



## FLUJO DE SEDIMENTOS A LO LARGO DE LA VERTIENTE OCCIDENTAL DE LOS ANDES PERUANOS

Miluska A. Rosas<sup>1</sup>, Willem Viveen<sup>2</sup>, Veerle Vanacker<sup>3</sup>

Autoridad Nacional del Agua

### Resumen

Los mecanismos de producción de sedimentos y los posibles factores que la controlan contribuyen a una mejor comprensión de los procesos geomorfológicos. Estudios previos destacaron el vínculo entre la tasa de sedimentos y factores antropogénicos (prácticas agrícolas) y factores naturales (precipitación, topografía, escorrentía, litología y cobertura vegetal). Las empinadas laderas de la vertiente occidental de los Andes peruanos presentan diferentes regímenes climáticos. La región sur presenta climas áridos y vegetación desértica, en contraste con la región norte donde se observan climas tropicales y abundante vegetación. Asimismo, una gran cantidad de proyectos de regulación agrícola e hídrica caracterizan a esta zona. Sin embargo, el número de estudios sobre producción y transporte de sedimentos y sus factores de control son limitados. La mayoría de los estudios se han centrado en la parte norte de Perú y mostraron un aumento de hasta 60 veces en el rendimiento de sedimentos durante los eventos de El Niño (ENSO) en comparación con años normales. Nuestro estudio presenta datos sobre la tasa de sedimentos en 21 puntos de muestreo en la vertiente occidental peruana. Los datos contienen información de sedimentos suspendidos, sedimentación de reservorios y/o turbidez del agua. Así mismo, usamos data satelital para derivar información topográfica: DEM HydroSHEDS, datos de precipitación diaria: producto PISCO de Senamhi, caudal diario: GloFAS-ERA5 dataset, litología: mapa litológico global GLiM,

y cobertura vegetal: producto MODIS. Nuestros resultados muestran una influencia significativa de la escorrentía y el relieve en el rendimiento de sedimentos. Asimismo, se observó una importante influencia del porcentaje de áreas de cultivo. Sin embargo, estos factores solo explican el ~ 50% del rendimiento de sedimentos en la región, lo que indica la urgencia de información más detallada y de una red de muestreo de sedimentos en la región.

**Palabras clave:** sedimentos, factores naturales, vertiente occidental peruana

**Keywords:** sediments, natural factors, Western Peruvian Andes

### Abstract

The mechanisms of sediment production and the possible factors that control them contribute to a better understanding of geomorphological processes. Previous studies highlighted the link between sediment rates and anthropogenic (agricultural practices) and natural factors (precipitation, topography, runoff, lithology, and vegetation cover). The steep slopes of the western Peruvian Andes present different climatic regimes. The southern region has arid climates and desert vegetation, in contrast to the northern region where tropical climates and abundant vegetation are observed. Likewise, a large number of agricultural and water regulation projects characterize this area. However, the number of studies on sediment production are limited. Most of them have focused on the northern part of Peru and showed a three-

to 60-fold increase in sediment yield during El Niño events (ENSO) compared to normal years. Our study presents data on the sediment rate at 21 sampling points on the western Peruvian Andes. The data contains information on suspended sediments, reservoir sedimentation, and/or water turbidity. Likewise, we use satellite data to derive topographic information: DEM HydroSHEDS, precipitation data: Senamhi's PISCO product, discharge: GloFAS-ERA5 dataset, lithology: GLiM global lithological map, and vegetation cover: MODIS product. Our results show a significant influence of runoff and relief on sediment yield. Likewise, the percentage of croplands plays an important role. However, these factors only explain ~ 50% of the sediment yield in the region, indicating the urgency for detailed information and a sediment sampling network in the region.

## Desarrollo

### Introducción

El flanco occidental de los Andes se caracteriza por una topografía accidentada, gradientes pronunciados de vegetación y patrones de lluvia variables y extremos. Estas condiciones ambientales plantean desafíos particulares para el monitoreo de la erosión y el flujo de sedimentos. Específicamente, el flanco occidental peruano es periódicamente afectada por procesos de transporte de sedimentos, como deslizamientos de tierra, flujos de lodo y escombros y huaicos. Estos son generados, principalmente, por el contexto climático local, donde el extenso periodo seco es precedido por una estación de precipitación extrema en las cabeceras de los ríos, provocando un importante volumen de sedimentos transportados (Litty et al., 2017).

