

Cartografía y monitorización de formas crionivales en la región subantártica (Tierra de Fuego, Argentina). Proyecto *GEOSAP*

A. Pérez Alberti*, M. Valcárcel Díaz*, R. Blanco Chao*,
P. Carrera Gómez*, F. Castillo Rodríguez**, J. López Bedoya*,
R. Calvo de Anta* y F. Macías Vázquez*

**Universidade de Santiago de Compostela*

***Consellería de Educación. Xunta de Galicia*

1. Introducción

Las investigaciones se están llevando a cabo en los Andes Fueguinos, en Tierra del Fuego, en el sur de Argentina (Figura 1). El rasgo característico del sector es la existencia de amplios valles que se alargan de este a oeste separando pequeños bloques erguidos. Se trata de valles con un claro carácter tectónico que se encuentran asociados a fallas transcurrentes. Entre ellas destaca la activa Falla de Magallanes que separa la Placa Sudamericana de la Placa de Scottia. Este hecho ha favorecido, por ejemplo, la apertura del valle ocupado en la actualidad por el Lago Fagnano. Aparte de este valle, situado al norte del área de estudio, nos encontramos con el que sigue el río Larsifarshak, en el centro, y los del Arroyo Grande y el que ocupa el Canal Beagle, en el sur. Este esquema se ve complementado por la presencia de un extenso conjunto de valles menores perpendiculares a los anteriores, generalmente encajados y que tienen sus cabeceras en antiguos o actuales glaciares. Podemos poner como ejemplo los que se estiran hacia el norte, hacia el Lago Fagnano, caso del ocupado por el Lago Escondido, en el este, por la Laguna Margarita, en el centro o por el recorrido por los ríos Alvear o el Torito, hacia el oeste. En dirección al valle del Río Larsifarshak descende otro amplio abanico de valles, que se alinean topográficamente con los anteriores. Es el caso del que recorre la ruta Nacional 3 hacia el lago Escondido; el del Río Tristán, el de Las Cotorras, el del Río Esmeralda o el del Río Beban que se corresponde por el norte con el del Torito.

Este rosario de valles que se alargan hacia el norte y el sur, continua entre el valle del Larsifarshak y el Arroyo Grande o entre aquel y el propio Canal Beagle. De muchos desconocemos su nombre por lo que es difícil enumerarlos pero, como en el conjunto anterior a uno que discurre hacia el norte le corresponde otro que lo hace hacia el sur. Destacaríamos los valles de los ríos Chico, Olivia o el que desemboca en la Estancia Tunel. En casi todos los citados, y en otros no enumerados, son evidentes las huellas del paso de los hielos glaciares en épocas muy recientes.

Los glaciares todavía perviven activos en la cabecera de muchos aunque en la actualidad se encuentran en franco retroceso. Así en el interfluvio Fagnano-Larsifarshak, de oeste a este encontramos los glaciares Sin Nombre, Beban, Albino o Alvear. En el interfluvio Larsifarshak-Arroyo Grande se emplazan los del Río Chico, Vini-guerra o Cinco Hermanos y, entre el de Arroyo Grande-Beagle, destaca el Martial, encima mismo de la ciudad de Ushuaia.

La presencia de este conjunto de valles ha propiciado la génesis de una serie de bloques aislados, bordeados por laderas empinadas que enlazan, bien con cumbres aplanadas, bien con afilados picachos, muchos de ellos antiguos *horns*, entre los que destacaríamos el Monte Olivia que alcanza los 1.326 m de altitud.

En el área de estudio dominan unas condiciones frías. Según nuestros propios registros la temperatura media anual es de -2°C , con cambios de tiempo muy frecuentes a lo largo del año (Figura 2); las precipitaciones en forma de nieve son frecuentes, incluso durante el verano, y los vientos alcanzan velocidades que llegan a superar frecuentemente los 150 k./hora.

2. Las unidades geomorfológicas del área de estudio

El área de estudio está situada en el sector central de los Andes Fueguinos. Por el este está limitada por la cabecera del valle del Río Tristán; por el norte por la del Río Alvear, dividida en dos, occidental y oriental; por el oeste, el área está limitada por el valle que se alarga de norte a sur desde el Glaciar Este del Alvear hasta el valle del Río Larsifarshak y, por el sur, por el valle de las Cotorras. Se trata de un sector de unos 4 km² de extensión y que, a nivel altitudinal, va desde los 600 a los 1.077,5 m y en el que es posible individualizar diferentes unidades morfológicas.

