



PERÚ

Ministerio
del Ambiente

Instituto
Geofísico del Perú - IGP



Convenio de Subvención
N° 098-2015-FONDECYT

MEMORIA

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN APLICADA

Influencia de los páramos en la erosión y conservación de los suelos andinos, e identificación de su rol en la regulación del recurso hídrico en grandes ciudades altoandinas

EL PERÚ PRIMERO

JUNIO 2019

Estudio del transporte de sedimentos en la Cuenca del río Ronquillo

DIANA DÍAZ^{1,2}; SERGIO MORERA JULCA^{1,3} & OSCAR SANTISTEBAN⁴

¹SUBDIRECCIÓN DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA E HIDRÓSFERA, INSTITUTO GEOFÍSICO DEL PERÚ, LIMA, PERÚ.

²UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA, CAJAMARCA, PERÚ.

³UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA, LIMA, PERÚ.

⁴EMPRESA PRESTADORA DE SERVICIOS DE SANEAMIENTO DE CAJAMARCA (SEDACAJ).

I. Contexto nacional y técnico científico

La ciudad de Cajamarca se encuentra atravesada por el río San Lucas, del cual uno de sus tributarios corresponde a la cuenca del río Ronquillo (INRENA, 2007). Durante el periodo 2003-2017, en el departamento de Cajamarca se registraron 177 emergencias por inundaciones, causadas por los grandes volúmenes de agua y sedimentos, estas emergencias causaron pérdidas económicas, cobraron vidas humanas, e incluso causaron epidemias. Ello podría incrementarse, en el presente o futuro, pues en los últimos 25 años, la ciudad de Cajamarca ha crecido exponencialmente, cubriendo gran parte del valle de Cajamarca, incrementando a su vez la planicie de inundación (DIPRE-SIERD, 2018).

El diseño de infraestructura hidráulica requiere de la estimación del transporte de sedimentos. La ingeniería tradicional utiliza las fórmulas empíricas mediante las cuales se obtienen resultados que generalmente no se pueden comparar con datos observados, debido a que no es común realizar el monitoreo de sedimento de fondo en las cuencas. Tomar la decisión de que fórmula es la que mejor se aproxima a los resultados reales

del transporte de sedimentos, sigue siendo un reto para la ingeniería, en ríos de montaña dicho reto se torna en un desafío debido a la fuerte variabilidad del transporte de sedimentos, las fuertes pendientes de los ríos y el material de tipo grava de los lechos, condiciones que no permiten utilizar las técnicas de muestreo comúnmente utilizadas en ríos con lechos de arena.

La presente investigación estableció una técnica de monitoreo de sedimentos de fondo, para estimar el transporte de sedimentos real, el cual, se comparó con el estimado a partir del uso de fórmulas empíricas.

II. Datos y Métodos

La información utilizada, corresponde a caudales líquidos obtenidos de las estaciones hidrométricas del Instituto Geofísico del Perú y la Universidad Nacional de Cajamarca en convenio con el proyecto CASCUS. La resolución de los caudales líquidos utilizados fueron cada 15 minutos, los cuales fueron obtenidos a partir de los niveles de agua, y los aforos realizados.

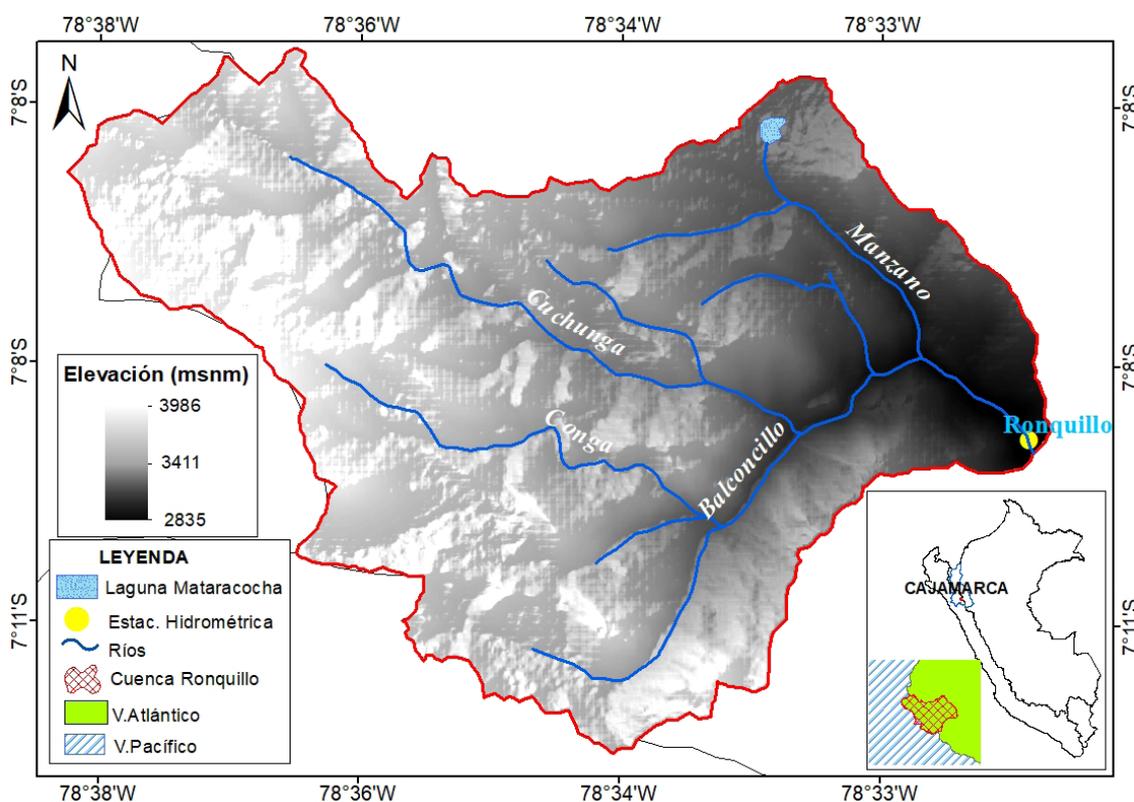


Figura 1. Ubicación de la cuenca del río Ronquillo.

Tabla 1. Principales características de la cuenca y río Ronquillo

	Parámetros	Valor
Cuenca Ronquillo	Área de la cuenca, Km ²	41.7
	Perímetro de la cuenca, Km	34.5
	Pendiente promedio de la cuenca, %	0.29
	Elevación máxima, msnm	3985.0
	Elevación media, msnm	3508.0
	Elevación mínima, msnm	2835.0
	Tiempo de concentración, mín.	235.0
	Longitud del máximo recorrido, Km	13.2

Río Ronquillo	Pendiente media del río ubicado aguas arriba de la captación, %	3.16
	Precipitación anual, mm	1280
	Descarga máxima medida, m ³ s ⁻¹	33.7
	Descarga media medida, m ³ s ⁻¹	0.2
	Descarga mínima medida, m ³ s ⁻¹	0.1

Los volúmenes de sedimentos observados, fueron obtenidos a partir de las batimetrías y topografía periódicos en el barraje de la captación Ronquillo. Las fórmulas empíricas utilizadas se muestra en la Tabla 2, para obtener los parámetros necesarios como: diámetro de partículas del lecho superficial y subsuperficial del río, pendiente, área y ancho del cauce promedios, se realizaron campañas de campo en la cuenca.

Tabla 2. Fórmulas empíricas para sedimento de fondo utilizadas.

AUTOR	FORMULA	OBSERVACION
Sub-sustrato basado en la ecuación de Parker, Klingeman, & McLean, (1982)	$W^* = \begin{cases} 11.2 \left(1 - \frac{0.822}{\phi_{50}}\right)^{4.5} & ; \phi_{50} > 1.65 \\ 0.0025 \exp \left[14.2(\phi_{50} - 1) - 9.28(\phi_{50} - 1)^2 \right] & ; 0.95 \leq \phi_{50} \leq 1.65 \\ 0.0025 \phi_{50}^{14.2} & ; 0.95 < \phi_{50} \end{cases}$ $\tau_{50}^* = \frac{n_s^2}{(s-1)gD_{50sub}} \quad , \quad \phi_{50} = \frac{\tau_{50}^*}{\tau_{r,50}^*}$ $Q_b = \frac{W^* n_s^2 \rho_s}{(s-1)g}$	Desarrollado para ríos con lecho de grava.
Smart, (1984) (S-J)	$\Phi^* = 4 \left[\frac{D_{90}}{D_{30}} \right]^{-0.2} S^{0.6} c^* r^{*0.5} \left[r^* - r_{cj}^* \right]$ $\tau_{cj}^* = \tau_c^* \cos(\arctan S) \left[1 - \frac{S}{\tan \phi} \right]$ $\Phi^* = \frac{q_s}{D \sqrt{g \Delta D}}$	0.4% ≤ S ≤ 20% Diámetros > 0.4 mm
(Bathurst et al., (1987)	$\Phi^* = \frac{2.5 S^{3/2}}{(\Delta+1)D_{50} \sqrt{(g \Delta D_{50})}} (q - q_c)$ $\frac{q_c}{\sqrt{g D_{50}^3}} = 0.15 S^{-1.12} \quad \text{o} \quad \frac{q_c}{\sqrt{g D_{16s}^3}} = 0.21 S^{-1.12}$ $\Phi^* = \frac{q_s}{D \sqrt{g \Delta D}}$	0.4% ≤ S ≤ 4% 0.30 ≤ d/D ₈₄ ≤ 50
Meyer-Peter & Müller, (1948) (M-P-M)	$Q_b = 8 \gamma_s \left(g \left(\frac{\gamma_s - D_m^3}{\gamma_s - \gamma} \right) \right)^{0.5} \left[\left(\frac{n_s}{n} \right)^{1.5} \tau_{*0.047} \right]^{-1.5}$ $n_s = \frac{D_{90s}^{1/6}}{26}$	0.4 < D ₅₀ < 29mm

Dónde:

γ : Peso específico del agua (Kg f m⁻³).

D_m: Diámetro medio (m).

D_{90s}: Diámetro de la partícula del 90% de sedimento superficial.

D₅₀: Diámetro del 50% del material del lecho sub-superficial.

D₃₀: Diámetro del 30% del material del lecho sub-superficial.

D_{16s}: Diámetro del 16% del material del lecho superficial.

S: Pendiente del cauce (%).

D: Diámetro característico del lecho del cauce.

τ_* : Número adimensional de Shields.

n_s : Coeficiente de manning debido a la partícula.

n : Coeficiente de manning.

g : Aceleración debido a la gravedad (m2/s).

s : Relación entre peso específico del suelo y del agua $\gamma_s \gamma^{-1}$.

Δ : Corresponde a s-1.

III. Resultados y Discusión

Al comparar los volúmenes de sedimentos de fondo monitoreados en campo, con los estimados, se observó que las fórmulas empíricas sobre-estimaron los volúmenes monitoreados. La fórmula empírica cuyos resultados se acercaron más a los reales, fue la de Parker, Klingteman y McLean, formulas diseñadas para cauces con lechos gravosos.

Los resultados obtenidos, son válidos para los caudales del periodo 2008-2016, ya que, con caudales mayores a los monitoreados en este periodo, el resultado puede variar.

El presente estudio, demuestra que las fórmulas empíricas no siempre permiten obtener resultados acordes a la realidad de la zona de estudio y realza la importancia del monitoreo de sedimentos en las cuencas.

