximas por debajo de 0°C (20-2-2005; 10 y 11-7-2007; y 7-8-2008) y en tan sólo una ocasión fue inferior a -1°C. En la sonda de -5 cm todavía se registraron 138 ciclos diarios de hielo/deshielo (37,8% de los días del año), con mínimas absolutas de -2,8°C (9 y 20-7-2006), durante los meses del invierno austral (figura 10.C). Por debajo de esta profundidad ya no se anotaron temperaturas negativas.

Figura 8

TEMPERATURAS MÍNIMAS, MÁXIMAS Y MEDIAS DIARIAS DEL AIRE (A), A -10 CM (B) YA -30 CM (C) DE PROFUNDIDAD DEL 1 DE FEBRERO AL 15 DE 2005, EN LA ESTACIÓN DE SONDEO MISTI 2 (5.455 M S.N.M)

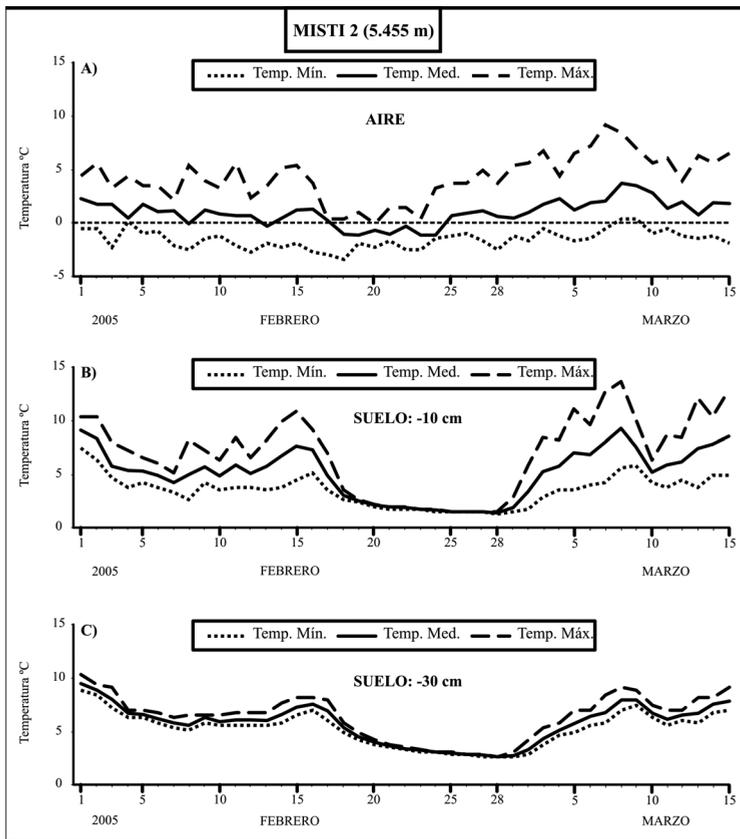
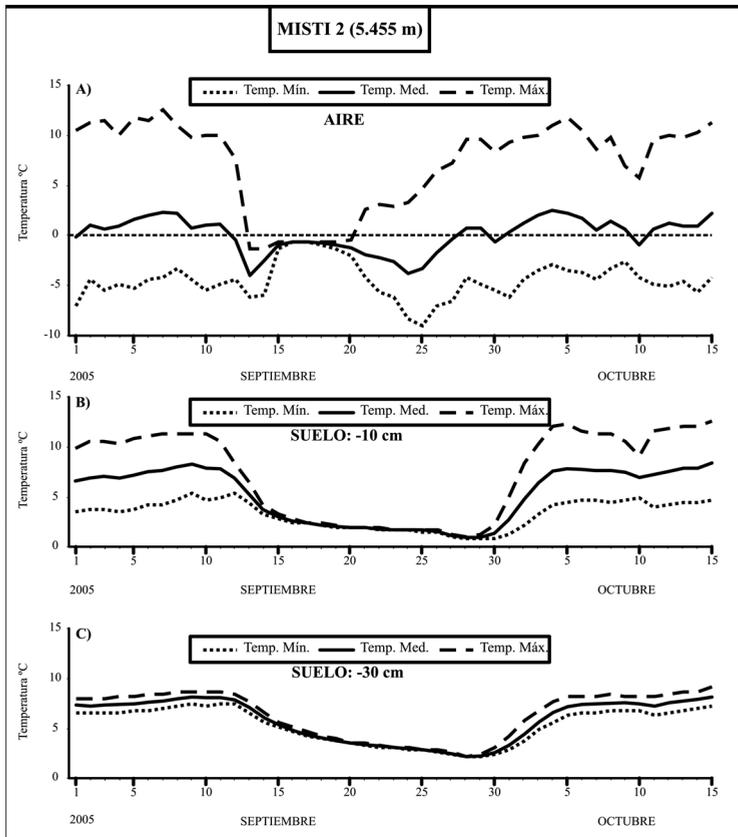


Figura 9
 TEMPERATURAS MÍNIMAS, MÁXIMAS Y MEDIAS DIARIAS DEL AIRE (A), A -10 CM (B) Y A -30 CM (C) DE PROFUNDIDAD
 ENTRE EL 1 DE SEPTIEMBRE Y EL 15 DE OCTUBRE 2005, EN LA ESTACIÓN DE SONDEO MISTI 2 (5.455 M.S.N.M).



Teniendo en cuenta los datos obtenidos en la serie anual comprendida entre el 1-09-2004 y 31-08-2005 para las sondas de -10 y -30 cm se observa que la TMS asciende con la profundidad en los primeros centímetros del suelo a razón de $0,18^{\circ}\text{C}$ por cada 10 cm (figura 11). La amplitud anual se reduce con la profundidad de $5,1^{\circ}\text{C}$ a $4,0^{\circ}\text{C}$. Si se supone una tendencia lineal de disminución de temperaturas medias mensuales máxima y mínima se tiene que la amplitud anual cero se localiza a una profundidad aproximada de -100,6 cm, donde la temperatura media del mes más frío y la del mes más cálido coinciden en $9,6^{\circ}\text{C}$.

Las temperaturas medidas a -10 cm en el suelo resultan más elevadas que las observadas en el aire, debido a las condiciones de instalación de las sondas: mientras las del aire se colocan a la sombra, las del suelo pueden recibir la influencia de la fuerte radiación diurna. Pero, con la profundidad, en lugar de aminorar la influencia de la radiación directa que se recibe en la superficie del suelo, las temperaturas se incrementan según lo observado a -30 cm. La explicación a este comportamiento está en la existencia de una fuente de calor interna, de manera que las temperaturas aumentan al acercarse a ella. La influencia del calor geotérmico,

Figura 10
 NÚMERO DE DÍAS EN LOS QUE LA TEMPERATURA PERMANECE POR ENCIMA, POR DEBAJO O FLUCTÚA ALREDEDOR DE 0°C EN LA ESTACIÓN MISTI 2 (5.455 M S.N.M)

