



Cuantificación de la tasa de denudación de los últimos 20 Ka utilizando nucleídos cosmogénicos (^{10}Be) en el suroeste de los Andes Peruanos: Laguna Aricota

Delgado Fabrizio^{1,2}, Zerathe Swann¹, Audin Laurence¹, Robert Xavier¹, Litty Camille¹, Benavente Carlos², Carcaillet Julien¹, and Aster Team³

¹ Univ. Grenoble Alpes, Univ. Savoie Mont Blanc, CNRS, IRD, IFSTTAR, ISTerre, 38000 Grenoble.

² Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico INGEMMET, Av. Canadá 1470, Lima, Perú.

³ Aix-Marseille Univ., CNRS, IRD, Coll. France, UM 34 CEREGE, Technopôle de l'Environnement Arbois-Méditerranée, BP80, 13545 Aix-en-Provence, France

RESUMEN

Existe un debate actual sobre el principal factor que controla los procesos de erosión en los Andes occidentales: McPhillips et al., 2014 proponen que la erosión depende fuertemente de la ocurrencia de terremotos mientras que otros estudios, reportan correlaciones positivas entre las variaciones climáticas y la erosión de la cuenca (Carretier et al., 2014; Reber et al., 2017) basadas en dataciones con nucleídos cosmogénicos (^{10}Be). En el sector de Curibaya el deslizamiento Aricota, relleno el valle y formó un gran dique que dio origen a la laguna Aricota, utilizando nucleídos cosmogénicos (^{10}Be), Delgado et al., (2016) fecharon el deslizamiento (dique) en ~17 ka. Nosotros en este estudio tenemos la oportunidad de comparar (1) la tasa de erosión a partir del volumen de sedimentos acumulados en la laguna desde su formación, y (2) la tasa de denudación a partir de la concentración de isótopos de ^{10}Be . Los resultados obtenidos en general muestran una importante correspondencia, indicando de esta manera que no hay influencia de productos volcánicos y de las superficies cuaternarias heredadas (morrenas).

Keywords: Tasa de erosión, deslizamiento, sedimentos acumulados, nucleídos cosmogénicos (^{10}Be)

INTRODUCCIÓN

En el flanco oeste de los Andes se realizaron es-

tudios a nivel de cuencas para calcular la tasa de denudación y conocer el detonante del proceso erosivo (Carretier et al., 2018; Reber et al., 2017).

El valle Locumba tiene un lugar inusual e importante para profundizar en el tema de cálculo de erosión. Un gran deslizamiento fechado en ~17ka relleno el valle y formó un gran dique (Delgado et al., 2016), que dio origen a la laguna Aricota. La cuenca tributaria de esta laguna está conformada por los ríos Callazas y Salado que recolectan, transportan y mezclan granos de varias partes de la cuenca y los depositan en la laguna desde su formación (Figura 1).

El área de estudio presenta volcanes activos, tiene relieves heredados por actividad glacial (morrenas) y un gran deslizamiento que relleno el valle. La litología en este lugar es uniforme, está conformada por rocas volcánicas e ignimbritas, con bajo porcentaje de cuarzo (1-2%)

El objetivo principal de este estudio es comparar la tasa de erosión a partir del volumen de sedimentos acumulados con la tasa de denudación a partir de la producción de isótopos cosmogénicos ^{10}Be y ver su correspondencia.

Los resultados contribuirán a la comprensión entre el clima, erosión y tasa de sedimentación.

METODOLOGÍA

- Estimación del volumen de sedimentos atrapados en la laguna

Para calcular el volumen de sedimentos atrapados desde que se formó la laguna, tenemos que saber cómo era el valle antes de ocurrido el deslizamiento. La batimetría (resolución 1m), muestra que el fondo de la laguna se encuentra a 40 m con respecto al espejo de agua. Luego, se realizaron 7 perfiles sísmicos (5 paralelos y 2 perpendiculares a la laguna Aricota) para identificar si el fondo de la laguna está formado por roca o sedimento, para ello se utilizó un georadar con el que se pudo llegar a visualizar correctamente los primeros 15 m por debajo del fondo de la laguna. Luego de determinar la presencia de sedimentos, se utilizó el programa ArcGis para trabajar con un modelo de elevación digital (DEM) Tandem-X (año 2014) de 12m de resolución. Como primer paso fue construir la superficie S1 a partir de la integración del DEM y la batimetría de la laguna (figura 2A). Luego se cartografió los depósitos lacustres (terrazas y fondo de lago).