Para el análisis de los datos obtenidos, se separaron en 2 grupos, teniendo en cuenta la duración de cada evento de crecida que llenó con sedimentos el barraje Ronquillo. El "Grupo 1" (Figura 2) está conformado por eventos que duraron como máximo 90 minutos, y presentan una variación de caudales líquidos desde $3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ hasta los $20 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, mientras que el "Grupo 2" (Figura 3) está conformado por los eventos de crecida que duraron más de 90 minutos, conformado por caudales que varían desde $3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ hasta los $34 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

El coeficiente de proporcionalidad (V_e/V_m), corresponden al volumen de sedimento de fondo estimado con las fórmulas empíricas (V_e) entre el volumen de sedimento de fondo medido en campo (V_m).

Los coeficientes de proporcionalidad medios obtenidos para cada fórmula aplicada a ambos grupo, están representados por los la línea negra y valor en ella en cada diagrama de cajas, observándose que para las 4 fórmulas los coeficientes obtenidos son mayores a 1, lo cual nos indica que los valores estimados por cada una de las fórmulas están sobre estimando los volúmenes de sedimento acumulados observados.

Al realizar un ajuste potencial entre los valores estimados con las fórmulas empíricas observadas y con los valores medidos en campo, se obtuvo los resultados mostrados en la Figura 4.

El coeficiente "a" representa la disponibilidad de sedimentos en la cuenca, observando que en el caso de las formulas

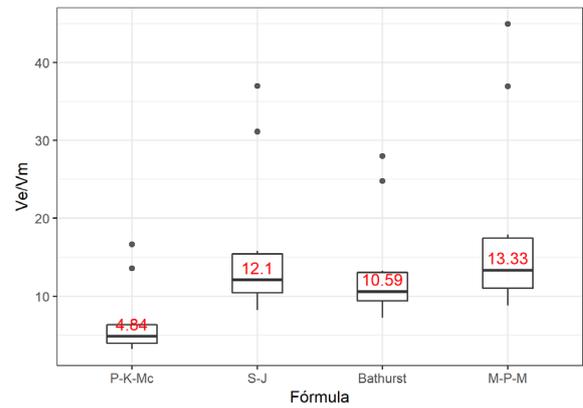


Figura 2. Coeficiente de proporcionalidad entre el volumen estimado (V_e) y el volumen medido en campo (V_m) correspondientes a los eventos que conforman el grupo 1.

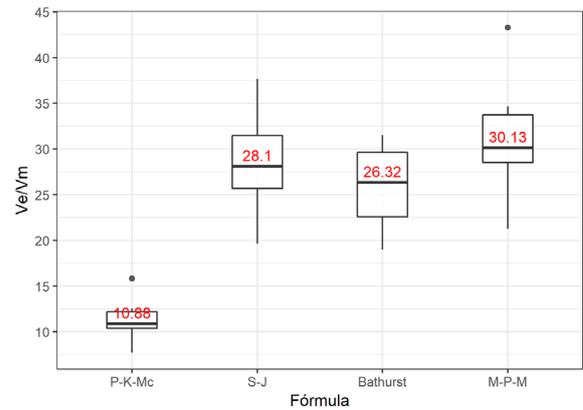
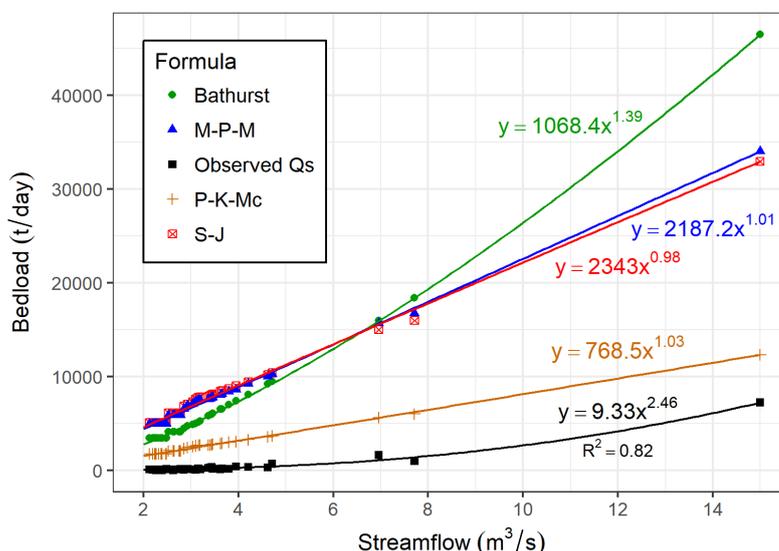


Figura 3. Coeficiente de proporcionalidad entre el volumen estimado (V_e) y el volumen medido en campo (V_m) correspondientes a los eventos que conforman el grupo 2.

empíricas ($a = 768.5$ hasta 2343) son mucho mayores que el observado ($a = 9.3$), en las formulas empíricas consideran mayor disponibilidad de sedimento que el real.

El exponent "b", representa la intensidad de las fuerzas erosivas, que según Iroumé (1990), varía desde 2 hasta 2.5, siendo el ultimo valor el valor que representa la intensidad más alta. En las formulas empíricas el valor de "b", varía entre 0.98 y 1.39, mientras que del observado es cercano es de 2.46. Este resultado claramente muestra que el río andino de montaña



muestra poderosas condiciones erosivas.

Figura 3. Curva de tendencias del sedimento de fondo observado y las tendencias de fondo estimadas utilizando las fórmulas empíricas mostradas en la tabla 1.

IV. Conclusiones

Las fórmulas empíricas utilizadas para estimar el transporte de sedimentos de fondo, sobre estiman los valores observados y según los datos observados, el río Ronquillo mostró una alta intensidad de fuerzas erosivas, las cuales pueden estar limitadas por la disponibilidad de sedimentos.

Es de gran importancia continuar con el monitoreo de los sedimentos en cuencas de montaña pues estas proveen de grandes volúmenes de agua a la costa peruana y a la llanura amazónica. El obtener datos reales permitirá entender la dinámica de la cuenca en estudio y por lo tanto tomar decisiones acertadas en el futuro.

V. Perspectivas/Recomendaciones

Se recomienda seguir monitoreando la cuenca Ronquillo para poder contar con información histórica de eventos extremos, con la finalidad de mejorar la fórmula con datos observados obtenida y lograr su mayor ajusten a la dinámica fluvial de los Andes.

Se recomienda implementar el monitoreo de sedimentos en la cuenca Ronquillo con un sistema indirecto que permita obtener mediciones y datos continuos de sedimentos de fondo y en suspensión.

VI. Contribución y/o impactos de la investigación

La presente investigación permitió aplicar una técnica de monitoreo de sedimentos utilizando las estructuras de la captación Ronquillo, obteniéndose las primeras mediciones reales en una cuenca de montaña andina; ello permitirá mejorar el dimensionamiento de la infraestructura hidráulica y para prevenir y/o mitigar las inundaciones en la ciudad de Cajamarca.

La municipalidad de Cajamarca cuenta ahora con la información del transporte de sedimentos de fondo, con lo cual podrá realizar planificaciones respecto a la limpieza de los cauces y calidad del agua captada.

VII. Colaboraciones interinstitucionales

MINAM: Instituto Geofísico del Perú (IGP).

Universidad Nacional de Cajamarca (UNC).

Universidad Nacional Agraria la Molina (UNALM).

Empresa prestadora de servicios de saneamiento de Cajamarca (SEDACAJ).

VIII. Publicación científica

Díaz, D., Morera, S.B., & Orrillo, J.D. High and extreme water discharger influences on bedload transport in a tropical mountain headwater catchment. 12th ISE 2018, Tokyo, Japan.

IX. Bibliografía

Bathurst, J. C., Graf, W. H., & Cao, H. H. (1987). Bed load discharge equations for steep mountain rivers. *Sediment Transport in Gravel-Bed Rivers*. John Wiley and Sons New York. 1987. p 453-491.

DIPRE-SIERD. (2018). Diagnóstico de la temporada de lluvias 2017 – 2018. Ministerio de Defensa - Instituto Nacional de Defensa Civil.

Instituto Nacional de Recursos Naturales – INRENA. (2007). Inventario de fuentes de agua superficial de la cuenca del Mashcon. Perú. Retrieved from http://www.ana.gob.pe/media/293513/fuentes_agua_superficial_mashcon.pdf.

Iroumé, A. (1990). Assessment of Runoff and Suspended Sediment Yield in a Partially Forested Catchment in Southern Chile. *Water Resources Research*, 26(11), 2637–2642. <https://doi.org/10.1029/WR026i011p02637>.

Meyer-Peter, E., & Müller, R. (1948). Formulas for bed-load transport. In IAHSR 2nd meeting, Stockholm, appendix 2. IAHR.

Parker, G., Klingeman, P. C., & McLean, D. G. (1982). Bedload and size distribution in paved gravel-bed streams. *Journal of the Hydraulics Division*, 108(4), 544–571.

Smart, G. M. (1984). Sediment transport formula for steep channels. *Journal of Hydraulic Engineering*, 110(3), 267–276.

IMPACTO ACUMULATIVO DEL CONTROL DE LA PRESIÓN ANTRÓPICA EN LOS CAMBIOS DE COBERTURA Y USO DE TIERRA (LUCC) EN LOS ANDES DEL NORTE DEL PERÚ: EL CASO DE LA CUENCA MASHCÓN

FERNANDO PRUDENCIO PAREDES¹; SERGIO MORERA JULCA¹

¹SUBDIRECCIÓN DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA E HIDRÓSFERA, INSTITUTO GEOFÍSICO DEL PERÚ, LIMA, PERÚ.

I. Introducción

Este estudio refiere al análisis del impacto de las actividades antrópicas en la dinámica del cambio de cobertura y uso de tierra (LUCC) en condiciones de montañas tropicales al norte de la cordillera de los Andes del Perú y región occidental de la cabecera de cuenca del Amazonas.

El principal desafío para el análisis del LUCC es lidiar con la naturaleza heterogénea de las cubiertas terrestres y condiciones meteorológicas que definen a los Andes noroccidentales del Perú (FAO, 2013). Por esa razón, los dispositivos de detección remota son las nuevas tecnologías disponibles para su monitoreo. Es así que desde 1972 a la actualidad, la misión aeroespacial Landsat se ha convertido en la principal fuente de datos multispectrales de resolución media (USGS, 2016a).

Para explicar el LUCC, es necesario identificar los factores que motivan esta dinámica. Algunos autores sugieren que existe un desplazamiento altitudinal ascendente de ciertos biomas de montaña debido al cambio climático (Peñuelas & Boada, 2003). Por otro lado, estudios como el de Tovar, Seijmonsbergen, & Duivenvoorden (2013), muestran, desde un panorama general, que estos cambios se deben principalmente a factores relacionados con la actividad extractivo-productiva en los distintos sectores económicos. Sin embargo, su investigación estuvo basada en un solo período extenso de tiempo, mas no evaluó la posibilidad de una variabilidad a escalas reducidas, que conduzcan a una mejor comprensión de la dinámica del LUCC en los últimos treinta años.

Entonces, la principal importancia de este trabajo radica en el análisis a escala de tiempo intradecadal (3-7 años) (Jensen & Cowen, 1999) para el cual se calcularon las medidas de cambio correspondientes. Es así que sus resultados contribuyen con un adecuado monitoreo del comportamiento del LUCC y el desplazamiento de las coberturas a lo largo del gradiente de elevación para el período 1987-2016. Identificando, además, los factores socioeconómicos que causaron dichas alteraciones.

