

ESTUDIO CRISTALOGRÁFICO DE HIELO DE TERMOCARST**CRYSTALLOGRAPHIC STUDY OF THERMOKARST ICE****Lucía E. Arena¹, Giorgio M. Caranti^{1,2} y Dario Trombotto³**

1 Facultad de Matemática, Astronomía y Física, Universidad Nacional de Córdoba- Argentina

2. CONICET

3 IANIGLA – CONICET- Mendoza, Argentina. Investigador invitado, Universität Humboldt zu Berlin, Alemania
arena@famaf.unc.edu.ar

En el presente trabajo se caracterizan microcristalográficamente muestras de hielo extraídas de un termocarst, en el área de hielo cubierto de sedimento, localizada a aproximadamente 4200 m de altura, en el Cordón del Plata de la Cordillera de los Andes, en Mendoza, Argentina. Las muestras estudiadas corresponden a dos paredes diferentes del termocarst extraídas en 1999 y 2002 respectivamente. En el laboratorio, se estudiaron el tamaño y orientación relativa de los cristales, el tamaño, la forma y distribución de las burbujas y se estimó la densidad de las dislocaciones de las muestras. Para ello se prepararon láminas delgadas, que se observaron con luz polarizada y se realizaron réplicas plásticas de la superficie de las muestras. Los resultados de la caracterización de las microcristalografía se compararon con las observaciones geomorfológicas. A partir de los primeros resultados fue posible distinguir hielo glaciogénico de hielo sedimentario

Ice samples extracted from a thermokarst located at the Cordon del Plata in the Andes are characterized crystallographically. Sediments at an altitude of 4200 msl cover the area of extraction. The studied samples are from two different walls of the thermokarst and corresponding to different campaigns in 1999 and 2002 respectively. In the laboratory the size and orientation of the crystallite and size, shape and distribution of bubbles were studied as well as the density of dislocations. The used techniques were: observation of thin cross sections of the samples with polarized light and plastic replicas of the surface. The microcrystallographic results are compared with the geomorphology from which it is possible to distinguish glaciogenic ice from sedimentary ice.

I. INTRODUCCIÓN

La comprensión de muchos fenómenos de la Ciencias Naturales puede verse favorecidos por el estudio correlacionado de modelos microscópicos y macroscópicos o de gran escala del mismo problema.

Existe un importante número de trabajos, entre los que se pueden mencionar los clásicos de Gow⁽¹⁾ o Lorius⁽²⁾ donde se trabajaron muestras glaciales polares y se observaron correlaciones entre la textura y la antigüedad del hielo. También cabe mencionar trabajos experimentales realizados en el laboratorio⁽³⁻⁶⁾, en los cuales se han podido relacionar las leyes de crecimiento de grano con la evolución temporal de la textura de hielos naturales extraídos de calotas polares. Por otro lado, Corte⁽⁷⁾ tomó muestras de permafrost y analizó la orientación y tamaño de cristales con el fin de caracterizar el hielo. En este mismo tipo de hielo es viable correlacionar las características microcristalográficas con las morfológicas del ambiente en que se forma^(8,9). Por ejemplo a partir de la microfísica se puede aportar información sobre la génesis del hielo del termocarst: el hielo formado por

acreción posee características diferente de hielo proveniente de avalanchas.

En este trabajo se estudian muestras de hielo extraídas del termocarst en una área con hielo cubierto por sedimentos. El permafrost se encuentra a 4200-4300 m de altura en el Cordón del Plata en la Cordillera de los Andes, en Mendoza, Argentina. Las muestras se extrajeron de diferentes paredes del termocarst perpendiculares entre si. En la Figura 1 puede verse un esquema del termocarst en el que se representan las dos paredes de extracción del conjunto de muestras y se especifican tanto la altura desde el tope del termocarst como la dirección del flujo principal del glaciar en relación a la orientación geográfica. Las muestras fueron extraídas espacialmente orientadas, manipuladas con el mayor cuidado para evitar contaminación y almacenadas a temperatura menor a -12°C para evitar cambios estructurales microcristalográficos⁽⁴⁾.