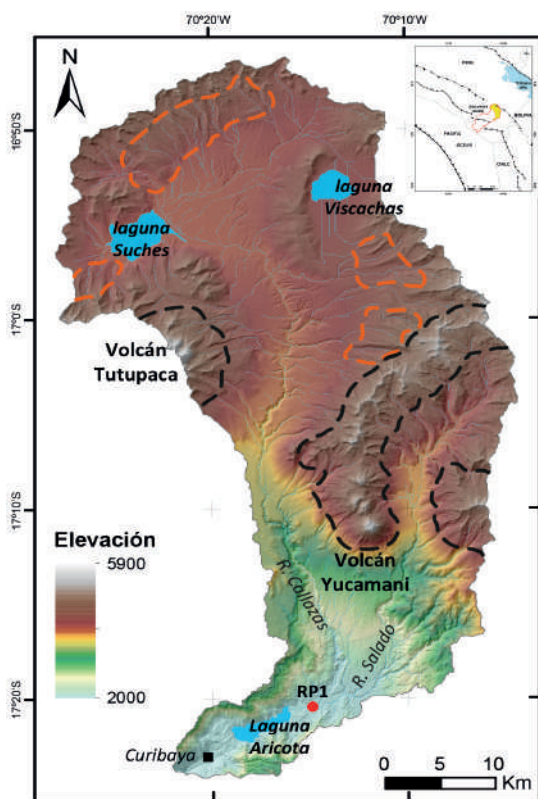


Figura 1. Área de estudio. Ubicado en el flanco oeste de los Andes. La línea punteada de color negro delimita los volcanes holocenos, la línea punteada de color rojo delimita relieves glaciares (morrenas) y el punto rojo marca la ubicación de la muestra RP1.

A partir de la superficie S1 reconstruimos el paleovalle (Superficie S2), para ello realizamos 28 perfiles topográficos perpendiculares a la laguna y las terrazas lacustres (paleodelta). En cada perfil realizamos la propagación de las pendientes hasta que se intercepten en un punto (Figura 2A), este punto representa el fondo del paleovalle, luego realizamos la corrección de los puntos interpolados sobre una línea, luego en la superficie S1 cortamos el área que corresponde a los sedimentos acumulados, agregamos los puntos corregidos del paleovalle, interpolamos y obtenemos la superficie S2 (Figura 2B).

Finalmente, el cálculo del volumen total de sedimentos acumulados, es la diferencia de las dos superficies (S1 - S2).

- Cálculo de la tasa de denudación de una cuenca a partir de la producción de ^{10}Be

Para calcular la tasa de denudación de la cuenca, primero se tuvo que identificar en el DEM el lugar idóneo para extraer una muestra que sea representativa de la cuenca. Recolectamos una muestra de sedimento (RP1) en el delta actual de la laguna Aricota (Figura 1), que nos permitirá medir la concentración de isótopos cosmogénicos de ^{10}Be y estimar la tasa de erosión de la cuenca (Bierman y Steig, 1996; Granger et al., 1996; Von Blanckenburg, 2005). Para ello tomamos como criterios: (1) la ubicación del punto de muestreo tiene que estar en el cauce principal del río y no sobre una terraza, y (2) el área a muestrear no debe estar afectada por deslizamientos los cuales podrían alterar el resultado final. Teniendo estos criterios recolectamos ~3 kilos de arena.

La preparación de la muestra con la metodología ^{10}Be -Cuarzo se llevó a cabo en el Instituto de Ciencias de la Tierra (ISTerre, Grenoble). El procedimiento incluye la extracción mecánica del cuarzo y la extracción química del isótopo ^{10}Be , de acuerdo a los procedimientos propuestos por Brown et al., (1991). Las mediciones de ^{10}Be se realizaron en el Acelerador Espectrométrico de Masa ASTER (CEREGE, Aix en Provence, Francia).