II. Contexto nacional y técnico científico

Actualmente, el paisaje natural altoandino está bajo la presión de las actividades antrópicas. Los trabajos de Tovar et

al. (2013) y el Estudio Especializado de Cambio de Cobertura y Uso de Tierra (GRC, 2014) muestran considerables pérdidas de espacios naturales en la región Cajamarca - Perú. Sin embargo, estudios con un adecuado análisis y cuantificación de LUCC a escala de tiempo más detalladas son inexistentes para la cuenca del río Mashcón. Lo que deja como evidencia que a falta de estudios que respalden las causas principales de la dinámica LUCC en estas zonas, el deterioro de los servicios ecosistémicos que estos brindan son asociados, en algunos casos, con el "cambio climático" y no a otros factores aún más relevantes.

III. Datos y Métodos

Se emplearon siete escenas Landsat 5TM y 8OLI (path = 9, row = 65) captadas en 1987, 1991, 1996, 2000, 2007, 2013 y 2016 durante la estación seca (julio y agosto) para minimizar la cobertura de nubes. Estos productos (Tabla 1) fueron descargados del sitio web Earth Explorer (<https://earthexplorer.usgs.gov/>) y son de tipo L1T (corrección de terreno estándar). Adicionalmente, fue utilizado el modelo de elevación digital (DEM) ALOS PALSAR RTC de 12.5m de la Japan Aerospace Exploration Agency (ASF DAAC, 2015).

El preprocesamiento inició con el cálculo de la reflectividad aparente a partir de las ecuaciones y parámetros de calibración (Chander, Markham, Helder, & Ali, 2009 y USGS, 2016b). Se seleccionó el modelo Quick Atmosphere Correction (QuAC), del software ENVI 5.3 y propuesto por Bernstein (2012), con la finalidad de minimizar los efectos atmosféricos de absorción-dispersión de la energía para obtener los valores de reflectividad absoluta a nivel de superficie. Al final de esta etapa, fue necesario corregir topográficamente las imágenes para reducir el ruido espectral causado por las sombras, efecto de la interacción entre el ángulo de incidencia solar y el relieve, a través de las condiciones de iluminación modeladas a partir del DEM. El método de Civco (1989) fue la mejor opción debido a que la reflectividad de cada pixel no es directamente multiplicada por un factor de corrección, tan solo añade un sesgo positivo o negativo según las condiciones de iluminación al momento de la captura de la escena.

La distribución espacial de los tipos de coberturas y usos de tierras, en la cuenca Maschón, es de naturaleza heterogénea. Por esta razón, se adoptó un sistema de clasificación diseñado para el análisis de grupos de píxeles espectralmente

Tabla 1 | Lista de escenas Landsat y DEM usadas en el proyecto

Fecha	Sensor	Resolución Espacial	Resolución Espectral	Resolución Radiométrica
10 / 08 / 1987	Thematic Mapper (TM)	30 metros	6 bandas (Visible, NIR, SWIR)	8 bits
04 / 07 / 1991	Thematic Mapper (TM)	30 metros	6 bandas (Visible, NIR, SWIR)	8 bits
17 / 07 / 1996	Thematic Mapper (TM)	30 metros	6 bandas (Visible, NIR, SWIR)	8 bits
28 / 07 / 2000	Thematic Mapper (TM)	30 metros	6 bandas (Visible, NIR, SWIR)	8 bits
01 / 08 / 2007	Thematic Mapper (TM)	30 metros	6 bandas (Visible, NIR, SWIR)	8 bits
16 / 07 / 2013	Operational Land Imager (OLI)	30 metros	7 bandas (Coastal Blue, Visible, NIR, SWIR)	16 bits
24 / 07 / 2016	Operational Land Imager (OLI)	30 metros	7 bandas (Coastal Blue, Visible, NIR, SWIR)	16 bits
MOSAICO 2011	ALOS-1 PALSAR	12.5 metros	-	-

homogéneos llamados objetos. Estos objetos fueron el resultado de la segmentación espectral (escale = 25, merge = 70) (Jin, 2012) de cada imágenes Landsat a través del software ENVI 5.3.

Previo a la clasificación, la cuenca fue caracterizada mediante 297 muestras adquiridas en las campañas de campo (septiembre de 2016) y 120 muestras seleccionadas a partir del mosaico de imágenes de alta resolución Google Earth Pro. Ambos conjuntos de datos estuvieron distribuidos bajo el método de muestreo sistemático no alineado, además de ser agrupadas en muestras de entrenamiento (70%) y de validación (30%).

La metodología estuvo basada en el protocolo "Análisis de las dinámicas de cambio de cobertura de la tierra en la Comunidad Andina" (MINAM, 2014). Donde las variables predictoras usadas fueron: (1) bandas espectrales, (2) transformación espectral Tasseled Cap (Baig, Zhang, Shuai, & Tong, 2014; Crist, 1985) a través de los índices de brillo, verdor y humedad, (3) índice de vegetación diferencia normalizada (NDVI) (Rouse, Hass, Schell, & Deering, 1974), (4) modelo de elevación digital ALOS PALSAR RTC (ASF DAAC, 2015) y el (5) modelo de pendientes.

Random Forest fue el algoritmo de aprendizaje automático seleccionado para la asignación categórica de cada objeto en las imágenes. En la etapa de validación, el modelo buscó relaciones lineales y no lineales entre las variables predictoras a lo largo de los 500 árboles de decisión construidos en el proceso de clasificación de cada imagen. Los resultados se sometieron a pruebas de confianza como las matrices de confusión (Congalton, 1991) y el índice Kappa (Cohen, 1960) como indicador estadístico. Finalmente, los objetos asignados incorrectamente se corrigieron durante la edición vectorial. Este último paso se limitó a la unidad mínima de mapeo (UMM) de 0.5 hectáreas.

El análisis de LUCC se basó en lo siguiente: (1) Tabulaciones cruzadas de LUCC, (2) cambio porcentual total (PCT) (Ecuación 1) y (3) la tasa de cambio anual (TCA) (Ecuación 2). Estos fueron calculados con la finalidad de analizar nuestros resultados y compararlos con otros estudios.

$$PCT = \frac{S_2 - S_1}{S_1} \times 100 \quad \text{Ecuación (1)}$$

$$TCA = \frac{1}{t_2 - t_1} \times \ln \left(\frac{S_2}{S_1} \right) \quad \text{Ecuación (2)}$$

El PCT es un indicador que refiere al cambio total, en porcentaje, respecto al área de estudio para los períodos analizados. La TCA se calcula a partir de la ecuación derivada de la ley del interés compuesta, propuesta por Puañoavaud (2003), ya que no subestima los valores altos y acelerados. Asimismo, las tabulaciones cruzadas de LUCC (Pontius, Shusas, & McEachern, 2004) se construyeron para distinguir la transición entre las diferentes clases identificadas y detectar patrones reales de LUCC. Además, la cuenca fue subdividida en rangos de 200 metros para analizar las posibles tendencias de cambios a lo largo del gradiente de elevación.

IV. Resultados y Discusión

Los resultados de las clasificaciones (Figura 1) serán descritos teniendo en cuenta que todo valor numérico expresado en porcentaje, excepto la PCT, están referidos al área total de la cuenca Mashcón.

El tipo de cobertura más extenso de la cuenca, en todo el período analizado, es la vegetación herbácea (>37%) (Figura 2). Su PCT entre 1987 y 2016 es de -47.7% a una TCA del -2.2%/año, la tasa negativa más agresiva detectada respecto al grupo de áreas naturales (Tabla 2).

Por otro lado, las coberturas como la Jalca, matorrales, bosques de montaña y cuerpos de agua representan juntos menos del 4.5% en todo el período analizado, (Figura 2). La Jalca, ubicada por encima de los 3000 m, se concentra entre los 3400 y 3800m; para el año 2016 tan solo representa el 0.76%. Los bosques de montaña y matorrales se encuentran principalmente en el rango de los 3000 y 3400m. Finalmente, los cuerpos de agua representados principalmente por la laguna Chamis, se ubican entre los 3200 y 3400m. De estas coberturas naturales, la pérdida más significativa corresponde a la Jalca (PCT=-24.2%, TCA=-0.96%/año) y bosques de montaña (PCT=-24.5%, TCA=-0.97%/año) para el período 1987-2016 (Tabla 2).

Asimismo, la agricultura representa el 34,1% (2016) del área de estudio (Figura 2). Su área más grande para ese año se ubicó entre 3000 y 3200 m (8.1%). Esto representa un aumento total en la cobertura del 20.5% para un TCA de +3.17% año (Tabla 2 and Figura 2). Los mayores incrementos ocurrieron para intervalos entre 3000 y 3600 m. En este rango, las nuevas áreas de tierra agrícola totalizan el 17.6% (1987-2016), siendo el intervalo entre los 3200-3400m con el porcentaje más alto

(6.3%). Sin embargo, hubo una pérdida del 0.9% del área total para las elevaciones entre 2600 y 2800m, la mayoría de las cuales ocurrieron entre 2007 y 2013 (0.7%).

Los pastos cubren el 13.7% (2016) de la cuenca, alcanzando su máxima extensión en el 2013 (15.7%) (Figura 2). En todos los años mapeados, está claro que el mayor porcentaje de su área de tierra fue entre 2600 y 2800m (en el valle de la cuenca). Los pastizales mostraron un aumento total de 5.5% a una tasa de +1.8% / año para el período 1987-2016, con el mayor crecimiento (2.6%) de 2007 a 2013 para una elevación de 3400-3600m.

Las áreas urbanas, ubicadas en el valle del río (2600-2800m) representaron el 4.1% del área estudiada (2016) (Figura 2), con un aumento total de 2.7% a una tasa de crecimiento de +3.7%/año para el período 1987-2016. Además, las áreas urbanas se expandieron (0.2%) en elevaciones entre 2800 y 3000m.

El área de tierra utilizada para la minería es del 3.9% del total (2016) (Figura 2), de la cual el 2.2% se concentra en el norte de la cuenca (3800-4200m). Esto representa un aumento total de 3.85% (1987-2016) a una tasa de crecimiento de +15%/año, principalmente en intervalos entre 3400 y 4200m (1991-2016).

La extensión de las plantaciones de árboles es de 3.1% (2016) (Figura 2), concentrada en elevaciones entre 3400 y 3800m (2.0%). El mayor incremento se produjo en el período 2013-2016 (0,6%) en elevaciones de 3400 a 3600 m.

Dentro de la dinámica de LUCC, se destacan que 7298ha (23.4% del área total de la cuenca) de pastizales se trasladaron a la clase de agricultura, 1483ha a pastos, 1145ha a coberturas relacionadas con la actividad minera y 861ha a plantaciones forestales entre 1987 y 2016. Siendo el rango de 3400-3600m la ubicación altitudinal del 27.6% del total de estos cambios. Y de esto, la transición herbazal-agricultura se ubica, en su mayoría, entre 3000 y 3600m a lo largo de toda la extensión de la cuenca del río Mashcón, mientras que la transición herbazal-minera se ubica principalmente entre 3800-4200m al norte de la ciudad de Cajamarca, donde la actividad extractiva es realizada por la empresa minera ti. No hay regeneración significativa (<0,4% del área de estudio) de esta cubierta natural a lo largo del gradiente de elevación. Además, es necesario mencionar que el 58.5% de la cobertura total perdida entre los bosques montanos, de Jalca y de matorral se reemplazó por la cobertura agrícola.