II. METODOLOGÍA DE TRABAJO

Las muestras de hielo se caracterizaron con técnicas de microscopía de réplicas plásticas y de

microfotografiado de láminas delgadas⁽⁴⁾. Por medio de estas técnicas es posible determinar el tamaño medio y la orientación relativa de los cristales, la concentración, orientación y distribución de burbujas y también, estimar características de las tensiones a que fueron sometidas las muestras. Respecto a este último

tema, en la réplica plástica es posible observar marcas del ataque químico que se producen principalmente en las fallas del cristal donde las moléculas están más débilmente unidas. Por consiguiente este método da

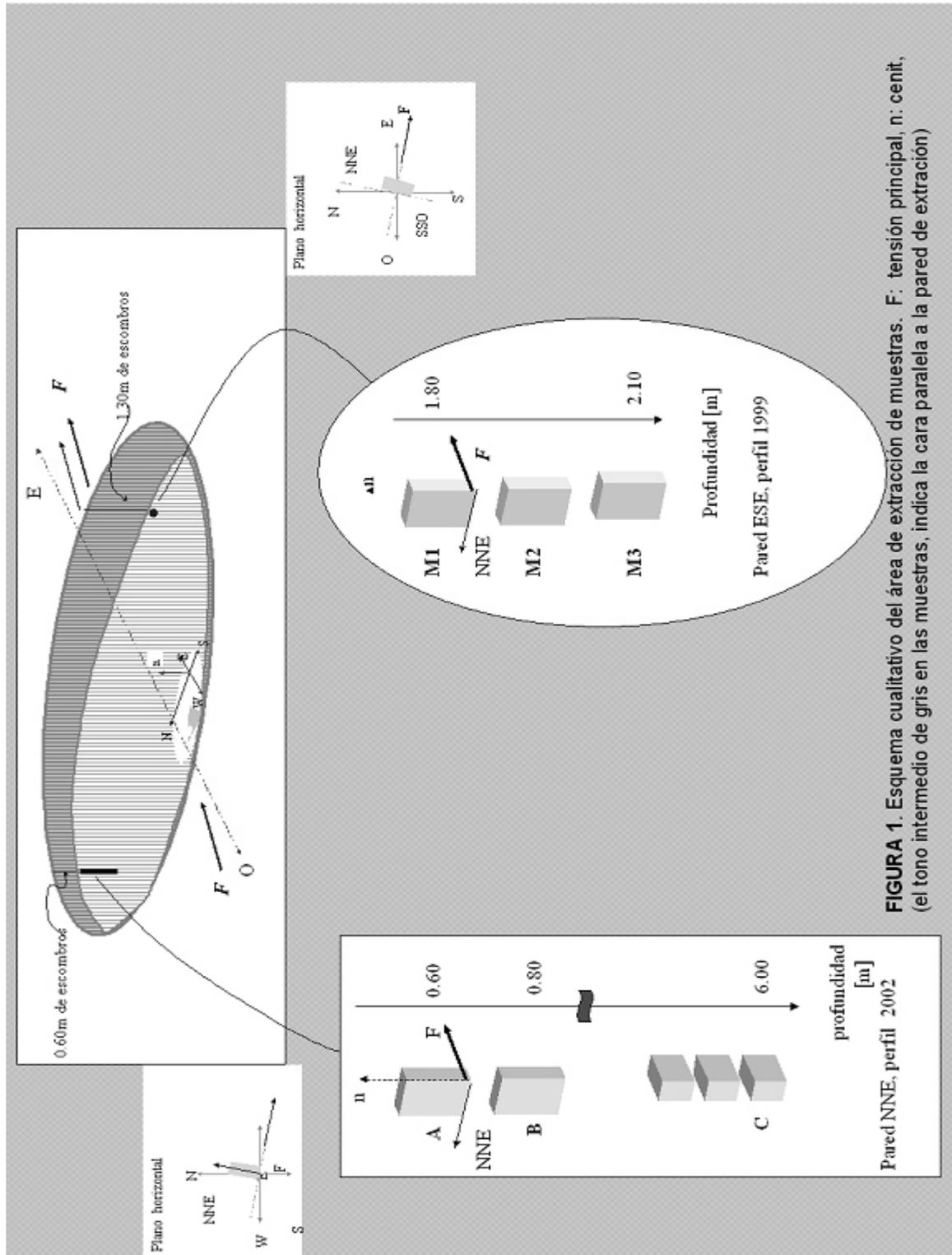


FIGURA 1. Esquema cualitativo del área de extracción de muestras. F: tensión principal, n: cenit, (el tono intermedio de gris en las muestras, indica la cara paralela a la pared de extracción)

Figura 1. Esquema cualitativo del área de extracción de muestras

información sobre las dislocaciones emergentes a la superficie del hielo⁽¹⁰⁻¹³⁾. La densidad de huellas de dislocaciones, que es medida en la superficie de una réplica plástica, da información sobre las tensiones residuales de la muestra.