2.1. Superficies aplanadas

Se diferencia un nivel superior y otro inferior. El primero se emplaza en el sector culminante, a 1.077,5 m de altitud. Se trata de una planicie desarrollada sobre vulcanitas ácidas, vulcanitas piroclásticas y pizarras (Figura 3). Su enlace con el valle de Las Cotorras se realiza por medio de paredes muy empinadas en las que son frecuen-



Figura 1: Situación del área de estudio en la Isla Grande de Tierra del Fuego.

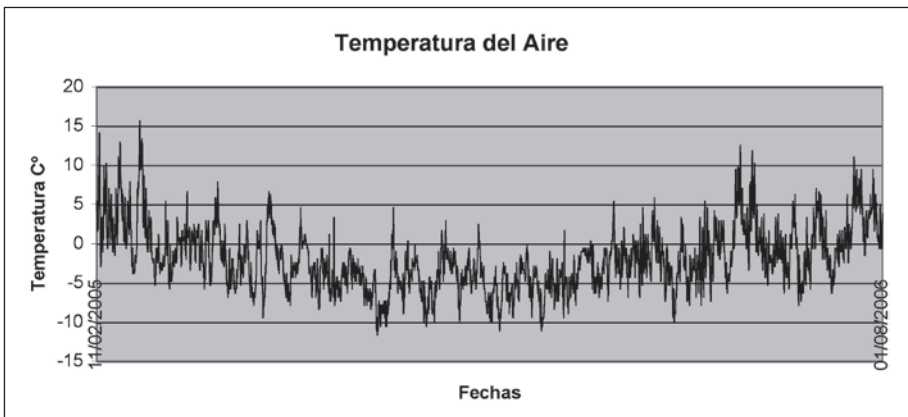


Figura 2: Temperaturas recogidas entre el 11-02-05 al 01/08/2006 en la cabecera del Río Tristán.

tes movimientos en masa. Lo mismo sucede en su enlace con el corredor de unión entre Las Cotorras y la cabecera del Río Alvear oeste. Por el contrario el enlace con la cabecera del Tristán y la parte superior del río Alvear este, es mucho más suave. En superficie sobresale un conjunto de formas crionivales activas, como círculos de piedra o suelos poligonales (Figura 4).

A un nivel ligeramente inferior, 990 m, al suroeste de la anterior aparece otra pequeña planicie que a modo de cerro aislado se orienta hacia la Laguna Alvear y el valle de su nombre. Se encuentra modelada sobre vulcanitas ácidas. Sobre ella también se han desarrollado círculos de menor tamaño que, visiblemente, presentan un menor grado de actividad aunque, al menos alguna, siguen siendo activas (Figura 5).

2.2. *Corredor central superior*

Entre las planicies superior e inferior se alarga la cabecera norte del valle de las Terrazas. Se trata de un corredor colgado que diseña primero un perfil suave para, camino de su unión con el valle principal, al pie de la superficie aplanada inferior, lo hace de manera escalonada con bruscos cambios en su perfil longitudinal encadenándose áreas de escasa pendiente con otras en las que el perfil se empina. Lateralmente nos encontramos con un perfil asimétrico muy controlado por la litología. Su cabecera, modelada sobre pizarras, presenta un perfil rectilíneo regularizado por una densa cubierta de clastos sobre la que sobresalen pequeños dientes de sierra buzando cara al oeste (Figura 6).

A medida que nos surcamos cauce abajo se pueden observar con una mayor claridad los contrastes topográficos. La ladera oriental se desenvuelve en dos segmentos separados por una estrecha terraza emplazada a 970 metros. En la occidental, por el contrario, el escalonamiento es mayor y es posible individualizar por lo menos cinco niveles de terrazas crionivales situadas entre los 700 y los 900 metros. En general se trata de escalones inclinados hacia el sudoeste (Figura 7). Su enlace entre ellos viene marcado por alargadas cornisas que no alcanzan los tres metros de altura.

Siguiendo el eje del corredor sobresale un amplio conjunto de lóbulos gelifluidales que descienden hacia el fondo. Se trata de acumulaciones compuestas por clastos de materiales pizarrosos fundamentalmente. Los lóbulos (Figura 8) se encadenan en la ladera generando un auténtico tren de frentes compuestos por clastos heterométricos que, con frecuencia, presentan su eje mayor orientado en dirección a la vertiente.

2.3. *Corredor central inferior*

El tramo inferior del valle se puede dividir en tres segmentos. El superior, que se alarga entre los 950 y los 864 m presenta una inclinación de 45°; se encaja entre la



Figura 3: Superficie aplanada superior.



Figura 4: Suelos poligonales emplazados en el nivel superior.



Figura 5: Círculos de piedras del nivel inferior.



Figura 6: Sector superior del Corredor central. En primer plano se puede ver con claridad la intensa fragmentación de los materiales pizarrosos.



Figura 7: Terrazas crionivales del sector oriental del Corredor Central superior.



Figura 8: Lóbulos de gelifluidales en el Corredor Central.

superficie aplanada superior y la inferior y su fondo aparece totalmente cubierto de derrubios que descienden desde las paredes laterales. Un segundo segmento que se alarga entre los 864 m altitud y los 759 m vuelve a ofrecer una topografía irregular con 16 niveles escalonados separados por cambios bruscos de perfil que, en muchos casos se corresponden a antiguos umbrales glaciares en fase de dismantelación (Figura 9). Un último segmento que enlaza con el valle de Las Cotorras desciende desde los 759 m y los 600 m con pendientes que de nuevo alcanzan los 45°. Las laderas aparecen cubiertas de clastos heterométricos.

2.4. El valle del Río Alvear

Al oeste de la superficie aplanada inferior se encuentra el valle del Río Alvear. En su cabecera sobresale, por una parte, el Lago Alvear y, por otra, adosado a la ladera occidental del valle, un glaciar rocoso complejo con evidentes signos de movilidad materializados tanto en las abundantes cicatrices (Figura 10) perpendiculares al eje principal como por la dinámica de su frente.

2.5. El Valle de las Cotorras. El Glaciar Alvear.

El Valle de las Cotorras presenta en su interior destacados elementos desde el punto de vista geomorfológico. Entre ellos destacaríamos, por una parte, la existencia en su cabecera del glaciar Alvear (Figura 11). Se trata de un glaciar de circo en una fase de evidente retroceso hecho que se puede observar tanto de manera visual como mediante la cartografía llevada a cabo desde el año 2005.

El reciente retroceso ha dejado al descubierto una impresionante gama de formas de erosión tales como estrías, acanaladuras, marmitas, huellas de impacto, pulidos..., así como precipitaciones de micritas carbonatadas que en la actualidad se están estudiando en el laboratorio.

2.6. La cabecera del valle del Río Tristán

El valle del Río Tristán limita por el norte el área de estudio. Se trata de un valle alargado de oeste a este en el que dominan laderas suaves interrumpidas por crestas rocosas originadas, en gran medida, por cambios en la litología. En el sector próximo a la cabecera del valle central superior, las laderas aparecen cubiertas por derrubios estratificados compuestos, de manera fundamental, por materiales pizarrosos. Frente a las formas lobuladas ya comentadas, en este sector dominan formas mucho más suaves apareciendo en superficie una gran cantidad de clastos alargados, orientados en dirección a la pendiente (Figura 12).



Figura 9: Terrazas crionivales del sector inferior del Corredor Central.