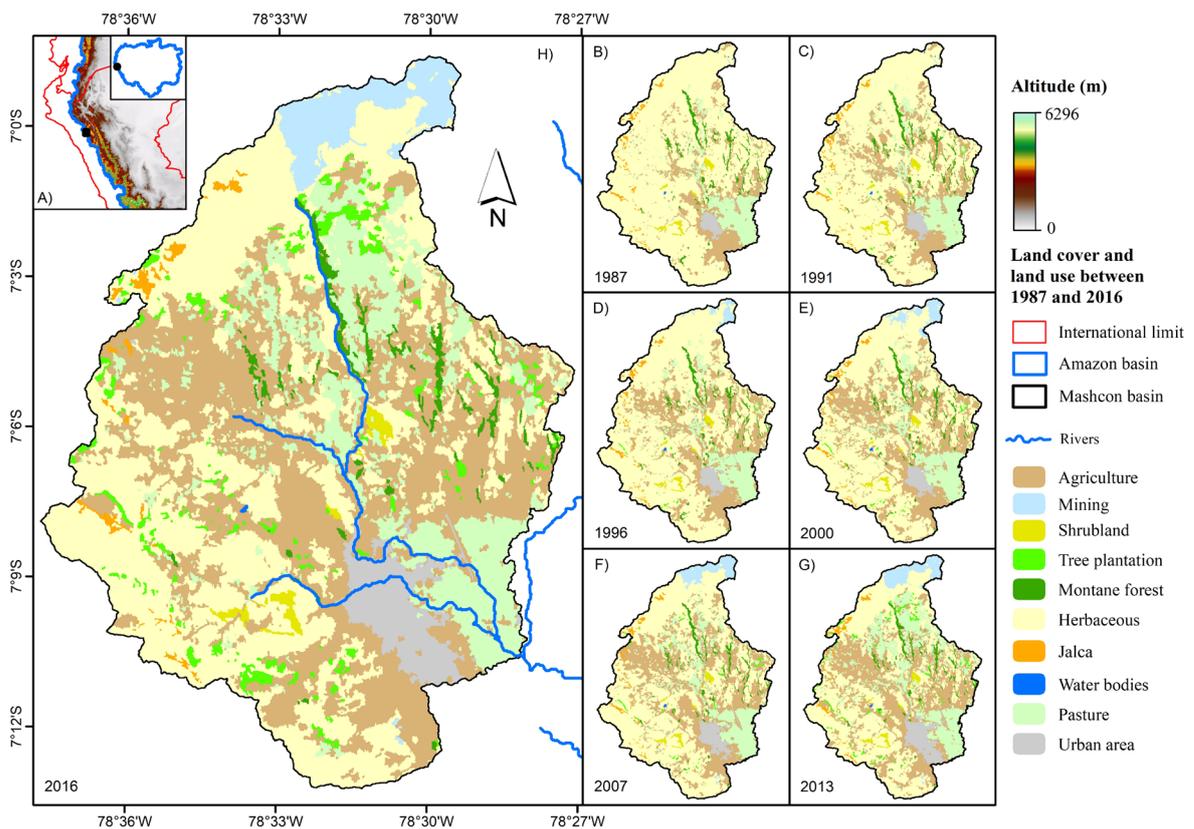


Figura 1 | Mapas de cobertura y uso de tierra en la cuenca Mashcón.

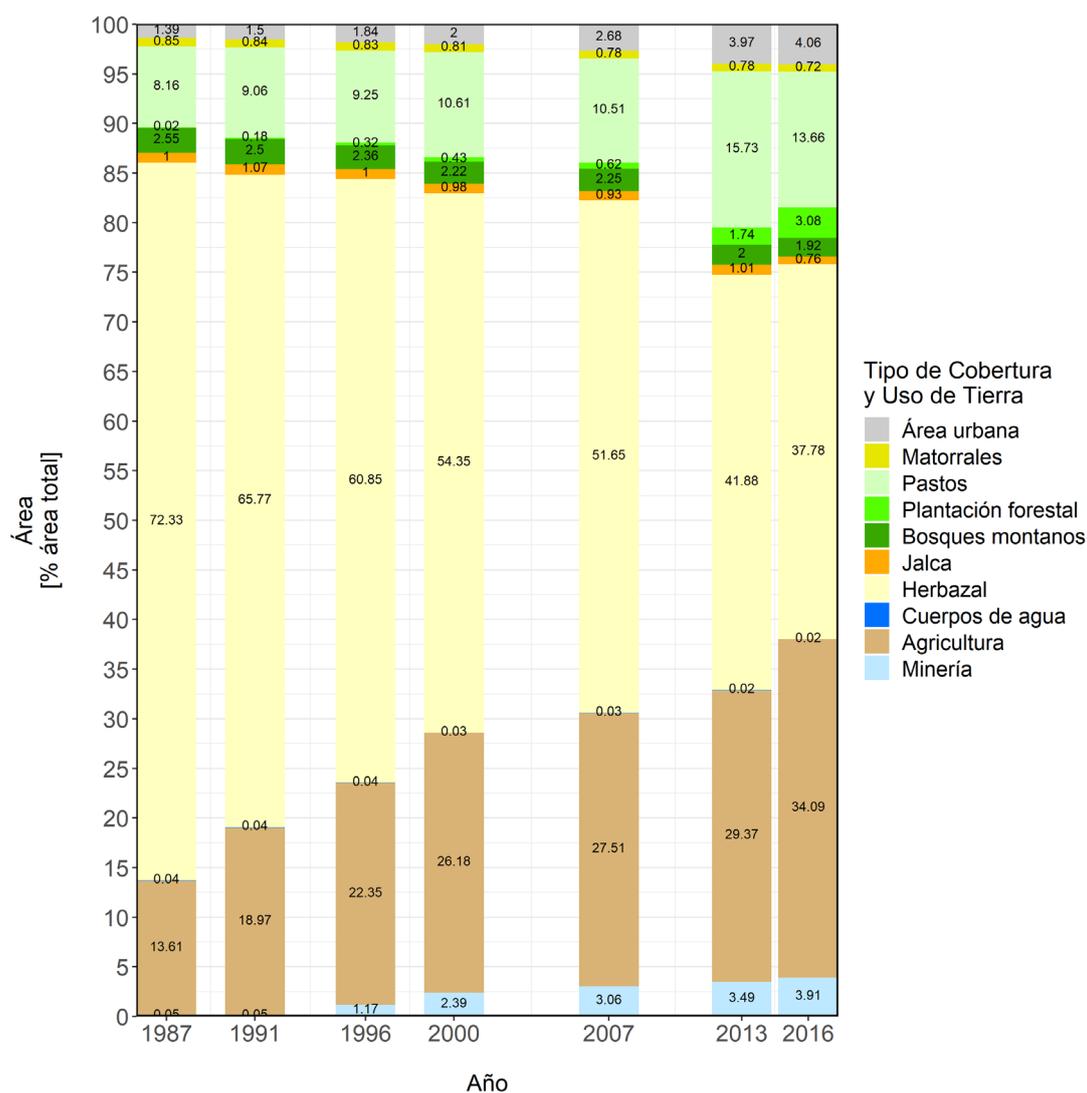


Figura 2 | Cambio de cobertura y uso de tierra.

Tabla 2 | Tasa de cambio anual por tipo de cobertura y uso e tierra para cada intervalo de años analizados

		Tasa de Cambio Anual (%/año)													
Cobertura y Uso de Tierra		1987-1991		1991-1996		1996-2000		2000-2007		2007-2013		2013-2016		1987-2016	
Áreas Naturales	Herbazal	-2.38		-1.56		-2.83		-0.73		-3.50		-3.44		-2.24	
	Bosques montanos	-0.44		-1.19		-1.56		0.19		-1.92		-1.34		-0.97	
	Matorrales	-0.08	-2.22	-0.34	-1.53	-0.69	-2.71	-0.48	-0.69	0.08	-3.28	-2.83	-3.46	-0.56	-2.15
	Cuerpos de agua	2.91		-2.32		-2.85		-1.84		-3.04		-12.17		-2.72	
	Jalca	1.64		-1.42		-0.55		-0.77		1.51		-9.60		-0.96	
Áreas No Naturales	Agricultura	8.30		3.28		3.95		0.71		1.09		4.97		3.17	
	Plantación forestal	58.35		10.89		7.67		5.08		17.23		19.06		17.75	
	Minería	1.29	6.20	62.06	3.20	17.92	4.38	3.48	0.91	2.19	3.37	3.81	2.66	15.04	3.20
	Área urbana	1.90		4.05		2.09		4.18		6.56		0.77		3.69	
	Pasture	2.61		0.42		3.44		-0.15		6.73		-4.71		1.78	

V. Conclusiones

La reducción del ruido espectral causado por las condiciones de iluminación, el uso de las covariables espectrales (NDVI y Tasseled Cap) y no espectrales (elevación y pendiente), y la contribución de la homogeneización espectral mediante la segmentación de imágenes en unidades mínimas conocidas como objetos, realizado en conjunto con la metodología empleada, es el más adecuado para entornos de cobertura heterogénea en áreas de alta montaña, consolidado en una separación óptima de las distintas categorías identificadas.

El monitoreo de la dinámica de LUCC en una escala intradecadal, como las presentadas en este estudio, debe ser incentivado como una herramienta de gestión para la identificación de patrones de distribución de áreas involucradas en actividades extractivas y productivas para diseñar estrategias de conservación. En nuestra área de estudio, estas actividades resultaron en una pérdida notable de la cubierta natural de la tierra entre 1987 y 2016, con grandes pérdidas de área de pastos y en menor medida de Jalca, matorrales y bosques de montaña. Estas pérdidas ocurrieron a un ritmo diferente en cada uno de los períodos de tiempo analizados. La mayoría de ellos involucraron el reemplazo de pastos con áreas agrícolas, mostrando un desplazamiento hacia arriba en esta actividad. No obstante, los mayores cambios relativos (TCA) involucran plantaciones forestales y minería.

Especialmente en los ecosistemas altoandinos, la información sobre la pérdida de la cobertura del suelo y sus cambios a lo largo del gradiente de elevación podría ser útil para la toma de decisiones. Podría sugerir priorizar no solo la conservación sino la expansión controlada de coberturas relacionadas con la actividad humana que tendrían un menor impacto en las áreas naturales. Creemos que el proyecto será útil para los estudios relacionados con el impacto de LUCC en la regulación del ciclo del agua y que se puede replicar en otras áreas con condiciones similares.

VI. Bibliografía

ASF DAAC. (2015). ALOS PALSAR Radiometric Terrain Corrected low resolution. Includes Material © JAXA/METI 2007. <https://doi.org/10.5067/JBYK3J6HFSVF>

Baig, M. H. A., Zhang, L., Shuai, T., & Tong, Q. (2014). Derivation of a tasseled cap transformation based on Landsat 8 at-satellite reflectance. *Remote Sensing Letters*, 5(5), 423–431. <https://doi.org/10.1080/2150704X.2014.915434>

Bernstein, L., Jin, X., Gregor, B., & M., S. (2012). Quick atmospheric correction code: algorithm description and recent upgrades. *Optical Engineering*, 51(11), 111719. <https://doi.org/10.1117/1.OE.51.11.111719>

Chander, G., Markham, B. L., Helder, D. L., & Ali, E.-. (2009). Remote Sensing of Environment Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. *Remote Sensing of Environment*, 113(5), 893–903. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.01.007>

Civco, D. L. (1989). Reduction of the Topographic Effect in Lands At Thematic Mapper Imagery. *Photogrammetric Engineering Remote Sensing*, 55, 1303–1309.