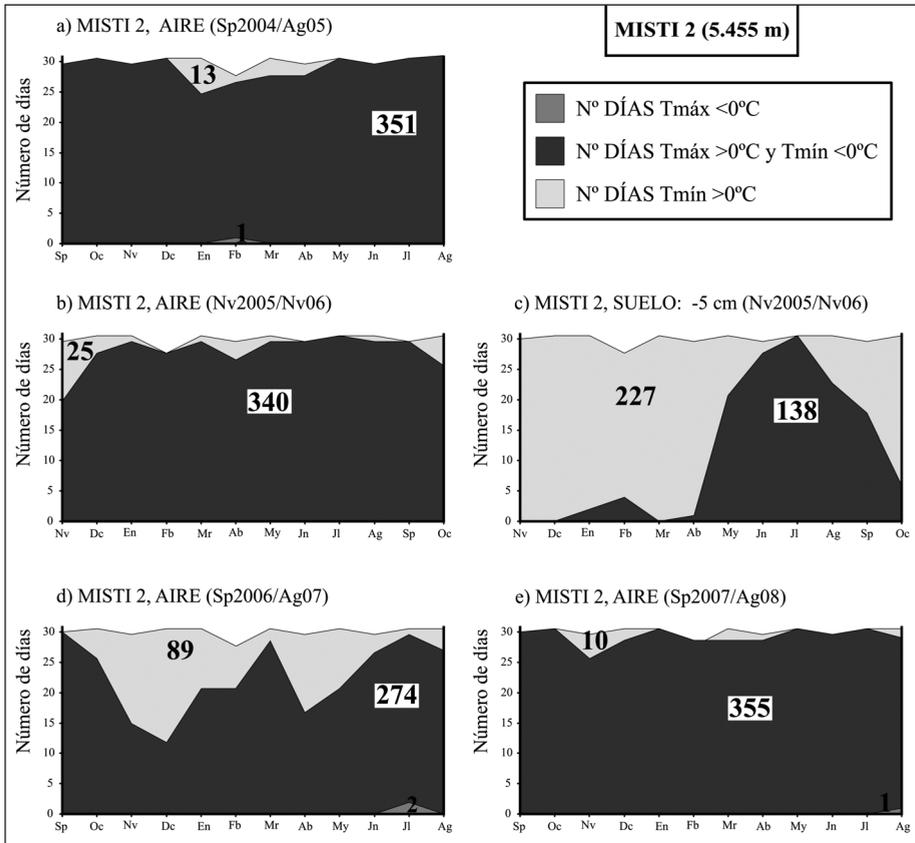
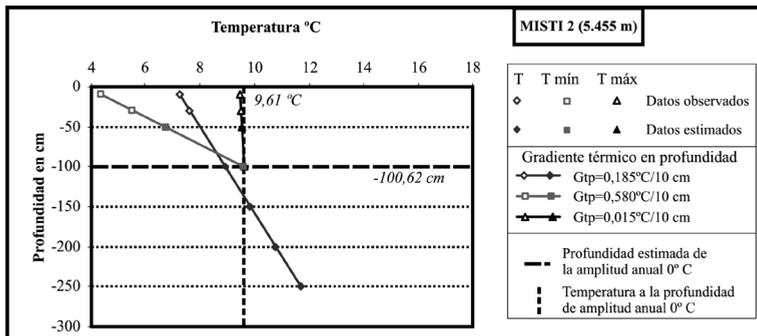


Figura 11
 TEMPERATURA MEDIA ANUAL (T), TEMPERATURA MEDIA MENSUAL MÍNIMA (T MIN) Y TEMPERATURA MEDIA MENSUAL MÁXIMA (T MAX) OBSERVADAS Y ESTIMADAS SEGÚN TENDENCIAS LINEALES, EN LA ESTACIÓN DE OBSERVACIÓN MISTI 2 (5.455 M S.N.M.), CON LOS DATOS DE LA SERIE 1-09-04/31-08-05



por tanto, hace imposible la presencia de permafrost en esta localización, aunque en los primeros 10 cm del suelo se notan los efectos de las bajas temperaturas nocturnas atmosféricas, con la presencia de ciclos diarios de hielo/deshielo durante el invierno (de abril a octubre).

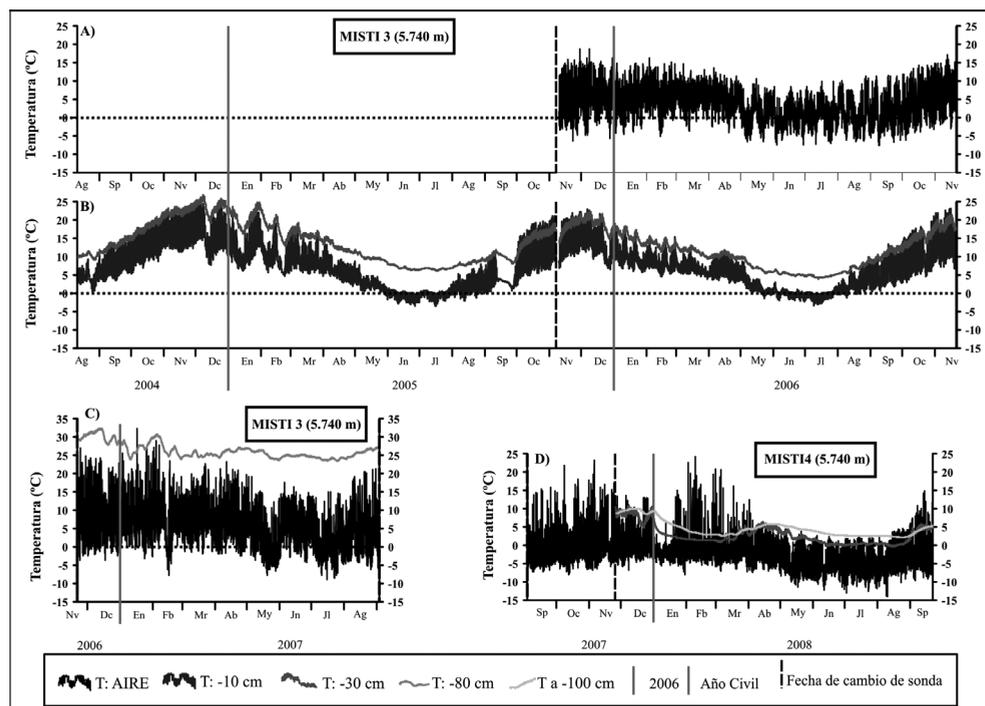
3. Gradiente térmico en la estación MISTI 3

Con el objetivo de calcular el gradiente de profundidad para la estación MISTI 3, localizada a 5.740 m, se han escogido dos series anuales con la misma periodicidad entre septiembre y agosto de 2004/05 y 2005/06, a partir de las colecciones de datos capturados por las sondas instaladas a -10 y -30 cm (figura 12.A, B y C; tablas 8, 9 y 10). En la serie anual de referencia (Nv2005/Nv06) la TMAA fue de 3,0°C, mientras que las TMAS se incrementaron notablemente con la profundidad. En la temporada anual 2004/05 se observa la misma tendencia con TMAS más elevadas.

