

ESTIMACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS POR PRÁCTICAS DE MANEJO DE SUELOS EN UNA CUENCA TRANSFRONTERIZA

Estimation of sediment production by soil management practices in a transboundary basin

Juan ARTEAGA¹, Diego MEJÍA-VEINTIMILLA² y Pablo OCHOA-CUEVA^{3*}

¹ Departamento de Geografía, Universidad de Málaga, Campus Universitario de Teatinos, s/n, Málaga, 29071, España.

² Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología – INAMHI -, Loja 170507, Ecuador.

³ Departamento de Ciencias Biológicas y Agropecuarias, Universidad Técnica Particular de Loja, Campus San Cayetano, 110107, Loja, Ecuador.

*Autor para correspondencia: paochoa@utpl.edu.ec

(Recibido: marzo 2021; aceptado: mayo 2022)

Palabras clave: GIRH, índice entrega de sedimentos, cambio de uso del suelo, productores y usuarios del agua, calidad de agua

RESUMEN

La cuenca transfronteriza Catamayo (en Ecuador) - Chira (en Perú), en su parte baja cuenta con el reservorio multipropósito Poechos, fundamental para el desarrollo económico productivo del norte del Perú. Sin embargo, por un manejo inadecuado del suelo en la cuenca, la represa se está llenando de sedimentos. La decisión tomada por la administración del reservorio fue elevar su cota, sin considerar el trabajar a la par con los agricultores de la cuenca proponiéndoles alternativas para un manejo sostenible del suelo. En este contexto, el objetivo de este estudio fue estimar la producción de sedimentos simulando prácticas de manejo y conservación de suelos, usando el índice de entrega de sedimentos (SDR) en el software InVEST 3.9.0, para sugerir prácticas adecuadas con las condiciones de la cuenca. También fue modelada la producción de sedimentos generados por cambio de uso del suelo en los últimos 30 años. Este estudio aporta un instrumento para la gestión integrada de recursos hídricos (GIRH) que permita un balance entre los usuarios del recurso hídrico (beneficiarios) y los proveedores, quienes tienen degradados sus suelos degradados. Así, la GIRH puede pasar de ser una simple intención, a un proceso clave para promover políticas y acuerdos internacionales hacia la generación de agua limpia y abundante para ambos países. Al mismo tiempo que se favorece el manejo y la conservación del suelo de la cuenca y sus recursos relacionados, con el fin de maximizar el bienestar económico y social de manera equitativa para ambos países.

Key words: IWRM, sediment delivery ratio, land use change, water producers and users, water quality

ABSTRACT

The Catamayo (in Ecuador) - Chira (in Peru) transboundary basin in its lower part has the Poechos multipurpose reservoir, which is essential for the economic and productive development of northern Peru. However, due to inadequate soil management in the

basin, the reservoir is accumulating a high sediment load. The decision made by the reservoir administration was to raise its elevation, without considering working alongside farmers in the basin, proposing alternatives for sustainable soil management. In this context, the objective of this study was to estimate the sediment export by simulation soil management and conservation practices, using the sediment delivery ratio module (SDR) in the InVEST 3.9.0 software, to suggest adequate practices for the conditions of the soil watershed. Sediment export based on land use change over the last 30 years was also modeled. This study contributes as an instrument for the integrated water resources management (IWRM), which allows a balance between the users of the water resources (beneficiaries) and suppliers, who have their soils degraded. Thus, IWRM can go from being a simple intention, to a key tool to promote policies and international agreements, toward the generation of clean and abundant water for both countries. At the same time, it favors the management and conservation of the soil of the basin and its related resources, to maximize economic and social welfare in an equitable manner for both countries.

INTRODUCCIÓN

Los ecosistemas que soportan servicios ambientales como la regulación de la cantidad y calidad de agua en las cuencas hidrográficas requieren protección y gestión ante las amenazas de degradación por las actividades antrópicas (Vásquez et al. 2016). Para América Latina y el Caribe, la salud de los ecosistemas es un factor clave tanto en términos de desarrollo humano como de competitividad económica (PNUD 2021). La ausencia de estrategias de gestión tiene el potencial de generar serias consecuencias ambientales, sociales y económicas, tales como la desertificación, sequía, migración y pobreza (Asociación Mundial para el Agua 2012). La notable riqueza en recursos naturales, en especial de los bosques, agua, y suelo, no ha sido debidamente gestionada, provocando un cambio de uso de suelo especialmente hacia la producción agropecuaria; porque persiste la idea errónea de que los asuntos ambientales son secundarios en los planes de ordenamiento y desarrollo territorial (Siegel 2016, Mera-Parra et al. 2021).

La producción de sedimentos por cambios en las coberturas naturales del suelo a pastizales o cultivos es un grave problema ambiental y económico en las cuencas hidrográficas andinas, ya que disminuye la productividad de la tierra y aumenta la presencia de contaminantes como pesticidas en ambientes circundantes a los cultivos, y favorece el desarrollo de cianobacterias en los sedimentos de los embalses (Sepúlveda-Sánchez et al. 2021, Ochoa-Cueva et al. 2022). Según la Autoridad Nacional del Agua (ANA 2018) adscrita al Ministerio de Agricultura y Riego del Perú, que es la máxima autoridad encargada de la gestión integrada de recursos hídricos en Perú, este país cuenta con 12 embalses o reservorios, y en la

zona norte están Poechos, San Lorenzo, Tinajones y Gallito Ciego (Enríquez 2016). Por su parte, la administración actual del gobierno de Ecuador cuenta con el Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica (MAATE), como el ente encargado de la planificación, gestión y regulación del recurso hídrico en este país. Además, en 2009 fue creado el Fondo Regional del Agua (FORAGUA), para gestionar las cuencas productoras de agua para la región sur de Ecuador. Sin embargo, FORAGUA aún no incluye a todos los gobiernos autónomos descentralizados (GAD), quienes de acuerdo con el Artículo 264 de la Constitución ecuatoriana y el Artículo 55 del Código de Zonificación, Autonomía y Descentralización tienen la competencia de “ejercer el control sobre el uso y ocupación del suelo en su territorio”.

Las coberturas naturales, principalmente los bosques, contribuyen a reducir el impacto de la lluvia y retener el suelo, aunque no pueden detener la erosión (Mejía-Veintimilla et al. 2019, Benavides Muñoz et al. 2020). Por ejemplo, en Puerto Rico y Panamá, se han reportado volúmenes sumamente elevados de sedimentos suspendidos en los ríos que drenan desde zonas ocupadas por los mosaicos agrícolas y deforestado, en comparación con la producción de sedimentos desde cuencas boscosas (Stallard y Kinner 2005, Murphy y Stallard 2012). La administración del gobierno de Ecuador en sus ministerios, GAD, o FORAGUA, no dispone de información suficiente que analice el uso del suelo con prácticas de manejo y conservación, específicamente la producción de sedimentos por erosión hídrica (MAG 2016). Este tipo de información es un instrumento básico para implementar propuestas de gestión integrada de recursos hídricos (GIRH). Así, los principales actores de la GIRH podrían generar estrategias, enfocadas a la consecución de sus planes

de gestión y evitar la degradación de las cuencas hidrográficas. Por ejemplo, con la captación de recursos de apoyo o cooperación internacional (Benítez 2018). O bien, podrían considerar al pago por servicios ambientales como una alternativa de financiamiento o estructura de incentivo en busca de la sostenibilidad de la cuenca (Chaves 2010, Farley et al. 2011).

