PERÚ | Ministerio del Ambiente

IGP Instituto Geofísico del Perú

DIAGNÓSTICO DE LA EROSIÓN HÍDRICA DE LOS SUELOS, PRODUCCIÓN Y TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EN EL DISTRITO DE QUILLO

(Provincia de Yungay, región Áncash)

Informe técnico n.° 036-2026/IGP CIENCIAS DE LA TIERRA SÓLIDA



Lima, Perú
Noviembre de 2026

CRÉDITOS

Vladimiro Huaroc Portocarrero
Ministro del Ambiente

Hernando Tavera
Jefe institucional del IGP

Juan Carlos Gómez
Director de la Dirección de Ciencias de la Tierra Sólida del IGP

Diagnóstico de la erosión hídrica de los suelos, producción y transporte de sedimentos en el distrito de Quillo
Informe técnico

Sergio Morera
Jhon Orrillo
Shirley Contreras
Jorge Laura
Michael Sánchez
Kithner Espinoza
Jhon Villanueva
Deysi Yana
Autores

César Huincho
Coordinador administrativo

Hernando Tavera
Jorge Concha
Edición de contenido

Jorge Concha
Diseño y diagramación

Este documento incluye figuras, tablas, ecuaciones y material cartográfico elaborados por el equipo técnico del PP 0089-IGP, excepto que se indique explícitamente lo contrario.

Este informe ha sido elaborado por el Instituto Geofísico del Perú (IGP).
Calle Badajoz 169, Mayorazgo, Ate, Lima
Teléfono: +51 1 317 2300

Accede libremente al Repositorio Geofísico Nacional (REGEN) para descargar este informe:
https://repositorio.igp.gob.pe/

REGEN

Lima, noviembre de 2026

Programa Presupuestal 0089
REDUCCIÓN DE LA DEGRADACIÓN DE LOS SUELOS AGRARIOS

Actividad presupuestal
Generación de información de levantamiento de suelos, de zonificación agroecológica y de medición del deterioro del suelo

Tarea
Medición de la degradación de los suelos agrarios por erosión

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a las personas e instituciones que colaboraron en el desarrollo del presente estudio:

- La Municipalidad Distrital de Quillo (MDQ) de la región Áncash, por el apoyo logístico y convocatorias para el inicio y cierre de las investigaciones científicas.
- El Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), por el fortalecimiento tecnológico mediante el proyecto PER5033 "Application of Nuclear Techniques for Assessing Soil Erosion and Sedimentation in Mountain Agricultural Catchments".
- El Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación Tecnológica (CONCYTEC), por el financiamiento a proyectos científicos complementarios.
- El Laboratorio de Ciencias del Clima y del Medio Ambiente (LSCE), de Francia, por cooperar con análisis complementarios de muestras de suelo.

DIAGNÓSTICO DE LA EROSIÓN HÍDRICA DE LOS SUELOS, PRODUCCIÓN Y TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EN EL DISTRITO DE QUILLO

(Provincia de Yungay, región Áncash)



Lima, Perú
Noviembre de 2026

RESUMEN

Las cifras nacionales de erosión delimitan el problema, pero no indican dónde se pierde el suelo, a qué velocidad ni bajo qué cobertura. Este informe responde a esas preguntas para el distrito de Quillo (Áncash; 371 km²; de 1112 m s. n. m. a 4948 m s. n. m.) mediante la integración de tres técnicas complementarias: trazadores radioisotópicos (Cs-137 y Pb-210ex), microparcelas experimentales y modelado espacial distribuido con WaTEM/SEDEM.

El análisis multitemporal de coberturas (1988-2024) muestra una matriz dominada por matorral arbustivo (38 %), agricultura (26 %) y pajonal andino (25 %). La superficie agrícola creció de 74 km² a 97 km² (+31 %) a expensas del matorral y el pajonal. Ocupa laderas con una pendiente mediana de 33°, y el 74 % del área cultivada supera los 25°. El distrito, en conjunto, tiene una pendiente media de 32°; el 92 % de su superficie supera los 15°, umbral de susceptibilidad erosiva moderada a muy alta.

Las tasas derivadas de Cs-137 muestran una jerarquía clara entre coberturas. Los suelos desnudos pierden 76 t/ha/año y los agrícolas, 44 t/ha/año, un orden de magnitud más que el matorral (5 t/ha/año), los pastos (4 t/ha/año) y el pajonal (3 t/ha/año). El Pb-210ex confirma esa jerarquía, con 77 t/ha/año en suelo desnudo y 22 t/ha/año en agricultura. El bofedal es la única cobertura con ganancia neta de suelo: 9 t/ha/año según Cs-137 y 7 t/ha/año según Pb-210ex. El uso del suelo explica el 61 % de la varianza de las tasas derivadas de Cs-137 y el 49 % de las derivadas de Pb-210ex (η^2, Kruskal-Wallis).

El monitoreo de las 26 microparcelas durante la campaña 2024 reunió 38 observaciones (21 de holantao, 12 de suelo desnudo y 5 de pastos). Las pérdidas de suelo por evento fueron prácticamente equivalentes en holantao y suelo desnudo (medianas de 1.2 g/m² y 1.3 g/m², respectivamente), una magnitud diez veces mayor que en pastos (0.1 g/m²). Anualizadas y proyectadas al régimen pluviométrico histórico, las tasas sitúan al suelo desnudo (32 t/ha/año) y al holantao (31 t/ha/año) más de tres veces por encima del umbral global de sostenibilidad de 10 t/ha/año, frente a los 3 t/ha/año de los pastos naturales.

La representación espacial mediante el modelo WaTEM/SEDEM mostró máximos de 163 t/ha/año. Las clases con tasas inferiores a 12.5 t/ha/año ocuparon 153 km² (41 %), mientras que 218 km² (59 %) presentaron erosión fuerte o superior; dentro de este grupo, 24 km² (6 %) superaron 30 t/ha/año y cerca de 1 km² alcanzó la categoría extrema. Sechín en E. A. Puente Quillo concentró el 77 % de la superficie severa distrital y el 98 % de los *hotspots*. La agricultura aportó el 62 % del área severa, seguida por el matorral (28 %) y el pajonal (7 %).

La degradación crítica no es difusa, sino que se encuentra focalizada en un número reducido de puntos hidráulicamente conectados con la red de drenaje. La gestión se debe orientar a conservar y ampliar las terrazas de tierra en la agricultura de ladera, proteger las coberturas perennes que hoy operan como principal barrera natural y controlar las cárcavas activas.

CONTENIDO

4 Agradecimientos

6 Resumen

9 Siglas, acrónimos y convenciones

11 Glosario de términos clave y conceptos fundamentales

13 Introducción

14 Instrumentación y laboratorio

14 Redes de monitoreo e instrumentación

15 Competencia analítica y caracterización metrológica

18 Análisis del sistema físico-territorial

18 Relieve y geología

20 Uso del suelo en las últimas décadas

24 Clima

28 Diagnóstico de la erosión

28 Historia de las últimas seis a diez décadas

32 Dinámica y monitoreo de la erosión actual

36 Dinámica de los sedimentos

36 Caracterización de los sedimentos

37 Mapeo de las tasas y la severidad de la erosión

37 Construcción del modelo espacial de erosión

38 Espacialización de la severidad de la pérdida de suelo

41 Conclusiones y recomendaciones para la gestión

41 ¿Qué nos dicen los isótopos, las microparcelas y el modelado?

41 Situación de Quillo en el contexto andino

41 Acciones prioritarias para la gestión

43 Referencias

SIGLAS, ACRÓNIMOS Y CONVENCIONES

USOS DEL SUELO Y COBERTURA VEGETAL	
Agr	Áreas agrícolas heterogéneas / frontera agrícola.
Ma	Matorral arbustivo.
Paj	Pajonal andino.
SVg	Áreas altoandinas con escasa o sin vegetación.
Car	Cardonal.
AHu	Áreas húmedas continentales.
CuA	Aguas continentales.
Urb	Áreas urbanizadas.

VARIABLES BIOFÍSICAS, HIDROLÓGICAS Y EDÁFICAS	
CSS	Concentración de sedimentos en suspensión.
E	Energía cinética de la lluvia (en modelo TEST).
EI_{30}	Índice de erosividad de la lluvia, calculado como el producto de la energía cinética total del evento y la intensidad máxima en 30 minutos.
Ec_{30}	Energía cinética de la lluvia acumulada en los 30 minutos de mayor intensidad del evento.
Ero	Costras de erosión.
I_{30}	Intensidad máxima en 30 minutos.
K	Factor de erodabilidad del suelo.
KTC	Coeficiente de capacidad de transporte.
LS	Factor de longitud y pendiente.
P	Factor de prácticas de conservación.
Q	Caudal.
R	Factor de erosividad.
RC	Coeficiente de escorrentía.
Ro	Escorrentía superficial generada ante eventos de precipitación.
SL	Pérdida de suelo por evento (*soil loss*).
RAIN4PE	*Rain for Peru and Ecuador*; producto de precipitación utilizado para caracterizar la erosividad.
SoilGrids250m	Producto global de información edáfica utilizado para estimar el factor K.

RADIOISÓTOPOS Y TRAZADORES	
^{137}Cs	Cesio-137.
$^{210}Pb_{ex}$	Plomo-210 en exceso.

INSTITUCIONES	
IGP	Instituto Geofísico del Perú.
MIDAGRI	Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego.
MINAM	Ministerio del Ambiente.
MoSSARD	Laboratorio de Monitoreo de Suelos, Sedimentos y Agua ante Riesgos de Desastres.
CENEPRED	Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres.

NORMAS Y MÉTODOS	
DEM	Modelo de elevación digital.
LD	Límite de detección.
POE	Procedimientos operativos estándar.
TEST	Erosión en terrazas y transporte de sedimentos.
WaTEM/SEDEM	Modelo de erosión y transporte de sedimentos en cuencas.

GLOSARIO DE TÉRMINOS CLAVE Y CONCEPTOS FUNDAMENTALES

Erosión hídrica	Proceso de degradación en el que el impacto de la lluvia y el flujo del agua desprenden y transportan la capa superficial del suelo.
Escorrentía superficial	Agua de lluvia que no se infiltra y corre por el terreno; es el principal motor de transporte de sedimentos en las microparcelas y laderas del distrito.
Cárcavas y caminos	Zanjas profundas y vías no pavimentadas que pueden mantener conexión directa con los cauces y favorecer el transporte de sedimentos.
Saturación del suelo	Estado en el que el suelo ya no puede absorber más agua, lo que favorece la escorrentía superficial y la erosión.
Trazadores isotópicos	Átomos (Cs-137 y Pb-210ex) que permiten reconstruir la "memoria" del suelo y cuantificar las tasas de erosión o sedimentación ocurridas en los últimos 61 a 100 años.
Colorimetría (CIELAB)	Técnica de geología forense que cuantifica el color del suelo como trazador para diferenciar fuentes de sedimento y estimar su contribución relativa a la mezcla transportada por los cauces.
Sedimentos en suspensión (SS)	Cantidad de partículas sólidas arrastradas por el río, medida como concentración de sedimento en suspensión.
Conectividad sedimentaria	Capacidad física de una cuenca para trasladar el suelo erosionado desde las laderas altas hasta los cauces de los ríos.
WaTEM/SEDEM	Modelo computacional distribuido utilizado para zonificar y representar espacialmente la erosión en aproximadamente 371 km² del distrito de Quillo.
Holantao	Cultivo de arveja (*Pisum sativum* L. var. *saccharatum*) monitoreado en microparcelas de Marcopampa durante la campaña de 2024.



Paisaje altoandino del distrito de Quillo, región Áncash.

1. Introducción

El distrito de Quillo (Yungay, Áncash) ocupa 371 km² en la vertiente occidental de la cordillera Negra, entre 1112 m s. n. m. y 4948 m s. n. m. Su agricultura es mayoritariamente de secano y se practica en laderas empinadas: el 92 % del distrito supera los 15° de pendiente y tres cuartas partes de la superficie cultivada se sitúan por encima de los 25°. En este tipo de laderas, el suelo se pierde hasta dos órdenes de magnitud más rápido de lo que se forma (Montgomery, 2007).

La tasa de erosión crece exponencialmente a medida que la cobertura disminuye (Gyssels et al., 2005). En los Andes tropicales, el umbral es abrupto: las cuencas que conservan más del 80 % de cobertura erosionan al ritmo de su referencia natural, mientras que las que bajan del 50 % lo superan entre cien y mil veces (Vanacker et al., 2014). Quillo se desplaza hacia ese segundo extremo. Entre 1988 y 2024, su superficie agrícola creció de 74 km² a 97 km², un 31 %, a costa del matorral arbustivo y del pajonal andino.