La sonda del aire registró sólo un día con la temperatura máxima por debajo de 0°C en la serie 2005/06, mientras que el 69,0% de los días del año (252 días) experimentaron osci-

Figura 12

A) GRÁFICA DE LOS DATOS TOMADOS POR LA SONDA DEL AIRE ENTRE NOVIEMBRE DE 2005 Y NOVIEMBRE DE 2006 (ESTACIÓN MISTI 3). B) GRÁFICAS DE LOS DATOS TOMADOS POR LAS SONDAS INSTALADAS A -10 Y A -30 CM ENTRE AGOSTO DE 2004 Y NOVIEMBRE DE 2006; Y POR LA SONDA DE -80 CM (ESTACIÓN MISTI 3). C) GRÁFICAS DE LOS DATOS TOMADOS POR LAS SONDAS DEL AIRE Y DE -80 CM ENTRE NOVIEMBRE DE 2006 Y SEPTIEMBRE DE 2007 (ESTACIÓN MISTI 3). D) GRÁFICA DE LOS DATOS TOMADOS POR LA SONDA DEL AIRE ENTRE SEPTIEMBRE DE 2007 Y SEPTIEMBRE DE 2008 (ESTACIÓN MISTI 4)



laciones alrededor de los 0°C, con una mayor presencia entre mayo y octubre (figura 13.A). También durante el invierno (de mayo a agosto) se producen 66 ciclos diarios de hielo/deshielo a -10 cm (18,1% de los días del año). A esta profundidad se contaron 11 días con máximas inferiores a 0°C entre junio y julio (figura 13.B). Las temperaturas mínimas extremas del aire (-7,6°C) son más bajas que las capturadas a -10 cm (-3,4°C), pero debido a que la amplitud diaria en el interior del suelo es menor que la del aire, a -10 cm se observan más días de helada.

En la serie anual Sp2004/Ag05, a -10 cm se registraron 77 ciclos diarios de hielo/deshielo, de mayo a agosto, y 6 días de helada, repartidos entre los meses de junio y julio.

Tabla 8

ESTADÍSTICOS ANUALES DE LAS TEMPERATURAS DIARIAS (EN °C) PARA LAS SERIES ENTRE SEPTIEMBRE DE 2004 Y AGOSTO DE 2005; Y ENTRE NOVIEMBRE DE 2005 Y NOVIEMBRE DE 2006, DE LAS SONDAS SITUADAS EN EL AIRE YA -10 Y -30 CM, EN LA ESTACIÓN MISTI 3 (5.740 M S.N.M); *Y PARA LA SERIE ENTRE SEPTIEMBRE DE 2007 Y AGOSTO DE 2008 DE LA SONDA DEL AIRE EN LA ESTACIÓN MISTI 4 (5.740 M S.N.M)

Serie	Localización (cm)	T MEDIA			T ABSOLUTA		AMPLITUD		
		Media	Máx	Mín	Máx	Mín	Media	Máx	Mín
Sp2004/Ag05	SUELO: -10	8,1	11,2	5,2	24,8	-3,4	6,0	13,6	0,5
Sp2004/Ag05	SUELO: -30	14,7	15,2	14,2	26,9	6,0	1,0	2,9	0,0
Nv2005/Nv06	AIRE: +100	3,0	9,3	-1,6	18,8	-7,6	11,0	21,0	4,8
Nv2005/Nv06	SUELO: -10	6,6	9,6	4,2	22,9	-3,4	5,4	13,6	0,7
Nv2005/Nv06	SUELO: -30	11,5	12,1	11,1	22,3	4,0	1,0	2,7	0,0
*Sp2007/Sp08	AIRE: +100	-2,2	5,6	-6,3	24,2	-14,0	11,9	28,4	3,2

Figura 13

NÚMERO DE DÍAS EN LOS QUE LA TEMPERATURA PERMANECE POR ENCIMA, POR DEBAJO O FLUCTÚA ALREDEDOR DE 0°C EN LA ESTACIÓN MISTI 3 (5.740 M S.N.M) (A Y B) Y EN LA ESTACIÓN MISTI 4 (C)

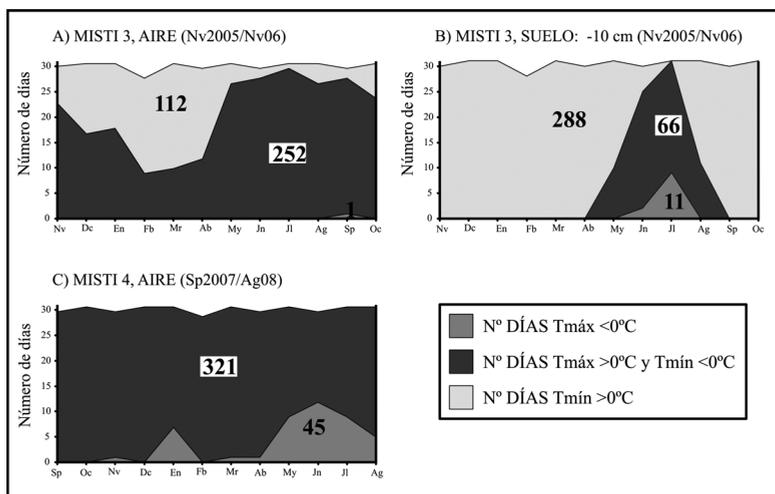


Tabla 9

ESTADÍSTICOS MENSUALES (EN °C) PARA LA SERIE ANUAL ENTRE SEPTIEMBRE DE 2004 Y AGOSTO DE 2005 DE LAS SONDAS SITUADAS A -10 Y -30 CM, EN LA ESTACIÓN MISTI 3 (5.740 M S.N.M)

Serie	Sp2004/Ag05				Sp2004/Ag05			
Sonda	SUELO:-10 cm				SUELO:-30 cm			
MES	MD	MX	MN	AT	MD	MX	MN	AT
<i>Sp</i>	8,0	12,0	4,8	7,3	13,2	13,8	12,6	1,1
<i>Oc</i>	13,3	18,0	8,8	9,3	18,0	18,9	17,2	1,6
<i>Nv</i>	17,2	22,1	12,4	9,6	22,5	23,3	21,6	1,7
<i>Dc</i>	16,4	21,0	12,1	8,9	23,6	24,6	22,9	1,7
<i>En</i>	12,9	17,3	9,2	8,1	20,6	21,5	19,9	1,7
<i>Fb</i>	9,8	12,7	7,4	5,3	17,8	18,6	17,3	1,3
<i>Mr</i>	9,5	13,2	6,5	6,7	16,1	16,9	15,5	1,3
<i>Ab</i>	6,1	8,9	4,2	4,7	12,8	13,2	12,4	0,8
<i>My</i>	2,5	4,1	1,3	2,9	9,8	10,0	9,6	0,4
<i>Jn</i>	-0,6	0,4	-2,0	2,4	7,1	7,2	7,0	0,2
<i>Jl</i>	-0,3	0,5	-1,6	2,1	6,7	6,7	6,6	0,2
<i>Ag</i>	1,8	4,8	-0,2	5,0	8,1	8,4	8,0	0,4
Media	8,1	11,3	5,2	6,0	14,7	15,2	14,2	1,0
<i>A anual</i>	17,8				17,0			

MD: temperatura media mensual; MX: temperatura máxima mensual; MN: temperatura mínima mensual; AT: amplitud térmica mensual; Media: promedios de las temperatura medias, máximas, mínima y amplitud mensuales; A anual: amplitud térmica anual.