Cohen, J. (1960). A Coefficient of Agreement for Nominal Scales. *Educational and Psychological Measurement*, 20(1), 37–46. <https://doi.org/10.1177/001316446002000104>

Congalton, R. G. (1991). A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*, 37(1), 35–46. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(91\)90048-B](https://doi.org/10.1016/0034-4257(91)90048-B)

Crist, E. P. (1985). A TM Tasseled Cap equivalent transformation for reflectance factor data. *Remote Sensing of Environment*, 17(3), 301–306. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(85\)90102-6](https://doi.org/10.1016/0034-4257(85)90102-6)

FAO. (2013). Diagnóstico de los Ecosistemas de Montaña en el Perú. Proyecto de Cooperación Técnica Regional (TCP/RLA/3301): Fortalecimiento de La Gestión Participativa Para El Desarrollo Sostenible de Los Andes. Elaborado Por Mario Tapia [in Spanish].

GRC. (2014). Estudio Especializado: Análisis de los cambios de la cobertura y uso de la tierra. Gobierno Regional de Cajamarca. Elaborado Por Germán Alcátara [in Spanish].

Jensen, J. R., & Cowen, D. C. (1999). Remote Sensing of Urban / Suburban Infrastructure and Socio-Economic Attributes, 65(5), 611–622.

Jin, X. (2012). Segmentation-based image processing system. U.S. Patent 8,260,048, filed Nov. 14, 2007, and issued Sept. 4, 2012.

MINAM. (2014). Protocolo. Analisis de las dinamicas de cambio de cobertura de la tierra en la comunidad andina. Ministerio de Ambiente del Perú.

Peñuelas, J., & Boada, M. (2003). A global change-induced biome shift in the Montseny mountains (NE Spain). *Global Change Biology*, 9(2), 131–140.

Pontius, R. G., Shusas, E., & McEachern, M. (2004). Detecting important categorical land changes while accounting for persistence. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 101(2–3), 251–268. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2003.09.008>

Puyravaud, J. P. (2003). Standardizing the calculation of the annual rate of deforestation. *Forest Ecology and Management*, 177(1–3), 593–596. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(02\)00335-3](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(02)00335-3)

Rouse, J. W., Hass, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. W. (1974). Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. Third Earth Resources Technology Satellite (ERTS) Symposium, 1, 309–317. <https://doi.org/citeulike-article-id:12009708>

Tovar, C., Seijmonsbergen, A. C., & Duivenvoorden, J. F. (2013). Monitoring land use and land cover change in mountain regions: An example in the Jalca grasslands of the Peruvian Andes. *Landscape and Urban Planning*, 112(1), 40–49. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2012.12.003>

USGS. (2016a). Landsat — Earth Observation Satellites Landsat Missions : Imaging the Earth Since 1972. United States Geological Survey, 1(1).

USGS. (2016b). Landsat 8 (L8) data users handbook. Department of the Interior U.S. Geological Survey (2.0).

VII. Perspectivas/Recomendaciones

La base de datos ayudará en el modelado hidrológico a escalas de tiempo intradecadal.

Su análisis respecto a la relación entre la conductividad hidráulica y el caudal de flujo base, se podrá estimar el porcentaje de aporte de agua subterránea por cada cobertura.

Con esta información, el gobierno regional y/o provincial de Cajamarca estará en la capacidad de promover la conservación de ecosistemas vulnerables en la cabecera de cuenca.

VIII. Contribución y/o impactos de la investigación

Social: población (nombres distritos, departamentos, etc.), número de habitantes. ¿A nivel de país cual es la contribución?

Los resultados contribuirán socialmente en la toma de conciencia por parte de la población urbano-rural cajamarquina para la conservación de áreas vulnerables ofertantes de servicios ecosistémicos.

A partir de la información generada, se tomarán decisiones de carácter de gestión de cuencas tanto a nivel local como regional, así como identificar las zonas prioritarias para la conservación e incluirlo dentro de la elaboración del Plan de Ordenamiento Territorial (POT).

Tecnológico/científico

El aporte científico de este estudio es el de poner a disponibilidad de la comunidad científica una alternativa metodológica para el mapeo de cobertura en zonas altoandinas. Además de contribuir con información intradecadal en los últimos treinta años, que contrastado con información como los datos hidrológicos, podríamos analizar el impacto del cambio de cobertura en la regulación del recurso hídrico. O que la información generada sirva como imput para la corrida de modelos hidrológicos y/o atmosféricos en investigaciones en el área de trabajo.

IX. Colaboraciones interinstitucionales

MINAM: Instituto Geofísico del Perú (IGP).

MINAM: Instituto Geofísico del Perú (IGP).

MINEDU: Fondo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico (FONDECYT).

Empresa Prestadora de Servicios de Saneamiento de Cajamarca (EPS SEDACAJ S.A.).

Universidad Nacional Mayor de San Marcos (UNMSM).

X. Publicación científica

Prudencio F.J., Morera, S.B. & Alcántara A. (In process). Cumulative impacts of anthropic pressure control on Land Use/Land Cover Change (LUCC) in the upper Andes mountain: The case of the Mashcon catchment. *Frontiers*.

CAPACIDAD DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS DE LADERA POR EROSIÓN HÍDRICA EN ZONAS DE FUERTE Y BAJA EROSIÓN EN LA CUENCA RONQUILLO

MICHAEL SÁNCHEZ MUÑOZ^{1,2,3}; SERGIO MORERA JULCA^{1,2,3}

¹SUBDIRECCIÓN DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA E HIDRÓSFERA, INSTITUTO GEOFÍSICO DEL PERÚ, LIMA, PERÚ.

²UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA

³UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

I. Contexto nacional y técnico científico

Problemática

Krois (2016) determinó que las cuencas que rodean la ciudad de Cajamarca se ven afectadas por la degradación de la tierra y la erosión del suelo. Ambos afectan directamente las tasas de infiltración y la capacidad de almacenamiento de agua, incrementando la escorrentía superficial y en consecuencia incrementa la erosión del suelo; el cual es transportada durante la temporada de lluvias (Octubre-Abril).

La erosión hídrica es una amenaza ambiental global (Angima et al., 2003) que reduce la productividad de todos los sistemas teniendo efectos in-situ y ex-situ (Erkossa et al., 2015). El efecto directo en el sitio está relacionado con la productividad agronómica restringiendo la demanda de productos agrícolas, pérdida de nutrientes y resistencia del suelo. (Lal, 1998). El efecto indirecto está relacionado con el sistema hídrico, propiedades fisicoquímicas, turbidez, densidad (Southgate et al., 1990); además de la rápida sedimentación de numerosos reservorios construidos en las últimas décadas (Ben et al., 2016).

Durante el desarrollo del presente estudio se identificó una ladera extensa de más de 3km² de extensión que debido a su

formación geológica, formación Chulec es altamente erodable y sería una de los principales causantes de los deslizamientos, no obstante, en las últimas décadas el cambio del uso del suelo y el cambio climático contribuyen al movimiento/deslizamiento de la ladera Ronquillo. La presente investigación estimó la capacidad del transporte de sedimentos en zonas de fuerte y baja erosión, bajo diferentes eventos de precipitación; así como diferentes usos de suelos en la cuenca Ronquillo.

II. Datos y Métodos

El enfoque utilizado en esta investigación fue reconocer áreas altamente erosionadas y apenas erosionadas mediante un análisis RUSLE (Renard, 1997), ayuda basada en estudios previos (Furchner, 2010; Krois, 2016; Krois et al., 2013; Krois & Schulte, 2014) y salidas de campo. Se ubicaron dos áreas experimentales: "Majadapampa", un área apenas erosionada, y "Ronquillo Alto", un área altamente erosionada (Fig. 1). Se instalaron parcelas experimentales de 1 m², 5 en Majadapampa y 8 en Ronquillo Alto (Tabla 1); estas permitieron cuantificar de manera objetiva la eficiencia de los diferentes usos del suelo y los diferentes factores que intervienen en la erosión (Somarriba et al., 2005).

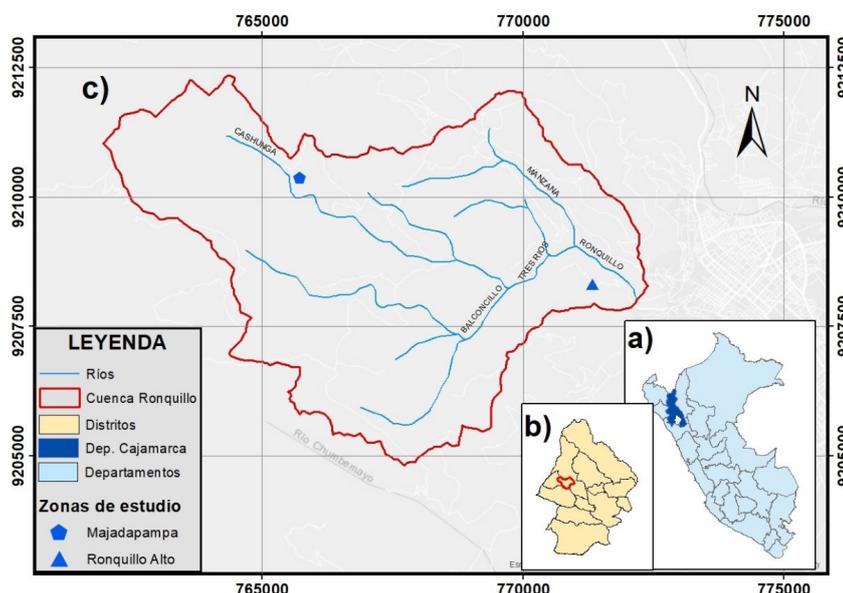


Fig. 1 Ubicación de la cuenca Ronquillo.

Se tomaron muestras de sedimento después de cada evento de lluvia que fue monitoreado por una estación pluviométrica instalada en cada área seleccionada. Luego, los volúmenes de muestra de suelo se recolectaron y se transfirieron a botellas de polietileno para su posterior análisis de laboratorio.

Las muestras recolectadas se tamizaron con un tamiz N° 230 que separa sedimentos gruesos y finos. Luego, se filtraron con la ayuda de una bomba de succión. Finalmente, la muestra se seca y se toma su peso para los análisis e interpretaciones.

Tabla 1 Resumen de trampas instaladas en cada zona de estudio

Trampa	Lugar	Uso	Pendiente (°)
TM1	Majadapampa	Avena	7
TM2	Majadapampa	Rumex spp.	27
TM3	Majadapampa	Olluco	18
TM4	Majadapampa	Pino	16
TM5	Majadapampa	Paja	26
TR1	Ronquillo alto	Desnudo	38
TR2	Ronquillo alto	Desnudo	22
TR3	Ronquillo alto	Aliso	23
TR4	Ronquillo alto	Ciprés	23
TR5	Ronquillo alto	Cárcava	35
TR6	Ronquillo alto	Cebada	18
TR7	Ronquillo alto	Chacra (sin cultivo)	25
TR8	Ronquillo alto	Pedregoso	28

III. Resultados y Discusión

En la Tabla 2 se presentan las ecuaciones que gobiernan la capacidad de transporte de sedimentos en función a la precipitación promedio para cada zona. Para Majadapampa el coeficiente de determinación máximo es 0.54 (Fig. 2a), esto indica que existen otros factores que tienen una mayor influencia en la capacidad de transporte de sedimentos. Por otro lado, para Ronquillo Alto el coeficiente de determinación es alto, hasta 0.87 (Fig. 2b) lo que implica que las tasas de erosión están estrechamente relacionadas con las precipitaciones de la zona generando muchas veces los deslizamientos.