El segundo control es el régimen pluviométrico. Quillo recibe unos 457 mm anuales y concentra el 95 % entre octubre y abril. Sobre ese régimen se superponen los eventos El Niño extremos, que multiplican la producción específica de sedimentos de la vertiente occidental peruana entre 3 y 60 veces (Morera et al., 2017).

El Niño Costero de 2017 fue el tercer evento más intenso de su tipo registrado en el Perú en al menos cien años (ENFEN, 2017), y Áncash figuró entre los departamentos con más distritos declarados en emergencia. Para Quillo, el CENEPRED elaboró cuatro evaluaciones de riesgo por lluvias intensas en distintos sectores del distrito (CENEPRED, s. f.). En marzo de 2026, el estado de emergencia en Quillo fue prorrogado (Decreto Supremo n.° 039-2026-PCM).

Ese sedimento tampoco se queda en el distrito. Quillo ocupa la cabecera del sistema Sechín, en la cuenca Casma-Sechín, de modo que el material movilizado por sus laderas llega al valle agrícola de Casma y a la infraestructura hidráulica de la cuenca baja.

Las cuencas vecinas de la vertiente del Pacífico muestran la magnitud que puede alcanzar ese aporte. La presa Poechos perdió el 58 % de su capacidad de almacenamiento en 41 años, y solo dos eventos El Niño extremos explican cerca de la mitad de esa colmatación (Marin Alvarez, 2020; Tote et al., 2011; Foucher et al., 2023). En Cañete, la sedimentación ha reducido la vida útil prevista del embalse de Capillucas de 50 a unos 17 años (Rosas et al., 2020).

Pese a ello, no existen mediciones directas publicadas para Quillo. La línea base nacional de degradación de tierras, que sitúa el área degradada del país en 22 248 100 ha al 2015 (17 % del territorio), se estimó con datos de fuentes globales, no con mediciones de campo (MINAM, 2020).

La escala regional tampoco cubre ese vacío. Lo que se conoce de la vertiente occidental peruana procede de rendimientos específicos medidos a la salida de cuencas grandes, donde el caudal y la pendiente del cauce explican el 55 % de la varianza y el efecto aparente de la cobertura resulta espurio porque covaría con ambas variables (Rosas et al., 2023). Esa escala permite estimar cuánto sedimento sale, pero no de qué coberturas ni de qué unidades territoriales procede, que es lo que exige una decisión de inversión distrital.

Este estudio cubre ese vacío mediante tres técnicas complementarias. Los objetivos son: (a) reconstruir la redistribución de suelo de los últimos 61 a 100 años mediante Cs-137 y Pb-210ex; (b) cuantificar la pérdida de suelo por evento y por cobertura mediante microparcelas de escorrentía; (c) caracterizar la concentración de sedimentos en suspensión a la salida de la cuenca; y (d) representar espacialmente las tasas de pérdida y su severidad mediante WaTEM/SEDEM, para identificar las unidades donde la inversión pública en conservación rendiría más.

2. Instrumentación y laboratorio

2.1 Redes de monitoreo e instrumentación

El Instituto Geofísico del Perú (IGP) desplegó en Quillo una red de monitoreo para capturar la variabilidad altitudinal y temporal de los procesos erosivos del distrito (Figura 2.1.1). La red estuvo compuesta por 2 estaciones meteorológicas automáticas, 1 estación hidrométrica, 26 microparcelas experimentales de erosión y 55 testigos de suelo.

Las estaciones meteorológicas registraron la precipitación y la humedad del suelo con una resolución de 5 minutos entre febrero y abril de 2024. La estación M01-Marcopampa se instaló en la zona altoandina (3534 m s. n. m.) y la estación M02-Quillo, en la parte baja del distrito (1315 m s. n. m.). La resolución de 5 minutos permite estimar la intensidad máxima en 30 minutos (I_{30}), parámetro central para caracterizar la erosividad de los eventos.

La estación hidrométrica H01 se instaló a 1177 m s. n. m., a la salida de la cuenca, para cuantificar la producción total de sedimentos a escala distrital. Registró 36 288 datos de nivel de agua con una resolución de 5 minutos y se complementó con 443 muestras de sedimentos en suspensión y aforos periódicos para calibrar la curva altura-gasto.

Las 26 microparcelas experimentales de 1 m^2 midieron escorrentía superficial y pérdida de suelo bajo diferentes coberturas y tipos de cultivo, lo que permitió obtener la respuesta directa del suelo a cada evento de lluvia (capítulo 4.2). Los 55 testigos de suelo se destinaron al análisis de Cs-137 y Pb-210ex para reconstruir la historia erosiva del distrito de los últimos 61 a 100 años (capítulo 4.1).

En conjunto, este despliegue generó 258 matrices sólidas y 481 matrices líquidas, procesadas en el laboratorio MoSSARD-IGP. Las matrices líquidas se componen de 443 muestras del cauce principal (estación H01) y 38 muestras procedentes de las microparcelas experimentales y filtrados complementarios. Este conjunto constituye la base del diagnóstico distrital.

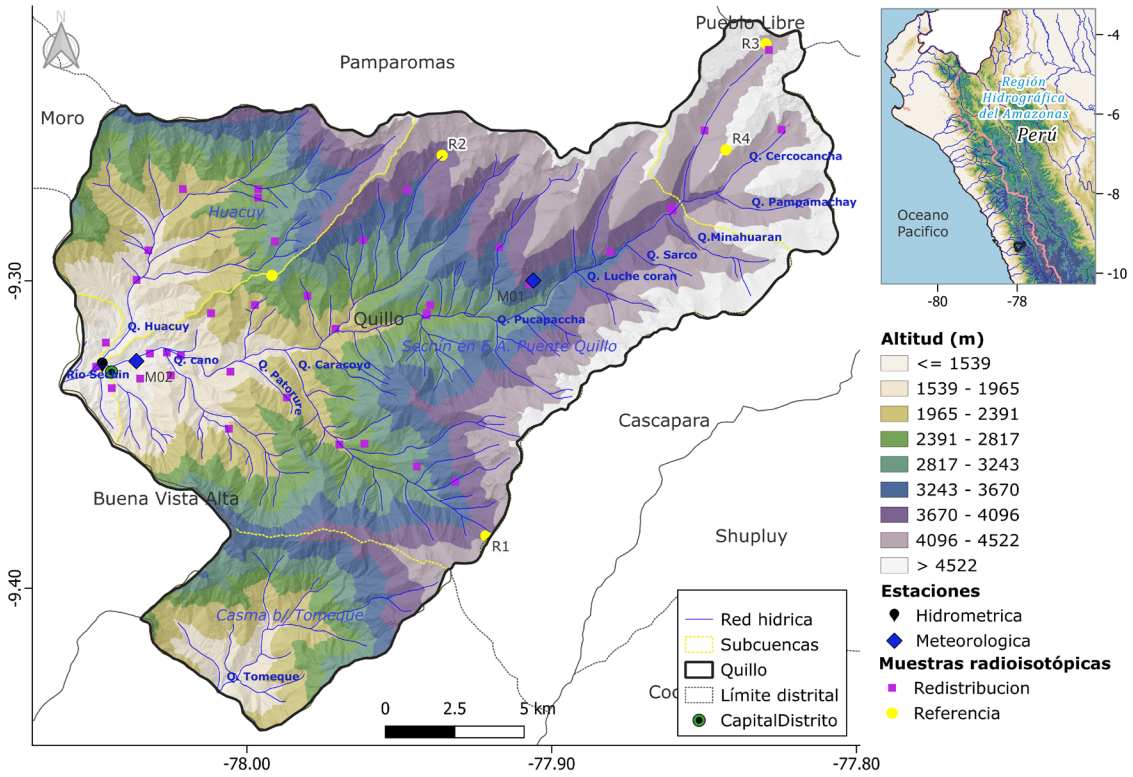


Figura 2.1.1. Configuración de la red de monitoreo hidrometeorológico y ubicación estratégica de los puntos de muestreo radioisotópico para la cuantificación de la dinámica erosiva en el distrito de Quillo (campaña 2024).

2.2 Competencia analítica y caracterización metrológica

2.2.1 Capacidades analíticas y tecnologías de alta resolución

Las matrices ambientales recolectadas en el distrito de Quillo fueron procesadas en el Laboratorio de Monitoreo de Suelos, Sedimentos y Agua ante Riesgos de Desastres (MoSSARD) del IGP (Figura 2.2.1). Las capacidades operativas, el soporte instrumental y el alcance de las metodologías validadas del laboratorio sustentan las lecturas instrumentales realizadas para este estudio, que permiten asegurar la precisión, la trazabilidad y la validez técnica de los insumos analíticos requeridos para la caracterización y el modelado de la erosión hídrica en el distrito.

2.2.2 Cuantificación de matrices ambientales para pretratamiento

La fase de acondicionamiento y pretratamiento preanalítico en el Laboratorio MoSSARD comprendió el procesamiento integral de 739 unidades de muestras ambientales correspondientes al distrito de Quillo (Figura 2.2.2a). El volumen preanalítico estuvo dominado por las matrices líquidas: las muestras de sedimentos en suspensión procedentes de microparcelas y ríos representaron el 5.1 % y el 59.9 %, respectivamente. En cuanto a las matrices sólidas, se acondicionaron 176 unidades de suelos y sedimentos superficiales destinadas a la caracterización granulométrica, geoquímica y colorimétrica, mientras que 82 unidades de fracciones de testigos de suelo completaron la secuencia de laminado, secado y homogeneización previa a las lecturas por espectrometría gamma. Este volumen de procesamiento asegura la representatividad estadística del estudio, se ajusta al rigor técnico exigido por los procedimientos operativos estándar (POE) y favorece la eficiencia de los tiempos de respuesta analítica (Figura 2.2.2b).

2.2.3 Rangos dinámicos y métricas analíticas por técnica

La caracterización multianalítica de las muestras del distrito de Quillo permitió cuantificar la sensibilidad, los rangos de concentración y la resolución de las técnicas fisicoquímicas y radioisotópicas aplicadas en el Laboratorio MoSSARD.

a. Actividad radioisotópica (^{137}Cs, ^{210}Pb y $^{210}Pb_{ex}$)

En las fracciones de testigos de suelo procesadas para el diagnóstico de la pérdida de suelo por

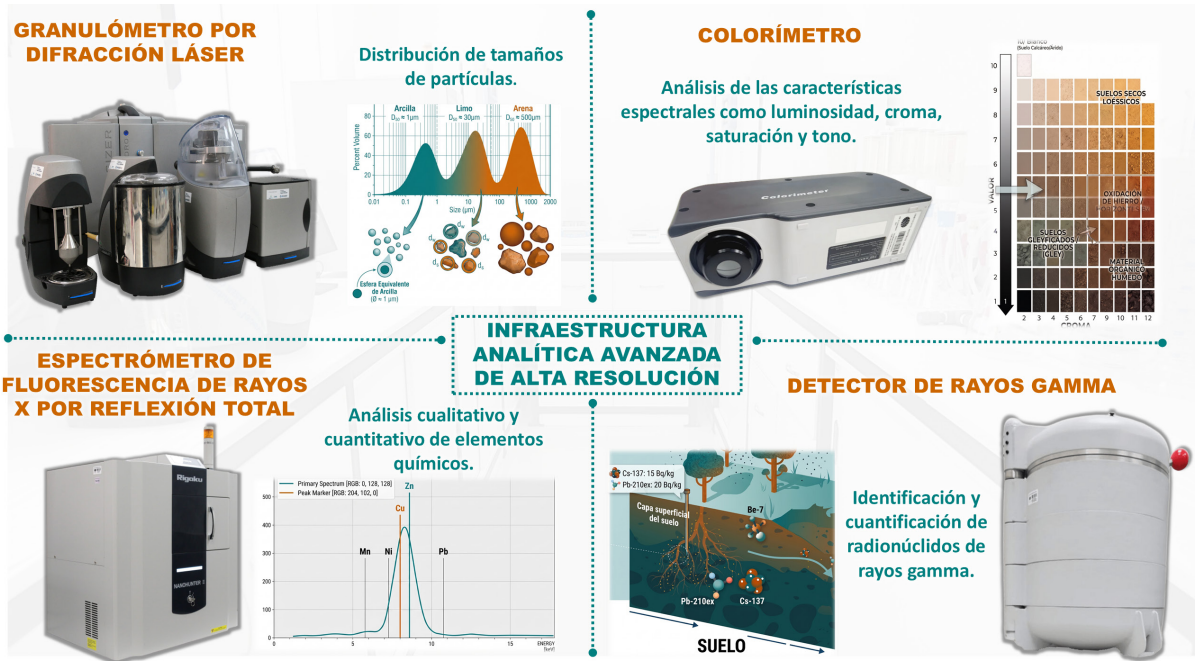


Figura 2.2.1. Instrumentación analítica de alta complejidad en el laboratorio MoSSARD-IGP.