Figura 14

TEMPERATURA MEDIA ANUAL (T), TEMPERATURA MEDIA MENSUAL MÍNIMA (T MIN) Y TEMPERATURA MEDIA MENSUAL MÁXIMA (T MAX) OBSERVADAS Y ESTIMADAS SEGÚN TENDENCIAS LINEALES, EN LA ESTACIÓN DE OBSERVACIÓN MISTI 3 (5.740 M SNM), CON LOS DATOS DE LA SERIE SP2004/AG05

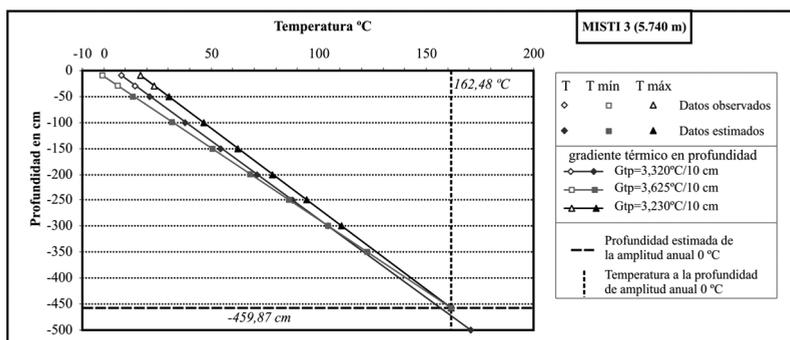


Tabla 10
 ESTADÍSTICOS MENSUALES (EN °C) PARA LAS SERIES ANUALES ENTRE NOVIEMBRE DE 2005 Y NOVIEMBRE DE 2006 DE LAS SONDAS SITUADAS EN LAIRE YA -10 Y -30 CM, EN LA ESTACIÓN MISTI 3 (5.740 M S.N.M.); Y PARA LA SERIE ANUAL DE SEPTIEMBRE DE 2007 A AGOSTO DE 2008 DE LA SONDA DEL AIRE, EN LA ESTACIÓN MISTI 4 (5.740 M S.N.M.)

Serie	Nv2005/Nv06						Nv2005/Nv06						Nv2005/Nv06						Sp2007/Ag08					
	AIRE			-10 cm			-30 cm			Sonda			AIRE			Sonda			AIRE			Sonda		
Sonda	MD	MX	MN	AT	MD	MX	MN	AT	MD	MX	MN	AT	MES	MD	MX	MN	AT	MES	MD	MX	MN	AT		
Nv	4,4	13,6	-1,6	15,3	14,5	19,8	9,8	10,0	18,4	19,4	17,5	2,0	Sp	-1,6	7,5	-6,3	13,7	Sp	-0,1	9,6	-5,1	14,8		
Dc	5,2	13,3	-0,5	13,8	13,8	17,6	10,5	7,1	19,1	20,0	18,4	1,6	Oc	-0,1	9,6	-5,1	14,8	Oc	-0,1	9,6	-5,1	14,8		
En	4,3	11,5	-0,7	12,2	9,9	12,7	7,6	5,1	15,6	16,4	15,1	1,3	Nv	0,6	12,1	-4,8	16,9	Nv	0,6	12,1	-4,8	16,9		
Fb	5,1	12,2	0,4	11,8	8,6	11,3	6,4	4,8	13,4	14,1	12,8	1,2	Dc	0,6	8,3	-3,8	12,1	Dc	0,6	8,3	-3,8	12,1		
Mr	5,6	10,8	1,3	9,6	6,7	8,4	5,5	3,0	11,5	11,9	11,2	0,7	En	-1,8	3,9	-4,5	8,4	En	-1,8	3,9	-4,5	8,4		
Ab	5,0	9,9	0,5	9,4	6,2	9,1	4,0	5,1	10,3	10,8	9,9	0,9	Fb	-1,0	10,8	-4,4	15,2	Fb	-1,0	10,8	-4,4	15,2		
My	0,9	6,0	-2,7	8,7	2,0	3,3	0,8	2,6	7,2	7,4	7,0	0,3	Mr	-1,4	7,9	-4,8	12,7	Mr	-1,4	7,9	-4,8	12,7		
Jn	-0,01	4,4	-3,9	8,3	0,0	0,7	-1,0	1,7	5,4	5,5	5,3	0,2	Ab	-2,1	4,2	-5,8	10,0	Ab	-2,1	4,2	-5,8	10,0		
Jl	0,4	5,7	-3,3	9,0	-0,5	0,4	-1,7	2,1	4,7	4,8	4,6	0,2	My	-4,9	0,9	-8,6	9,6	My	-4,9	0,9	-8,6	9,6		
Ag	1,0	6,3	-3,0	9,2	2,4	5,1	0,5	4,6	7,0	7,3	6,8	0,5	Jn	-5,3	0,1	-8,9	8,9	Jn	-5,3	0,1	-8,9	8,9		
Sp	0,5	7,1	-3,8	10,9	5,7	10,2	2,4	7,8	10,8	11,4	10,2	1,3	Jl	-5,6	0,5	-9,9	10,4	Jl	-5,6	0,5	-9,9	10,4		
Oc	3,3	11,4	-2,0	13,5	10,3	16,1	5,5	10,6	15,2	16,2	14,3	1,9	Ag	-4,3	1,8	-8,8	10,7	Ag	-4,3	1,8	-8,8	10,7		
Media	3,0	9,4	-1,6	11,0	6,6	9,6	4,2	5,4	11,5	12,1	11,1	1,0	Media	-2,2	5,6	-6,3	12,0	Media	-2,2	5,6	-6,3	12,0		
A anual	5,6				15,0								A anual	6,2				A anual	6,2					

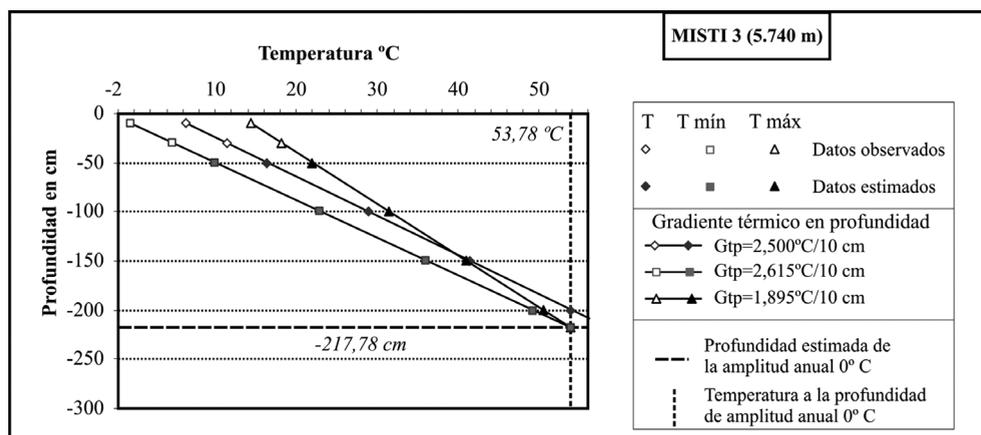
MD: temperatura media mensual; MX: temperatura máxima mensual; MN: temperatura mínima mensual; AT: amplitud térmica mensual; Media: promedios de las temperatura medias, máximas, mínimas y amplitud mensuales; A anual: amplitud térmica anual.