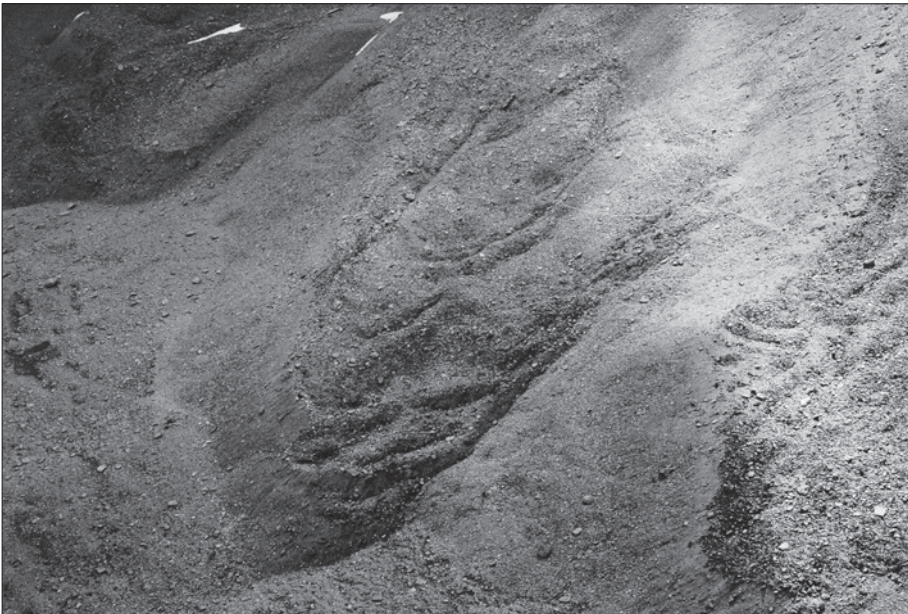


Figura 10: Glaciar rocoso emplazado en la ladera occidental del valle del Ro Alvear.



Figura 11: Vista general del Glaciar Alvear.



Figura 12: Ladera meridional del valle del Río Tristán.

3. Objetivos, material y métodos

El sector meridional de América del Sur es uno de los más sensibles al cambio climático global. El retroceso acelerado de los complejos glaciares existentes que se ha podido constatar de manera instrumental parece indicarlo. Por ello la demostrada por nosotros existencia de permafrost en el pasado (Pérez Alberti *et al.*, 2005) y la constatación de que existe en la actualidad (Valcárcel Díaz *et al.*, 2006) convierte al sector en un lugar de enorme interés para comprobar el comportamiento del suelo mediante la monitorización.

Por ello, dadas las evidencias, los objetivos científicos propuestos en el proyecto GEOSAP han sido:

1. Cartografiar a macroescala las diferentes crioformas existentes en los Andes Fueguinos, concretamente en la Sierra Alvear y su entorno.
2. Conocer como las características texturales, composición mineralógica y contenido en humus influyen en la capacidad de retención de agua así como en los procesos de congelación y crioturbación.
3. Conocer el grado de dinamismo de las diferentes crioformas mediante la instalación de distintas parcelas de control fotogramétrico y de la instalación de diferentes estaciones de control que permitan conocer la evolución del gradiente térmico y de humedad del suelo a distintas profundidades. Ello se verá acompañado de las correspondientes mediciones de la temperatura a nivel del aire en superficie así como el comportamiento del manto nival.
4. Conocer las posibles migraciones tanto a nivel altitudinal como en el tiempo.

La metodología que se está empleando es la utilizada por los diferentes grupos de trabajo englobados en la *International Permafrost Association* derivadas de diferentes reuniones fundamentalmente de las celebradas en Madison, Wisconsin (*Antarctic Permafrost and Soils*) (Noviembre de 2004); en Viena (European Geosciences Union) (Abril de 2005) y en Postdam (*European Permafrost Congress*) (Junio de 2005) así como de las derivadas de la amplia bibliografía científica referentes al estudio sedimentario, de los suelos y de los depósitos de origen frío.

El plan de trabajo contempla poner en marcha o reforzar los ya existentes sistemas de registro de variables térmicas e higrométricas del suelo; de la temperatura del aire a diferentes cotas así como la distribución y espesor de la capa nival. Ello ha supuesto la ampliación de la red estaciones de control de las condiciones climáticas locales, lo que obliga a realizar un estudio en profundidad de las características físico-químicas del suelo que influyen en su comportamiento térmico. Hay que apuntar que las labores de mantenimiento y recogida de datos climáticos que se iniciaron en 2004 con un primer proyecto, se prolongarán hasta el 2009, e incluso podrían ir más allá, mientras se mantengan operativos los instrumentos de medición, lo que dependerá de la provisión de fondos.

Una parte fundamental del proyecto consiste, pues, en la monitorización de los procesos activos, tanto de los movimientos en masa lentos (lóbulos de gelifluxión, *creeping*, *snowcreep*...) como de los rápidos, englobados en contexto periglacial y crionival. En general se trata de métodos sencillos donde el aspecto fundamental es el reconocimiento, georeferenciación y cartografiado a escala de detalle mediante la realización de levantamientos topográficos. Coetáneamente se continuará el estudio de la dinámica de los mantos nivales estacionales. En ellos se ha detectado la presencia de deslizamientos repetidos de la nieve, lo que origina dinámicas geomorfológicas muy activas, tanto actualmente como en épocas históricas. Se monitorizarán los parámetros climáticos, así como se utilizarán cámaras digitales para el control del manto nival.