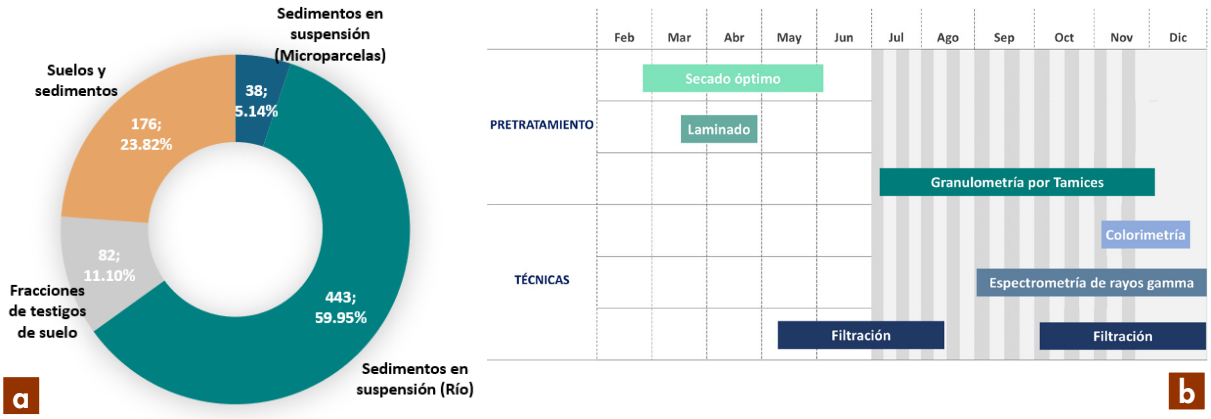


Figura 2.2.2. a) Distribución de las matrices ambientales procesadas y b) cronograma de pretratamiento y análisis en el laboratorio MoSSARD-IGP.

uso de la tierra, las lecturas por espectrometría de rayos gamma mostraron una respuesta analítica definida por un límite de detección (LD) de 0.1 Bq kg^{-1} y un control estricto de la variabilidad metrológica, con incertidumbres combinadas inferiores al 30 % en la cuantificación de los fotopicos de interés (Figura 2.2.3).

b. Concentración de sedimentos en suspensión (CSS) en dinámicas de transporte

El análisis de los sedimentos en suspensión obtenidos en ríos mediante la técnica de filtración confirma el predominio de la fracción de partículas finas respecto de la fracción gruesa en la estación de monitoreo (Figura 2.2.4). En la estación Sechín, la concentración total alcanzó un promedio de 0.0373 g/L, con eventos extremos que generaron un máximo de 1.96 g/L. En cuanto al fraccionamiento granulométrico, las partículas finas presentaron una mediana de 0.015 g/L y representaron, en promedio, más del 83 % de la carga total de sedimentos en suspensión.

Por otra parte, la fracción de partículas gruesas mantuvo niveles atenuados, con una media de 0.0060 g/L y un máximo puntual de 0.228 g/L. Esta dinámica evidencia que, durante los eventos pluviales extremos, la escorrentía directa en el punto de monitoreo moviliza prioritariamente las partículas finas (limos y arcillas).

El monitoreo de la respuesta erosiva a escala de microparcelas experimentales mostró un marcado gradiente altitudinal y el predominio del transporte de partículas finas respecto de la fracción gruesa entre la zona alta (Marcopampa) y la zona baja (Quillo) de la cuenca (Figura 2.2.5). En la estación Marcopampa, la concentración total de sedimentos en suspensión promedió 2.01 g/L; las partículas finas aportaron el 96.4 % del sedimento removido y registraron picos de hasta 10.12 g/L. Por el contrario, en la estación Quillo, la concentración total alcanzó una media de 1.09 g/L y las partículas finas determinaron el proceso de erosión, con el 98.7 % de la carga total. La mínima presencia de partículas gruesas en ambas estaciones confirma que la escorrentía superficial en estas parcelas moviliza predominantemente limo y arcilla por desprendimiento laminar.

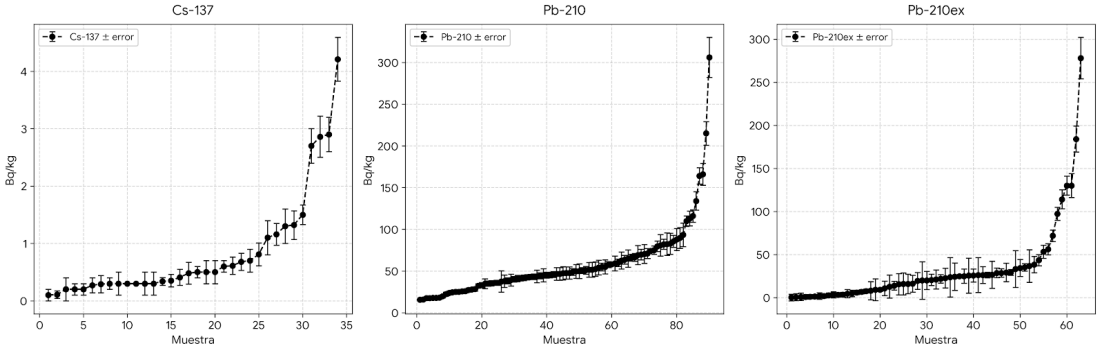


Figura 2.2.3. Límites de detección e incertidumbres en fracciones de testigos de suelos en el distrito de Quillo.

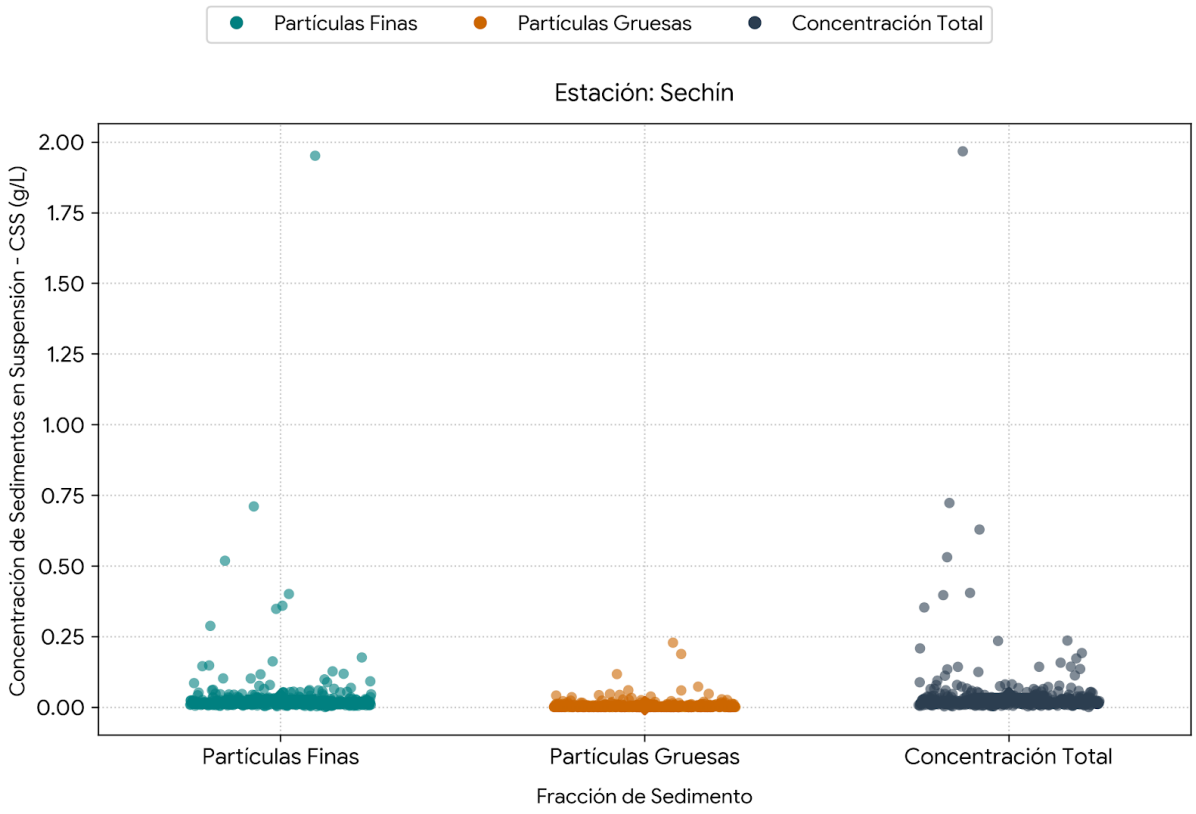


Figura 2.2.4. Concentración de sedimentos en suspensión (CSS, en g/L) en una estación de monitoreo del río Sechín, distrito de Quillo.

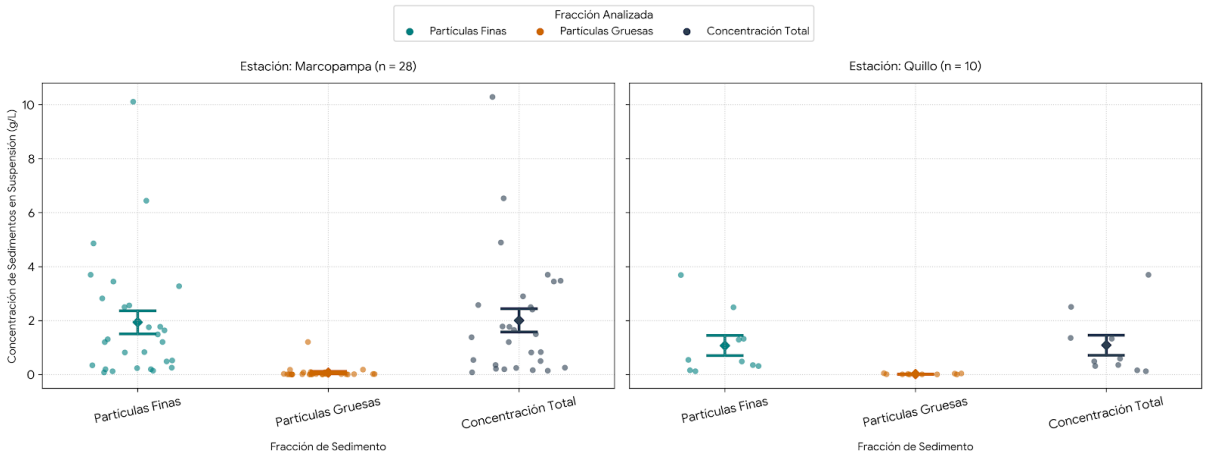


Figura 2.2.5. Concentración de sedimentos en suspensión (CSS, en g/L) en microparcelas experimentales de dos estaciones de monitoreo del distrito de Quillo.

3. Análisis del sistema físico-territorial

3.1 Relieve y geología

3.1.1 Unidad litoestratigráfica

El distrito de Quillo presenta una configuración geológica dominada por unidades volcánicas, intrusivas y depósitos cuaternarios (Figura 3.1.1). Las unidades de mayor extensión corresponden al Grupo Calipuy y a cuerpos plutónicos andinos. Los aglomerados volcánicos del Centro Volcánico Pucajirca abarcan 67 km² (18 %), las tonalitas de la Superunidad Pativilca 50 km² (14 %), las dioritas de la Superunidad Paccho 43 km² (12 %), y las granodioritas de las superunidades Pativilca y Puscao 69 km² (19 %) en conjunto. En total, las unidades volcánicas e intrusivas superan el 60 % del territorio distrital. Las formaciones sedimentarias del Grupo Goyllarisquizga (Chimú, Carhuaz y Farrat), compuestas por areniscas y lutitas, cubren 17 km² y presentan menor estabilidad frente a la meteorización y la erosión superficial (DGAAA, 2024).