Si se consideran las temperaturas medias de la serie Sp2004/Ag05 (Tabla 9), se observa que tanto la media anual como las mensuales, máxima y mínima, aumentan con una proporción similar de 3,3°C, 3,2°C y 3,6°C, respectivamente, por cada 10 cm de profundidad. Las tendencias lineales con la profundidad son casi paralelas y las rectas de las máximas y mínimas mensuales no se cruzarán hasta alcanzar una profundidad de -459,35 cm, donde se produce, según el modelo, la amplitud anual cero, con un valor de 162,48°C (figura 14).

Teniendo en cuenta los datos obtenidos en la serie anual Sp2005/Ag06 (Tabla 10) para las sondas de -10 y -30 cm, se aprecia que la TMAA asciende con la profundidad en los primeros centímetros del suelo a razón de 2,5°C por cada 10 cm (figura 15). Las temperaturas medias mensuales más bajas del año también se incrementan, pero a razón de 2,6°C por cada 10 cm, y las medias mensuales más altas lo hacen con 1,9°C por cada 10 cm. Suponiendo una tendencia lineal de las medias mensuales mínimas y máximas se observa que el límite de amplitud anual cero se alcanzaría a los -217,8 cm, donde la temperatura media mensual se igualaría en 53,8°C.

Figura 15

TEMPERATURA MEDIA ANUAL (T), TEMPERATURA MEDIA MENSUAL MÍNIMA (T MIN) Y TEMPERATURA MEDIA MENSUAL MÁXIMA (T MAX) OBSERVADAS Y ESTIMADAS SEGÚN TENDENCIAS LINEALES, EN LA ESTACIÓN DE OBSERVACIÓN MISTI 3 (5.740 M S.N.M.), CON LOS DATOS DE LA SERIE SP2005/AG06.

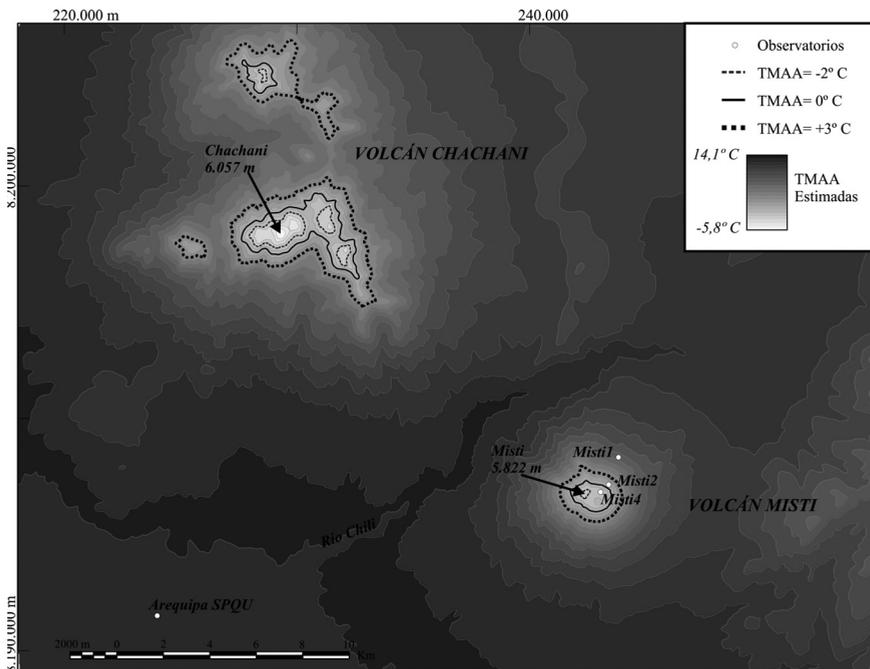


La sonda del aire de la estación MISTI 4 comenzó a funcionar en septiembre de 2007 (figura 12.D) y la primera serie anual registrada dio una TMAA de -2,24°C, con todas las medias mensuales negativas, excepto en los meses de noviembre y diciembre (Tabla 10). Además, todos los días registraron temperaturas negativas (figura 13.C). Estos hechos confirman la idea de que las emisiones de las fumarolas en las proximidades de la estación MISTI 3 estaban influyendo en las características térmicas del aire. Por otra parte, los escasos valores registrados por las sondas del suelo, muestran que a -30 cm todavía se alcanzan temperaturas negativas, aunque ningún valor quedó por debajo de -0,4°C.

IV. GRADIENTE VERTICAL DE LA TMAA Y DE LA TMAS

La distribución de las TMAA en la ladera norte de El Misti se puede simular mediante el cálculo de gradientes verticales de temperatura, empleando para ello las TMAA de nuestras estaciones y la TMAA de la estación meteorológica Arequipa SPQU. En la comparación de los valores de TMAA a diferentes alturas se observó que los valores de MISTI 3 siempre eran mayores a los registrados en la MISTI 2, situada a menor altura. Por ejemplo, en la serie Nv2005/06 la TMAA de MISTI 3 fue de 3,0°C, mientras que la MISTI 2 registró 1,7°C. Este aumento de las temperaturas con la altitud no se ajusta a la tendencia climática «normal» y puede estar relacionado con la influencia del calor geotérmico en la primera capa de aire en contacto con la superficie del suelo en el entorno de la estación MISTI 3. Sin tener en cuenta los valores de esta estación, las TMAA de las estaciones MISTI 1, 2 y 4 (Tablas 2, 4 y 8), de la serie Sp2007/Ag08, junto con la TMAA de Arequipa SPQU (13,8°C), muestran que la temperatura desciende con la altitud a razón de 0,50°C/100 m, aunque la tendencia no es lineal, ya que varía en los diferentes tramos. Entre la estación más baja hasta la MISTI 1, la temperatura desciende 0,30°C/100 m, mientras que desde esta hasta la MISTI 2 disminuye a razón de 0,72°C/100 m y desde aquí hasta la más elevada, 1,66°C/100 m. El ajuste de una recta de regresión entre las variables de altitud y TMAA consiguió un buen ajuste ($R^2 = 0,91$), aunque el modelo generado en el Sig a partir de esta ecuación localizó la isoterma de

Figura 16
 MODELO DE DISTRIBUCIÓN ALTUDINAL DE LAS TMAA EN EL COMPLEJO MISTI-CHACHANI SEGÚN UN AJUSTE CALCULADO CON LOS VALORES DE LAS TMAA DE LAS ESTACIONES MISTI 1, 2, 4 Y AREQUIPA SPQU