Las líneas de tendencia fueron ajustadas de tal manera que se usaron tendencias lineales, potenciales y polinómicas.

Tabla 2 Capacidad de transporte de sedimentos vs precipitación promedio

Trampa	Uso	Ecuación	R ²
TM1	Avena	$T_s = 0.0025 P^{1.8136}$	0.53
TM2	Rumex spp.	$T_s = 0.1523 P - 0.363$	0.35
TM3	Olluco	$T_s = 0.2547 P^{1.5212}$	0.41
TM4	Pino	$T_s = 0.1943 P - 0.7156$	0.36
TM5	Paja	$T_s = 0.0058 P^{1.8664}$	0.54
TR1	Desnudo 22°	$T_s = 0.0949 P^{2.1109}$	0.68
TR2	Desnudo 38°	$T_s = 0.0946 P^{2.0166}$	0.58
TR3	Aliso	$T_s = 0.0127 P^{1.7851}$	0.73
TR4	Ciprés	$T_s = 0.014 P^2 + 0.3986 P - 0.9819$	0.75
TR5	Cárcava	$T_s = 5.2798 P - 18.501$	0.61
TR6	Cebada	$T_s = 0.094 P^2 - 1.4661 P + 7.7893$	0.87
TR7	Chacra (sin cultivo)	$T_s = 0.2917 P^2 - 2.1222 P + 10.669$	0.67
TR8	Pedregoso	$T_s = 2.7345 P - 1.4678$	0.62

Donde: T_s es la capacidad de transporte de sedimentos y P es la precipitación promedio

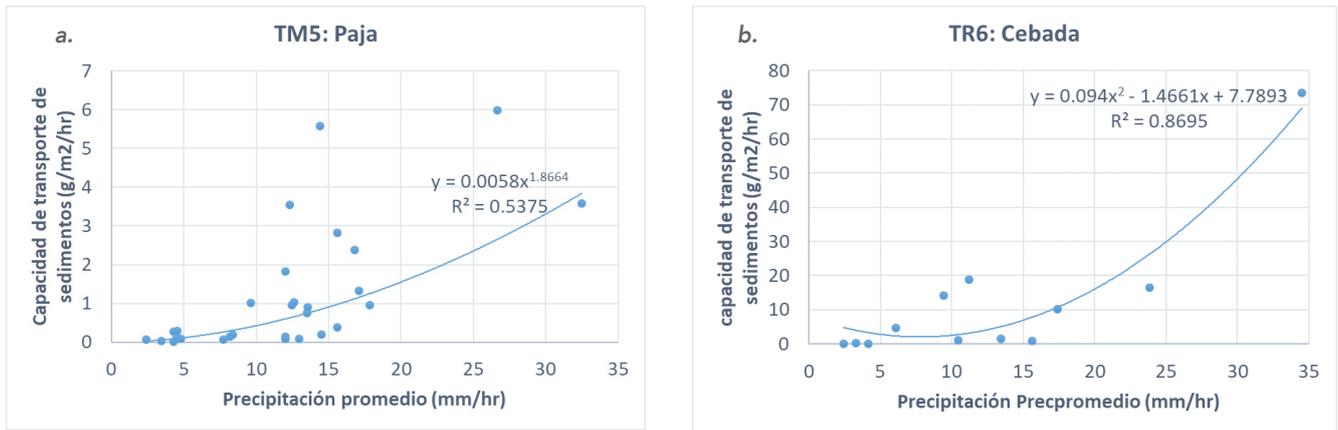


Fig. 2 Capacidad de transporte de sedimentos vs precipitación promedio

Para determinar la influencia de la cobertura vegetal en la capacidad de transporte de sedimentos se seleccionaron las trampas con mayores variaciones de cobertura vegetal de cada zona (Fig. 3).

Se determinó que la cobertura vegetal en ambas zonas disminuye considerablemente la concentración de sedimentos de acuerdo a las diferentes intensidades de precipitación, hasta 4 veces menos para intensidades bajas (menores a 10mm/hr) y 6 veces en intensidades altas (mayores a 10 mm/hr) (Fig. 3).

La gradiente del transporte de sedimentos disminuye a medida que aumenta la cobertura vegetal y es uno de los factores más influyentes para el control del transporte de sedimentos.

La zona Ronquillo Alto presenta una cobertura vegetal pobre lo que implica una mayor tasa de erosión en la parte baja de la cuenca conjuntamente con las precipitaciones altas de la zona.

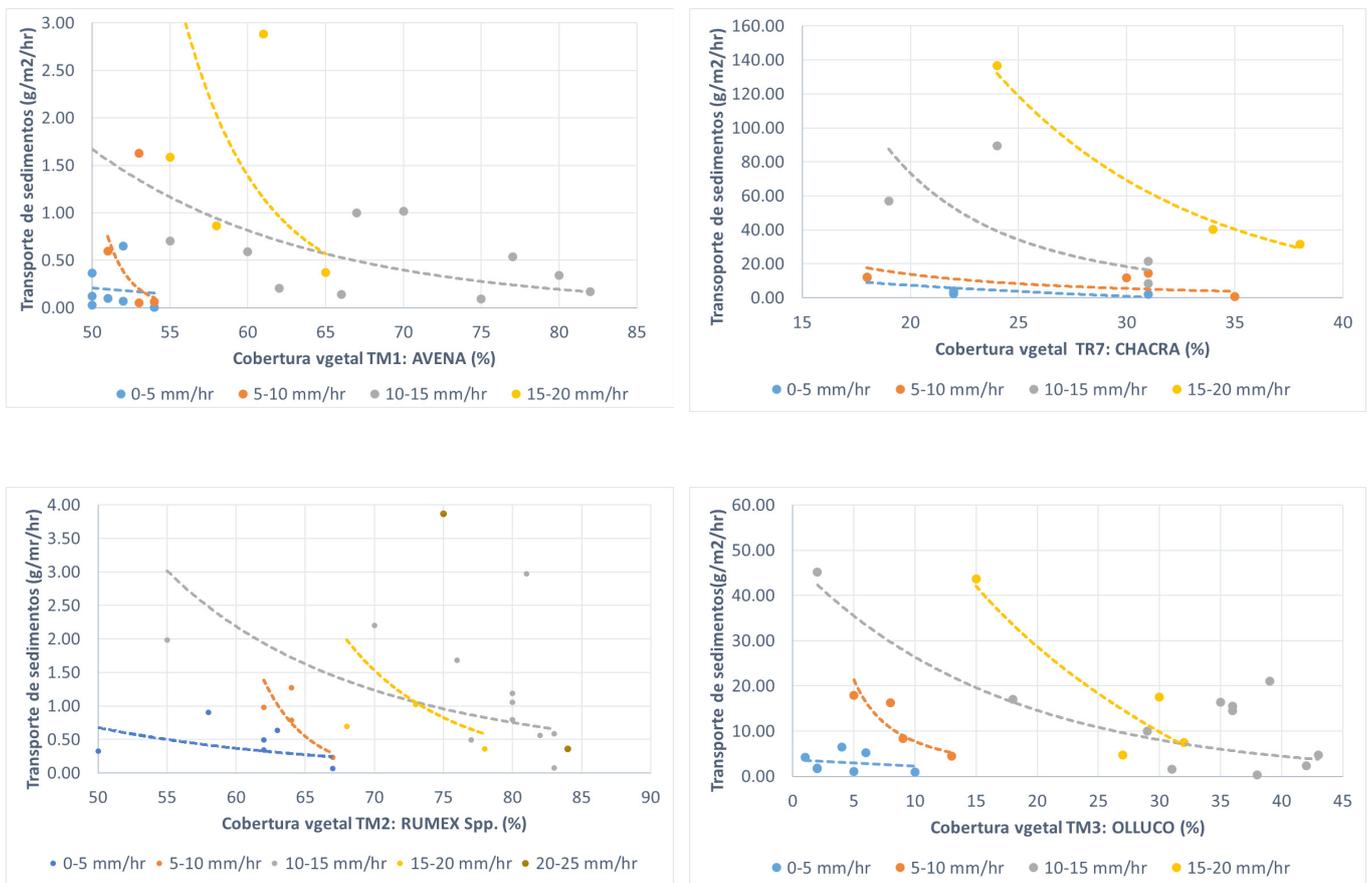


Fig. 3 Capacidad de transporte de sedimentos vs cobertura vegetal para Majadapampa y Ronquillo Alto

IV. Conclusiones

La hidrología de la cuenca Ronquillo es bastante diversa ya que para la zona de Majadapampa las precipitaciones son más prolongadas con intensidades máximas bajas; mientras que para la zona de Ronquillo alto las precipitaciones son más cortas y de intensidades altas. Los efectos de estas características de precipitación de cada zona son determinantes para la capacidad de transporte de sedimentos e incluso el transporte de grandes masas de suelo erosionado debido a las características geológicas.

La zona de Majadapampa presenta un relieve suave con una pendiente promedio de 19°; mientras que, la zona de Ronquillo alto presenta un relieve más accidentado con una pendiente promedio de 28° lo que contribuye a mayores tasas de erosión. Por otro lado, en Majadapampa hay mayor presencia de cobertura vegetal, un promedio que supera el 70% donde sus valores más bajos corresponden a la actividad antrópica como es la trampa del Olluco. En Ronquillo alto no supera el 40% de la cobertura vegetal. Estas características son, al igual que el comportamiento de la precipitación y pendiente factores que determinan la capacidad de transporte de sedimentos y la población suele temer por los grandes deslizamientos atribuyendo a la "Falla geológica".

La capacidad de transporte de sedimentos aumenta con forme aumenta la intensidad máxima, es decir hay una relación directa de la intensidad máxima y la capacidad de transporte de sedimentos. Por otro lado, hay eventos atípicos que necesitan un mayor análisis del porqué en precipitaciones promedio y precipitaciones máximas bajas tienen una capacidad de transporte de sedimentos alta. Según las observaciones realizadas la humedad del terreno, el índice de conectividad de sedimentos, las gotas de lluvia, la velocidad de las gotas, entre otros factores podrían jugar un papel importante en los valores atípicos y obtener una mejor interpretación.

V. Perspectivas/Recomendaciones

A raíz de la presente investigación han surgido diversas dudas de cuál es el comportamiento del transporte de sedimentos frente a la dinámica de la gota de lluvia que cae en la superficie del suelo, la humedad del suelo; también cuál es el efecto y evolución del índice de conectividad de sedimentos a lo largo del tiempo con las precipitaciones extremas.

Aún es necesario seguir analizando los comportamientos del transporte de sedimentos para tener una mejor validación de los estudios realizados.

VI. Contribución y/o impactos de la investigación

Muchas estructuras como los reservorios son depósitos de agua para la producción de electricidad u otras actividades, pero su vida útil se ve afectada por la erosión de suelo generando costes de mantenimiento e incluso dejando obsoletas gran parte de estas obras hidráulicas.

La captación Ronquillo se ve afectada por la alta tasa de sedimentos ya que los operarios están limpiando constantemente la captación en épocas de lluvia. Además, el coste de tratamiento de agua potable aumenta por los sedimentos arrastrados de la cuenca lo que hace más difícil el aprovechamiento del agua para Cajamarca.

Según el estudio de Erkossa et al. (2015), además del deterioro a largo plazo de la calidad de la tierra por la degradación del suelo, la pérdida financiera anual sufrida por los agricultores es sustancial. Por lo tanto, se debe fomentar medidas de conservación del suelo y agua de la cuenca que sean adecuadas en términos biofísicos y socioeconómicos en los paisajes.