Los depósitos cuaternarios condicionan la geomorfología reciente y la redistribución actual de sedimentos. Los depósitos aluviales (25 km², 7 %), compuestos por bloques, gravas, arenas y limos pobremente consolidados, presentan alta susceptibilidad a la removilización hídrica. Los depósitos glaciares y glaciofluviales (9 km²) se

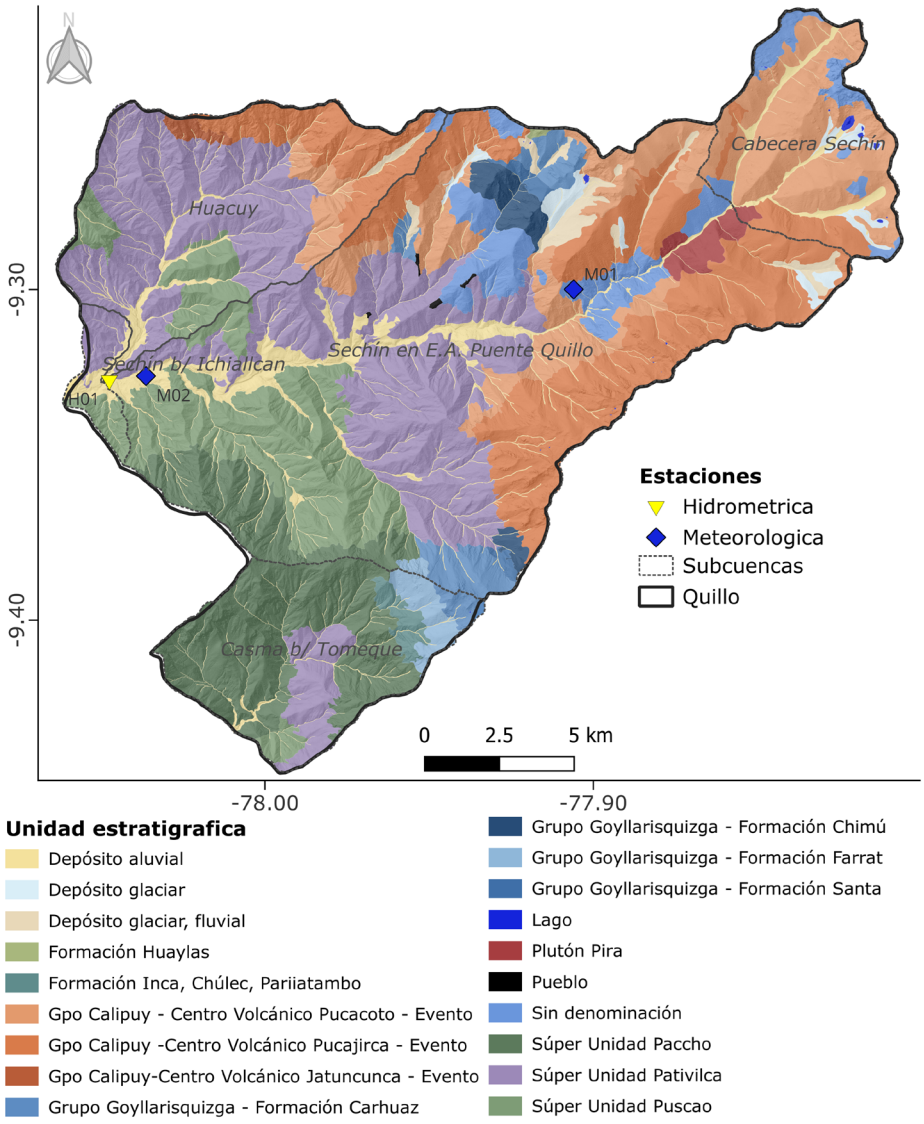


Figura 3.1.1. Mapa de unidad estratigráfica del distrito de Quillo. Adaptado del Estudio geológico-litológico del distrito de Quillo (DGAAA, 2024).

concentran por encima de los 4000 m s. n. m., en coincidencia con zonas de pajonal y escasa cobertura vegetal.

La litología condiciona además el comportamiento erosivo a escala local: las tonalitas y granodioritas generan regolitos arenosos moderadamente estables, mientras las secuencias volcánicas del Grupo Calipuy, más fracturadas y texturalmente heterogéneas, favorecen la desagregación mecánica y la producción de sedimentos durante eventos de lluvia intensa. Esta heterogeneidad litológica determina diferencias espaciales en infiltración, estabilidad geomorfológica y susceptibilidad erosiva dentro del distrito.

3.1.2 Morfometría y análisis de pendientes

La topografía es uno de los factores que más condiciona la velocidad del flujo superficial y, con ella, la capacidad del territorio para generar y transportar sedimentos. El procesamiento del modelo de elevación digital (DEM) de la Comisión Nacional de Investigación y Desarrollo Aeroespacial (CONIDA) de 5 m de resolución indica que el 92 % de la superficie distrital presenta pendientes superiores a 15°, lo que configura condiciones de moderada a muy alta susceptibilidad erosiva en prácticamente la totalidad del territorio (Figura 3.1.2).

La pendiente media del distrito es de 32°. El rango plano a moderado (0°-15°) abarca el 8 % del área (31 km²). El rango empinado (15°-25°) representa el 20 % del territorio (73 km²) y marca el umbral a partir del cual el agua adquiere energía suficiente para iniciar la erosión laminar de la capa superficial. El rango crítico (>25°) domina el paisaje con el 72 % del área (267 km²); dentro de este rango, el 13 % (50 km²) supera los 45° y corresponde a laderas donde la velocidad del flujo favorece activamente la formación de surcos y cárcavas.

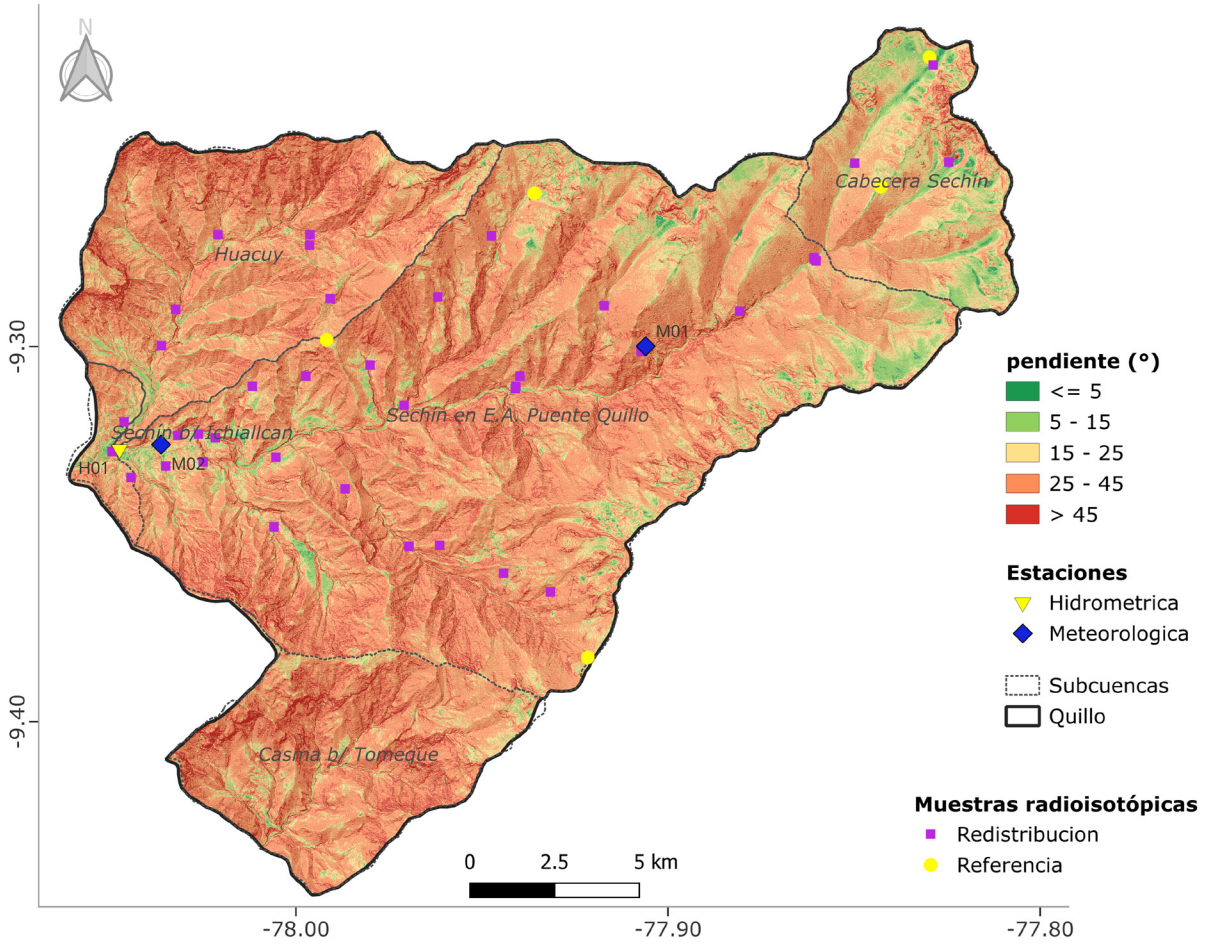


Figura 3.1.2. Mapa de pendiente del distrito de Quillo.

El cruce entre cobertura del suelo y pendiente revela patrones de exposición erosiva diferenciados (Figura 3.1.3). Las coberturas con mayor representación territorial, como el matorral arbustivo (142 km², 38 % del distrito) y la agricultura (97 km², 26 %), se ubican en los rangos de pendiente más críticos del distrito. El matorral arbustivo presenta la mediana más alta de todas las coberturas (36°); el 97 % de su superficie supera los 15° y el 86 %, los 25°. La agricultura, por su parte, ocupa laderas con una pendiente mediana de 33°; el 92 % supera los 15° y el 74 %, los 25°, lo que implica que la gran mayoría de la superficie cultivada se desarrolla por encima del umbral crítico de inicio de erosión laminar activa.

El pajonal andino (93 km², 25 % del distrito) se distribuye en pendientes intermedias a altas (mediana de 28°, 90 % por encima de 15°), mientras que las cárcavas (7 km²) presentan una mediana de 29°, con el 66 % de su área en el rango muy empinado (25°-45°), lo que confirma su asociación con zonas de alta energía de escorrentía. En el extremo opuesto, las áreas húmedas continentales (2 km²) se concentran en las partes llanas del territorio (mediana de 9°).

La zona altoandina (29 km², 8 %) ocupa una posición intermedia con mediana de 22° y el 41 % de su superficie en pendientes superiores a 25°, comportamiento coherente con su ubicación en cabeceras de cuenca donde el relieve comienza a suavizarse respecto a las laderas medias.

En conjunto, estos resultados indican que tanto las coberturas protectoras (matorral, pajonal) como las perturbadas (agricultura, cárcavas) operan sobre un sustrato topográfico de alta energía, lo que amplifica el potencial erosivo de cualquier perturbación de la cobertura vegetal y subraya la importancia crítica del mantenimiento de la vegetación perenne en este distrito.

3.2 Uso del suelo en las últimas décadas

3.2.1 Evolución del paisaje

El análisis multitemporal sobre 371 km² cartográficos confirma una expansión sostenida

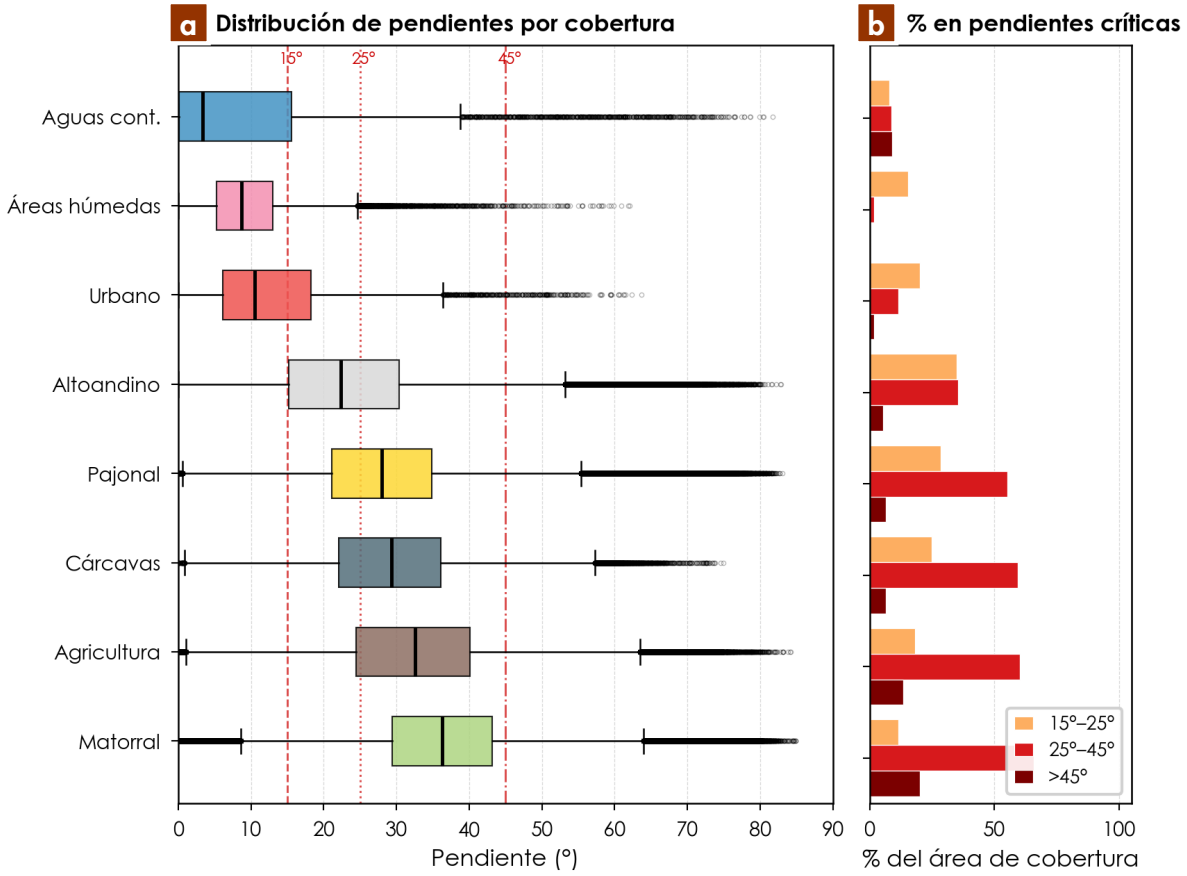


Figura 3.1.3. Análisis de pendientes por cobertura de suelo en el distrito de Quillo.