4. Primeras conclusiones

Uno de los problemas con los que se encuentran los investigadores que trabajan sobre formas y depósitos de origen frío en medios no activos es la falta de información directa de cómo han evolucionado las laderas. Los depósitos se muestran de manera desigual, en función de los afloramientos existentes, pero, al tratarse del resultado de procesos no activos, con relativa frecuencia es necesario llevar a cabo una interpretación hipotética a partir de los datos morfosedimentarios o secuencias deposicionales existentes. Estas permiten comprobar con relativa frecuencia cambios importantes en la dinámica fruto, sin duda, de la evolución geodinámica pero las interpretaciones se basan siempre en la existencia de un tipo u otro de formación superficial. En los medios activos, por contra, es posible comprobar directamente el funcionamiento de los procesos en la actualidad y el rol de cada uno de ellos e la dinámica de las laderas aunque la escala temporal de análisis únicamente permite un seguimiento puntual en el tiempo. Este permite conocer algunos aspectos relevantes:

1.- Los suelos de la zona tienen un comportamiento alcalino con Ph que oscilan entre los 7,5 de los materiales pizarrosos hasta los 8,50 de las inimbritas volcánicas. Se trata de suelos muy poco evolucionados sin evidencias de materia orgánica. Da la impresión que ello es fruto de la intensa alteración física de los materiales, lo que se conoce como Ph de abrasión.

2.- En el sector existe una gran variedad de crioformas activas destacando los glaciares rocosos activos y los suelos poligonales, claro indicativo de la presencia de permafrost (Valcárcel Díaz *et al.*, 2007).

3.- A partir de los datos extraídos de las parcelas instaladas a 1.050, 1.077 y 950 m de altitud se ha comprobado la existencia de procesos de *frost heave*, fruto del dinamismo de la capa activa. Para conocer su magnitud, se han instalado clavos de 15 cm de longitud que han sido desplazados verticalmente aunque de manera diferente (Figura 13). En algunos casos han sido expulsados totalmente en dos años, mientras



Figura 13: Clavo expusado por la actividad del *frost heave*.



Figura 14: Coladas solifluidales vinculadas a la fusión nival.

que otros apenas han sufrido cambios. La media de desplazamiento ha variado desde los 4,6 cm en la cota superior y entre los 3, 55 y los 1,1, en la inferior (Pérez Alberti *et al.*, 2007).

4.- Un hecho a destacar es el papel de primer orden que provoca la nieve. Su acumulación diferencial está motivada por los fuertes vientos. Estos, aunque de dirección predominante oeste, sufren fuertes perturbaciones al circular en medio de las unidades del relieve Tanto las avalanchas de nieve como su fusión lenta, provocan procesos de erosión subnival, coladas solifluidales y gelifluidales (Figura 14) que modifican intensamente las laderas.

Agradecimientos

Las investigaciones en Tierra de Fuego se iniciaron gracias al proyecto CGL2004-03380-BOS, del MEC, y continúan con el POL2006-0971; en este caso dentro del marco del Año Polar Internacional, financiado por el MEC.

Bibliografía

- Ahnert, F. (1980): "A note on measurement and experiments in geomorphology". *Z. für Geomorph. N. F. Suppl.* 35. 1-10.
- Barsch, D y Sateblein, G. (1984): "Frost dynamic and permafrost in ice-free areas of the Antarctic Peninsula". *Polarforschung* 54 (2): 11-119.
- Bockheim, J.G. (1995): "Permafrost distribution in the Southern Circumpolar Region and its relation to the environment: a review and recommendations for further research". *Permafrost and Periglacial Processes* 6: 27-45.
- Boelhouwers, J. (2003): "Sensitivity and responses to climate change en Subantarctic periglacial environment", pp. 67-71. En: Phillips, M. Springman, S.M. y Arenson, L.U., (Eds.). *Permafrost, proceedings of the 8th International Conference on Permafrost*, Zurich, Suiza.
- Bradley, R. S. (1999): *Paleoclimatology. Reconstructing Climates of the Quaternary*. International Geophysics Series. Vol 64. Academic Press. 613 pp.
- Brown, J., Ferrians, Jr., O.J., Heginbotton, J.A y Melnikov, E.S. (1997): "Circum-artic map of permafrost and ground-ice conditions". *U.S. Geol. Surv.* MAP CP-45.
- French, H. (2007): *The Periglacial Environment*. Ed. J. Wiley, 458 pags.
- French, H.M. y Guglielmin, M. (2000): "Frozen groud phenomena in the vicinity of Terra Nova Bay, northern Victoria Land, Antarctica: a preliminary record". *Geografiska Annaler* 82^a:513-526. Published by the National Snow and Ice Data Centre, Boulder, Colorado.
- Gardine, V. & Dakombe, R. (1983): *Geomorphological Field Manual*, Allen & Unwin, 254 pp.
- Goudie, A. (1981): *Geomorphological techniques*, Allen & Unwin, Londres, 395 pp.
- Lewkowicz, A. y Harris, Ch. (2005): "Morphology and geotechnique of active-layers detachment failures in discontinuous and continuous permafrost, northern Canada". *Geomorphology* 69, 275-297.

- Matsuoka, N., K. Moriwaki, y K. Hirakawa (1988): "Diurnal frost-heavy activity in the Sør Rondane Mountains, Antarctica". *Arctic & Alpine Research* 20:422-428.
- Matsuoka, N., K. Moriwaki, S. Iwata, y K. Hirakawa (1990): "Ground temperature regimes and their relation to periglacial processes in the Sør Rondane Mountains, East Antarctica. Proc. NIPR Symp.". En *Antarctic Geosciences* 4:55-66.
- Matsuoka, N. and K. Moriwaki (1992): "Frost heave and creep in the Sør Rondane Mountains, Antarctica". *Arctic & Alpine Research* 24:271-280.
- Pérez Alberti, A., Valcárcel Díaz, Carrera Gómez, P., M., Coronato, A. & Rabassa, J. (2005): "Late pleistocene ice-wedge cast from Tierra de Fuego, Argentina". *Terra Nostra*. AWI Stiftung Alfred-Wegener-Institut für Polar-und Meeresforschung in der Helmholtz-Gemeinschaft. *EUCOP II 2° European Conference on Permafrost*. Vol. 2005/2, Pp. 19-20. Potsdam . Alemania
- Pérez Alberti, A., Valcárcel Díaz, Carrera, P., Castillo Rodríguez, F., López Bedoya, J. y Blanco Chao, R.. (2007): "Evidencias de Frost Heave en los Andes Fueguinos (Tierra del Fuego, Argentina)". Guarda, Portugal, 25-27 de junio de 2007. Libro de resúmenes, pág. 16.
- Ramos, M. (1998): "Active layer in the vicinity of the Spanish Antarctic Station". *Terra Antartica* 5(2): 189-193.
- Ramos, M. *et al.* (2004): "Permafrost and active layer monitoring and modelling in Livingston and Deception islands (South Shetlands, Antarctic) – Permamodel." and "Ground surface energy balance in deception island during the summer (South Shetlands, Antarctic)". XXVIII SCAR, Open Science Conference.
- Sagawaki, T. (1995): "Ground temperature regimes and frost heave activity in the vicinity of Syowa Station, East Antarctica". Proc. NIPR Symp. En *Antarctic Geosciences* 8:239-249.
- Sone, T., J. Strelin, y J. Mori (2001): "Thermal characteristics of permafrost in Seymour Island and James Ross Island, Antarctic Peninsula (abstract, p. 100)". En: C. Harris and B. Rea (eds.) *1st European Permafrost Conference*.
- Valcárcel Díaz, M., Carrera, P., Coronato, A. Castillo, F., Pérez Alberti, A. & Rabassa, J. (2006): "Characterization and first data on landforms and deposits of cryogenic origin in Subantarctic latitudes (Sierras de Alvear, Fuegian Andes, Argentina)". *Permafrost Processes and Landforms*, 17: 371–376.
- Valcárcel Díaz, M., Carrera, P., Blanco Chao, R y Pérez Alberti, A. (2007): "Permafrost Occurrence in Soutthernmost South America (Serras de Avear, Tierra del Fuego, Argentina)". Comunicación presentada y aceptada a la *9th International Permafrost Conference*. Alaska, julio 2008.