III. RESULTADOS

En el presente trabajo, cada muestra natural fue seccionada en tres direcciones perpendiculares a F, NNE y n respectivamente, indicadas en la figura 1. A su vez, en cada sección se caracterizaron cristales, burbujas y defectos, según se informa en la tabla 1

En las secciones se distinguen dos zonas diferentes, con y sin microburbujas, designadas por sb y cb respectivamente. Se pueden distinguir tres tipos diferentes de burbujas: dos de éstos son microburbujas (mB) con diámetro medio menor que 100 μm y el otro macroburbujas (MB), que pueden observarse a simple vista, con diámetros mayores que 500 μm . En el primer grupo, para los tamaños de grano presentes en las muestras, burbujas con el diámetro medio menor que 50 μm (llamadas mBA) pueden anclar los bordes de grano, reduciendo la velocidad del crecimiento de grano⁽⁵⁾. Por otro lado, las microburbujas con diámetro medio mayor que 50 μm (denominadas mBNA), en general no afectan la migración de los límites de grano. Habitualmente, el tamaño medio de los cristales en las zonas de microburbujas anclantes (zonas cb) es más pequeño que en las zonas sin burbujas (zonas sb) o en zonas que contienen las burbujas mBNA y MB^(3,4). Es interesante notar que las burbujas mBA son casi esféricas; mientras, las mBNA y MB son oblongas y su orientación da información sobre la dirección de las tensiones aplicadas

Finalmente, las huellas de los defectos, medidos en las réplicas plásticas, fueron clasificados según pertenezcan a los planos prismáticos (P) o hexagonales (H)⁽⁹⁾

Los resultados sobre cristales, las burbujas y las huellas de dislocaciones son:

a) Un análisis en profundidad de todas las muestras del perfil 1999 y las más profundas del perfil 2002 indica que:

- i) el tamaño medio de grano en las zonas sin burbujas aumenta con la profundidad.
- ii) el tamaño medio de las microburbujas anclantes (mBA) disminuye con la profundidad en un factor 3 o más.
- iii) el tamaño medio de las burbujas no anclantes (mBNA, MB) cambian la forma de esférica a elongadas.

En todos estos casos, la muestra A de 2002 no sigue estas reglas.

b) en el perfil I, las burbujas elongadas tienen el eje más largo paralelo a F en la muestra M2 y a n (el Cenit) en la muestra M3.

c) en el perfil II, las microburbujas se alinean con el Cenit en las muestras A y C, y a 45° del Cenit en la muestra B.

d) mirando las muestras más profundas es claro que la densidad volumétrica de burbujas es un orden de magnitud más grande en la muestra C que en la M3.

e) las muestras se texturan con la profundidad. Más específicamente, las muestras M3 y C adquieren una orientación preferencial con el eje cristalográfico c paralelo a la dirección F.

d) en las réplicas plásticas de las secciones estudiadas, la densidad de figuras de ataque químico disminuye con la profundidad.

IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Es bien conocido que en hielos glaciares polares, los cristales aumentan el tamaño medio de grano y se texturan con la profundidad. La orientación cristalográfica preferencial en hielo profundo es con el eje c en la dirección de la tensión principal aplicada⁽¹⁴⁾. Debido a la textura particular encontrada podría inferirse que las muestras M3 y C deben haber estado sujetas a una tensión en la dirección principal de tensiones del termocarst, en la dirección de F. Este sería el primer indicio de que M3 y C son de origen de glaciogénico, como se propuso en el trabajo anterior para el perfil I⁽⁹⁾. La densidad de huellas de dislocaciones disminuye con la profundidad, y éste es otro indicador de que las muestras profundas son más antiguas. El diámetro medio de las burbujas disminuye con la profundidad y las burbujas se elongan con el eje más largo paralelo a F, lo que también muestra que el hielo es antiguo. La textura especial de muestra B indica una posible tensión de cizalla, que se observa geomorfológicamente

La muestra M1 no tiene una textura particular, es posible considerar que ha estado fuertemente influenciada por la capa activa del termocarst.

La muestra M2 tiene una textura particular con el eje cristalográfico c paralelo a n, entonces esta muestra habría estado sometida a una tensión principal en dirección perpendicular a n; lo que se puede verificar con la forma de las burbujas.

La muestra A, por otro lado, presenta textura especial pero el tamaño medio de grano es mayor que en la muestra B, indicando que estuvo sometida a una temperatura más alta que el resto del termocarst. El tamaño y la forma y orientación de burbujas son indicadores de procesos de recongelamiento. Por lo tanto, el hielo de la muestra A sería un nuevo tipo de hielo, diferente a los dos previamente descritos. Estas ideas se refuerzan por el hecho de que la muestra A, extraída en 2002, tiene una densidad más pequeña de burbujas que la muestra M1 de 1999. Este fenómeno es consistente con el conocido aumento de temperatura que hubo en esa región responsable de la retracción de los límites glaciares.

Referencias

- Gow, A. Journal of Glaciology, 8, 53, 241-252 (1969)
- Lorius, C., J. Jouzel, C. Ritz, L. Merlivat, N.I. Barkov, Y.S. Korotkevich y N. Kotlyakov Nature 316, 591-596 (1985)
- Nasello O.B., L.E. Arena y L. Levi. Phys. Chem. of Ice 422-427, (1992).
- Arena L.E. PhD "Crecimiento de grano en hielo puro", FAMAFA-UNC (1995)
- Arena L.E., O.B. Nasello, L. Levi. J. Phys. and Chem. B, 101, 32, 6109-6112 (1997)
- Arena, L.E. y O.B. Nasello, "Estudio de los factores que influyen en el crecimiento de grano de hielo glaciario-polar" Anales de la 19^a Reun. AAGG. (1997)
- Corte, A. "Relationship between four ground patterns, structure of the active layer, and type and distribution of ice in the permafrost" Biuletyn peryglacjalny 12 (1963)
- Arena L.E., G. Caranti and D. Trombotto "Study of Rock Glaciario Ice", 31st International Geocriology Congress, Río de Janeiro, Brasil, August, 2000
- Arena L.E., D. Trombotto and G. Caranti "Microcosmic characterization of thermokarst ice from an area of Andean permafrost, Central Andes of Mandoza, Argentina" 2nd European Conference on Permafrost. Terra Nostra Heft 2005/2: 2nd European Conference on Permafrost: p. 55, Postdam, Alemania (2005)
- Bryant G. and Mason B. Philosophical magazine, Eight Ser., 5, 60, 1221-27 (1960)
- Levi, L., E.M. de Achaval y E. Suraski, Journal of Glaciology 5, 41, 691-699 (1965)
- Carreras, A. Pedernera y L. Arena "Recristalización en hielo puro y dopado" Anales de la AFA, 9, 149-153 (1997)
- Pedernera D. A. "Recristalización en hielo" Trabajo especial de licenciatura en Física- FAMAFA-UNC- Córdoba-Argentina (2002)
- Matsuda M. and G. Wakahama, Journal of Glaciology, 21, 85, 607-620 (1978)

Agradecimientos

CONICET, SECYT-UNC

José Hernández por el trabajo de campo.

Tabla 1: TIPO DE CRISTAL, PROPIEDADES DE BURBUJAS Y DENSIDAD DE DEFECTOS. CB y SB SIGNIFICAN CON Y SIN BURBUJAS; mBA Y mBNA DENOTAN MICROBURBUJAS ANCLANTES Y NO ANCLANTES RESPECTIVAMENTE

muestra	Característica	cristales			
		D [mm]		orientación	
		SB	CB		
P E R F. I	M1	Topo del thermokarst	4.2	0.4	azar
	M2	Región de colapso	5.8	nd	Eje cristalogr. <i>c</i> perpendicular a n
	M3	Tensión paralela a F	2.0	2.6	Eje cristalogr. <i>c</i> paralelo a F
P E R F.	A	Topo del thermokarst	4	0.4	Eje cristalogr. <i>c</i> cuasi perpendicular a n
	B	Topo del thermokarst	2	0.3	Eje cristalogr. <i>c</i> a 45° de n NNE
II	C	Hielo Glaciogénico	6	nd	Eje cristalogr. <i>c</i> paralelo a F

D: diámetro

muestra	Densidad de defectos [$\times 10^6 \text{ mm}^{-2}$]		
	Plano hexagonal	Plano prismático	
I	M1	2.1±0.5	3.0±1.4
	M2	1.5±0.4	2.6±0.8
	M3	1.5±0.6	2.0±0.1
II	A	2.4±0.7	5±1
	B	0.7±0.2	3±1
	C	0.5±0.2	3±1

muestra	burbujas					
	d [µm]		N_v [mm^{-3}]	forma	Orientación	
	mBA	mBNA				
P e r f i l I	M1	nd	500	840	esférica	azar
	M2	50	nd	58	esférica y elongada	25% elongada paralela a F
	M3	10	nd	23	elongadas	Paralela a n
P e r f i l II	A	20	1250	52	elongadas	Paralela a n
	B	20	60	1080	Spher aline	A 45° de n y NNE
II	C	6	<50	465	Esférica alineadas	Paralela a n
					elongated	Elongadas Paralela a n

N_v : densidad volumétrica de burbujas, d: diámetro medio de las burbujas