-2°C a 6.163 m, cuando el valor observado de -2,2°C estaba a 5.740 m. Por esta razón, para desarrollar el modelo se ajustó una curva, una polinómica de segundo grado ($R^2 = 0,99$):

$$y = -0,000002x^2 + 0,011601x - 2,745674$$

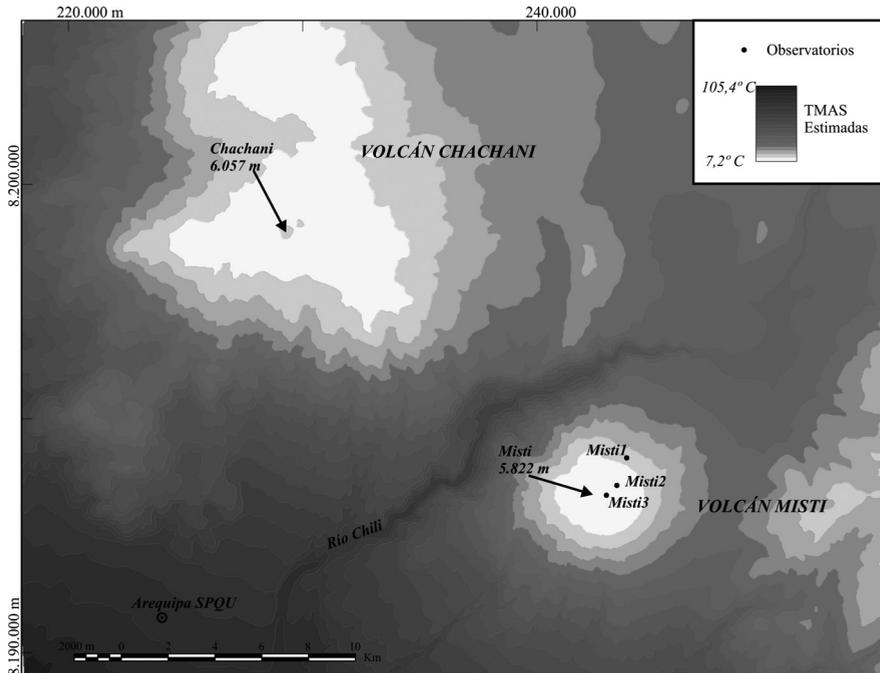
En este caso, el modelo (figura 16) devolvió un valor estimado de -2°C para una altura de 5.731 m, por encima de la cual dominarían los procesos de helada. De la misma manera, situó el límite inferior del piso morfoclimático periglacial a 5.249 m (isoterma de +3°C) y la TMAA de 0°C a 5.549 m.

Al tratar de obtener gradientes verticales de las TMAA se notaron distorsiones importantes. Por ejemplo, en el gradiente térmico vertical de la TMAA calculado a partir de los valores observados en las estaciones MISTI 1, 2 y 3 a -10 cm, en la serie anual Sp2004/Ag05 (figura 17), la temperatura desciende a razón de 0,41°C por cada 100 m de altura, aunque se observa que la TMAA disminuye entre las dos primeras estaciones a razón de 0,66°C/100 m, mientras que entre la segunda y la tercera se incrementa ligeramente (0,33°C/100 m). El ajuste de una recta no permite estimar un descenso de la temperatura en los primeros metros y después un ascenso, por lo que se ha ajustado una polinómica de segundo grado:

$$y = 0,000010x^2 - 0,109624x + 303,991760$$

Figura 17

MODELO DE DISTRIBUCIÓN ALTUDINAL DE LAS TMAA EN EL COMPLEJO MISTI-CHACHANI SEGÚN UN AJUSTE POLINÓMICO CALCULADO CON LOS VALORES DE LAS TMAA A -10 CM DE LAS ESTACIONES MISTI 1, 2 Y 3



Según este modelo, aplicado al área volcánica El Misti-Chachahi, no se dan temperaturas por debajo del punto de congelación a -10 cm, ya que la temperatura más baja de las estimadas es 7,2°C. Si utilizamos como elemento de validación la estación del aeropuerto de Arequipa (2.508 m), con una TMAA real para esas mismas fechas de 14,75°C, el modelo indica una TMAS de 93°C a -10 cm, con lo que se comprueba el gran desajuste de las TMAS de las estaciones de El Misti con los gradientes climáticos.

Para calcular el gradiente térmico vertical con las TMAS de -30 cm, se cuenta únicamente con los datos obtenidos en las series anuales 2004/05 y 2005/06 en las estaciones MISTI 2 y 3. En ambos casos, el resultado indica que la temperatura aumenta con la altitud, porque, como ya se ha visto, el régimen térmico del suelo en la estación MISTI 3 queda muy alterado por la influencia del flujo geotérmico. Así, para la primera serie la TMAS aumenta 2,89°C por cada 100 m de ascenso y en la segunda, 1,73°C por cada 100 m. La creación de un modelo de distribución a partir de estos datos resulta altamente arriesgada, ya que sólo se cuenta con los valores de dos estaciones de muestreo muy próximas y el gradiente presenta un valor muy elevado que aumenta con la altura. De hecho siguiendo estas tendencias se estiman unos valores de -77,5°C y -43,9°C, respectivamente, a -30 cm el interior del suelo, en la estación Arequipa SPQU (2.508 m).

Por tanto, la grave alteración de la temperatura del suelo, debida al calor geotérmico en el cono superior de El Misti, anula la posibilidad de poder usar modelos de distribución altitudinal de la temperatura generalizables a otras áreas próximas.

V. DISCUSIÓN

En la cara norte del volcán El Misti, el análisis de datos térmicos del suelo recogidos ofrece resultados sumamente anómalos desde el punto de vista climático. En la estación MISTI 1 (4.726 m) la TMAA es positiva (7,1°C) y registra 22 días con ciclos de hielo/deshielo. En el interior del suelo todos los registros de temperaturas son positivos y la media anual a -10 cm es de 12,0°C. Al aumentar la profundidad aumenta también la temperatura media, a la vez que se reducen la amplitud anual y la oscilación media diaria anual. Suponiendo una tendencia lineal de las temperaturas mensuales máximas y mínimas observadas a distintas profundidades, la amplitud anual 0 se alcanzaría a 183 cm de profundidad y sería de 13,3°C. Estos datos indican la mínima actuación de la helada en el suelo y la fuerte influencia del calor geotérmico. A 5.455 m, en la estación MISTI 2, las TMAA siguen siendo positivas, aunque registran numerosos ciclos diarios de hielo/deshielo (más de 350 días al año) con no más de 10 días de máximas negativas. En los primeros centímetros del suelo, al igual que indican Smith y Riseborough (2002), la TMAS se eleva considerablemente (6,1°C a -5 cm), aunque todavía se registra un elevado número de días con hielo/deshielo (138 días). Los autores indican que esta tendencia se debe a factores que aíslan el suelo de la helada (vegetación, cubierta nival...). En este caso no existe cubierta vegetal y el efecto de la nieve en el suelo, durante los escasos días que permanece, supone un enfriamiento de la temperatura del suelo. Esta diferencia entre la TMAA y la TMAS en los primeros centímetros se debe a las características de la localización de los termómetros: mientras que la sonda del aire se instala siempre a la sombra, la superficie del suelo queda expuesta a la radiación solar que influye en las temperaturas tomadas en la parte superior del suelo. Al aumentar la profundidad, la TMAS

sigue incrementándose, al contrario de lo que señalan Smith y Riseborough (2002), de forma que a -10 cm se observa una TMAA de 7,2°C y a -30 cm entre 8,0°C y 7,5°C (según el año de observación). A estas profundidades ya no se registran temperaturas negativas. Si se mantiene la tendencia lineal de aumento, la amplitud anual 0 se produciría a 1 m de profundidad con una TMAA de 9,6°C. Estas condiciones indican un incremento de la influencia del calor geotérmico y la prácticamente nula acción de la helada en el suelo.