El reservorio Poechos se encuentra ubicado en Lancones, distrito de la provincia de Sullana, a unos 50 km al norte de Piura (capital de la región Piura - Perú), y a unos 30 km de la frontera con Ecuador. Es una infraestructura denominada multipropósito, porque genera energía hidroeléctrica, y distribuye el recurso hídrico principalmente para irrigación a cerca de 44 500 agricultores que poseen aproximadamente 95 000 predios, y para consumo humano en las principales ciudades del norte del Perú, beneficiando a un estimado de 850 000 personas (Integral Consultores 2020). Debido a su importancia regional, la producción de sedimentos que se depositan en Poechos fue determinada por el proyecto Chira-Piura, quienes realizaron batimetrías anuales desde 1976 al 2002. Con la última batimetría realizada en el año 2002, se determinó que el volumen de sedimentos depositado en el reservorio fue de 3.87×10^8 t, ocupando el 44.46 % del volumen total disponible al inicio de su operación. Durante los periodos de fuerte intensidad del fenómeno “El Niño” de 1982/1983 y 1997/1998 se depositaron 7.38×10^7 t y 7.47×10^7 t de sedimentos respectivamente. Con una descarga media anual del caudal en la entrada del embalse 5.4 veces mayor que las descargas anuales durante años normales (Tote et al. 2011). El embalse Poechos tiene una colmatación acelerada, con aportes de sedimentos del orden de 1.47×10^7 t promedio por año. Con los datos determinados mediante batimetría y descontando los años extraordinarios del fenómeno El Niño, se tiene un promedio de 9.25×10^6 t/año. Si a esto se suma el volumen de sedimentos controlados en el puente Sullana que es de 3.74×10^6 t/año, resulta que en promedio el río Chira en años normales transporta 1.31×10^7 t/año. Si la capacidad de Poechos es de 4.84×10^8 t, se puede deducir que dentro de 50 años este reservorio estaría plenamente colmatado (Consortio ATA-UNP-UNL 2005).

La zona del Perú de la cuenca binacional Catamayo-Chira tiene como principales usuarios a agricultores, empresas de agua potable y generadoras de energía hidroeléctrica. Gran parte de las actividades de estos usuarios depende de la reserva del recurso hídrico que se almacena en la represa Poechos, cuya capacidad se ve disminuida por la carga de sedimentos que recibe por la erosión del suelo en su cuenca productora de agua. Por lo que el objetivo de este estudio fue analizar la

producción de sedimentos frente a los cambios de uso/cobertura del suelo ocurridos en los últimos 30 años. Con estos resultados se proponen zonas para aplicar prácticas de manejo y conservación en tierras de uso agrícola, para toda la cuenca. Se muestran escenarios posibles que disminuyen la producción de sedimentos, con el propósito de aportar con insumos hacia una gestión sostenible e integral de esta cuenca transfronteriza.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

La cuenca del reservorio Poechos se encuentra al límite norte de Perú con Ecuador, en el sistema hidrográfico del río Catamayo-Chira, ubicado entre las coordenadas UTM 9434559 - 9593309 S, y 525428 - 710837 E. Tiene una superficie aproximada de 13 474 km², con un área dentro de la jurisdicción de Ecuador de 7214 km² y de 6260 km² en Perú (**Fig. 1**). Su altitud va desde los 122 m snm en el reservorio Poechos hasta los 3965 m snm en el punto más alto de la cuenca, con una pendiente media del 30 %. Las coberturas vegetales que predominan en esta cuenca son: bosque húmedo tropical, bosque seco tropical, pastizal y cultivos (Arteaga et al. 2020).

Recopilación y procesamiento de datos meteorológicos

La colecta de información es una limitante muy importante para poder ejecutar este tipo de estudios. Incluso dentro de un mismo país se pueden tener distintas fuentes de entidades encargadas del cuidado, mantenimiento y generación de la información, misma que podría estar en diferentes escalas, métodos de análisis, frecuencia de colección o temporalidades. A escala de cuencas transnacionales, el disponer o compartir esta información podría ser aún más complejo. En este caso de estudio, es distinta la densidad de las redes de información de precipitación para el área de estudio. Se recuperó de los registros de 34 estaciones pluviométricas del Servicio Meteorológico Ecuatoriano (INAMHI), y de 6 estaciones pluviométricas del Servicio Meteorológico Peruano (SENAMHI) como lo muestran la **figura 1** y el **cuadro I**. Para el procesamiento y homogeneización de la información se utilizó el paquete Climatol en el software R, el cual utiliza el Standard Normal Homogeneity Test - SNTH (Guijarro 2021). Con este SNTH fueron detectados los datos con errores y valores atípicos, que no fueron incluidos en este estudio. Para este análisis fue utilizada la estimación del volumen mensual de precipitación acumulado de cada estación durante un periodo de 35 años de datos.

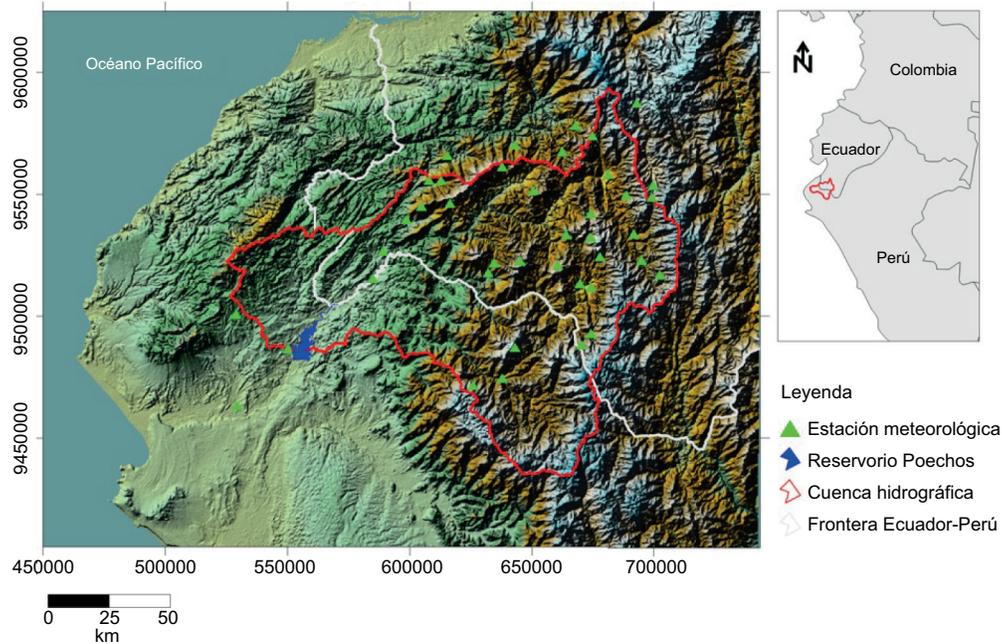


Fig. 1. Ubicación geográfica de la cuenca del reservorio Poechos (Catamayo-Chira).

Estimación de sedimentos

Para estimar la producción de sedimentos en la cuenca en los últimos 30 años y escenarios de implementación de prácticas de manejo, se utilizó el índice de entrega de sedimentos (SDR, por sus siglas en inglés de Sediment Delivery Ratio) (Sharp et al. 2018) en el software Integrated Valuation of Ecosystem Services an Tradeoffs - InVEST 3.9.0, que es una herramienta de evaluación de servicios ecosistémicos. Este software usa información biofísica como entrada, y su escala de análisis puede ser local, regional y global, permitiendo la simulación de escenarios de gestión y conservación del suelo y agua (Sharp et al. 2018). El SDR usa los factores de la ecuación universal de pérdida de suelo revisada (RUSLE), por sus siglas en inglés (Renard 1997):

$$A = R \times K \times LS \times C \times P \quad (1)$$

donde A es la pérdida promedio anual de suelo producida por la erosión hídrica por unidad de superficie ($t/ha/a$), R es el factor de erosividad de la lluvia ($MJ/mm/ha/h/a$), K es el factor de erodibilidad del suelo ($t/ha/h$), L y S son los factores de longitud (m) y de inclinación de la pendiente (grados) respectivamente con base en datos topográficos, C es el factor de uso/cobertura vegetal del suelo (adimensional), y P es el factor de conservación del suelo.

El factor de erosividad de la lluvia (R) fue calculado a partir de una serie de datos de precipitación de 35 años de datos de las estaciones en la cuenca de estudio (**Cuadro I**), mediante la expresión propuesta por Renard y Freimund (1994) (Ecuación 2):

$$R = 95.77 - 6.081 F + 0.4770 F^2 \quad (2)$$

donde R es el factor de erosividad ($MJ/mm/ha/h/a$) y F es el Índice de Fournier Modificado (IFM), obtenido mediante la ecuación 3, propuesta por Arnoldus (1977):

$$F = \frac{\sum_{i=1}^{12} p_i^2}{P} \quad (3)$$

donde p_i es la precipitación media mensual y P la precipitación media anual.

Para el cálculo de la erodabilidad del suelo (K) de la cuenca, se utilizó el método propuesto por Paulet (1974) que usa datos texturales y de densidad aparente de los perfiles edafológicos:

$$K = 0.010356 - 0.00378082 \cdot A + 0.00232882 \cdot L + 0.0323545 \cdot D_a \quad (4)$$

donde: K = es el índice de erodabilidad en $t/ha/h$; A = % de arena; L = % de limo; D_a = densidad aparente en g/cm^3 .

CUADRO I. ESTACIONES METEOROLÓGICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO (INFORMACIÓN DE PRECIPITACIÓN DE 35 AÑOS).

| Nº | Nombre | X (UTM) | Y (UTM) | Altitud (msnm) | P media (mm/a) |
|----|----------------|---------|---------|----------------|----------------|
| 1 | La Argelia | 699711 | 9553629 | 2160 | 967.1 |
| 2 | Cajanuma | 699237 | 9548746 | 2267 | 1223.5 |
| 3 | EL Tambo | 688720 | 9549537 | 1580 | 858.1 |
| 4 | Catamayo | 681150 | 9558246 | 1238 | 390.9 |
| 5 | Malacatos | 691894 | 9533772 | 1453 | 687.5 |
| 6 | Quinara | 694954 | 9522952 | 1559 | 876.6 |
| 7 | Yangana | 702556 | 9516943 | 1835 | 1158.0 |
| 8 | San Lucas | 693086 | 9587312 | 2525 | 1182.7 |
| 9 | EL Cisne | 674671 | 9574046 | 2218 | 1189.3 |
| 10 | San Jose | 667798 | 9578297 | 1560 | 1861.4 |
| 11 | Changaimina | 663861 | 9533277 | 1935 | 1160.0 |
| 12 | Nambacola | 673838 | 9542164 | 1822 | 732.0 |
| 13 | Gonzanama | 674127 | 9532243 | 2042 | 1128.5 |
| 14 | Quilanga | 677657 | 9524372 | 1819 | 1159.9 |
| 15 | El Lucero | 669587 | 9513516 | 1180 | 870.6 |
| 16 | EL Ingenio | 673992 | 9511847 | 1189 | 1273.8 |
| 17 | Amaluza | 674106 | 9493049 | 1672 | 982.0 |
| 18 | Jimbura | 670274 | 9488265 | 2100 | 1278.4 |
| 19 | Cariamanga | 660415 | 9520875 | 1950 | 1288.9 |
| 20 | Zambi | 662318 | 9567403 | 1446 | 1053.0 |
| 21 | Buenavista | 642951 | 9570198 | 1020 | 1282.0 |
| 22 | Lauro Guerrero | 637817 | 9561300 | 1910 | 1457.6 |
| 23 | Catacocha | 650479 | 9551575 | 1808 | 884.1 |
| 24 | Colaisaca | 645032 | 9522745 | 2410 | 1088.4 |
| 25 | Sozoranga | 634395 | 9521872 | 1427 | 1191.6 |
| 26 | Sabiango | 632015 | 9517853 | 700 | 1102.5 |
| 27 | Ciano | 615339 | 9565937 | 1470 | 1218.4 |
| 28 | Celica | 616393 | 9546221 | 1904 | 1104.9 |
| 29 | Alamor | 607925 | 9555751 | 1250 | 1318.7 |
| 30 | Mercadillo | 612704 | 9555653 | 1125 | 1294.3 |
| 31 | Pozul | 604705 | 9545099 | 1739 | 1251.1 |
| 32 | Sabanilla | 598563 | 9539640 | 733 | 822.8 |
| 33 | SaucilloAlamor | 588930 | 9526784 | 328 | 646.1 |
| 34 | Zapotillo | 584726 | 9515549 | 223 | 619.8 |
| 35 | Ayapamba * | 643004 | 9487247 | 2648 | 1385.0 |
| 36 | Lancones * | 550224 | 9486795 | 136 | 374.6 |
| 37 | Mallares * | 529321 | 9463276 | 44 | 222.7 |
| 38 | Pananga * | 528904 | 9500879 | 360 | 337.9 |
| 39 | Sapillica * | 625856 | 9471752 | 1451 | 679.7 |
| 40 | Sausal * | 637750 | 9474584 | 997 | 336.1 |

*Estaciones meteorológicas de Perú.

La información de textura y densidad aparente del suelo fue recuperada de la base de datos SoilGrids de la International Soil Reference and Information Centre (ISRIC), con resolución espacial de 500 m (Hengl et al. 2017).

Con el modelo digital del terreno MDT de resolución espacial de 100 x 100 m de tamaño de pixel, derivado del satélite Alos Palsar (ASF DAAC 2015), fue calculado el factor L y S de la ecuación 1. La resolución de salida de los mapas fue de 100 x 100 m.

Para la generación de los mapas de exportación de sedimentos en los últimos 30 años (1992 y 2019), fueron empleados los datos de cobertura del suelo (**Fig. 2**) que se obtuvieron del Land Cover CCI Climate Research Data Package (CRDP) de 300 m de resolución espacial (ESA 2019). Y fueron consideradas las categorías de leyenda establecidas por el Servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos (USCS).

En cuanto a los escenarios de generación de sedimentos con diferentes prácticas de manejo, fue

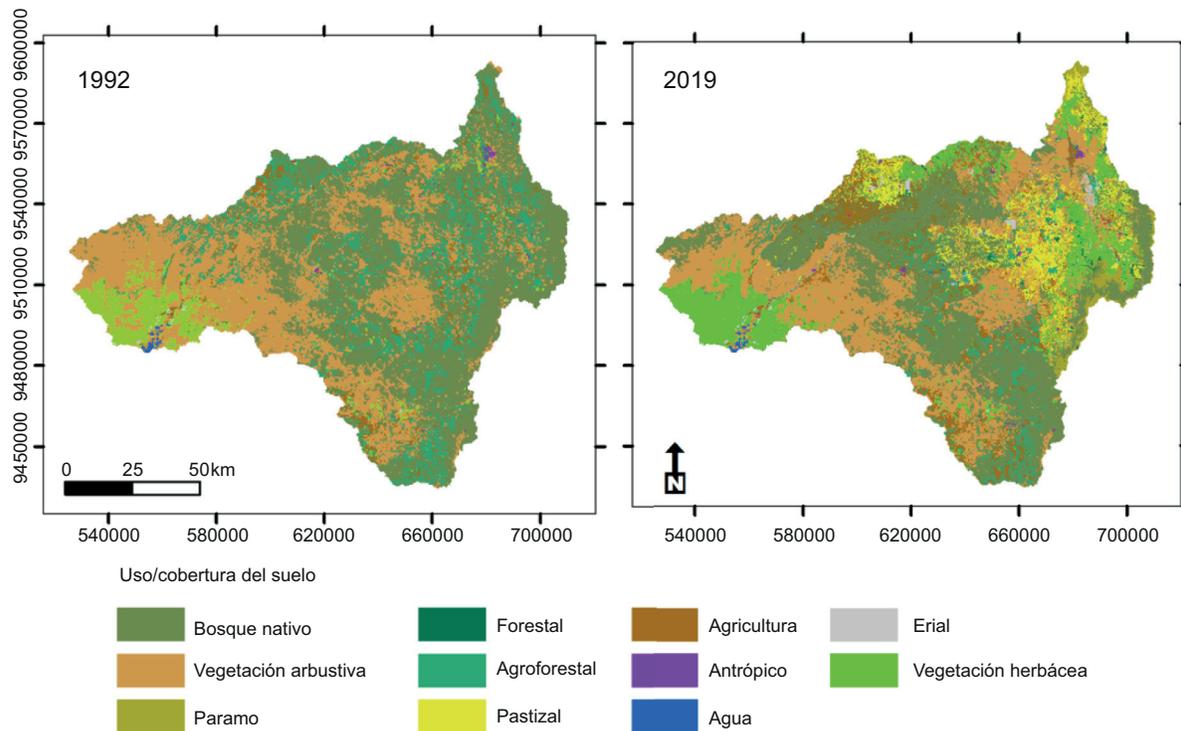


Fig. 2. Mapas de uso/cobertura del suelo de la cuenca para los años 1992 y 2019.

utilizada la misma información de cobertura de suelo (Fig. 2), y fueron modificados los valores del factor P a 0.52 y 0.25 para prácticas de labranza mínima y labranza zonal respectivamente (Benavidez et al. 2018).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Producción de sedimentos de la cuenca del reservorio Poechos

La distribución espacial de las zonas de generación de sedimentos en la cuenca de estudio, generada como salida del índice SDR usando el software INVEST se muestra en la figura 3. Según esta estimación, la cantidad total de sedimentos generada en el año 1992 fue de 10045 779 t, mientras que para el 2019 se incrementó a 18 446 353 t.

El volumen total del reservorio Poechos, estimado en 8.71×10^8 t en el año 1976 al inicio de su operación, se redujo para el 2014 a 3.99×10^8 t (50 % de su capacidad) por la acumulación de 4.71×10^8 t de sedimentos. La acumulación media de sedimentos es de 12.6 Mt/año (Enríquez 2016), valor que se encuentra dentro del rango de producción de sedimentos estimado en este estudio (10.0 Mt – 18.4 Mt/año).

Del mismo modo, la generación de sedimentos estimada en este estudio para el año 1992 fue de 10 Mt, cercano al volumen registrado mediante batimetría en el mismo año de 9.8 Mt (Consorcio ATA-UNP-UNL 2005). Esta comparación nos permite verificar nuestra estimación de producción de sedimentos con SDR en el software INVEST, al aproximarse con las mediciones hechas en campo. No se pudo verificar la estimación de 2019, por no contar con datos por parte de quienes gestionan el embalse, ya que esta información es considerada “estratégica” por sus usos en la generación de energía hidroeléctrica, irrigación, industria, agua potable, y por ser el agua un recurso escaso para ambos países. Sin embargo, si se generara un sistema de información base transfronterizo, se podría prevenir riesgos como roturas del reservorio, inundaciones, sequías, u otros eventos colaterales.

Las zonas de mayor producción de sedimentos se localizan en la cuenca media-alta (Fig. 3), con tasas de generación anual mayores a 20 t/ha. Estas zonas se corresponden con fuertes precipitaciones y pendientes, y con usos de suelo agropecuario (Figs. 1 y 2), factores que favorecen la erosión del suelo (Ffolliott et al. 2013, Ochoa et al. 2016). Si asumimos que los sedimentos generados por erosión hídrica en esta

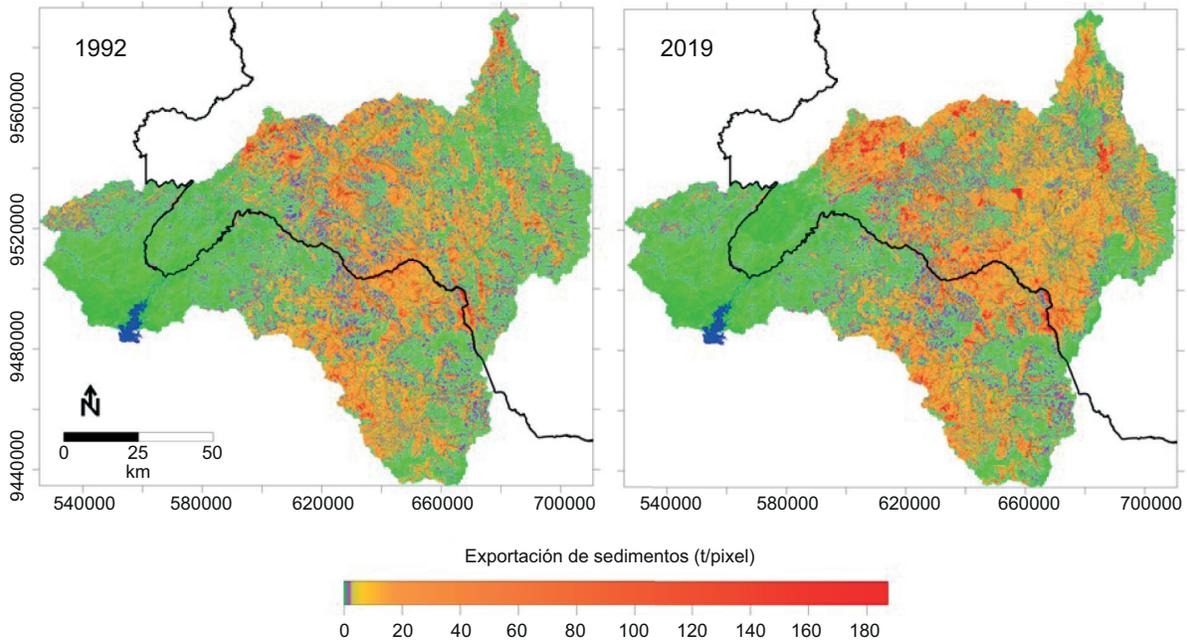


Fig. 3. Producción de sedimentos (t/pixel), que alcanza la red hidrica de la cuenca para los años 1992 y 2019 (pixel = 100 m x 100 m).

cuenca van a pasar directamente a los ríos y luego al embalse, la exportación media anual de sedimentos es alta a escala global (1369 t/km²), y en comparación con otras cuencas de condiciones montañosas y semiáridas como en California (EUA), en las que Minear y Kondolf (2009) reportaron una media anual de 180 t/km² (considerando un $\gamma_s = 1 \text{ t/m}^3$). Por otro lado, la generación de sedimentos en la cuenca baja es deficiente por las pendientes leves y menor intensidad de precipitación, a pesar de que la cobertura vegetal es dispersa y no ofrece mayor protección al suelo. La exportación de sedimentos estimada en este estudio para la cuenca baja es de aproximadamente 196.8 t/km² (considerando una densidad de sedimentos $\rho_s = 1 \text{ t/m}^3$), valores cercanos a los reportados por Rahmani et al. (2018) para las grandes planicies de los Estados Unidos de América, con una tasa de sedimentación media anual de 263.7 t/km².

Generación de sedimentos con diferentes prácticas de manejo agrícola

El cuadro II muestra una comparación entre escenarios de producción de sedimentos convencional y frente a las prácticas de manejo y conservación de suelos agrícolas. La simulación específica de tierras agrícolas con prácticas de manejo de labranza mínima y labranza zonal, muestran una reducción en la

producción de sedimentos respecto del escenario sin prácticas de manejo (convencional): (i) del -12 % y -19 % respectivamente para el año 1992 y, (ii) del -15 % y -23 % respectivamente para el año 2019. O, en términos del incremento de la producción de sedimentos del escenario convencional, la implementación de estas prácticas reduciría este incremento (84 %) de -6 % en labranza mínima y -9 % con labranza zonal.

CUADRO II. ESTIMACIÓN DE SEDIMENTOS GENERADOS EN RELACIÓN CON LAS PRÁCTICAS DE MANEJO DEL SUELO.

| Escenario | Generación total (t/a) | | Incremento (%) |
|-----------------|------------------------|----------|----------------|
| | 1992 | 2019 | |
| Convencional | 10045779 | 18446353 | +84 |
| Labranza mínima | 8810312 | 15703859 | +78 |
| Labranza zonal | 8115362 | 14161207 | +75 |

En un estudio similar, Lee et al. (2021) simularon la implementación de labranza cero en una cuenca agrícola en Illinois (EUA), estimando reducciones del 76 % en la pérdida de suelo y 72 % en la producción de sedimentos. Las diferencias entre los resultados generales de la simulación de producción de

sedimentos de la cuenca en estudio y los de Lee et al. (2021), responden principalmente a la pendiente del terreno, siendo en promedio del 1 % para el caso de comparación.

La **figura 4** muestra la localización de las zonas en las que se tiene uso de suelo agrícola, donde se reduciría la producción de sedimentos por la aplicación de las prácticas de manejo agrícola sugeridos en este estudio. Estas áreas suman una superficie de 96 462 ha de las cuales 58 248 ha (60 %) se ubican en territorio ecuatoriano. Los volúmenes más altos de reducción se observan en la zona media de la cuenca donde se estima una reducción sobre 25 t/ha por la implementación de labranza zonal. La reducción media estimada es de 44 t/ha.

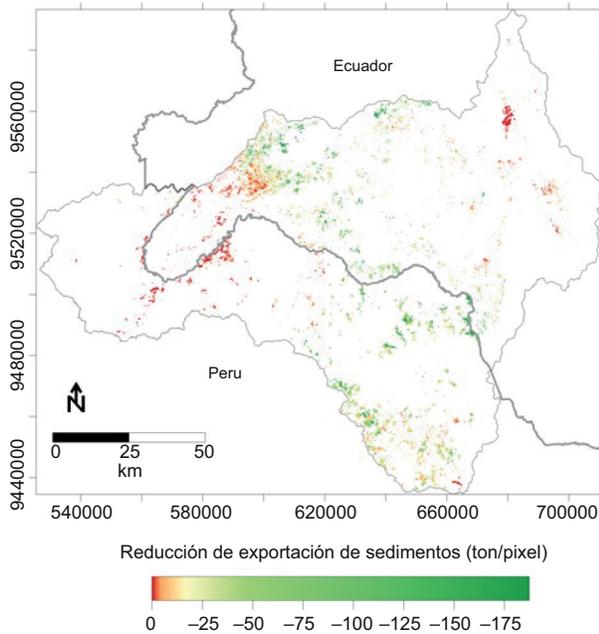


Fig. 4. Zonas de reducción potencial en la generación de sedimentos (t/píxel) con la aplicación de labranza zonal.

La labranza zonal se propone como una alternativa para disminuir la pérdida de suelo, ya que sólo perturba un tercio o menos de la superficie de la tierra (Carter 2005). Además de la reducción en la pérdida de suelo por erosión, esta práctica ofrece ventajas para la agricultura como la conservación de la humedad del suelo, reducción de mano de obra y el almacenamiento de nutrientes en las zonas no alteradas del suelo (USDA-NRCS 2006, Ochoa-Cueva et al. 2022).

La práctica de manejo del suelo agrícola con labranza mínima implica el uso mínimo de labranza

primaria y secundaria para cumplir con los requerimientos de producción de cultivos bajo las condiciones de clima y edáficas existentes (Carter 2005). La estimación en la producción de sedimentos con esta práctica fue 10 % mayor respecto de la labranza zonal (**Cuadro II**). Sin embargo, la labranza mínima, además de aportar en la reducción de la producción de sedimentos, tiene impactos positivos en los ingresos netos per cápita por cultivos de los hogares de pequeños agricultores (Chaves 2010), y reduce la demanda total de trabajo, lo que permite a los hogares de los agricultores dedicarse a otras actividades generadoras de ingresos, según lo reportan Osewe et al. (2020).

Aunque no se puede tener la solución definitiva o estática en prácticas de manejo y conservación de suelos y agua, que disminuyan el aporte de sedimentos a los cauces de los ríos y embalses, es conveniente pensar en alternativas como estas que serían correctivas o preventivas y que disminuyen el proceso erosivo.

CUADRO III. ESTIMACIÓN DE LA GENERACIÓN MEDIA DE SEDIMENTOS, POR PRÁCTICA DE CONSERVACIÓN Y POR ZONA TERRITORIAL.

| Escenario | Generación media (t/ha) | |
|-----------------|-------------------------|------|
| | Ecuador | Perú |
| Convencional | 18.8 | 8.0 |
| Labranza mínima | 16.5 | 6.2 |
| Labranza zonal | 15.2 | 5.3 |

Gestión transfronteriza de la cuenca del reservorio Poechos

Los problemas que enfrentan dos países vecinos dependientes de un mismo recurso son los mismos, pero en diferente grado del que enfrentan dos parcelas o dos comunidades locales vecinas que comparten el agua (Asociación Mundial para el Agua 2012). El **cuadro III** presenta los valores medios de generación de sedimentos, estimados para las áreas ecuatoriana y peruana de la cuenca en estudio, tanto para el escenario convencional, como para los escenarios de conservación en tierras agrícolas. La generación de sedimentos en el lado ecuatoriano duplica a la del territorio peruano. Esto responde, entre otros factores, a que en la zona de Perú se ubica la mayor parte de la cuenca baja donde la topografía es ligeramente inclinada y el suelo tiene cobertura herbácea o se encuentra en barbecho (**Figs. 1 y 2**).

Nuestro estudio concuerda con lo puntualizado por el Consorcio ATA-UNP-UNL (2005) quienes describen que la mayor producción de sedimentos en territorio ecuatoriano se da principalmente por dos amenazas: la natural con precipitaciones de gran intensidad y accidentada topografía, y la antrópica básicamente con la agricultura y la ganadería (Ochoa et al. 2016).

Esta cuenca se caracteriza por tener precipitaciones muy variables tanto en su temporalidad como en su distribución espacial (Fries et al. 2020). El promedio de precipitación anual de acuerdo con los datos de las estaciones meteorológicas ubicadas en la parte alta de la cuenca (Ecuador) es de 1076 mm, coincidiendo con lo descrito por Tote et al. (2011), quienes mencionan que el periodo de las precipitaciones se alarga y humedece gradualmente el este de la cuenca y con el aumento de la altitud. Mientras que el promedio en las estaciones meteorológicas del Perú cercanas a Poechos es 556 mm, cerca del 50 % menos de lo que recibe la cuenca alta (**Cuadro I**). Los sistemas hídricos que aportan la mayor cantidad de sedimentos al reservorio Poechos es el Río Macará con 1224 t/día de sedimentos en una descarga líquida media de caudal de 40.6 m³/s, y el sistema del Río Quiroz que aporta con 336 t/día de sedimentos en un caudal medio de 15.1 m³/s (Paulet 1974, Consorcio ATA-UNP-UNL 2005).

Un caso similar de gestión de una cuenca transnacional es la del Río Bermejo ubicado entre Bolivia y Argentina. Tiene una superficie de 123 000 km² y genera un total de 100 Mt/año de sedimentos. La mayor cantidad de sedimento se genera en la cuenca alta del río Bermejo, similar a la cuenca en estudio. El 52 % de la cuenca del Bermejo tiene una erosión estimada de significativa a muy grave (COBINABE 2010a). También en la cuenca del Bermejo se desarrollaron obras estructurales y no estructurales para controlar la sedimentación. Dentro de las obras estructurales se construyeron diques de retención de sedimento y control de torrentes. Las obras no estructurales consisten en el manejo del pastoreo y uso de micro riego. Éstas acciones permitieron minimizar la carga de sedimentos generados en esta cuenca binacional. (COBINABE 2010b).

Nuestro estudio, al igual que el ejemplo anterior y otros muy buenos ejemplos en la región como el descrito por Chaves (2010), no sólo pretende mostrar cuáles zonas tienen mayor producción de sedimentos, sino ir más allá, generando instrumentos o alternativas que pueden ser llevadas a la práctica si se establecen políticas de gestión transfronteriza de cuencas y acuerdos entre ambos gobiernos. Es verdad que los intereses y objetivos para el uso de la tierra y el agua

están en concordancia con los planes de desarrollo y seguridad de cada país, pero como se ha descrito, existen intereses transnacionales. Por un lado, están los usuarios en la parte baja de la cuenca, quienes requieren de un recurso con alta calidad y cantidad como lo aborda el Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) 6 (Asamblea General de las Naciones Unidas 2015). Por otro lado están los pequeños productores de tierras altas (“minifundistas”), quienes también necesitan mantener su tierra productiva, en busca de una agricultura y consumo sostenibles, temas que también son abordados en las metas de los ODS 12 y 15 respectivamente (Arteaga et al. 2020, Ochoa-Cueva et al. 2022).

Las alternativas que se muestran en este estudio son para exhortar a los tomadores de decisiones y comunidad en general a reunir tanto a las partes interesadas como usuarios y productores del recurso hídrico (*stakeholders*); para generar acuerdos encaminados hacia la gestión integrada de recursos hídricos para cuencas transfronterizas (Asociación Mundial para el Agua 2012). Una propuesta que puede generar un entorno propicio para la GIRH es incluir el pago por compensación de servicios hidroambientales. Asimismo, solicitar contribuciones de los países que comparten territorio de la cuenca, o se podrían gestionar contribuciones de donantes externos. Estos recursos se podrían canalizar a través de un fondo rotativo intergubernamental que se gestione con la supervisión de organismos internacionales como la Iniciativa Internacional de Sedimentos para América Latina y el Caribe (ISI – LAC) del Programa Hidrológico Internacional (PHI) de la UNESCO, la academia, organizaciones especializadas, u otros. Estos recursos a su vez pueden sostener a un organismo de cuenca transfronterizo que canalice capacitación, extensión, y ponga en funcionamiento prácticas de manejo y gestión del suelo como las propuestas en este estudio inclusive la implementación de infraestructura para el desarrollo económico de ambos países. Es conveniente inicialmente contar con supervisión y apoyo internacional por posibles conflictos en la asignación de recursos o distribución de beneficios, que se vuelven complejos de manejar a través de las fronteras internacionales donde la política y los conflictos históricos entre países relacionados o no con el agua entran en juego (Asociación Mundial para el Agua, 2012). En el caso de esta cuenca la gestión transfronteriza fue afectada por conflictos limítrofes entre ambos países hasta finales del siglo XX. Esta es una de las primeras propuestas basadas en la simulación de escenarios de prácticas de manejo y conservación de suelos para

la gestión transfronteriza de esta cuenca, por lo que consideramos importante continuar desarrollando estudios, usando otros modelos y prácticas de manejo y conservación del suelo y agua, que puedan ser comparadas o contrastadas para elegir lo más conveniente para esta cuenca hidrográfica. Por lo que se invita tanto a usuarios como a productores de los servicios hidroambientales de la cuenca, así como a los tomadores de decisión de cada país, junto a la comunidad en general, al desarrollo de un sistema de información base transfronterizo, que contenga y genere estudios que sirvan como base para la generación de políticas, marco legal y financiamiento de proyectos concretos para la GIRH a escala transfronteriza.

CONCLUSIONES

La producción de sedimentos en la cuenca transnacional Catamayo-Chira se da mayoritariamente en zonas con fuertes pendientes y precipitaciones, cobertura vegetal escasa y manejo convencional del suelo en áreas de uso agrícola. Los escenarios modelados con prácticas de manejo y conservación de suelo como labranza mínima y labranza zonal disminuyen significativamente la producción de sedimentos para esta cuenca y favorecen el aumento de la recarga hídrica, mejorando así su flujo base. Asimismo, los escenarios modelados con cambios de uso del suelo permiten concluir que básicamente los cambios de cobertura natural a pastizales y agricultura son el principal factor que favoreció el aumento en la producción de sedimentos en los últimos 30 años.

El contar con modelos predictivos genera gran beneficio para tomar decisiones oportunas hacia una gestión sostenible de los recursos naturales de una cuenca transfronteriza. Sin embargo, es importante continuar investigando otros modelos, y otras prácticas de manejo y conservación del suelo y agua, para contar con un sistema de información base, que favorezca el monitoreo futuro de la gestión integral de esta cuenca transfronteriza de gran importancia para la región norte del Perú y sur de Ecuador.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al proyecto de investigación para el manejo estacional del agua para zonas semiáridas PROY_INV_INGC_2019_2602, por facilitar la movilización hacia Poechos. Así como el respaldo del Observatorio del Clima, parte del Parque Científico y Tecnológico UTPL, para desarrollar este estudio.

REFERENCIAS

- ANA (2018). Memoria anual 2018. Autoridad Nacional del Agua. Perú, 57 pp.
- Arnoldus H.M.J. (1977). Methodology used to determine the maximum potential average annual soil loss due to sheet and rill erosion in Morocco. *FAO Soils Bulletin* (FAO) 34, 39-51.
- Arteaga J., Ochoa P., Fries A. y Boll J. (2020). Identification of Priority Areas for Integrated Management of Semiarid Watersheds in the Ecuadorian Andes. *Journal of the American Water Resources Association* 56 (2), 270-282. <https://doi.org/10.1111/1752-1688.12837>
- Asamblea General de las Naciones Unidas (2015). Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. (A/RES/70/1). Naciones Unidas.
- ASF DAAC. (2015). PALSAR_Radiometric_Terrain_Corrected_high_res JAXA/METI 2007 [en línea]. <https://doi.org/10.5067/Z97HFCNKR6VA>
- Asociación Mundial para el Agua (2012). Manual para la gestión integrada de los recursos hídricos de las cuencas transfronterizas de ríos, lagos y acuíferos. Red Internacional de Organismos de Cuenca (RIOC) y Asociación Mundial para el Agua (GWP).
- Benavides Muñoz H., Arias J., Fries, A., Sánchez-Paladines J., Gallegos A., Hernández R. y Ochoa-Cueva P. (2020). Management of hydrological systems: Analysis and perspective of the contingent valuation of water for mountain basins. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003024576>
- Benavidez R., Jackson B., Maxwell D. y Norton K. (2018). A review of the (Revised) Universal Soil Loss Equation ((R)USLE): with a view to increasing its global applicability and improving soil loss estimates. *Hydrology and Earth System Sciences* 22 (11), 6059-6086. <https://doi.org/10.5194/hess-22-6059-2018>
- Benítez M. (2018). La Gestión Integrada del Recurso Hídrico (GIRH) como herramienta para contribuir al proceso de adaptación del Cambio Climático en la Cuenca Transfronteriza Catamayo-Chira. Tesis de Maestría. Universidad Andina Simón Bolívar. Quito, 180 pp.
- Carter M.R. (2005). Conservation tillage. En: *Encyclopedia of Soils in the Environment* (D. Hillel, Ed.). Elsevier, pp. 306-311. <https://doi.org/10.1016/B0-12-348530-4/00270-8>
- Chaves H.M.L. (2010). Relações de aporte de sedimento e implicação de sua utilização no pagamento por serviço ambiental em bacias hidrográficas. *Revista Brasileira de Ciência de Solo* 34 (4), 1469-1477. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832010000400043>
- COBINABE (2010a). Generación y transporte de sedimentos en la Cuenca Binacional del Río Bermejo.

- Caracterización y análisis de los procesos intervinientes. Comisión Binacional para el Desarrollo de la Alta Cuenca del Río Bermejo y el Río Grande de Tarija.
- COBINABE (2010b). Protección y rehabilitación ambiental en la Cuenca Binacional del Río Bermejo. Comisión Binacional para el Desarrollo de la Alta Cuenca del Río Bermejo y el Río Grande de Tarija.
- Consortio ATA-UNP-UNL. (2005). Caracterización hídrica y adecuación entre la oferta y la demanda caracterización territorial y documentación básica. Asesores Técnicos Asociados S.A. - Universidad Nacional de Piura - Universidad Nacional de Loja.
- Enríquez J. (2016). Estado hidrológico, hidráulico y sedimentológico de los embalses en la Región Piura. Tesis de Ingeniería. Universidad de Piura. Piura, Perú, 101 pp.
- ESA (2019). Land Cover CCI Climate Research Data Package (CRDP). ESA Climate Change Initiative [en línea]. <http://maps.elie.ucl.ac.be/CCI/viewer/download.php> 24/05/2022
- Farley K.A., Anderson W.G., Bremer L.L. y Harden C.P. (2011). Compensation for ecosystem services: an evaluation of efforts to achieve conservation and development in Ecuadorian páramo grasslands. *Environmental Conservation* 38 (4), 393-405. <https://doi.org/10.1017/S037689291100049X>
- Ffolliott P., Brooks K., Neary D., Pizarro R. y Garcia P. (2013). Soil erosion and sediment production on watershed landscapes: Processes and control. UNESCO, International Hydrological Programme, Regional Office for Science for Latin American and the Caribbean.
- Fries A., Silva K., Pucha-Cofrep F., Oñate-Valdivieso F. y Ochoa-Cueva P. (2020). Water Balance and Soil Moisture Deficit of Different Vegetation Units under Semiarid Conditions in the Andes of Southern Ecuador. *Climate* 8 (2). <https://doi.org/10.3390/cli8020030>
- Guijarro J. (2021). Homogenization of climatic series with Climatol. State Meteorological Agency (AEMET). Balearic Islands Office, Spain. 20 pp. https://www.climatol.eu/homog_climatol-en.pdf
- Hengl T., Mendes de Jesus J., Heuvelink G.B.M., Ruiperez Gonzalez M., Kilibarda M., Blagotić A., Shangguan W., Wright M.N., Geng X., Bauer-Marschallinger B., Guevara M.A., Vargas R., MacMillan R.A., Batjes N.H., Leenaars J.G.B., Ribeiro E., Wheeler I., Mantel S. y Kempen B. (2017). SoilGrids250m: Global gridded soil information based on machine learning. *PLOS ONE* 12 (2), e0169748. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0169748>
- Integral Consultores (2020). Reservorio Poechos. Integral Ingenieros Consultores [en línea]. <https://www.integral.com.co/reservorio-poechos/> 24/05/2022
- Lee S., Chu M. L., Guzman J. A. y Botero-Acosta A. (2021). A comprehensive modeling framework to evaluate soil erosion by water and tillage. *Journal of Environmental Management* 279, 111631. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111631>
- MAG (2016). La política agropecuaria ecuatoriana, hacia el desarrollo territorial rural sostenible 2015-2025. Ministerio de Agricultura y Ganadería de Ecuador, Quito, Ecuador, 481 pp.
- Mejía-Veintimilla D., Ochoa-Cueva P., Samaniego-Rojas N., Félix R., Arteaga J., Crespo P., Oñate-Valdivieso F. y Fries A. (2019). River discharge simulation in the high andes of southern Ecuador using high-resolution radar observations and meteorological station data. *Remote Sensing* 11 (23). <https://doi.org/10.3390/rs11232804>
- Mera-Parra C., Oñate-Valdivieso F., Massa-Sánchez P. y Ochoa-Cueva P. (2021). Establishment of the baseline for the IWRM in the Ecuadorian Andean Basins: Land use change, water recharge, meteorological forecast and hydrological modeling. *Land* 10 (5), 513. <https://doi.org/10.3390/land10050513>
- Minear J.T. y Kondolf G.M. (2009). Estimating reservoir sedimentation rates at large spatial and temporal scales: A case study of California. *Water Resources Research* 45 (12). <https://doi.org/10.1029/2007WR006703>
- Murphy S.F. y Stallard R.F. (2012). Water quality and landscape processes of four watersheds in eastern Puerto Rico. U.S. Geological Survey, 294 pp.
- Ochoa-Cueva P.A., Arteaga J., Arévalo A.P. y Kolok A.S. (2022). A potential pesticides exposure index (PPEI) for developing countries: Applied in a transboundary basin. *Integrated Environmental Assessment and Management* 18 (1), 187-197. <https://doi.org/10.1002/ieam.4470>
- Ochoa P.A., Fries A., Mejía D., Burneo J.I., Ruiz-Sinoga J.D. y Cerdà A. (2016). Effects of climate, land cover and topography on soil erosion risk in a semiarid basin of the Andes. *Catena* 140, 31-42. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.01.011>
- Osewe M., Miyinzi Mwungu C. y Liu A. (2020). Does minimum tillage improve smallholder farmers' welfare? Evidence from Southern Tanzania. *Land* 9 (12). <https://doi.org/10.3390/land9120513>
- Paulet I. (1974). Guía para el planeamiento del uso de las tierras agrícolas en las zonas de lluvia del Perú. Universidad Nacional Agraria La Molina, Perú. 55 pp.
- PNUD (2021). Informe regional de desarrollo humano 2021 | Atrapados: alta desigualdad y bajo crecimiento en América Latina y El Caribe. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, 334p.
- Rahmani V., Kastens J.H., DeNoyelles F., Jakubauskas M.E., Martinko E.A., Huggins D.H., Gnau C., Liechti

- P.M., Campbell S.W., Callihan R.A. y Blackwood A.J. (2018). Examining storage capacity loss and sedimentation rate of large reservoirs in the Central U.S. Great Plains. *Water* 10 (2), 190. <https://doi.org/10.3390/w10020190>
- Renard K.G., Foster G.R., Weesies G.A., McCool D.K. y Yoder D.C. (1997). Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). United States Government Printing, 385 pp.
- Renard K.G. y Freimund J. R. (1994). Using monthly precipitation data to estimate the R-factor in the revised USLE. *Journal of Hydrology* 157 (1), 287-306. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(94\)90110-4](https://doi.org/10.1016/0022-1694(94)90110-4)
- Sepúlveda-Sánchez M., Arismendy-González L.M., Arboleda-Baena C.M., Múskus López C.E., Pohlen E., Flórez Molina M.T. y Palacio Baena J.A. (2021). First evidence of potential toxic cyanobacteria in the water-sediment interface of a tropical drinking water reservoir. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* 37, 259-272. <https://doi.org/10.20937/RICA.53696>
- Sharp R., Tallis H.T., Ricketts T., Guerry A.D., Wood S.A., Chaplin-Kramer R., Nelson E., Ennaanay D., Wolny S., Olwero N., Vigerstol K., Pennington D., Mendoza G., Aukema J., Foster J., Forrest J., Cameron D., Arkema K., Lonsdorf E., Kennedy C., Verutes G., Kim C.K., Guannel G., Papenfus M., Toft J., Marsik M., Bernhardt J., Griffin R., Glowinski K., Chaumont N., Perelman A., Lacayo M., Mandle L., Hamel P., Vogl A.L., Rogers L., Bierbower W., Denu D. y Douglass J. (2018). InVEST 3.9.0 User's Guide. En: *The Natural Capital Project*, Stanford University, University of Minnesota, The Nature Conservancy, and World Wildlife Fund, 308 pp.
- Siegel K.M. (2016). Environment, politics and governance in Latin America. *Revista Europea de Estudios Latinoamericanos y del Caribe* (102), 109-117.
- Stallard R.F. y Kinner D.A. (2005). Estimation of landslide importance in hillslope erosion within the Panama canal watershed. En: *The Río Chagres, Panama* (R.S. Harmon, Ed.). *Water Science and Technology Library*, vol 52, Springer, Dordrecht, pp 281-295. https://doi.org/10.1007/1-4020-3297-8_19
- Tote C., Govers G., Van Kerckhoven S., Filiberto I., Verstraeten G. y Eerens H. (2011). Effect of ENSO events on sediment production in a large coastal basin in northern Peru. *Earth Surface Processes and Landforms* 36 (13), 1776-1788. <https://doi.org/10.1002/esp.2200>
- USDA-NRCS. (2006). *Tillage Practice Guide*. US Department of Agriculture, National Resources Conservation Service, 2 pp.
- Vásquez A., Mejía A., Faustino J., Terán R., Vásquez I., Díaz J., Vásquez C., Castro A., Tapia M. y Alcántara J. (2016). *Manejo y gestión de cuencas hidrográficas*. Fondo Editorial-UNALM, Lima, Perú, 646 pp.