VII. Colaboraciones interinstitucionales

MINAM: Instituto Geofísico del Perú (IGP).

MINEDU: Fondo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológica (FONDECYT).

Empresa Prestadora de Servicios de Saneamiento de Cajamarca (EPS SEDACAJ S.A.).

Universidad Nacional de Cajamarca (UNC).

VIII. Referencias bibliográficas

Angima, S. D., Stott, D. E., O'Neill, M. K., Ong, C. K., & Weesies, G. A. (2003). Soil erosion prediction using RUSLE for central Kenyan highland conditions. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 97(1), 295-308. doi:[https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(03\)00011-2](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(03)00011-2)

Ben, A., Raclot, D., Evrard, O., Sanaa, M., Lefevre, I., & Le Bissonnais, Y. (2016). Relative Contribution of Rill/Interrill and Gully/Channel Erosion to Small Reservoir Siltation in Mediterranean Environments. *Land Degradation & Development*, 27(3), 785-797. doi:10.1002/ldr.2387

Erkossa, T., Wudneh, A., Desalegn, B., & Taye, G. (2015). Linking soil erosion to on-site financial cost: lessons from watersheds in the Blue Nile basin. *Solid Earth*, 6(2), 765-774. doi:10.5194/se-6-765-2015

Furchner, K. (2010). Qualitative und semiquantitative Charakterisierung der Bodenerosionsformen im Einzugsgebiet des Río Manzana in der Region Cajamarca, nördliche Sierra Peru. Freie Universität Berlin.

Krois, J. (2016). Soil and Water Conservation in the Northern Andes of Peru. Freie Universität Berlin,

Krois, J., Abendroth, S., Schulte, A., & Schneider, M. (2013). Dry Season Runoff and Natural Water Storage Capacity in the High Andean Catchment of the River Ronquillo in the Northern Sierra of Peru. *Journal of Latin American Geography*, 12(3), 59-89.

Krois, J., & Schulte, A. (2014). GIS-based multi-criteria evaluation to identify potential sites for soil and water conservation techniques in the Ronquillo watershed, northern Peru. *Applied Geography*, 51, 131-142. doi:<https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2014.04.006>

Lal, R. (1998). Soil Erosion Impact on Agronomic Productivity and Environment Quality. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 17(4), 319-464. doi:10.1080/07352689891304249

Renard, K. (1997). Rainfall Simulators and USDA Erosion Research.

Southgate, D., Sanders, J. H., & Ehui, S. (1990). Resource degradation in Africa and Latin America: population pressure, policies, and property arrangements. *American Journal of Agricultural Economics*, 72(5), 1259-1263. doi:10.2307/1242543

CARACTERIZACIÓN DEL ROL DEL PÁRAMO ANDINO EN LA REGULACIÓN DEL RECURSO HÍDRICO EN LA CUENCA RONQUILLO

ORRILLO, J.^{1,2}; MORERA, S.B.^{1,2} & OSCAR SANTISTEBAN³

¹SUBDIRECCIÓN DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA E HIDRÓSFERA, INSTITUTO GEOFÍSICO DEL PERÚ, LIMA, PERÚ.

²UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA, LIMA, PERÚ.

³EMPRESA PRESTADORA DE SERVICIOS DE SANEAMIENTO DE CAJAMARCA.

I. Introducción

La cuenca del río Ronquillo (42 km²) es de gran relevancia para esta región, ya que proporciona el 30% del agua potable a la ciudad de Cajamarca. En la época de estiaje experimenta una marcada escasez del recurso hídrico que se agudiza en época de estiaje, esta problemática afecta a la población que habita dentro de la cuenca, así como a la población de la ciudad de Cajamarca. Por tal razón, el objetivo de la presente investigación fue cuantificar la influencia del páramo andino en la regulación del recurso hídrico en la cuenca Ronquillo, colaborando a su puesta en valor.

Para cuantificar la influencia del Páramo Andino, se separó el hidrograma de caudal para estimar el Índice de Flujo Base (BFI), el cual es la relación entre el volumen de caudal base y el volumen de caudal total. Estas estimaciones se realizaron en la cuenca Ronquillo y en dos sub-cuencas con presencia

de suelo Páramo, como son: Sexemayo y Majadapampa. Los valores obtenidos de BFI demuestran que la microcuenca Sexemayo presenta un mayor índice de flujo base igual a 0.72, seguida de la microcuenca de Majadapampa con 0.68 y un valor menor para la cuenca Ronquillo con 0.50. La microcuenca Majadapampa presenta un área de suelo páramo de 4.5km², muy parecido a Sexemayo con 4.4 km², pero el efecto como regulador del recurso hídrico es más evidente en la microcuenca Sexemayo.

II. Datos y Métodos

La cuenca Ronquillo se encuentra al norte de Perú en el departamento de Cajamarca, pertenece a la cuenca del Atlántico, tiene un área de 42 km² y una altitud promedio de 3508m.s.n.m. Para la presente investigación se considera como punto emisor la captación Ronquillo.

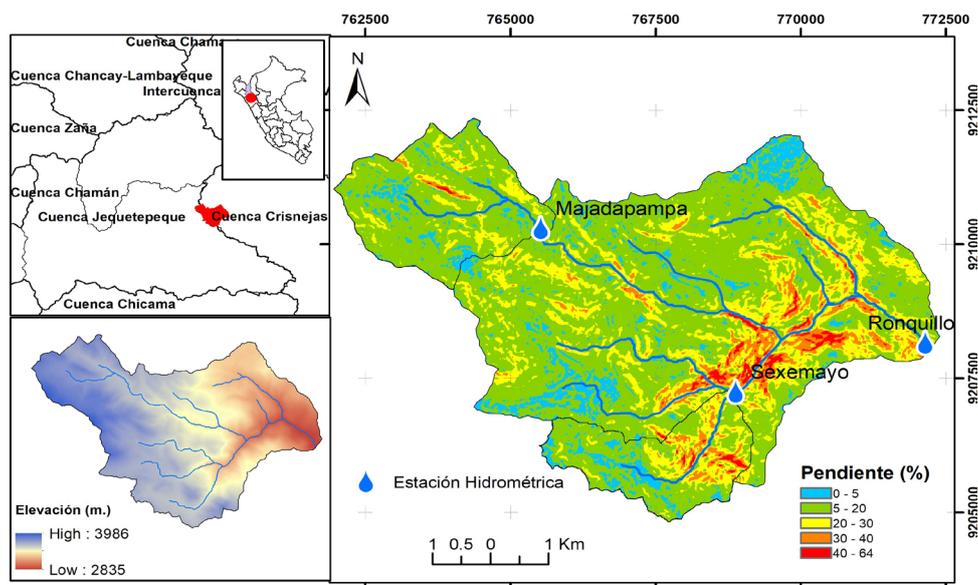


Figura 1. Ubicación de la cuenca Ronquillo

Se utilizaron caudales estimados obtenidos a partir de los niveles registrados cada 5 minutos, en las estaciones de Majadapampa, Sexemayo entre los años 2016 y 2017, y entre 2008 y 2017 para la cuenca Ronquillo. Se realizó la separación de caudal base del caudal total, utilizando ocho métodos de separación. Estos métodos están agrupados en métodos gráficos o también llamados de filtrado y los métodos de filtros digitales. Luego de realizar la separación del caudal base, se escogió los métodos más consistentes para realizar su calibración, estos métodos seleccionados fueron los métodos de filtros digitales. Esta información sirvió para

calcular el índice de flujo base (BFI), el cual es la relación entre el volumen de caudal base y el volumen de caudal total, para la cuenca Ronquillo, microcuencas de Sexemayo y Majadapampa.

Dentro de los dos grupos de métodos utilizados, para la separación del caudal base, se tiene: (i) los métodos de filtros digitales, donde se utilizaron el método de: Eckhardt (Eckhardt, 2008), métodos de Un parámetro (Chapman, 1999) y el método de Lyne y Hollick (Lyne & Hollick, 1979), de estos el método de Eckhardt se adapta mejor al área en estudio. Por su parte (ii) los métodos gráficos (Sloto & Crouse, 1996) que se basan en identificar valores mínimos del hidrograma en un intervalo dado de tiempo (N), sobrestimando el caudal base para nuestra zona de estudio.

III. Resultados y Discusión

Separación del caudal base e Índice de Flujo Base (BFI)

Métodos de filtros digitales

- Cuenca Ronquillo

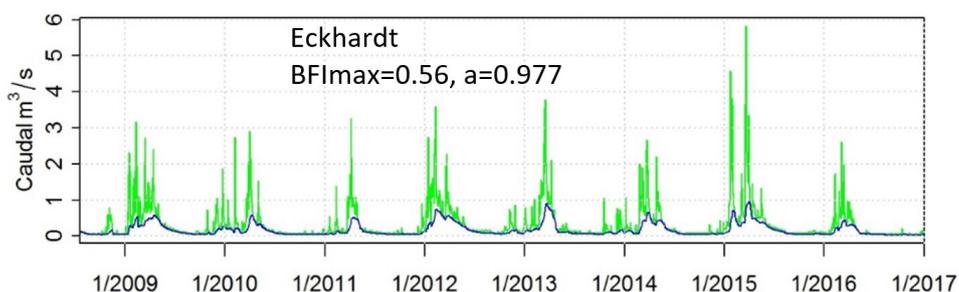


Figura 2. Resultados obtenidos para la cuenca Ronquillo con el método de Eckhardt. La línea de color verde representa el caudal total y la línea de color azul el caudal base.

Tabla 1. Resultados de valores de índice de flujo base para la estación Ronquillo.

Método	Sin Calibración			Con Calibración		
	BFI	RMSD	RMSD Q	BFI	RMSD	RMSD Q
<u>Lyne y Hollick</u>	0.49	0.018	0.029	0.19	0.013	0.032
Un Parámetro	0.50	0.010	0.035	0.29	0.009	0.036
<u>Eckhardt</u>	0.37	0.015	0.041	0.50	0.009	0.034

El filtro de Eckhardt da un valor de BFI igual a 0.50, con un valor de RMSD 0.009 m³/s y un RMSD Q igual a 0.034 m³/s. Este método también presenta un valor de RMSD igual al del método de Un Parámetro, pero el valor de BFI aumenta a 0.50.

- Microcuenca Sexemayo

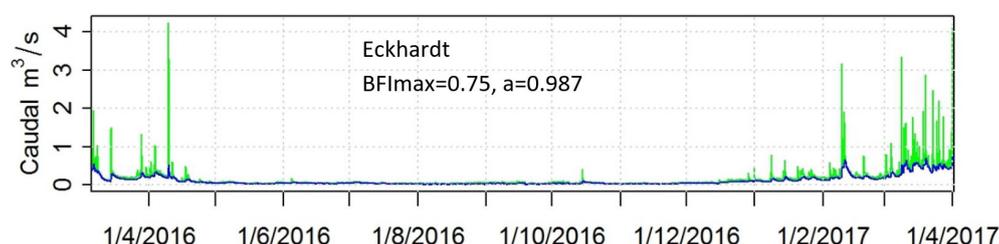


Figura 3. Resultados obtenidos para la microcuenca Sexemayo con el métodos de Eckhardt. La línea de color verde representa el caudal total y la línea de color azul el caudal base.

Tabla 2. Resultados de valores de índice de flujo base para la estación Sexemayo, con calibración y sin calibración.