La tasa de denudación a partir de la concentración ^{10}Be detrítico ($D_{(^{10}\text{Be})}$), calculamos mediante el método CAIRN (Mudd et al., 2016), para el cual utilizamos un SRTM-DEM de 90m de resolución. Los parámetros utilizados para que funcione el método CAIRN, incluye la vida media del ^{10}Be de

1.39 ± 0.01 My (Chmeleff et al., 2010; Korschinek et al., 2010) y la tasa de producción de ^{10}Be de $4.30 \text{ at.g}^{-1}.\text{y}^{-1}$. (Mudd et al., 2016). También se asume la densidad de roca de 2.65 g.cm^{-3} y para calcular el toposhielding (apantallamiento topográfico) de la cuenca se colocó una inclinación de 5° y el azimut de 8° propuesto por Mudd et al., (2016).

RESULTADOS

- Estimación del volumen de sedimentos atrapados en el lago

La cuenca tributaria de la laguna Aricota está integrada por los ríos Callazas y Salado, que aportan constantemente agua y sedimento desde que se formó la laguna (~ 17 ka). El resultado de los perfiles sísmicos realizados en la laguna, muestra en los primeros 15m sedimentos finos depositados en forma horizontal.

Siguiendo la metodología descrita en el ítem 2 (*Estimación del volumen de sedimentos atrapados en la laguna*), el volumen total (V_{total}) obtenido de la diferencia de superficies (S1-S2) fue $0.8 \pm 0.1 \text{ km}^3$. Luego se realizó la corrección de porosidad para arenas finas y arenas limosas.

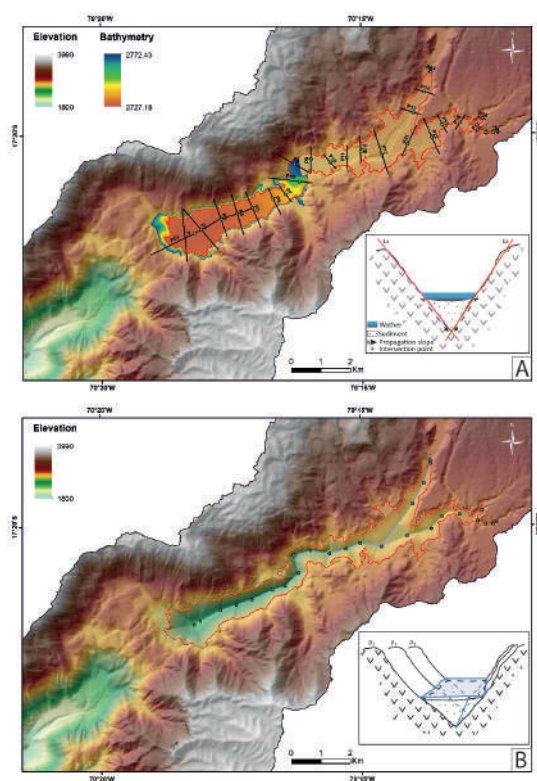


Figura 2. Cálculo de volumen de sedimentos. (A) Superficie S1 (DEM + Batimetría), las líneas negras son perfiles topográficos perpendiculares a la laguna y terrazas, el esquema detalla la propagación e intersección de las pendientes.

(B) Superficie reconstruida S2 (Paleovalle), el esquema muestra a detalle cómo se realizó la interpolación de los puntos del fondo de paleovalle. La línea roja es el área delimitada de los sedimentos acumulados.

Según Sanders (1998) el porcentaje de porosidad efectiva (P_{efectiva}) para este tipo de sedimentos esta entre 10-30% del volumen total. Nosotros usamos el promedio (20%) y se obtuvo un volumen de porosidad (V_{poros}) de 0.16 km^3 . Finalmente, para calcular el volumen de sedimentos (V_{sed}), se restó los dos volumen ($V_{\text{total}} - V_{\text{poros}}$), obteniendo un volumen de $0.7 \pm 0.1 \text{ km}^3$.