En el norte peruano, la fuerte presencia de eventos El Niño (ENOS) influye sobre los flujos de sedimentos. El volumen de sedimentos transportados en contraste con una temporada normal se estimó entre 5 y 11 veces más durante un evento ENOS moderado a extremo (Tote et al., 2011), o incluso 60 veces más durante eventos muy extremos (Morera et al., 2017). Los Andes centrales del Perú muestran una falta de información y estudios en el tema. Estudios anteriores calcularon tasas de sedimentos inferiores a 900 t. km<sup>-2</sup>. yr<sup>-1</sup> siendo el relieve, la cobertura del suelo y la variabilidad temporal

de la precipitación los factores predominantes en la producción de sedimentos (Morera et al., 2017; Rosas et al., 2020; Litty et al., 2017).

### Estimación de la tasa de sedimentos

El estudio se basa en datos de sedimentos de 21 estaciones de medición distribuidas en 9 cuencas de captación (Fig. 1). Se utilizaron datos de sedimentos de estudios previos, así como de instituciones públicas como la Superintendencia de Servicios y Saneamiento (SUNASS), Proyectos Especiales de Gestión del Agua (PE) y el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología del Ecuador (INAMHI). El principal input para obtener el rendimiento de sedimentos es la curva de concentración-descarga, que es la correlación entre la concentración de sedimentos suspendidos (SSC) (g. L<sup>-1</sup> o kg. m<sup>-3</sup>) y la descarga (Q) (m<sup>3</sup>. s<sup>-1</sup>). La ecuación 1 muestra la correlación utilizada, donde  $\alpha$  y  $\beta$  son los coeficientes para ajustar la curva y  $\sigma$  es el error estándar residual.

$$SSC = \alpha Q^\beta + \frac{\sigma^2}{2} \quad \text{Eq. 1}$$

Recopilamos datos de descargas diarias (m<sup>3</sup>. s<sup>-1</sup>) de estaciones de aforo públicas y data satelital global de descarga de ríos GloFAS-ERA5 (Harrigan et al., 2020). La información pública hidrométrica está recopilada en el Sistema Nacional de Recursos Hídricos del Perú (Sinrh). Las dos bases de datos funcionaron de manera complementaria: los datos satelitales llenaron los vacíos de los datos observados mediante un proceso de "downscaling" y así obtuvimos un registro de alta continua para el período de estudio 1990-2019.

### Factores que controlan la producción de sedimentos

Las características físicas y ambientales de la zona se describieron mediante 30 variables. Cada variable se calculó para el área de captación río arriba de cada estación de muestreo. Incluyeron nueve variables físicas, siete variables para interpretar los patrones de lluvia, dos para la escorrentía, dos para la litología y diez para la cobertura del suelo. La entrada principal para las variables físicas fue el "void-filled" DEM HydroSHEDS (Lehner et al., 2008) que permite el cálculo de redes de drenaje continuo. Los datos meteorológicos correspondieron a la precipitación

diaria interpolada del producto PISCO del SENAMHI (Aybar et al., 2017). La resistencia litológica se evaluó con el factor de erodabilidad litológica (LE) propuesto por Campforts et al. (2020). Y finalmente, el producto de tipo de cobertura terrestre MCD12Q1 de MODIS (Friedl y Sulla-Menashe, 2019) se utilizó para evaluar la vegetación y la cobertura del suelo en el área de estudio.

Estimamos la correlación entre la producción de sedimentos y cada factor mediante el coeficiente de Spearman  $r$ . Se consideró la siguiente clasificación:  $| \text{Spearman } r | \geq 0.4$  buena correlación;  $0.3 < | \text{Spearman } r | < 0.4$  correlación moderada; y  $| \text{Spearman } r | \leq 0.3$  como pobremente o no correlacionado.

Realizamos un análisis estadístico de regresión simple y multivariado (lineal y no lineal) para encontrar la mejor combinación que representa la variación espacial del rendimiento de sedimentos en la región.

### Resultados

Nuestros resultados no muestran un patrón espacial marcado en términos de producción de sedimentos (Fig. 1). En el área central norte, donde se ubican las estaciones 12 a 21, los valores oscilan ampliamente entre  $\sim 12.5$  a  $1\,500$  t. km<sup>-2</sup>. año<sup>-1</sup>. Se observa un pico en el rendimiento de sedimentos de  $>2\,300$  t. km<sup>-2</sup>. año<sup>-1</sup> en la estación 15. Además, se estimaron valores máximos de  $>2400$  t. km<sup>-2</sup>. año<sup>-1</sup> para la cuenca alta del río Santa (estación 11) y de  $>3000$  t. km<sup>-2</sup>. año<sup>-1</sup> en el río Tablachaca (estación 9). Excluyendo estos dos valores extremos, en el área centro-sur la tasa de sedimentos tiende a aumentar de sur a norte (estaciones 1-10, Fig.1) mostrando valores menores a  $1600$  t. km<sup>-2</sup>. año<sup>-1</sup>.

Respecto a los factores que controlan la producción de sedimentos en la región, encontramos que la descarga (Q) muestra una correlación moderada (Spearman  $r = 0.39$ ) y los factores de área de captación (A), relieve (R) y el porcentaje de tierras de cultivo (C%) presentan un alto valor de correlación (Spearman  $r$  de 0.41, 0.41 y 0.53, respectivamente). Sugiere que la topografía regional y los cambios antropogénicos en la cobertura del suelo juegan un papel importante en el control del SSY. Adicionalmente, se calcularon modelos de regresión multivariada para identificar una combinación de factores que representen la variación espacial del rendimiento de sedimentos en la región. El modelo bivariable

con relieve (R) y escorrentía (Q. A-1) en espacio logarítmico, explicó el 40,5% del SSY en la región. Observamos que el porcentaje de área de tierras de cultivo (C%) y la combinación entre tierras de cultivo y matorrales (C% + Sh%) incrementaron el desempeño de nuestro modelo (46% y 55% respectivamente).

### Conclusiones

El estudio presenta la distribución espacial de la tasa de sedimentos de 21 cuencas en los Andes occidentales peruanos durante un período de 30 años (1990 - 2019). La distribución es no homogénea, la mayoría con tasas por debajo de  $2\,000$  t km<sup>-2</sup> año<sup>-1</sup> y algunos picos en la zona central con valores alrededor de  $3\,000$  t km<sup>-2</sup> año<sup>-1</sup>. La tasa de sedimentos está potencialmente controlada tanto por variables naturales como antropogénicas, los cuales son: relieve local, el área de la cuenca, el caudal medio anual, y el porcentaje de tierras de cultivo y matorrales. Para aumentar la robustez de nuestros hallazgos, se necesitan más datos básicos de sedimentos y/o medioambientales en la región. A pesar del número limitado de cuencas de captación estudiadas, la similitud de nuestro modelo con algunos hallazgos regionales (Ecuador, Colombia, Chile) nos da una idea de los procesos de producción y transporte de sedimentos en los Andes occidentales.

### Contribuciones técnicas y científicas

La distribución de tasas de sedimentos es no homogénea y los valores están dentro del rango regional. El relieve local, el área de la cuenca, el caudal medio anual, y el porcentaje de tierras de cultivo y matorrales, solo explican el  $\sim 55\%$  de la tasa de sedimentos.

### Referencias bibliográficas

- Aybar, C., Lavado-Casimiro, W., Huerta, A., Fernández, C., Vega, F., Sabino, E. and Felipe-Obando, O., 2017. Uso del Producto Grillado "PISCO" de precipitación en Estudios, Investigaciones y Sistemas Operacionales de Monitoreo y Pronóstico Hidrometeorológico. Lima-Perú.
- Campforts, B., Vanacker, V., Herman, F., Vanmaercke, M., Schwanghart, W., Tenorio, G. E., Willems, P., and Govers, G., 2020. Parameterization of river incision models requires accounting for environmental heterogeneity: insights from the tropical Andes, *Earth Surf. Dynam.*, 8, 447–470. <https://doi.org/10.1002/ese2.2000>

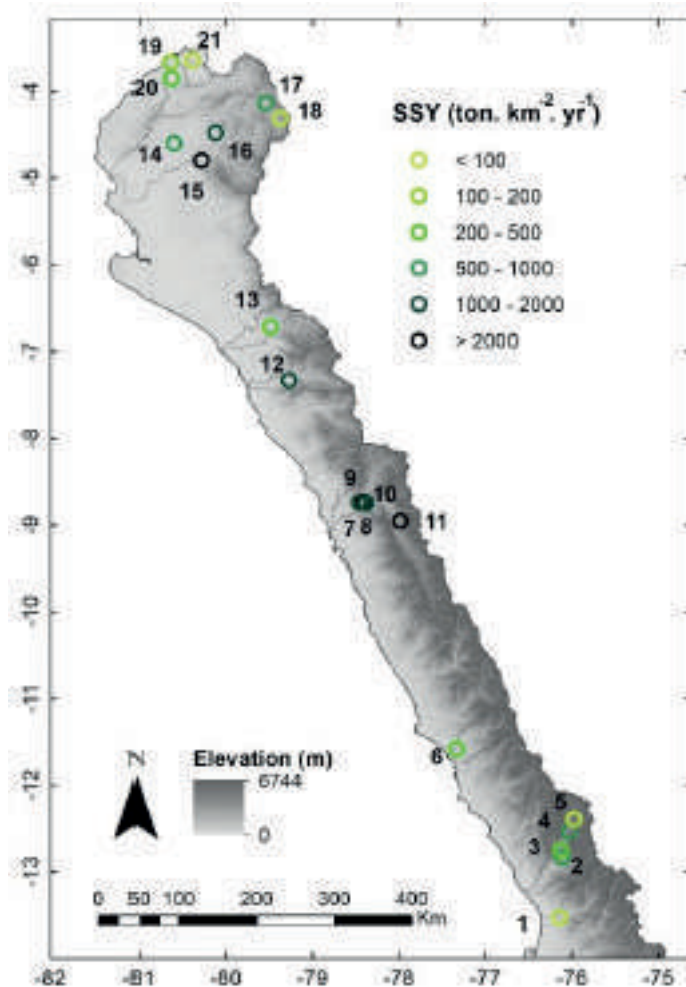


Fig. 1 Distribución espacial de las tasas de sedimentos (SSY) en el flanco oeste de los Andes peruanos

- org/10.5194/esurf-8-447-2020
- Friedl, M. and Sulla-Menashe, D., 2019. MCD12Q1 MODIS/Terra+Aqua Land Cover Type Yearly L3 Global 500m SIN Grid V006 [Data set]. NASA EOSDIS Land Processes DAAC. Accessed 2021-01-29 from <https://doi.org/10.5067/MODIS/MCD12Q1.006>
- Harrigan, S., Zsoter, E., Alfieri, L., Prudhomme, C., Salamon, P., Wetterhall, F., Barnard, C., Cloke, H., and Pappenberger, F., 2020. GloFAS-ERA5 operational global river discharge reanalysis 1979–present, *Earth Syst. Sci. Data*, 12, 2043–2060, <https://doi.org/10.5194/essd-12-2043-2020>
- Lehner, B., Verdin, K., Jarvis, A., 2008. New global hydrography derived from spaceborne elevation data. *Eos, Transactions, AGU*, 89(10): 93-94. <https://doi.org/10.1029/2008EO100001>
- Litty, C., Schlunegger, F. and Viveen, W., 2017. Possible threshold controls on sediment grains properties of Peruvian coastal river basins. *Earth Surf. Dynam.*, 5, 571-583. <https://doi.org/10.5194/esurf-5-571-2017>
- Morera, S.B., Condom, T., Crave, A., Steer, P. and Guyot, J.L., 2017. The impact of extreme El Niño events on modern sediment transport along the western Peruvian Andes (1968–2012). *Sci. Rep.* 7, 11947. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-12220-x>
- Rosas, M.A., Vanacker, V., Viveen, W., Gutierrez, R. R., Huggel, C., 2020. The potential impact of climate variability on siltation of Andean reservoirs. *Journal of Hydrology*, 581, 124396. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124396>
- Tote, C., Govers, G., Van Kerckhoven, S., Filiberto, I., Verstraeten, G., and Eerens, H., 2011. Effect of ENSO events on sediment production in a large coastal basin in northern Peru. *Earth Surf. Process. Landforms* 36, 1776–1788. <https://doi.org/10.1002/esp.2200>