En la localización de la estación MISTI 3 (5.740 m) la TMAA (3,0°C) es más elevada que la registrada en la estación MISTI 2, y el número de días con ciclo de hielo/deshielo es algo inferior (252 días). A -10 cm la temperatura media anual se incrementa considerablemente (8,0°C y 6,6°C en dos campañas anuales), aunque todavía hay algún día con ciclo de hielo/deshielo (77 y 66 días), con una menor intensidad de la helada (mínima absoluta de -3,4°C). 20 cm más abajo la TMAA alcanza los 14,7°C/11,5°C, con valores máximos absolutos iguales o superiores a los de -10 cm y con mínimas absolutas de 6,0°C. Las medias mensuales sufren un incremento de unos 5-6°C de forma uniforme respecto de los registros a -10 cm. Este comportamiento es indicativo de una enorme influencia del calor geotérmico, que impide que el suelo se hiele e incluso eleva las temperaturas del aire. Al localizar la sonda del aire en un nuevo emplazamiento a la misma altitud y con el máximo alejamiento de las fuentes visibles de calor (estación MISTI 4), la TMAA fue de -2,2°C, con diez medias mensuales negativas. Esto demuestra que la influencia del flujo geotérmico en la primera capa del aire tiene un alcance limitado al entorno del foco de calor. Para determinar la extensión del área afectada se necesitaría establecer una red más densa de sondas y relacionar sus valores con las características del viento.

El modelo de distribución de TMAA generado a partir de la estimación del gradiente vertical con los datos obtenidos en las estaciones de El Misti, localiza la isoterma de +3°C a 5.249 m, de forma que el ambiente periglaciario quedaría teóricamente definido por cotas superiores a esta (French, 2007). Sin embargo, el modelo de distribución de las TMAA a -10 cm no ofrecen una relación con la altura, ya que, aunque entre las estaciones más baja y más alta experimente un descenso general de 0,41°C por cada 100 m de ascenso, la TMAA recogida en la estación intermedia, rompe la tendencia, de forma que la temperatura desciende con la altura hasta los 5.455 m de la estación intermedia y luego vuelve a incrementarse. El modelo generado a partir de estos datos estima valores no verosímiles fuera del alineamiento de las tres estaciones. Algo similar sucede con la tendencia lineal de las TMAA a -30 cm entre las estaciones MISTI 2 y MISTI 3, donde se establece una clara reducción de la temperatura con la disminución de la altura.

Con estas experiencias se puede concluir que la temperatura del suelo no se ajusta a un patrón climático de distribución altitudinal en toda la ladera norte de El Misti. La influencia del calor geotérmico afecta a todo el cono superior del volcán y distorsiona el reparto de las temperaturas.

Por otra parte, los valores térmicos del aire, muy citados y usados como referencia del mundo tropical (French, 2007), que Troll (1959) observa en la estación Mont Blanc (4.760 m) y en la estación Summit (5.850 m) de El Misti difieren a los que ofrecen aquí las estaciones MISTI 1 y MISTI 3/MISTI 4 localizadas a altitudes similares (4.726 m y 5.740 m respectivamente). Troll (1959) indica que a una altura de 4.760 m se registran 337 días en los que la temperatura oscila en torno a 0°C a lo largo del día, con temperaturas nocturnas que

varían entre -1 y $-3,7^{\circ}\text{C}$ y diurnas, entre $4,6$ y $8,2^{\circ}\text{C}$. El resto de los días del año quedan libres de helada. Por el contrario, en la estación MISTI 1 apenas se han contabilizado 22 días en los que el termómetro se mueve alrededor de 0°C , con máximas de $6,1$ a $14,1^{\circ}\text{C}$ y con mínimas de $-0,2$ a $-4,2^{\circ}\text{C}$. También las características que encuentra Troll en la estación Summit, con 323 días con temperaturas siempre por debajo de 0° y 42 ciclos diarios de hielo/deshielo, son diferentes de las aquí descritas para las estaciones MISTI 3 y 4. En MISTI 3 se dan 112 días libres de helada y el resto de días del año la temperatura oscila en torno al punto de congelación. Las condiciones en una posición más alejada del foco de calor geotérmico (MISTI 4), tampoco se acercan a las referidas por Troll, con 45 días de helada y 321 ciclos diarios de hielo/deshielo. La posible causa de esta diferencia en los datos térmicos hay que buscarla en la fecha de obtención de los valores, ya que Troll emplea temperaturas recogidas entre enero de 1893 y diciembre de 1895 (Mont Blanc) y entre octubre de 1893 y diciembre de 1895 (Summit Station), frente a las series más recientes analizadas aquí entre septiembre de 2007 y agosto de 2008. Por lo tanto, los datos que ofrece el trabajo de Troll no se pueden emplear para delimitar el ambiente periglaciario ni los límites de extensión del permafrost en la franja tropical del Hemisferio Sur de forma genérica.

Otra referencia de comparación hay que buscarla en el trabajo realizado en el complejo volcánico inactivo del Chachani por el Grupo Investigación de Geografía Física de Alta Montaña, todavía sin publicar (Andrés, 2009), en el que se han analizado las temperaturas medidas en tres estaciones localizadas en el Chachani, para periodos de tiempo similares a las series obtenidas aquí para El Misti. A una altitud de 5.331 m en el Chachani se han encontrado TMAA negativas ($-1,9^{\circ}\text{C}$) que se corresponden con TMAA a -30 cm también negativas ($-2,7^{\circ}\text{C}$) (2007/08). En contraposición, en El Misti, a 5.455 m la TMAA es positiva ($1,8^{\circ}\text{C}$) y a -30 cm la TMAA es excepcionalmente alta ($7,7^{\circ}\text{C}$), para el mismo periodo. Por otra parte, el modelo de distribución de TMAA que se puede calcular a partir de los valores térmicos capturados en el Chachani indica que la isoterma de $+3^{\circ}\text{C}$, que se emplea para delimitar el ámbito periglaciario (French, 2007) se localiza a 4.651 m, casi 600 m más abajo que en el modelo calculado con las temperaturas de El Misti (figura 16). Aunque habría que estudiar si existen otros factores que puedan explicar un distinto comportamiento de las temperaturas en el interior del suelo (p.e. se encontró hielo segregado en la estación instalada a 5.331 m en el Chachani), de nuevo todo apunta a que en el cono superior de El Misti la influencia del calor geotérmico impide que se den las condiciones térmicas necesarias para el desarrollo de procesos periglaciares. De esta manera se puede explicar, que aunque el número de días con temperaturas inferiores a 0°C y de ciclos de hielo/deshielo en el aire estén indicando la posibilidad de existencia de actividad periglaciaria o incluso presencia de permafrost (MISTI 2 y 4), en el caso de El Misti, el flujo geotérmico impide por completo su desarrollo en el cono superior.

VI. CONCLUSIONES

En El Misti no se encuentran formas debidas a procesos geomorfológicos fríos, mientras que en el Chachani, situado a $15,5$ km al NW, se han observado formas glaciares de la Pequeña Edad del Hielo y glaciares rocosos activos (Palacios *et al.*, 2009). En este trabajo se ha tratado de encontrar el factor limitante del desarrollo de procesos periglaciares en El Misti

mediante el estudio de las características térmicas el aire y de la superficie del suelo en dicho volcán. Los datos obtenidos a partir de la instrumentación resultan valiosos por sí mismos, debido a la escasez de información térmica que existe para la montaña del mundo tropical, y su análisis revela que la influencia del calor geotérmico distorsiona la distribución la temperatura de tal manera que restringe la presencia de formas periglaciares.

El tratamiento de los valores capturados por las sondas instaladas en El Misti demuestra que el régimen de la temperatura del suelo queda modificado por el flujo geotérmico. Incluso la temperatura del aire a un metro del suelo es alterada por su efecto y, seguramente, por la importancia de las fumarolas. En cualquier caso, los datos obtenidos de la temperatura del aire no sirven para sacar conclusiones sobre la importancia de la actividad periglaciara en volcanes activos, como se ha hecho repetidamente, en especial con el caso de El Misti. Las TMAA, a pesar de que guardan una estrecha relación con la altitud, no son fiables como indicadores de procesos periglaciares. Tampoco los ciclos de hielo/deshielo diarios y el número de días de helada en el aire determinan la presencia de características térmicas en el suelo favorables para el desarrollo de formas periglaciares, ya que afectan de forma somera a los primeros 10 cm del suelo y no se detectan ya a -30 cm.

Por otra parte, las anomalías detectadas en el régimen térmico del suelo imposibilitan la creación de modelos de distribución de temperaturas en el interior del suelo a partir de datos de distintas altitudes, ya que no existe una relación uniforme entre la temperatura y la altitud.

Otro comportamiento térmico que llama la atención es el efecto que produce una cubierta nival sobre el suelo. En el caso de El Misti se ha visto que la nieve no actúa como aislante, sino que hace que la temperatura del interior del suelo disminuya, aunque si provoca que la oscilación diaria sea prácticamente nula. Esta observación puede estar relacionada con el hecho de que en la montaña tropical la nieve no tiene ningún papel determinante en el ámbito periglaciara y en la distribución del permafrost.

La falta de glaciares y de formas glaciares y la ausencia de formas periglaciares en El Misti, tan abundantes en volcanes inactivos próximos como el Chachani, se debe, no sólo a su posible destrucción por la actividad volcánica reciente, sino sobre todo por los importantes efectos del calor geotérmico en las laderas de su cono superior, que controla el régimen térmico del suelo, evitando que se congele, incluso en las posiciones más elevadas.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha realizado con financiación del Ministerio de Ciencia e Innovación de España (CGL 2009-7343) y el Grupo de investigación de Geografía Física de alta Montaña UCM. Queremos agradecer el apoyo del Instituto Geofísico del Perú (IGP) y del Instituto Geológico Minero y Metalúrgico de Perú (INGEMMET) durante los trabajos de campo realizados para llevar a cabo el presente trabajo.

This work has supported by a grant from the *Ministerio de Ciencia e Innovación* of Spain (project CGL 2009-7343) and Research Group *Geografía Física de alta Montaña UCM*. We thank the support from Instituto Geofísico del Perú (IGP) and Instituto Geológico Minero y Metalúrgico de Perú (INGEMMET) in the fieldwork.

VII. BIBLIOGRAFÍA

- ANDRÉS, N. (2009): *Técnicas de información geográfica aplicadas al estudio del origen de los lahares y su experimentación en estratovolcanes tropicales*. Tesis doctoral inédita. Universidad Complutense de Madrid, Madrid, 476 pp.
- DRIEDGER, C.L. (1981): «Effect of ash thickness on snow ablation» en *The 1980 eruptions of Mount St Helens* (Lipman, P.W. y Mullineaux, D.R., eds.). USGS Professional Paper 1250, 757-760.
- FRENCH, H.M. (2007): *The Periglacial Environment*. John Wiley & Sons.
- HAEBERLI, W. (1973): «Die Basis Temperatur der winterlichen Schneedecke als möglicher Indikator für die Verbreitung von Permafrost». *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glaziologie*, nº 9(1/2), 221-227.
- Instituto Nacional de Estadística e Informática de Perú (INEI) (2007): *Censo de 2007*. Disponible en <http://censos.inei.gob.pe/censos2007/>
- KELLERER-PIRKLBAUER, A., FARBROT, H. y ETZELMÜLLER, B. (2007): «The potential of volcanic eruptions for permafrost aggradation in local and global perspectives based on the Hekla-2000 eruption in Iceland». *Permafrost and Periglacial Processes*, nº 18, 269-284.
- KIRKBRIDE, M.P. y DUGMORE, A.J. (2003): «Glaciological response to distal tephra fallout from the 1947 eruption of Hekla, south Iceland». *Journal of Glaciology*, nº 49, 420-428.
- KNEISEL, C. y KÄÄB, A. (2007): «Mountain permafrost dynamics within a recently exposed glacier forefield inferred by a combined geomorphological, geophysical and photogrammetrical approach». *Earth Surface Processes and Landforms*, nº 32, 1797-1810.
- MARTELLI, K., THOURET, J.C., VAN WESTEN, C., FABRE, D., SHERIDAN, M. y VARGAS, R. (2008): «Estimating building and infrastructure vulnerability in the city of Arequipa, Peru, from volcanic mass flows: A challenge» en Extended Abstracts of 7th International Symposium on Andean Geodynamics (ISAG, Nice), 315-318.
- PALACIOS, D., ZAMORANO, J.J. y PARRILLA, G. (1998): «Proglacial debris flows in Popocatepetl north face and their relation to 1995 eruption». *Zeitschrift Geomorphologie*, nº 42 (3), 273-295.
- PALACIOS, D., ANDRÉS, N., ÚBEDA, J., y ALCALÁ, J. (2009): «Permafrost and Periglacial Activity Distribution and Geothermal Anomalies in the Chachani and El Misti Volcanoes (Southern Peru)», *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 11, EGU2009-8014-2, EGU General Assembly 2009.
- SENAMHI (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología), *Normales climatológicas 1949-1998 para la estación de Arequipa*. Disponible en (<http://www.senamhi.gob.pe/>).
- SMITH, M.W. y RISEBOROUGH, D.W. (2002): «Climate and the limits of permafrost: A zonal analysis». *Permafrost and Periglacial Processes*, nº 13, 1-15.
- THOURET, J.C., FINIZOLA, A., FORNARY, M., SUNI, J. y FRECHEN, M. (2001): «Geology of El Misti volcano near the city of Arequipa, Peru». *Geological Society of America Bulletin*, nº 113 (12), 1593-1610.

- TROLL, C. (1959): «Die tropischen Gebirge, ihre dreidimensionale klimatische und pflanzengeographische Zonierung». *Bonner Geographische Abhandlungen*, nº 25, 1-93.
- VAN EVERDINGEN, R.O. (1985): «Unfrozen permafrost and other taliks» en *Proc. Workshop on Permafrost Geophysics* (Brown, J., Metz, M.C. y Hoekstra, P., eds.), U.S. Army, C.R.R.E.L., Special Rept. nº 85-5, 101-105.