Luego calculamos la tasa de erosión (E_{sed}), al dividir el volumen de sedimentos (V_{sed}) entre el tiempo de acumulación de sedimentos (edad del dique) y el área de la cuenca (A). Obtenemos la tasa de erosión de $27 \pm 4 \text{ mm.Ka}^{-1}$. Este resultado representa la erosión mecánica de la cuenca.

- Cálculo de la tasa de denudación de una cuenca a partir de la producción de ^{10}Be

La concentración de isotopos de ^{10}Be en los sedimentos del río refleja la historia erosiva integrada de la cuenca tanto en espacio y tiempo. La tasa de denudación calculada con el método CAIRN a partir de la concentración de ^{10}Be es $39 \pm 7 \text{ mm.Ka}^{-1}$. Este resultado representa la producción/concentración de ^{10}Be de la cuenca (Figura 3) incluyendo la erosión mecánica y química.

A partir de la tasa de denudación calculamos el tiempo de integración de producción de ^{10}Be (Lal, 1991) para la cuenca estudiada, obteniendo como resultado ~ 16 ka.

DISCUSIÓN

La laguna Aricota formada por un gran deslizamiento, tiene sedimentos acumulados desde hace ~ 17 ka (Delgado et al., 2016), esta es una oportunidad para comparar la tasa de erosión a partir de sedimentos reales (volumen acumulado) y la tasa de denudación promedio a partir de la producción de ^{10}Be en los Andes, en una escala de tiempo de miles de años, considerando que el área de estudio se ubica en una zona intermedia del flanco occidental de los Andes con una precipitación promedio de 200 mm.a^{-1} (Boers et al., 2013; Reber et al., 2017).

Los cálculos realizados con el sedimento acumulado y la producción de ^{10}Be , dieron resultados de $27 \pm 4 \text{ mm.Ka}^{-1}$ y $39 \pm 7 \text{ mm.Ka}^{-1}$ respectivamente.

Al comparar el tiempo de erosión/depositación y el tiempo integrado de acumulación de isótopos de ^{10}Be . La tasa de denudación por ^{10}Be para la cuenca está integrado en un tiempo ~ 16 ka, y el tiempo de acumulación de sedimentos comienza ~ 17 ka (edad del dique). Estos datos indican que los resultados obtenidos están integrados en el mismo rango de tiempo ($\sim 16-17$ ka) y se pueden comparar directamente.

La correspondencia en el resultado de ambos métodos es buena e inesperada. Considerando una incertidumbre "2 sigma", los resultados son indistinguibles y tienen el mismo orden de magnitud; además, este factor indica que la actividad volcánica y la herencia glacial (morrenas) tienen poca influencia o ninguna en la propuesta con ^{10}Be .

La tasa de denudación a partir de ^{10}Be detrítico es más alta que la tasa de erosión obtenida de los sedimentos acumulados. El primer resultado se obtiene a partir de la producción y concentración de ^{10}Be en la cuenca e integra la erosión mecánica y la disolución química, mientras que el volumen de sedimento representa únicamente la erosión mecánica.

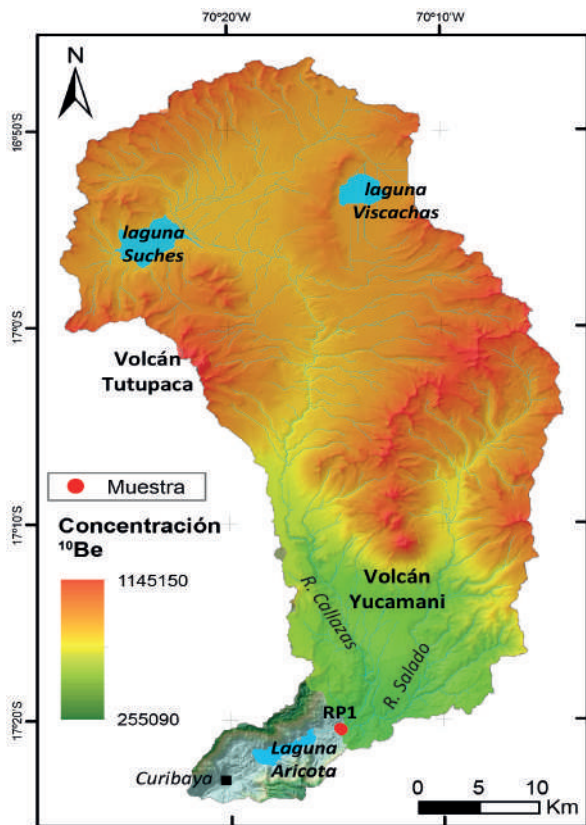


Figura 3. Distribución de la concentración de ^{10}Be en la cuenca, mapa resultado del método CAIRN.

químicos de los ríos Callazas y Salado (Franco et al., 2012); obteniendo un volumen total de $9.5 \times 10^8 \text{ m}^3$. Este volumen incrementaría el resultado de la tasa de erosión a partir de los sedimentos acumulados. Pero se debe indicar que (1) parte de los elementos disueltos precipitaron en la laguna y están considerados en el cálculo de volumen de sedimentos, (2) una mínima parte de elementos disueltos se infiltra en el trayecto del río y (3) los datos de análisis físico-químicos medidos en ambos ríos considera la disolución de elementos en superficie y los que se encuentran en el subsuelo (Aguas subterráneas), también incluye elementos de aguas hidrotermales y de lluvia.

Al realizar el cálculo de tasa de denudación de una cuenca a partir de la producción de ^{10}Be , se debe de tomar en cuenta los grandes deslizamientos. Los diques no reconocidos pueden tener impactos importantes sobre la transferencia de los sedimentos. Por ejemplo Reber et al., (2017) para el cálculo de tasa de denudación de la cuenca Locumba no tomaron en cuenta la presencia del deslizamiento Aricota, el cual es necesario recalcular.

CONCLUSIONES

El flanco oeste de los Andes es continuamente estudiado para tratar de comprender la evolución del relieve y la relación que existe entre el clima y tectónica; en este entender, los estudios recientes incluyen nucleídos cosmogénicos (^{10}Be -cuarzo) para cuantificar la velocidad de erosión a partir de la producción y concentración de isótopos de ^{10}Be utilizando el método CAIRN.

La laguna Aricota (latitud 17.2°S), es un lugar excepcional para profundizar y comprender más el tema de cálculo de tasa de erosión, debido a un gran deslizamiento que represo el río hace ~ 17 ka (Delgado et al., 2016). En este estudio tratamos de comparar la tasa de erosión a partir del volumen de sedimentos acumulados y la tasa de denudación a partir de la producción de ^{10}Be .

Para realizar los cálculos de tasa de erosión/denudación se trabajó con dos métodos diferentes, para luego comparar si los resultados tienen correspondencia o no. Con el primer método calculamos la tasa de erosión a partir del volumen de sedimentos acumulados, realizamos perfiles topográficos, propagamos e interpolamos las pendientes para reconstruir el paleovalle, luego restamos la superficie actual (S1) con la superficie reconstruida (S2) y obtuvimos el volumen total acumulado

(V_{total}), luego realizamos la corrección de porosidad (V_{poros}) para obtener el volumen de sedimento acumulado (V_{sed}). A partir de V_{sed} , el tiempo de acumulación (edad del dique) y el área de la cuenca estimamos la tasa de erosión en 27 ± 4 mm. Ka^{-1} . Con el segundo método calculamos la tasa de denudación a partir de la producción y concentración de ^{10}Be , para ello se extrajo una muestra de sedimento del río tributario principal. En laboratorio realizamos la preparación de la muestra y en el AMS-ASTER se determinó la concentración de ^{10}Be . A partir de ese resultado y siguiendo los pasos del método CAIRN, obtuvimos una tasa de denudación de 39 ± 7 mm. Ka^{-1} .

En conclusión, los resultados obtenidos por ambos métodos son sorprendentes e inesperados, ya que tienen una gran correspondencia considerando una incertidumbre “2 *sigma*”, indicando que no hubo influencia o poca de productos volcánicos y de superficies glaciares heredadas (morenas). La diferencia que existe se debe a que la tasa de erosión calculada a partir del volumen de sedimentos toma en cuenta la erosión mecánica, y la tasa de denudación a partir de ^{10}Be integra la producción de ^{10}Be , la erosión mecánica y la disolución química.

REFERENCIAS

- Bierman, P., & Steig, E. J. (1996). Estimating rates of denudation using cosmogenic isotope abundances in sediment. *Earth surface processes and landforms*, 21(2), 125-139.
- Boers, N., B. Bookhagen, N. Marwan, J. Kurths, and J. Marengo (2013), Complex networks identify spatial patterns of extreme rainfall events of the South American Monsoon System, *Geophys. Res. Lett.*, 40, 4386–4392, doi:10.1002/grl.50681.
- Carretier, S., Tolorza, V., Regard, V., Aguilar, G., Bermúdez, M. A., Martinod, J., & Riquelme, R. (2018). Review of erosion dynamics along the major NS climatic gradient in Chile and perspectives. *Geomorphology*, 300, 45-68.
- Chmeleff, J., von Blanckenburg, F., Kossert, K., & Jakob, D. (2010). Determination of the ^{10}Be half-life by multicollector ICP-MS and liquid scintillation counting. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 268(2), 192-199.
- Delgado, G.; Zerathe, S.; Benavente, C.; Audin, L.; Robert, X. and AsterTeam (2016) Datación de depósitos coluviales utilizando nucleidos cosmogénicos (^{10}Be) – Cronología del deslizamiento Aricota. XVIII Congreso Peruano de Geología. 5p.
- Franco, A.; Ponce, S. and Rodríguez, J. (2012) Hydrogeologic activity of southern Peru, a situational assessment of Sama and Locumba basins. *TECNIA* 22 (1). 11p.
- Granger, D.E., Kirchner, J.W., Finkel, R., 1996. Spatially Averaged Long-Term Erosion Rates Measured from in Situ-Produced Cosmogenic Nuclides in Alluvial Sediment. *The Journal of Geology* 104, 249–257. <https://doi.org/10.1086/629823>
- Korschinek, G., Bergmaier, A., Faestermann, T., Gerstmann, U.C., Knie, K., Rugel, G., Wallner, A., Dillmann, I., Dollinger, G., von Gostomski, C.L., Kossert, K., Maiti, M., Poutivtsev, M., Remmert, A., 2010. A new value for the half-life of ^{10}Be by Heavy-Ion Elastic Recoil Detection and liquid scintillation counting. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* 268, 187–191. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2009.09.020>
- Lal, D. (1991). Cosmic ray labeling of erosion surfaces: in situ nuclide production rates and erosion models, *Earth Planet. Sc. Lett.*, 104, 24–439.
- McPhillips, D., P. R. Bierman, and D. H. Rood (2014), Millennial-scale record of landslides in the Andes consistent with earthquake trigger, *Nature Geoscience*, 7, 925–930, doi: 10.1038/NGEO2278
- Mudd, S. M., Harel, M. A., Hurst, M. D., Grieve, S. W. D., & Marrero, S.M. (2016). The CAIRN method: Automated, reproducible calculation of catchment-averaged denudation rates from cosmogenic radionuclide concentrations. *Earth Surface Dynamics*, 4, 655–674.
- Reber, R., Delunel, R., Schlunegger, F., Litty, C., Madella, A., Akçar, N., & Christl, M. (2017). Environmental controls on ^{10}Be -based catchment-averaged denudation rates along the western margin of the Peruvian Andes. *Terra nova*.
- Sanders, L. (1998). *A manual of Field Hydrogeology*. Prentice-Hall, 381 pp.
- von Blanckenburg, F., 2005. The control mechanisms of erosion and weathering at basin scale from cosmogenic nuclides in river sediment. *Earth and Planetary Science Letters* 237, 462–479. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2005.06.030>