Método	Sin Calibración			Con Calibración		
	BFI	RMSD	RMSD Q	BFI	RMSD	RMSD Q
<u>Lyne y Hollick</u>	0.74	0.283	0.006	0.69	0.229	0.007
Un Parámetro	0.50	0.143	0.023	0.50	0.140	0.023
<u>Eckhardt</u>	0.46	0.361	0.025	0.72	0.188	0.012

Con el método de Eckhardt se obtiene el valor de índice de flujo base más alto igual a 0.72, este valor y el obtenido con el método de Lyne y Hollick, son cercanos y según las jornadas de trabajo en campo son los valores que se adaptan mejor a la realidad de ésta microcuenca, que gran parte de su área cuenta con suelo páramo.

Microcuenca Majadapampa

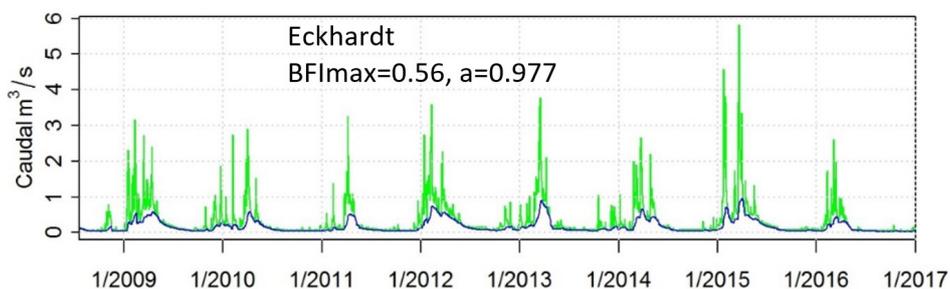


Figura 4. Resultados obtenidos para la microcuenca Majadapampa con los métodos de filtros digitales Lyne y Hollick, Un Parámetro y Eckhardt. La línea de color verde representa el caudal total y la línea de color azul el caudal base.

Tabla 3. Resultados de valores de índice de flujo base para la estación Majadapampa.

Método	Sin Calibración		Con Calibración	
	BFI	RMSD	BFI	RMSD
<u>Lyne y Hollick</u>	0.75	0.110	0.88	0.041
Un Parámetro	0.50	0.068	0.50	0.059
<u>Eckhardt</u>	0.30	0.140	0.68	0.055

Para la estación Majadapampa (Tabla 3), el filtro de Lyne y Hollick calcula un índice de flujo base igual a 0.88, con el RMSD más bajo. Este valor de BFI es un valor muy alto, considerando que es un río con un régimen efímero. Con el filtro de Un Parámetro se obtiene el valor de índice de flujo base igual a 0.50, con el RMSD más alto.

Aplicando el filtro de Eckhardt, el valor de índice de flujo base es igual a 0.68, con un valor de RMSD igual a 0.055 m³/s, que es un valor intermedio considerando los dos filtros antes detallados.

Volumen de caudal base y escorrentía superficial

Luego de realizar la separación del caudal base, se calculó el volumen de la escorrentía superficial y el caudal base. En la cuenca Ronquillo, para los años hidrológicos entre 2009 al 2016 se puede ver la variación de volumen de agua (escorrentía superficial y caudal base), de esto se infiere que el año hidrológico 2016 fue el año con menor volumen de agua producido por la cuenca Ronquillo con 6.6 millones de metros cúbicos, mientras que el año hidrológico 2015 con 15.3 millones de metros cúbicos fue el año con mayor producción de volumen de agua. También se puede ver (Figura 5) que luego de un año con alta producción de agua, se presenta años con una producción menor de volumen de agua.

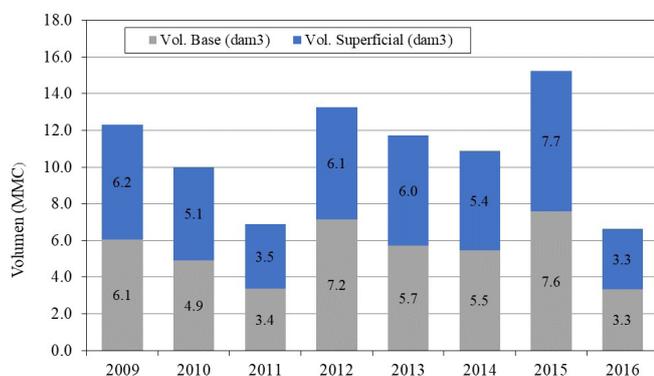


Figura 5. Volumen de caudal base (color gris) y caudal de escorrentía superficial (color azul), para los años hidrológicos desde el 2009 al 2016.

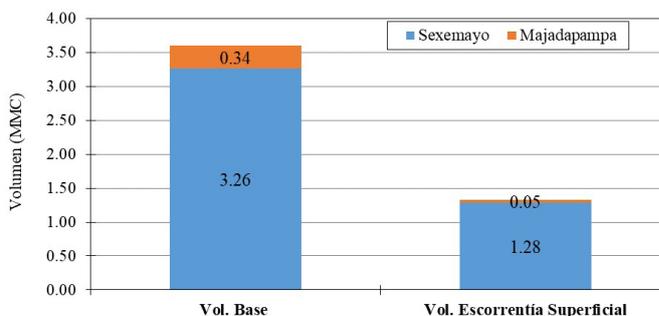


Figura 6. Volúmenes de agua de caudal base para las microcuencas de Sexemayo (color azul) y Majadapampa (color naranja).

Para las microcuencas Sexemayo y Majadapampa se observa (Figura 6) que los volúmenes de agua en ambas microcuencas difieren de forma considerable, tanto en volumen base (a partir del caudal base) como el volumen de escorrentía superficial (caudal directo). Pero tanto en la microcuenca Sexemayo como Majadapampa el volumen base es mayor que el volumen de la escorrentía superficial.

Según los datos registrados, en cada punto emisor de las microcuencas sexemayo y Majadapampa, los volúmenes son 4.5 millones m³ y 3.9 millones m³ respectivamente, a pesar de que el área de la microcuenca Sexemayo (4.7 km²) es más pequeña que el de la microcuenca Majadapampa (6.8 km²), ambas presentan diferencias considerables en cuanto a los volúmenes de agua producidos en cada microcuenca, que no son una relación directamente proporcional al área. Esta diferencia podría ser causada por la presencia de roca altamente fracturada en la parte de Majadapampa y por la presencia de un falla geológica paralela al curso de agua.

IV. Conclusiones

La cuenca Ronquillo presenta un BFI de 0.50, esto es producto de su variada geología y tipos de suelos que van desde Andosol, con características buenas para la retención de agua, hasta suelos Leptosol con escasa capacidad de retención de humedad. Las microcuencas de Sexemayo y Majadapampa, ambas con predominancia de depósitos de suelo Andosol, Páramo Andosol y Paramosol, presentan un BFI igual a 0.72 y 0.68, respectivamente. En otras palabras, su capacidad de regulación del recurso hídrico es del 72% y 68% de la precipitación acumulada en un año en la cuenca.

Se monitoreó la humedad de un suelo tipo Andosol/Páramo, se encontró que las características especiales (estructura del suelo y vegetación) permiten que solo pierda humedad los 25 cm superficiales en agosto-septiembre (periodo de estiaje), y bajo los 75 centímetros se mantiene con alta humedad durante todo el año. Al relacionar el BFI con la humedad se encontró que a mayor contenido de humedad se tiene mayor valor de BFI.

V. Perspectiva y Recomendación

La segunda fase de nuestro estudio contempla la mejora de la estimación de la recarga de los ecosistemas de montaña, mediante el uso de trazadores ambientales. Continuaremos monitoreando los suelos de tipo Andosol, Páramo Andosol y Paramosol, pues nuestro estudio identificó almacenan grandes volúmenes de agua, pero son muy sensibles al cambio de uso de suelo. El estudio de Prudencio et al., (sometido) evidencia que dichos cambios son cada vez más marcados en las cabeceras de cuenca.

Se recomienda trabajar en la implementación de un sistema de Retribuciones por Servicios Ambientales, como MERESE, en la cuenca del río Ronquillo en donde se involucre al Gobierno Regional, Municipal de Cajamarca, SEDACAJ, la universidad y otros.

VI. Contribución y/o impactos de la investigación

En la actualidad, no se dispone de estudios que cuantifiquen la producción/regulación de los ecosistemas andinos al agua

subterránea. Nuestra investigación cuantifica la influencia de los suelos páramos en la regulación del recurso hídrico, especialmente el agua subterránea. Avizoramos que las estimaciones del volumen de agua que provienen de los páramos contribuirá al desarrollo de las políticas por pagos por servicios ambientales en la cuenca del Río Ronquillo. Al generar un fondo por pagos por servicios ambientales, los pobladores que habitan en la cuenca Ronquillo, como son los caseríos de: Sexemayo Lote 1 y Sexemayo Lote 2, Majadapampa, Cushunga y Chamis, además de la población de la ciudad de Cajamarca, se beneficiarán mediante la ejecución de proyectos que mejoren las actividades productivas agrícolas y ganaderas, y disminuyan el impacto de dichas actividades en los ecosistemas de montaña.

Identificar la influencia de los suelos paramos en la regulación del recurso hídrico, contribuye a la puesta en valor de las áreas de suelos páramo en la cuenca Ronquillo. Nuestro sustento técnico será una herramienta importante para el desarrollo de políticas para la protección de las zonas páramo en las cabeceras de cuencas.

Los tomadores de decisiones deben interiorizar que, si la degradación de los ecosistemas de montaña en la cuenca de Sexemayo y Majadapampa continua, la cantidad de agua durante la época de estiaje seguirá disminuyendo, y dichos cambios no obedecen al cambio climático, tal y cual fue afirmado por varios de ellos en reportajes en radio, televisión y periódicos.

VII. Colaboraciones interinstitucionales

MINAM: Instituto Geofísico del Perú (IGP).

MINEDU: Fondo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico (FONDECYT).

Empresa Prestadora de Servicios de Saneamiento de Cajamarca (EPS SEDACAJ S.A.).

Universidad Nacional de Cajamarca (UNC).

VIII. Publicación científica

Chapman, T. (1999). A comparison of algorithms for streamflow recession and baseflow separation. *Hydrological Processes*, 13(July 1998), 701-714. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1085\(19990415\)13:5<701::AID-HYP774>3.0.CO;2-2](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1085(19990415)13:5<701::AID-HYP774>3.0.CO;2-2)

Eckhardt, K. (2008). A comparison of baseflow indices, which were calculated with seven different baseflow separation methods. *Journal of Hydrology*, 352(1-2), 168-173. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.01.005>

Lyne, V. D. D., & Hollick, M. (1979). Stochastic time-variable rainfall-runoff modelling. *Hydrology and Water Resources Symposium*.

Sloto, R. a., & Crouse, M. Y. (1996). Hysep: a computer program for streamflow hydrograph separation and analysis. U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 96-4040, 54.

Orrillo, J. & Morera, S.B. (In process). Characterization of the influence of mountain ecosystems and calcareous formations in the direct flow and groundwater in the central Andes. *Journal of Hydrology*.



Instituto Geofísico del Perú
Calle Badajoz 169, Urb. Mayorazgo IV Etapa,
Ate, Lima, Perú
Central Telefónica: (511) 317 2300

<http://www.igp.gob.pe>

 <http://www.facebook.com/igp.peru>

 http://twitter.com/igp_peru

 https://www.youtube.com/c/igp_videos

Organizado por:



Financiado por:



Apoyo de:

