

NOTA BREVE

ORIGEN DEL TSUNAMI DE MAYO DE 1960 EN EL LAGO NAHUEL HUAPI, PATAGONIA: APLICACIÓN DE TÉCNICAS BATIMÉTRICAS Y SÍSMICAS DE ALTA RESOLUCIÓN

Gustavo VILLAROSA¹, Valeria OUTES², Eduardo A. GOMEZ^{2,3}, Emmanuel CHAPRON⁴ y Daniel ARIZTEGUI⁵

¹ INIBIOMA, (CONICET-UNCO), Centro Regional Universitario Bariloche, S.C. Bariloche. E-mail: gustavov@crub.unccoma.edu.ar y valerio@crub.unccoma.edu.ar
² INIBIOMA, (CONICET-UNCO), Centro Regional Universitario Bariloche, S.C. Bariloche. E-mail: gustavov@crub.unccoma.edu.ar y valerio@crub.unccoma.edu.ar

² Instituto Argentino de Oceanografía (CONICET-UNS), CCT Bahía Blanca, Bahía Blanca. E-mail: gmgomez@criba.edu.ar

³ Universidad Tecnológica Nacional, Bahía Blanca.

⁴ Institut des Sciences de la Terre d'Orléans (ISTO), Universidad de Orleans, Francia. E-mail: emmanuel.chapron@univ-orleans.fr

⁵ Sección de Ciencias de la Tierra, Universidad de Ginebra, Suiza. E-mail: daniel.ariztegui@unige.ch

RESUMEN

El tsunami ocurrido en el lago Nahuel Huapi, Patagonia Argentina, el 22 de Mayo de 1960, constituye el primer ejemplo de tsunami en lagos continentales en Argentina. La batimetría de detalle obtenida con sonar batimétrico por medición de fase (SBMF) y dos perfiles sísmicos de alta resolución junto con tres testigos sedimentarios cortos del lago permitieron vincular al tsunami con el gran movimiento sísmico conocido como el terremoto de Valdivia, el sismo más fuerte registrado instrumentalmente a escala global (Mw 9,5). El impacto de las ondas sísmicas provocó la movilización de grandes volúmenes de sedimentos lacustres del sustrato, especialmente por debajo de los 70-80 m de profundidad de agua. El fallo fue probablemente inducido por la presencia de una superficie de baja coherencia (tefra?) que funcionó como plano de deslizamiento posibilitando la remoción de sedimentos y conformando una megaturbidita en la parte más profunda. La movilización de estos materiales provocó el desplazamiento de un gran volumen de agua, originando el tsunami que golpeó las costas de Bariloche y destruyó el muelle de la ciudad.

Palabras clave: *Tsunami, Deslizamientos subácueos, Lago Nahuel Huapi, Sismo de 1960, Batimetría y sísmica de alta resolución.*

ABSTRACT: *Origin of the tsunami of may 1960 in the Lake Nahuel Huapi, Patagonia: application of the high-resolution bathymetric and seismic techniques.* The tsunami recorded in the Lake Nahuel Huapi, Patagonia Argentina, on May 22, 1960 is the first example of a tsunami in a continental lake in Argentina. High-resolution bathymetry (SBMF), 2 high-resolution seismic profiles together with three short sedimentary cores allowed linking this tsunami to the 1960 earthquake of Valdivia, the strongest (Mw 9.5) ever instrumentally recorded earthquake. The impact of the seismic waves produced huge mass-failure below 70-80 m water depth. The failure was probably induced by the presence of a non-cohesive surface (tephra layer?) that acted as a sliding surface, and the mobilized material evolved into a mega turbidite in the deep basin. A large volume of water was displaced by the mobilization of these sediments producing a tsunami that hit the coasts of Bariloche and destroyed the harbor of the city.

Keywords: *Tsunami, Earthquake-induced landslides, Nahuel Huapi Lake, 1960 earthquake, High-resolution bathymetry, Seismic profiles.*

INTRODUCCIÓN

Hasta el momento, los tsunamis producidos en lagos continentales han recibido poca atención en Sudamérica. En este trabajo se analiza el posible origen del único evento lacustre de este tipo registrado en Argentina, ocurrido en el lago Nahuel Huapi, y que se asocia al episodio sísmico de mayo de 1960.

Durante los días 21 y 22 de mayo de 1960

se registraron fuertes eventos sísmicos, con epicentros próximos a la ciudad de Valdivia (Chile). Los movimientos telúricos se prolongaron hasta el 6 de junio, sumando 9 terremotos. Este episodio sísmico incluye el sismo más fuerte registrado instrumentalmente a escala global (Mw 9,5) hasta el presente. El día 22 de mayo se produjo un tsunami en el lago Nahuel Huapi y el 24 de mayo el cordón Caulle entró en erupción, arrojando cenizas que

alcanzaron la ciudad de Bariloche. Este tsunami afectó las costas de la ciudad, destruyendo el muelle del puerto San Carlos recientemente construido, cobrando la vida de dos personas y destruyendo varias embarcaciones. Este evento constituye uno de los pocos tsunamis registrados en cuerpos de agua continentales en tiempos históricos y merece especial atención, a fin de poder realizar futuras evaluaciones de la peligrosidad a la que está

expuesta la ciudad de Bariloche. Para ello se estudiaron los posibles mecanismos que han provocado este desastre y las condiciones naturales actuales, de manera de poder evaluar adecuadamente la posibilidad de que fenómenos similares se repitan.

Siguiendo el criterio de Ichinose *et al.* (2000), se considera que en una cuenca cerrada, un tsunami es aquella ola inicial producto de un desplazamiento cosísmico a partir de un terremoto, mientras que un *seiche* es la resonancia armónica del mismo dentro del lago.

La ocurrencia de grandes olas, "lagomotos" o "marejadas" extraordinarias en cuerpos de agua, como la analizada aquí, pueden producirse por diversas causas, casi siempre relacionadas con variaciones de volumen en la masa de agua o de la cubeta que la contiene. Frecuentemente estas variaciones de volumen se relacionan con movimientos de remoción en masa que involucran grandes cantidades de materiales rocosos o sedimentarios de laderas en ambientes subaéreos o de taludes en ambiente subacuático. Algunos pocos ejemplos están documentados: el tsunami en *Owens Lake*, sudeste de California, a partir del sismo de 1872, (Smoot *et al.* 2000); el tsunami de 1971 en el lago Yanahuín, Perú, inducido por un deslizamiento (Plafker y Eyzaguirre 1979) y tsunamis históricos en lagos de Nicaragua (Freundt *et al.* 2007), estos últimos asociados a erupciones e inestabilidad de los edificios volcánicos. Schnellmann *et al.* (2005) describen eventos históricos y prehistóricos combinando datos geofísicos y sedimentológicos en el Lago de Lucerna, Suiza; y Nakajima y Kanai (2000) describen sismo-turbiditas originadas por el sismo de 1893 y sismos anteriores en una cuenca semicerrada próxima al mar del Japón.

Dado que en el caso que nos ocupa no existen registros ni evidencias de deslizamientos de laderas asociados al evento sísmico que pudieran hacer ingresar al lago volúmenes considerables de materiales sólidos, se investigó la posibilidad de reactivación de sistemas de fallas en el lago- como en el caso de *Owens Lake* en California,

Estados Unidos- y la posible ocurrencia de deslizamientos subácuos. Por esta razón, para evaluar la peligrosidad de tsunamis en las costas del lago Nahuel Huapi frente al sector del Puerto San Carlos y alrededores resultó necesario conocer las características morfológicas del fondo y algunas propiedades físicas de los materiales que constituyen el lecho del lago, especialmente en los sectores con pendientes pronunciadas próximos al puerto.

MÉTODOS UTILIZADOS

Batimetría SBMF

La batimetría de detalle fue levantada con un sonar batimétrico por medición de fase (SBMF de *GeoAcoustics* denominado *GeoSwath Bathymetry System Plus*), herramienta que permite estudiar la sedimentología y morfología subácuca con alta resolución, obteniéndose modelos digitales de terreno muy precisos, con resolución submétrica. Este método emula la performance de los sistemas multihaz para baja profundidad, alcanzando los 100 m de profundidad aproximadamente (Gómez y Marachin 2006). Este equipo fue montado en un guardacostas de la Prefectura Naval Argentina y en tierra se estableció una estación de referencia para el sistema GPS diferencial utilizado para la georeferenciación de los datos batimétricos. Esta estación fue a su vez georeferenciada con GPS diferencial utilizando sistemas de coordenadas Gauss Krüger. Para este trabajo se relevó un área de aproximadamente 1,5 km² cubriendo fajas continuas de anchos variables con superposición de aproximadamente 50% de la superficie, abarcando unos 1.700 m de longitud en dirección aproximada E-O, en forma paralela a la costa, cubriéndose el lecho hasta profundidades de algo más de 120 m, límite para el cual el principio de operación del sistema pierde eficacia. Adicionalmente se realizaron relevamientos expeditivos de algunos sectores.

Sísmica de alta resolución

La información sobre las características

del relleno sedimentario de la cubeta del lago Nahuel Huapi fue obtenida a partir de estudios sísmicos realizados en enero de 1994 (ETH Zürich y PROGEBACONICET). En esa oportunidad se levantaron dos perfiles sísmicos de alta resolución que cubren el sector medio-distal del lago (Fig.1a y e) en dirección general NO-SE que comienzan en las costas cercanas a la ciudad de Bariloche. Se utilizó un equipo análogo *ORE-Geopulse* de 3,5 KHz de simple canal con navegador satelital operado desde un guardacostas de la Prefectura Naval Argentina, obteniéndose penetraciones máximas de 50 a 60 m con una resolución de aproximadamente 10 a 20 cm. Estos perfiles sísmicos fueron analizados recientemente en busca de evidencias de la existencia de depósitos y morfologías relacionadas con posibles movimientos de remoción en masa subácuos que pudieran ser vinculados al tsunami de 1960 (Chapron *et al.* 2006).

Testigos de sedimentos

Como método de soporte y calibración se utilizaron tres testigos sedimentarios cortos (< 70 cm de longitud) (NH-94-P1, NAN98 y NAS98) (Fig. 1b y c) utilizando un muestreador de gravedad. El análisis de estos niveles sedimentarios superficiales permitió relacionar la respuesta sísmica a los tipos de materiales existentes.

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

De acuerdo a las interpretaciones de los perfiles sísmicos y de la batimetría de detalle es posible establecer algunos elementos relevantes para comprender el origen y naturaleza de los acontecimientos que, a partir del evento sísmico de Mayo de 1960, derivaron en la ola extraordinaria o tsunami y en la destrucción del puerto de Bariloche.

Los datos sísmicos no muestran evidencias de activación de fallas que afecten al paquete sedimentario, pero muestran claramente la presencia de depósitos de remoción en masa identificados por su sedimentología y por su morfología, origi-

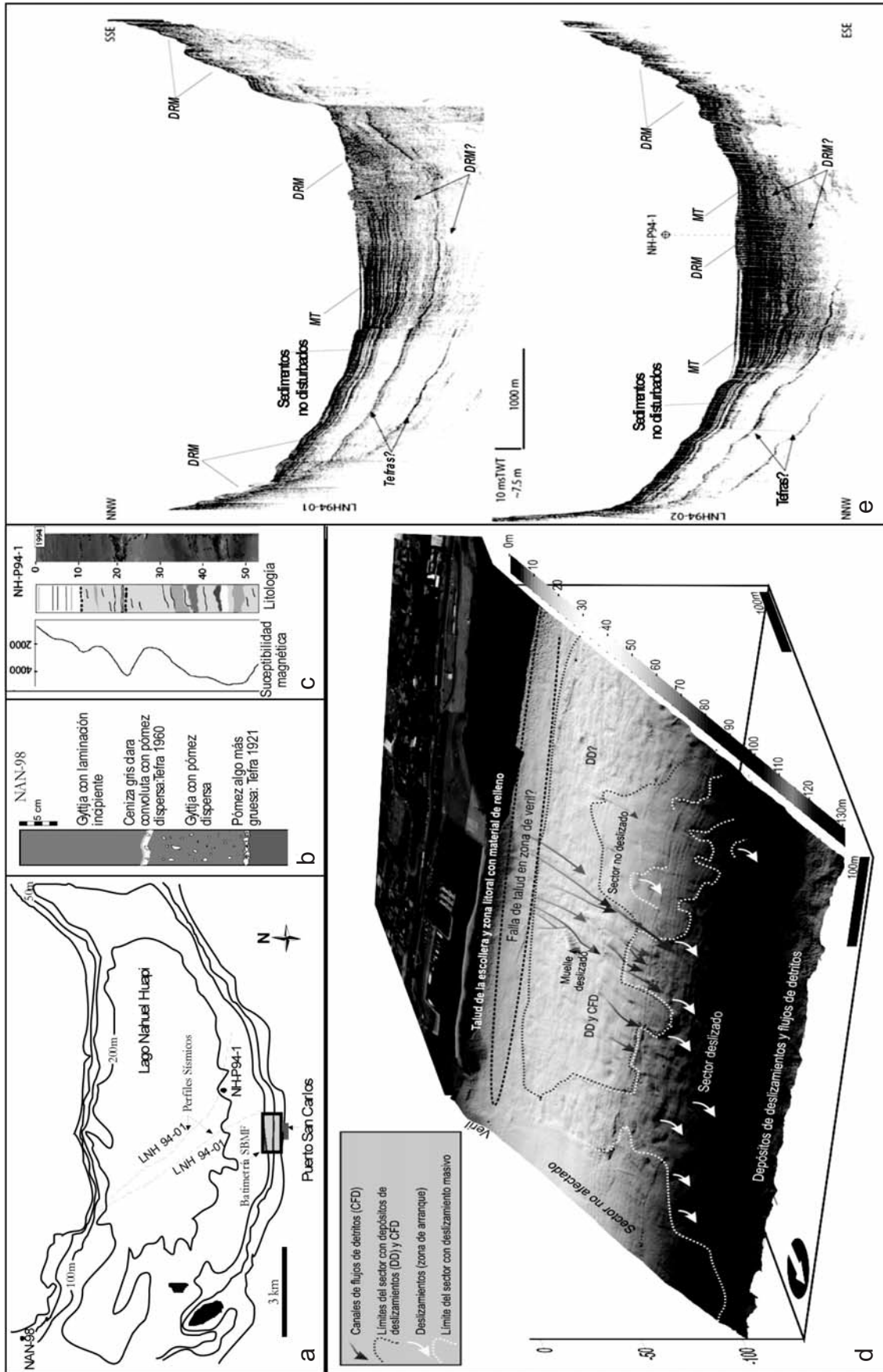


Figura 1: a) Plano de ubicación. b y c) Características sedimentarias de los testigos NAN98 y NH P94-1; d) Bloque diagrama representando la morfología del lecho lacustre de la margen sur del lago Nahuel Huapi frente a Bariloche; e) Perfiles sísmicos de alta resolución indicando rasgos asociados a remoción en masa. DRM: Depósitos de remoción en masa, MT: Megaturbidity.

nados tanto en tiempos recientes como probablemente en el pasado, lo que estaría indicando un cierto carácter recurrente para estos procesos.

En el lago Nahuel Huapi se detectaron lóbulos de depósitos de remoción en masa y megaturbiditas en los sectores más profundos (Fig. 1e). Por su posición superficial las megaturbiditas ubicadas en posición distal se interpretan como producto de la fluidización de parte de los deslizamientos o flujos producidos a partir del sismo (sismo-turbiditas).

La batimetría de detalle (Fig. 1d) muestra amplios sectores deslizados localizados a profundidades menores a los 70 m, aproximadamente en el área frente a Puerto San Carlos. En particular, frente a la escollera, existe un sector donde los fenómenos de remoción en masa han afectado niveles mucho menos profundos los cuales presentan, además, canales que son interpretados como sectores de desplazamiento de flujos de detritos. En este sector, a unos 35 m de profundidad, se ha identificado una forma rectangular que sobresale del sustrato y que es interpretada como los restos de la estructura del muelle deslizado.

Al oeste de la escollera la morfología del fondo muestra que no existe el resalto típico del veril y se aprecia una rugosidad y granulometría que puede ser interpretada como producto de depósitos originados por el deslizamiento del sector del veril, en un ambiente constituido, en gran medida, por material de relleno.

Dentro del ambiente situado frente al puerto y al este del mismo hay sectores cuyas superficies aparentan no haber sufrido fenómenos de remoción en masa o, en algunos casos, haber deslizado en bloque sin que se afecte severamente su superficie (deslizamiento traslacional). La localización de los depósitos de remoción, así como las zonas de arranque detectadas (Fig. 1d) en la margen sur del lago Nahuel Huapi indican que, existieron importantes movimientos originados en ambientes profundos y de profundidades medias, mientras que en sectores menos profundos se produjo la desesta-

bilización del veril. La existencia de depósitos de deslizamientos recientes a niveles superficiales del lecho en ambientes profundos del lago y la presencia en estos depósitos de la tefra de caída proveniente de la erupción del 24 de mayo del Cordon Caulle (Lara *et al.* 2006) permiten vincular estos depósitos con el evento sismo-volcánico de mayo de 1960.

El testigo sedimentario corto NH P94-1, tomado en depósitos de deslizamientos (véase Fig. 1c y d) permite apreciar un espesor de depósitos algo convolutos y re-trabajados entre los 54 y los 10 cm producto del deslizamiento, coronados por sedimentos finamente laminados posteriores. En testigos de ambientes menos profundos (NAN 98, Fig. 1b) fue posible identificar a la tefra de 1960 asociada a los niveles superiores de los sedimentos redepositados, confirmando la edad de la disturbación.

A partir de estos elementos es posible proponer una secuencia de acontecimientos que explican el fenómeno y los efectos observados. En principio queda claro que el tsunami del 22 de Mayo de 1960 está vinculado al gran movimiento sísmico conocido como sismo de Valdivia. Se propone la siguiente secuencia de acontecimientos:

- El impacto de las ondas sísmicas en los sedimentos lacustres provocó la movilización de grandes porciones del sustrato por debajo de los 70-80 m de profundidad de agua en una extensa área frente al puerto, probablemente a partir de la existencia de una superficie de baja coherencia (fluidizada?) que funcionó como plano de deslizamiento. Esta superficie puede corresponder a un banco de tefras, depositado a partir de erupciones explosivas recurrentes en la región (Villarosa *et al.* 2006 y Villarosa 2008) o arenas finas y limpias ubicadas a poca profundidad por debajo de la superficie del paquete sedimentario.

- La movilización de esos grandes volúmenes de sedimentos en profundidad provocó el desplazamiento de una masa de agua y un consecuente tsunami cuya ola golpeó las costas de la ciudad de

Bariloche.

- Es probable que al tiempo que se desarrollaba la ola se hayan producido fenómenos de flujo de detritos en los sedimentos donde se asentaba el antiguo muelle provocando su colapso. Estos flujos localizados se habrían producido como resultado del fallo del talud del veril o por retroceso de la escarpa generada a partir del deslizamiento profundo, por fluidización de los sedimentos que conformaban el sustrato donde se fundó el muelle. Estos materiales se encontraban debilitados por las intensas y prolongadas vibraciones provocadas por el hincado de los postes durante la construcción del muelle. Hacia fines de marzo de 1958 un incendio destruyó el muelle por completo. De inmediato se inició su reconstrucción, colocando nuevamente el estacado, lo que requirió del hincado de postes. El tsunami ocurrió cuando la reconstrucción estaba prácticamente concluida, es decir que durante más de dos años previo al tsunami hubo intervención antrópica continua en la zona aumentando la inestabilidad del material sedimentario.

- Los sedimentos movilizados se depositaron en tres ambientes: (a) A profundidades bajas y medias se depositaron los sedimentos movilizados por el fallo del veril, principalmente en el sector frente al puerto actual y al oeste; (b) Por debajo de los 70-80 m se depositaron sedimentos producto de deslizamientos traslacionales, rotacionales y de flujo de detritos, conformando la topografía *hummocky* visible en los perfiles sísmicos y, (c) En el ambiente más profundo, cerca de los 200 m de profundidad se depositó una megaturbidita originada por fluidización de parte de los sedimentos deslizados (Chapron *et al.* 2006).

La comprensión de los procesos que originaron el tsunami de 1960 permite aproximar una evaluación de peligrosidad para Bariloche. Un análisis completo debe incluir estudio de recurrencia, comportamiento de otros sectores costeros del lago durante este episodio y la identificación de características naturales e intervenciones antrópicas que aumenten la

inestabilidad natural, estudios que se encuentran en curso.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha realizado en el marco del Proyecto PIP Universidad Nacional del Comahue B-130, con financiación parcial provista por la Provincia de Río Negro para estudiar la "Factibilidad Ambiental para la localización de un Centro de Convenciones y Eventos" y con aporte del proyecto PICT'03 07-14653 de la ANPCyT. Los relevamientos batimétricos se realizaron con equipamiento del IADO y los trabajos de sismica se realizaron con equipo del ETH-Zürich (Suiza) y recursos financieros del Fondo Nacional para la Investigación de Suiza. Los autores desean agradecer a Prefectura Naval Argentina por su invaluable apoyo logístico durante los relevamientos en el lago Nahuel Huapi; a los revisores por sus comentarios y al Dr. Walter D. Melo y al Lic. Marcos A. Asensio Sabio por la colaboración en las tareas de campo.

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- Chapron E., Ariztegui, D., Mulsow, S., Villarosa, G., Pino, M., Outes, V., Charlet, F. y Juvignié, E. 2006. Impact of 1960 major subduction earthquake in Northern Patagonia (Chile, Argentina). *Quaternary International* 158 (1): 58-71.
- Freundt, A., Strauch, W., Kutterol, S., y Schmincke, H-U. 2007. Volcanogenic tsunamis in lakes: Examples from Nicaragua and general implications. *Pure and Applied Geophysics*, 164: 527-545.
- Gómez, E. A. y Maraschin, S. D. 2006. Sonar Batimétrico por Medición de Fase: nueva herramienta para estudiar la morfología y sedimentología subácea. *Cuarto Congreso Latinoamericano de Sedimentología y Novena Reunión Argentina de Sedimentología*, 1:112.
- Ichinose, G. A., Satake, K., Anderson, J. G., Schweickert, R. A. y Lahren, M. M. 2000. The potential hazard from tsunami and seiche waves generated by future large earthquakes within the Lake Tahoe basin, California-Nevada. *Geophysical Research Letters* 27: 1203-1206.
- Lara L. E., Moreno, H., Naranjo, J. A., Matthews, S. y Pérez de Arce, C. 2006. Magmatic evolution of the Puyehue-Cordón Caulle Volcanic Complex (40°S), Southern Andean Volcanic Zone: From shield to unusual rhyolitic fissure volcanism. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 157: 343-366.
- Nakajima, T. y Kanai, Y. 2000. Sedimentary features of seismoturbidites triggered by the 1983 and older historical earthquakes in the Eastern margin of the Japan Sea. *Sedimentary Geology* 135: 1-19.
- Plafker, G. y Eyzaguirre, V. R. 1979. Rock avalanche and wave at Chungar, Perú. In: Voight, B. (Ed.): *Rockslides and Avalanches*, vol. 2. *Developments in Engineering Geology* 14B: 269-279. Elsevier, NL.
- Schnellmann, M., Anselmetti, F. S., Giardini, D. y McKenzie, J. A., 2005. Mass movement-induced fold-and-thrust belt structures in unconsolidated sediments in Lake Lucerne (Switzerland). *Sedimentology* 52: 271-289.
- Smoot, J. P., Litwin, R. L., Bischoff, J. L. y Lund, S. J. 2000. Sedimentary record of the 1872 earthquake and Tsunami at Owens Lake, SE California. *Sedimentary Geology* 135: 241-254.
- Villarosa, G., Outes, V., Hajduk, A., Sellés, D.; Fernández, M., Crivelli Montero, E., Crivelli, E. 2006. Explosive volcanism during the Holocene in the upper Limay river basin: The effects of ashfalls on human societies. *Northern Patagonia, Argentina. Quaternary International* 158 (1): 44 - 57.
- Villarosa, G. 2008. Tefrocronología Postglacial de la región de Nahuel Huapi, Patagonia, Argentina. Tesis doctoral Universidad de Buenos Aires, (inédito), 262 p., Buenos Aires.

Recibido: 24 de julio, 2009

Aceptado: 22 de septiembre, 2009