de la agricultura dentro de una matriz territorial dominada por matorral y pajonal entre 1988 y 2024 (Figura 3.2.1). El matorral arbustivo (Ma) se mantuvo como la cobertura predominante, aunque disminuyó de aproximadamente 154 km² (41 %) a 142 km² (38 %). El área agrícola (Agr) aumentó de 74 km² (20 %) a 97 km² (26 %), mientras el pajonal andino (Paj) pasó de 103 km² (28 %) a 93 km² (25 %). En conjunto, estas tres coberturas se mantuvieron en 331 km² (89 %), pero con una redistribución interna de 6 puntos porcentuales a favor de la agricultura.

La trayectoria temporal diferencia cambios sostenidos de variaciones interanuales. La agricultura aumentó en las ocho fechas evaluadas, de 74 km² a 79 km², 81 km², 84 km², 88 km², 90 km², 93 km² y 97 km², y acumuló 23 km² adicionales (+31 % respecto de 1988). El matorral presentó la tendencia inversa y disminuyó de forma continua de aproximadamente 154 km² a 142 km². El pajonal fluctuó entre 93 km² y 103 km² y cerró con una reducción de 10 km², mientras que las áreas altoandinas con escasa o sin vegetación (SVg) variaron entre 29 km² y 34 km² y finalizaron en 30 km², apenas 2 km² por debajo de 1988.

Las principales contracciones netas afectaron al matorral, el pajonal y SVg. El matorral registró la mayor pérdida absoluta del grupo (–13 km²; –8 % respecto de su superficie inicial), seguido por el pajonal (–10 km²; –9 %) y SVg (–2 km²; –6 %). En conjunto, estas tres coberturas disminuyeron de 289 km² a 265 km² (–24 km²) y redujeron su participación del 78 % al 71 %. Este balance concentra la principal reorganización del paisaje y es consistente con el incremento agrícola registrado durante el mismo periodo.

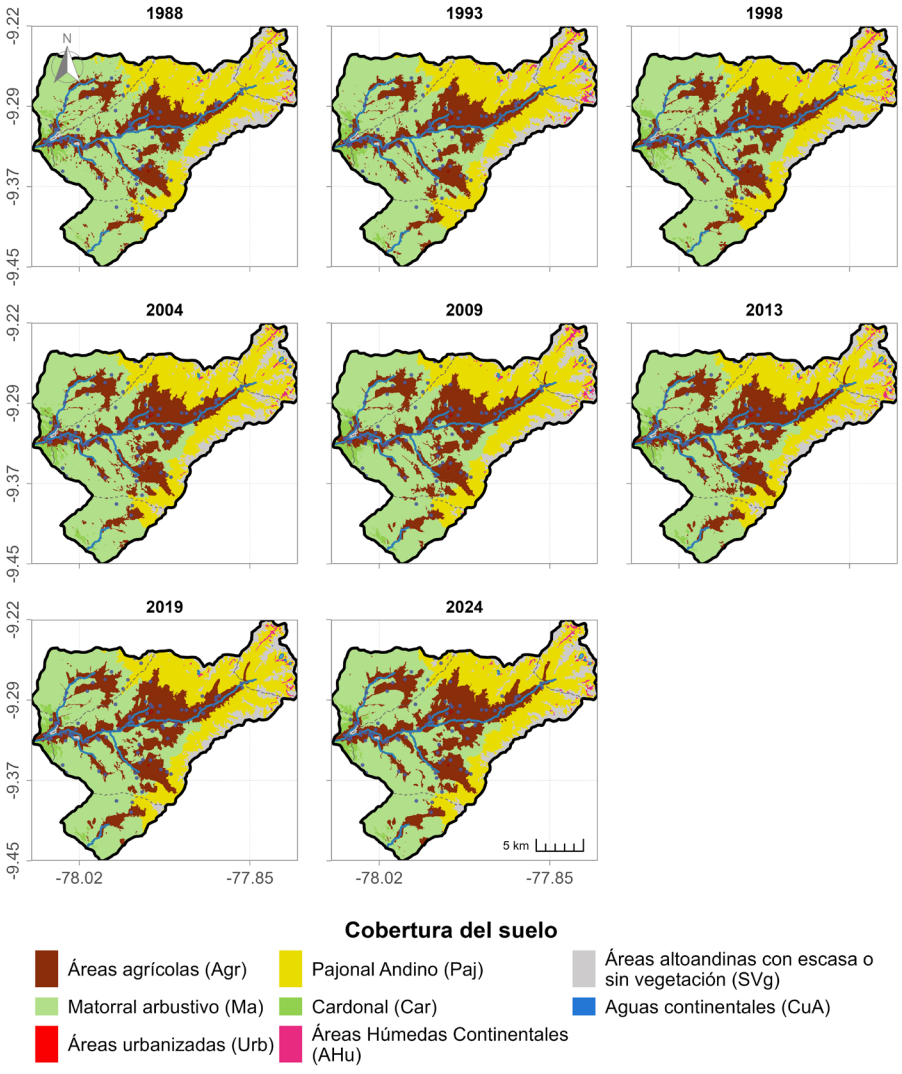


Figura 3.2.1. Evolución espaciotemporal de la cobertura y el uso del suelo en el distrito de Quillo durante la época húmeda del periodo 1988-2024.

El cardonal (Car) fluctuó entre 6 km² y 9 km² y finalizó en 7 km². Las áreas húmedas continentales (AHu) variaron entre 2 km² y 4 km², las aguas continentales (CuA) permanecieron entre 22 ha y 31 ha y las áreas urbanizadas (Urb) aumentaron de 8 ha a 25 ha (+17 ha). En 2024, estas cuatro coberturas representaron conjuntamente menos del 3 % del área analizada.

3.2.2 Transiciones del paisaje

Las siete transiciones evaluadas acumularon 287 km² de intercambio temporal entre coberturas durante 1988-2024 (Figura 3.2.2). El área transferida por intervalo fluctuó entre 37 km² y 47 km², con un máximo en 1988-1993 y un mínimo en 2019-2024. El área agrícola (Agr) recibió 71 km² desde otras coberturas y transfirió 48 km² hacia ellas, lo que confirma una expansión neta en la matriz de cambio. El principal intercambio ocurrió con el matorral arbustivo (Ma), que aportó 52 km² a la agricultura y recibió 39 km² desde ella. El pajonal andino (Paj) transfirió 15 km² a Agr y recibió 6 km²; el cardonal (Car), alrededor de 3 km² en ambos sentidos. Los demás intercambios agrícolas fueron inferiores a 1 km².

Las transiciones confirman que la expansión agrícola no dependió de una sola cobertura de origen. Su balance resultó principalmente de intercambios recurrentes con matorral y pajonal. Fuera de la matriz agrícola, destacó el intercambio entre SVg y Paj, con 54 km² y 53 km² en sentidos opuestos; entre Ma y Car, con 12 km² y 11 km²; y entre Paj y Ma, con 12 km² y 10 km², respectivamente.

3.2.3 Paisaje por subcuenca

La composición de 2024 diferencia cuatro configuraciones territoriales entre las cinco subcuencas de Quillo (Figura 3.2.3). Casma b/ Tomeque y Huacuy conservaron un claro predominio de matorral arbustivo. En Casma b/ Tomeque, Ma alcanzó 71 % (33 km²), seguido por agricultura con 14 % (6 km²) y pajonal con 10 % (5 km²). Huacuy registró 68 % de matorral (45 km²), 20 % de agricultura (13 km²) y 8 % de pajonal (5 km²). En ambas unidades, la agricultura aumentó respecto de 1988, cuando representaba 9 % y 16 %, respectivamente, mientras el matorral redujo su participación de 78 % a 71 % en Casma b/ Tomeque y de 70 % a 68 % en Huacuy.

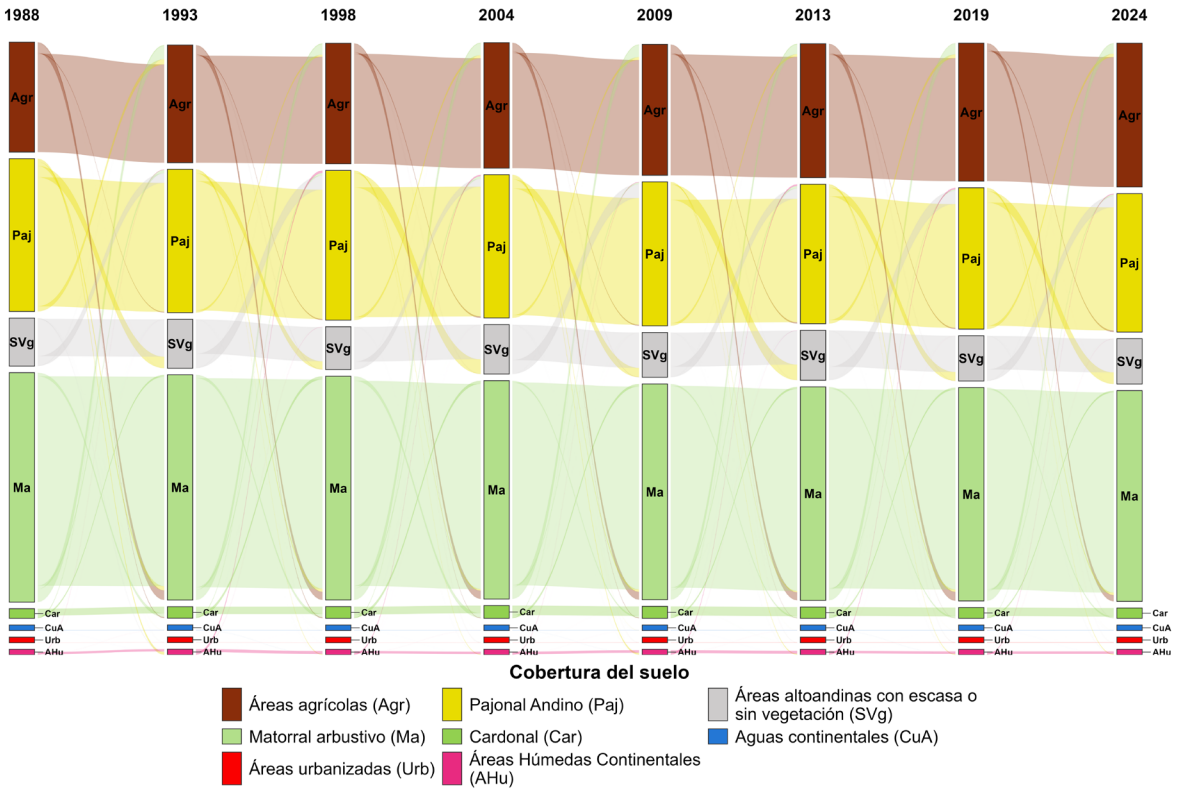


Figura 3.2.2. Transiciones de cobertura y uso del suelo en el distrito de Quillo durante la época húmeda, periodo 1988-2024.

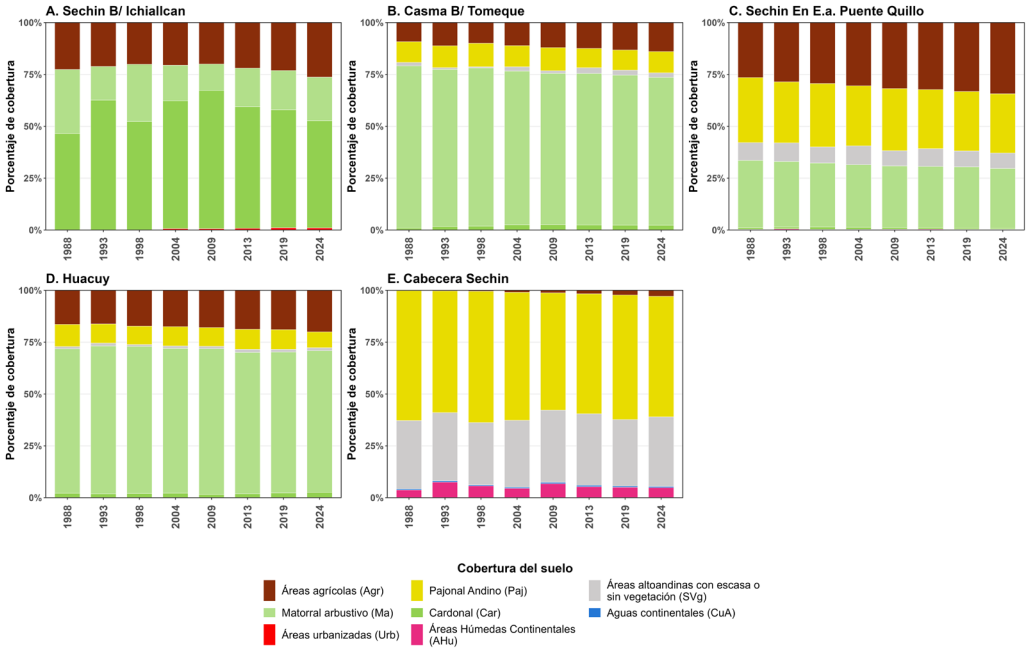


Figura 3.2.3. Composición multitemporal de la cobertura y el uso del suelo por subcuenca durante la época húmeda, periodo 1988-2024.

Sechín en E. A. Puente Quillo presentó la composición más equilibrada y concentró la mayor superficie agrícola absoluta. En 2024, la agricultura alcanzó 34 % (74 km²), mientras el matorral y el pajonal representaron 29 % cada uno (62 km²); SVg aportó 7 % (16 km²). Cabecera Sechín conservó la configuración más altoandina, con 58 % de pajonal (22 km²), 34 % de SVg (12 km²) y 5 % de áreas húmedas continentales (2 km²), frente a 3 % de agricultura (1 km²). Sechín b/ Ichiallcan mostró un patrón distinto, dominado por cardonal con 52 % (3 km²), seguido por agricultura con 26 % (2 km²) y matorral con 21 % (1 km²); las áreas urbanizadas completaron aproximadamente el 1 % restante.

El mayor incremento agrícola ocurrió en Sechín en E. A. Puente Quillo, con 8 puntos porcentuales y 17 km² adicionales. Esta subcuenca concentró 74 % del incremento agrícola distrital. Casma b/ Tomeque aumentó 5 puntos y 2 km²; Huacuy, 4 puntos y 2 km²; Sechín b/ Ichiallcan, 4 puntos y 23 ha; y Cabecera Sechín, 3 puntos y 1 km². Puente Quillo también registró las mayores reducciones absolutas de matorral (–8 km²), pajonal (–6 km²) y SVg (–2 km²). Estas diferencias permiten distinguir una matriz arbustiva en Casma b/ Tomeque y Huacuy, una matriz agrícola-mixta en Puente Quillo, una configuración altoandina en Cabecera Sechín y un paisaje dominado por cardonal en Ichiallcan.

3.2.4 Ganancia, pérdida y persistencia

El matorral arbustivo (Ma) sostuvo la mayor persistencia del paisaje entre 1988 y 2024, con 130 km² sin cambio (Figura 3.2.4), equivalentes al 84 % de su superficie inicial. El pajonal andino (Paj) mantuvo 82 km² (80 %), el área agrícola (Agr) 67 km² (90 %), las áreas altoandinas con escasa o sin vegetación (SVg) 24 km² (76 %) y el cardonal (Car) 4 km² (59 %).

La agricultura también concentró la mayor movilidad territorial. Registró 30 km² de ganancia y 7 km² de pérdida, con balance de +23 km². El cardonal ganó y perdió alrededor de 3 km², con balance de +0.5 km². Las áreas húmedas continentales (AHu) ganaron 1.2 km² y perdieron 0.7 km² (+0.5 km²). Las áreas urbanizadas (Urb) y las aguas continentales (CuA) presentaron balances positivos menores, equivalentes a aproximadamente 17 ha y 5 ha. La agricultura fue la única cobertura con un balance positivo superior a 1 km².

Las mayores reducciones netas correspondieron al matorral y al pajonal. El primero perdió aproximadamente 24 km² y ganó aproximadamente 12 km², con un balance de –13 km². El pajonal perdió 20 km² y ganó 11 km², con lo que alcanzó un balance de –10 km². SVg perdió 8 km² y ganó 6 km², con un balance de –2 km². En conjunto, 308 km² permanecieron en la misma clase y 63 km² cambiaron de cobertura.

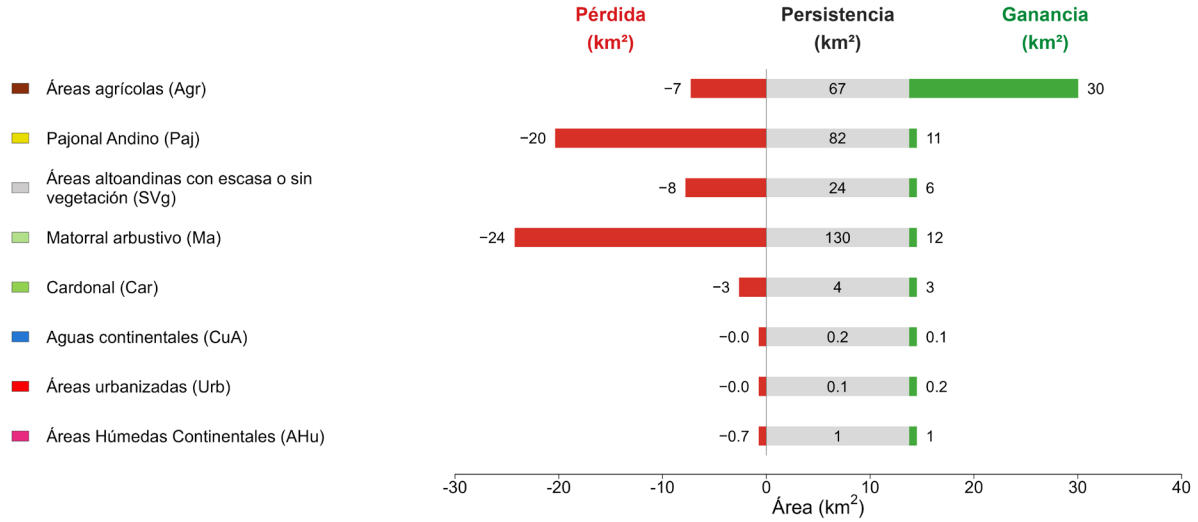


Figura 3.2.4. Ganancia, pérdida y persistencia de las coberturas del suelo en el distrito de Quillo durante la época húmeda, periodo 1988-2024.

La suma de ganancias y pérdidas muestra que la agricultura movilizó 37 km², seguida por el matorral con 36 km², el pajonal con 31 km², SVg con 14 km² y el cardonal con 6 km². La agricultura combinó una elevada persistencia con la mayor ganancia y el mayor intercambio del periodo. Este balance coincide con las trayectorias de la Figura 3.2.2 y con la concentración del incremento agrícola en Sechín en E. A. Puente Quillo registrada en la Figura 3.2.3.

3.3 Clima

3.3.1 Régimen pluviométrico histórico (1981-2015)

El distrito de Quillo registra una precipitación anual media de 457 mm, estimada a partir de la grilla RAIN4PE para el periodo 1981-2015 (Fernandez-Palomino et al., 2021). El coeficiente de variación interanual de 42.5 % refleja una variabilidad moderada. Dado que esta grilla tiene una resolución aproximada de 10 km, no resuelve el marcado gradiente altitudinal entre la estación Marcopampa (3534 m s. n. m.) y la estación Quillo (1315 m s. n. m.), ambas dentro de la misma celda o de celdas contiguas. El valor de 457 mm se reporta como referencia del contexto climático regional, no como climatología independiente y equivalente para cada estación.

La distribución mensual muestra una estacionalidad marcada (Figura 3.3.1). La temporada húmeda se extiende de octubre a abril y concentra aproximadamente el 95 % de la precipitación anual. Marzo es el mes de mayor aporte, con una media histórica de 104 mm y un rango P10-P90 de 56 mm a 156 mm. A partir de abril, la precipitación desciende de forma pronunciada: mayo y septiembre registran 11 mm y 9 mm, y en junio, julio y agosto los totales mensuales no superan los 2 mm, lo que configura una temporada seca de cinco meses (mayo-septiembre) que aporta solo el 5 % del total anual. Esta alternancia entre una temporada húmeda concentrada y una estación seca prolongada restringe la actividad erosiva a los meses de octubre a abril, con su mayor intensidad entre febrero y abril, cuando cae el 54 % de la precipitación anual.

3.3.2 Precipitación durante la campaña de monitoreo (febrero-abril de 2024)

El IGP instaló dos estaciones meteorológicas automáticas equipadas con pluviómetros con una resolución de 5 minutos (Figura 3.3.2): la estación M01 (Marcopampa), en la zona altoandina (3534 m s. n. m.), y la estación M02-Quillo, en la parte baja del distrito (1315 m s. n. m.). El registro cubre el periodo febrero-abril de 2024, coincidente con la fase final de la temporada húmeda.

La estación Marcopampa acumuló 181 mm en los tres meses de campaña. Marzo concentró el mayor aporte con 79 mm, seguido de abril con 59 mm y febrero con 43 mm (Figura 3.3.3).

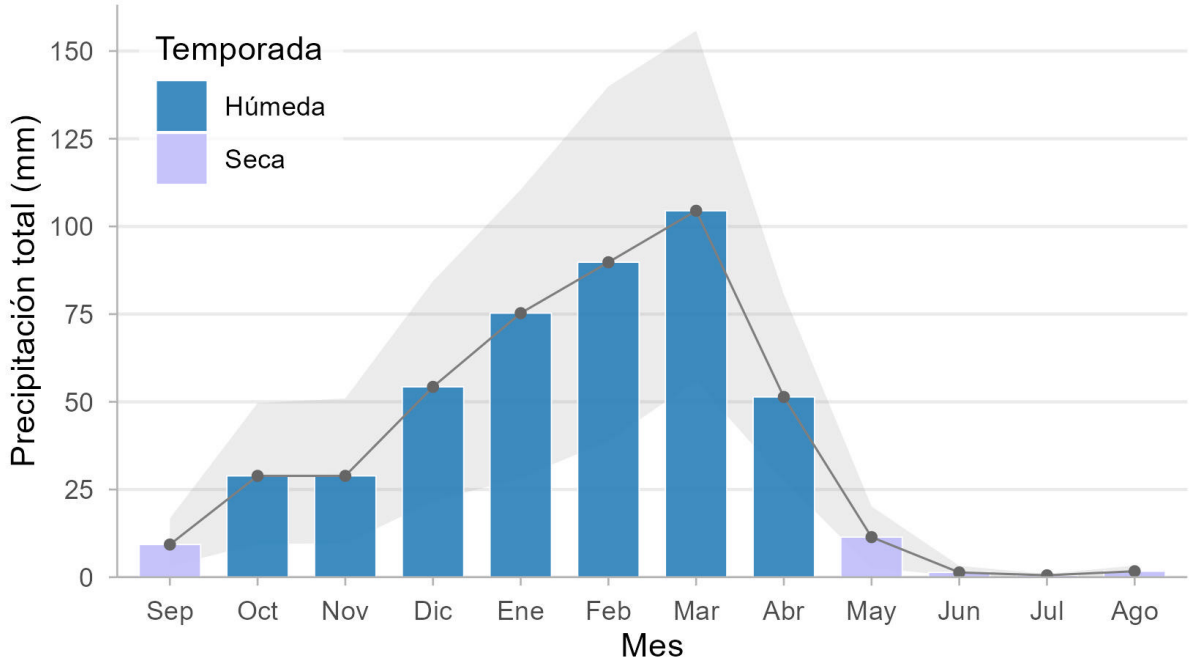


Figura 3.3.1. Climatología mensual de precipitación del distrito de Quillo, periodo 1981-2015 (grilla RAIN4PE). Las barras representan la precipitación media mensual; la banda sombreada delimita el rango entre el percentil 10 (año seco) y el percentil 90 (año húmedo). En azul, temporada húmeda (octubre-abril); en lila, temporada seca (mayo-septiembre). Fuente: elaboración propia con datos del producto RAIN4PE.



Figura 3.3.2. Estaciones meteorológicas automáticas del IGP instaladas en el distrito de Quillo. (a) Estación Marcopampa (3534 m s. n. m.), con gabinete del registrador de datos, pluviómetro con una resolución de 5 minutos y sensores de humedad del suelo; (b) estación Quillo (1315 m s. n. m.), en la parte baja del distrito.

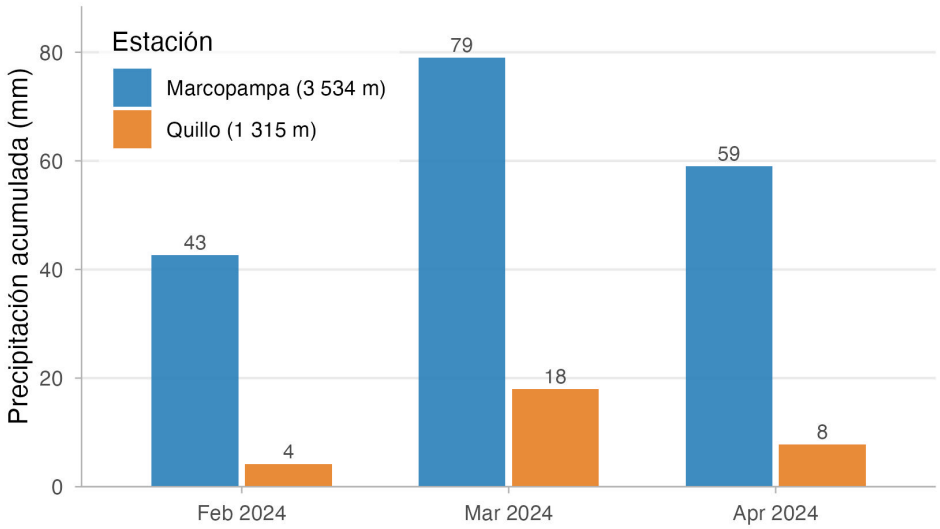


Figura 3.3.3. Precipitación mensual acumulada durante la campaña de monitoreo.

La estación Quillo acumuló únicamente 30 mm en el mismo periodo, el 12 % de la media histórica de febrero-abril (246 mm): febrero registró 4 mm; marzo, 18 mm, y abril, 8 mm. Solo se registraron 8 eventos de al menos 1 mm, frente a 34 en Marcopampa, y únicamente el del 22 de marzo (12 mm) superó los 3 mm. En ese evento, el único con muestras de sedimento en la estación, el índice de precipitación antecedente de cinco días (API_5) fue de apenas 2 mm y la humedad del suelo a 10 cm, de 0.19 m^3/m^3, frente a valores de 0.27 m^3/m^3 a 0.35 m^3/m^3 en los eventos muestreados en Marcopampa. Los bajos coeficientes de escorrentía (mediana de 0.08 en suelo desnudo, frente a 0.18 en Marcopampa) y la escasez de eventos en la estación Quillo reflejan, por tanto, una campaña atípicamente seca y una superficie con menor humedad antecedente.

3.3.3 Ciclo diurno de la precipitación

La distribución horaria de la precipitación registrada en la estación Marcopampa revela un ciclo diurno marcadamente vespertino (Figura 3.3.4). El volumen acumulado y la frecuencia de ocurrencia alcanzan su máximo simultáneo entre las 15:00 y las 16:00, con 32 mm acumulados en cada una de esas dos horas y una frecuencia de ocurrencia del 10 % en ambos casos. A partir de las 17:00, la actividad decrece progresivamente hasta volverse prácticamente nula entre las 8:00 y las 11:00.

Este patrón es consistente con la dinámica de convección orográfica vespertina de zonas altoandinas, donde el calentamiento diferencial de

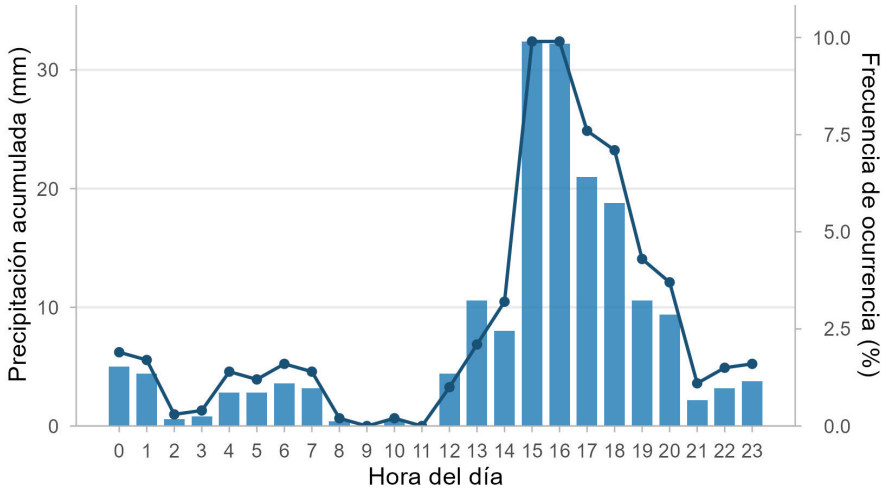


Figura 3.3.4. Ciclo diurno de precipitación en la estación Marcopampa (3534 m s. n. m.) durante la campaña febrero-abril de 2024. Barras: precipitación acumulada por hora (mm); línea: frecuencia de ocurrencia (%).

las laderas favorece el ascenso forzado de masas de aire húmedo y la formación de precipitación convectiva en las horas de la tarde.

El momento del día en que se concentra la energía cinética de la lluvia tiene implicancias directas sobre el estado del suelo en el momento del impacto. Las precipitaciones vespertinas inciden sobre suelos que han completado el calentamiento diurno y, en coberturas sin vegetación, pueden encontrar superficies con costras de desecación formadas durante las horas de la mañana, lo que modifica la infiltrabilidad y favorece la generación de escorrentía.

3.3.4 Intensidad y erosividad de los eventos de campaña

Durante la campaña se registraron 34 eventos de precipitación en la estación Marcopampa, clasificados según su intensidad máxima sostenida en 30 minutos (I_{30}). En conjunto, estos eventos acumularon 172 mm de los 181 mm totales de la campaña; los 9 mm restantes corresponden a precipitación traza (episodios menores de 1 mm cada uno), excluida de la clasificación por criterio metodológico. Los 29 eventos de baja intensidad (I_{30} < 5 mm/h) dominaron en frecuencia (85 % del total), y aportaron el 65 % del volumen acumulado (111 mm). Los 5 eventos restantes (3 de intensidad moderada, con I_{30} entre 5 mm/h y 10 mm/h, y 2 de intensidad alta, con I_{30} entre 10 mm/h y 20 mm/h) representaron el 15 % de los episodios, pero concentraron el 35 % del volumen (23 mm y 38 mm, respectivamente) (Figura 3.3.5). Esta desproporción entre frecuencia y aporte volumétrico es consistente con un régimen convectivo de ladera, en el que un número reducido de episodios intensos concentra la mayor parte de la erosividad disponible para el desprendimiento de partículas.

De los 34 eventos, 6 contaron con muestras de sedimentos asociadas. En estos eventos, la precipitación osciló entre 3 mm (14 de febrero) y 12 mm (23 de marzo), con una I_{30} media de 7 mm/h y un máximo de 11 mm/h registrado el 11 de abril. La erosividad acumulada de los seis eventos muestreados (EI_{30}), calculada según Brown y Foster (1987), totalizó 46 MJ·mm/ha·h, equivalente al 35 % de la erosividad acumulada de la campaña. La precipitación antecedente (API_5) varió entre 3 mm en el primer evento de febrero y 41 mm el 23 de marzo, fecha que coincidió con la mayor humedad volumétrica a 20 cm entre los eventos muestreados (0.3 m^3/m^3).

En términos de erosividad, la concentración de los aportes fue más marcada que en términos de volumen precipitado: del total acumulado en los 34 eventos de la campaña, los 2 eventos de alta intensidad aportaron el 48 %, mientras que los 29 eventos de baja intensidad aportaron el 33 % (Figura 3.3.5). La pérdida de suelo de los eventos muestreados siguió el mismo patrón: el evento del 11 de abril, el único de alta intensidad con muestras, concentró el 49 % de la pérdida acumulada, mientras que los tres eventos de baja intensidad (14 de febrero, 19 de marzo y 6 de abril) concentraron el 21 %. Con volúmenes de precipitación similares, el evento del 19 de marzo (6 mm; I_{30} = 4 mm/h) generó una pérdida de suelo equivalente a aproximadamente una séptima parte de la registrada en el evento del 16 de marzo (7 mm; I_{30} = 8 mm/h), lo que indica que la pérdida de suelo responde principalmente a la intensidad del evento y no al volumen de precipitación.

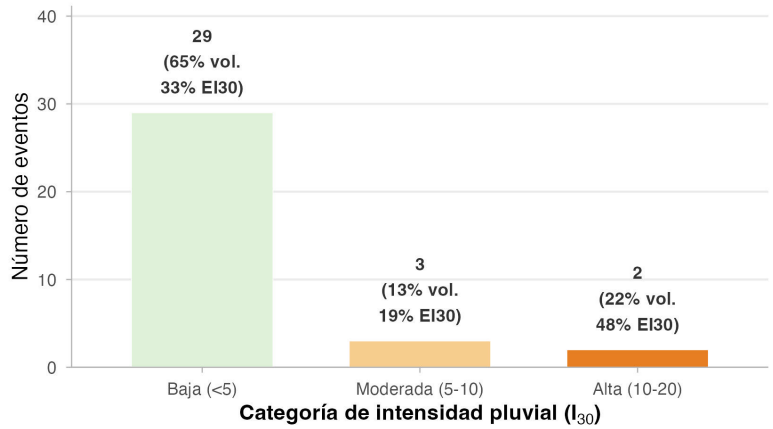


Figura 3.3.5. Clasificación de los eventos de precipitación registrados en la estación Marcopampa (3534 m s. n. m.) según la categoría de intensidad I_{30} (mm/h). Las etiquetas indican el número de eventos y los porcentajes del volumen total de precipitación de la campaña y de la erosividad acumulada (EI_{30}) correspondientes a cada categoría. Periodo: febrero-abril de 2024.

4. Diagnóstico de la erosión

4.1 Historia de las últimas seis a diez décadas

El Perú carece de registros continuos de erosión, lo que limita el análisis de los cambios del paisaje a escala decadal. Los radioisótopos Cs-137 y Pb-210ex reconstruyen esta historia mediante su señal en el perfil edáfico. El Cs-137, producto de las pruebas nucleares atmosféricas de mediados del siglo XX, registra la pérdida de suelo de los últimos 61 años (1963-2024). El Pb-210ex, de origen natural, amplía esta ventana a 100 años (1924-2024). Al comparar el inventario de cada trazador entre un punto de ladera y un sitio de referencia no perturbado, se cuantifica la redistribución neta de suelo.

4.1.1 Validación científica: ¿qué tan confiable es nuestro registro histórico?

a. Diseño de muestreo y análisis de muestras

Se recolectaron 55 testigos de suelo con un muestreador cilíndrico de 8 cm de diámetro y 20 cm de profundidad (Figuras 4.1.1 y 4.1.2). El muestreo cubrió los usos predominantes del distrito (agricultura, matorral, pajonal, eucalipto y bofedal) a lo largo de todo el gradiente altitudinal (de 1112 m s. n. m. a 4948 m s. n. m.) y de pendientes, desde <2° hasta >25°.

Los sitios de referencia se laminaron en capas de 5 cm, mientras que los testigos de redistribución se analizaron como núcleo completo. Se generaron 82 muestras en total, las cuales fueron secadas, tamizadas y analizadas por espectrometría

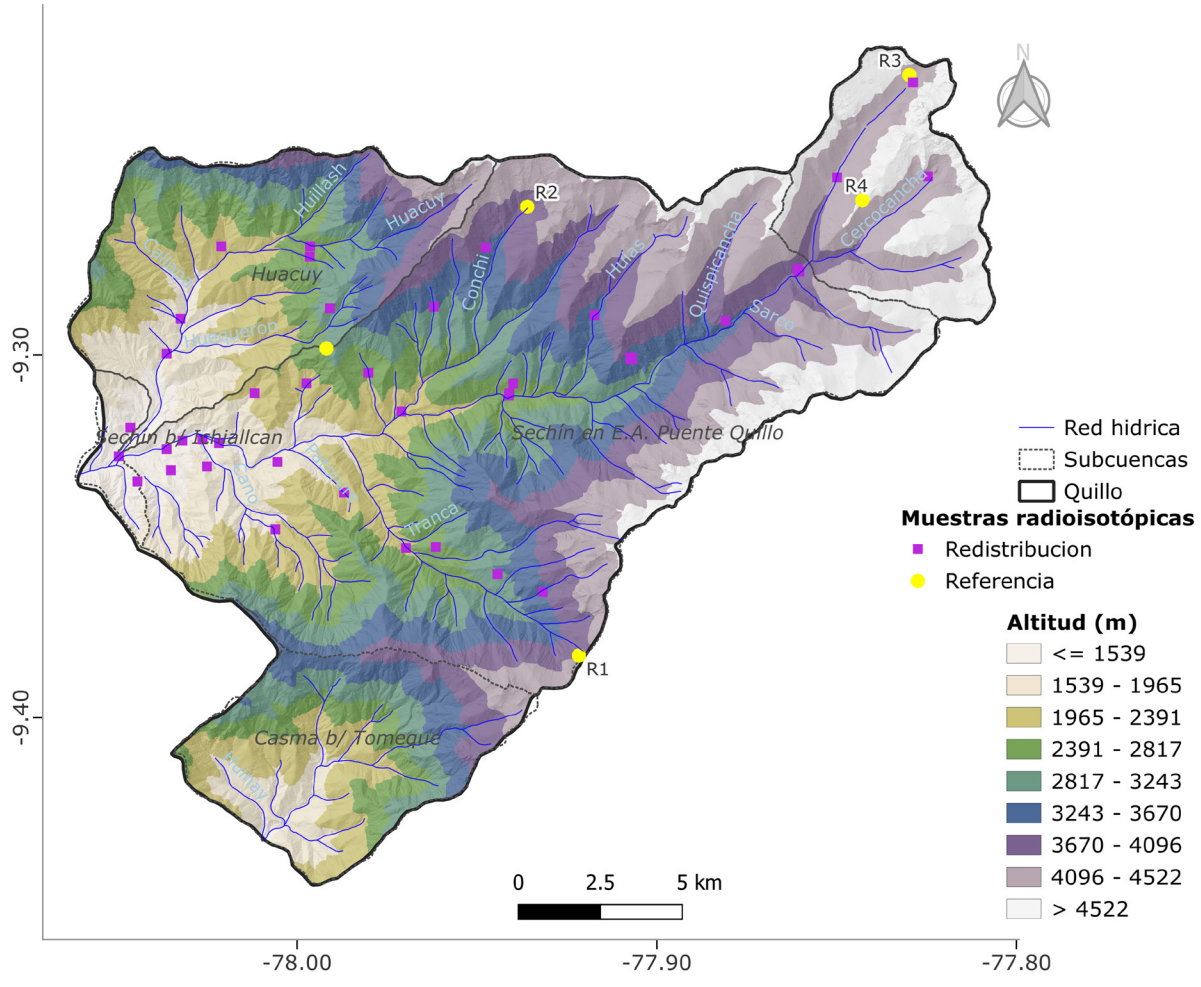


Figura 4.1.1. Muestras recolectadas en sitios de redistribución y referencia en el distrito de Quillo.



Figura 4.1.2. Evidencia fotográfica del muestreo en las diversas coberturas de suelos.

gamma. El Cs-137 se detectó en 25 muestras (31 %) y el Pb-210ex, en 65 muestras (79 %); las muestras restantes quedaron por debajo del límite de detección (LD = 0.1 Bq kg^{-1}; Currie, 1968; 95 % de confianza) y fueron excluidas de los cálculos.

b. Validación de los sitios de referencia

Se identificaron cuatro sitios de referencia (R1 a R4, Figura 4.1.1) en áreas planas y con mínima intervención humana. En todos, el inventario decreció exponencialmente desde la superficie hasta los 15 cm (Figura 4.1.3).

Ambos trazadores mostraron coeficientes de variación elevados (Cs-137: 91 %; Pb-210ex: 43 %), consistentes con el marcado gradiente altitudinal de precipitación en el distrito, que varía de 132 mm/año en la parte baja a 712 mm/año en la cabecera (RAIN4PE). Este gradiente se refleja en inventarios claramente diferenciados por piso altitudinal: en la parte media y baja (<4181 m s. n. m.; R1-R2), los valores promedio fueron 24 Bq/m^2 (Cs-137) y 4287 Bq/m^2 (Pb-210ex), mientras que en la parte alta (>4181 m s. n. m.; R3-R4) ascendieron a 141 Bq/m^2 (Cs-137) y 8416 Bq/m^2 (Pb-210ex). En consecuencia, se definieron referencias diferenciadas por piso altitudinal: R1-R2 para zonas por debajo de 4181 m s. n. m. y R3-R4 para zonas por encima.

4.1.2 Diagnóstico de la pérdida de suelo por uso de tierra

Las tasas de redistribución de suelo se estimaron mediante el modelo de balance de masa de Soto y Navas (2004, 2008) para Cs-137, y mediante los modelos de balance de masa (coberturas agrícolas) y de migración-difusión (coberturas naturales) según Walling y He (1999) para Pb-210ex.

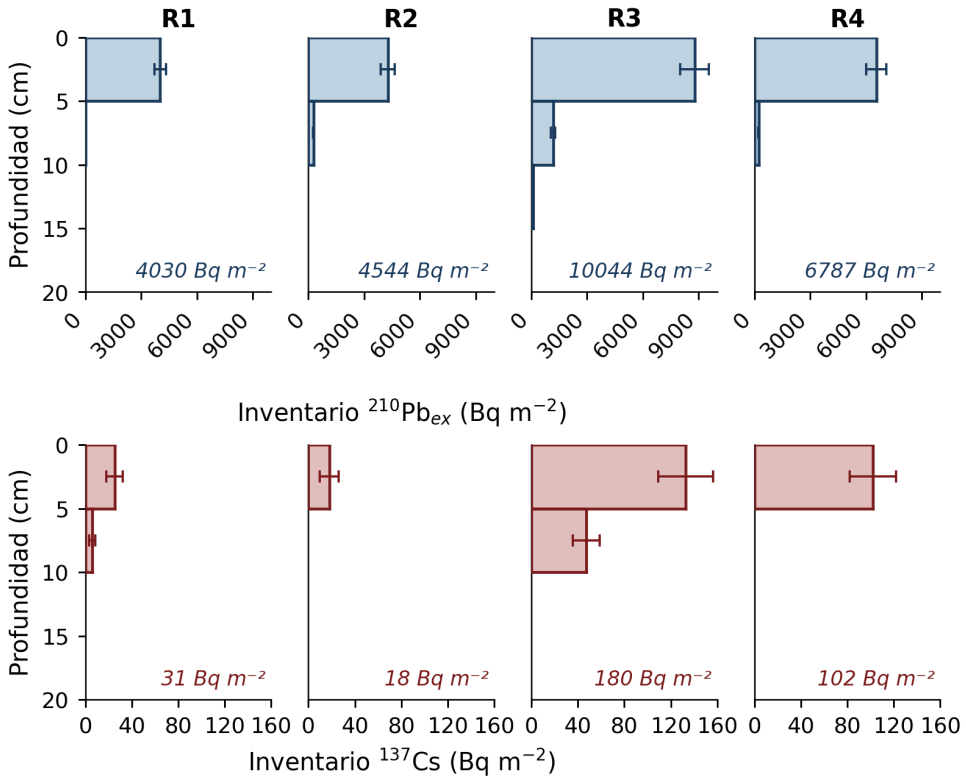


Figura 4.1.3. Distribución de Pb-210ex y Cs-137 en el pertil del suelo de sitios de referencia.

Los suelos desnudos registran las tasas más altas del distrito (76 t/ha/año por Cs-137 y 77 t/ha/año por Pb-210ex), seguidos por la agricultura (44 t/ha/año y 22 t/ha/año, respectivamente). En esta última cobertura, la tasa de Cs-137 duplica la de Pb-210ex, lo que podría reflejar una intensificación erosiva reciente asociada a cambios en las prácticas de cultivo. La alta variabilidad entre parcelas (DE: ±35 t/ha/año y ±22 t/ha/año) indica, además, que la pérdida de suelo no es uniforme entre ellas.

Las coberturas naturales registran las pérdidas más bajas. El pajonal presenta 3 t/ha/año (Cs-137) y 2 t/ha/año (Pb-210ex), con baja variabilidad espacial (DE: ±1 t/ha/año), mientras que los pastos y el matorral se sitúan entre 4 t/ha/año y 5 t/ha/año, con variabilidad moderada y distribución espacial homogénea.

El eucalipto presenta tasas de 15 t/ha/año y 12 t/ha/año (Cs-137 y Pb-210ex, respectivamente), mientras que el bofedal muestra una ganancia neta de 9 t/ha/año y 7 t/ha/año, consistente con su función como trampa natural de sedimentos. Ambos resultados provienen de un único punto de muestreo, por lo que deben interpretarse como indicativos y no como representativos de toda la cobertura.

Las terrazas de tierra registran pérdidas de 9 t/ha/año a 10 t/ha/año, entre 4 y 5 veces menores que las de la agricultura sin esta práctica, lo que confirma su eficacia como medida de conservación en el distrito.

4.1.3 Factores que controlan la variabilidad espacial de la redistribución histórica

El análisis se restringió a los puntos con pérdida neta de suelo: se excluyeron los sitios de acumulación, entre ellos el bofedal, que presenta ganancia neta y se discute por separado en la sección 4.1.2. Sobre esa base, el uso del suelo explica entre el 49 % y el 61 % de la variabilidad total en las tasas de redistribución (Kruskal-Wallis: Cs-137, $H = 14.42$, $gl = 4$, $p = 6.1 \times 10^{-3}$, $\eta^2 = 0.61$, $n = 24$; Pb-210ex, $H = 18.07$, $gl = 4$, $p = 1.2 \times 10^{-3}$, $\eta^2 = 0.49$, $n = 36$). Los cinco grupos comparados fueron agricultura, suelo desnudo, matorral, pajonal y pastos. Según el análisis *post hoc* de Dunn para comparaciones múltiples, con corrección de Benjamini-Hochberg, en Pb-210ex el suelo desnudo y la agricultura difieren significativamente del matorral y del pajonal ($p = 0.022$), mientras que entre matorral y

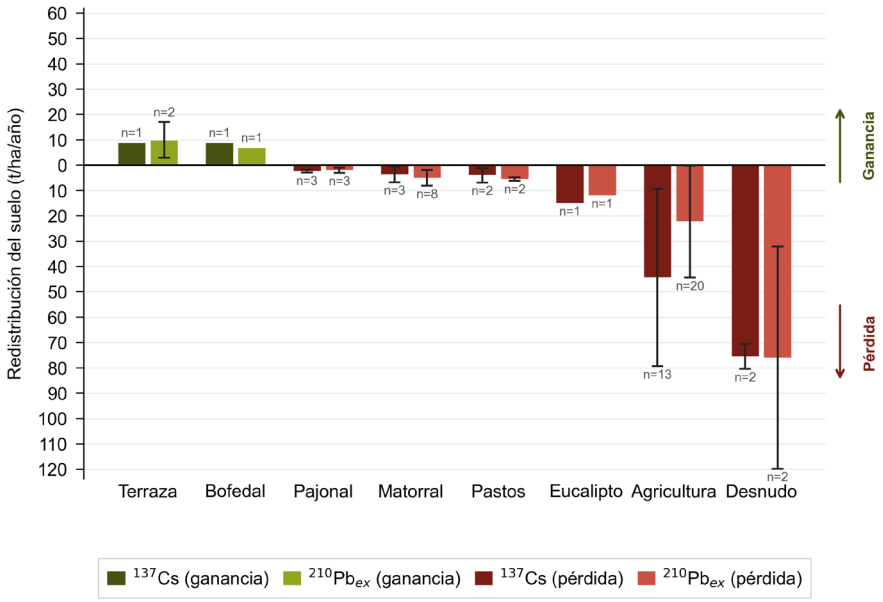


Figura 4.1.4. Balance de redistribución de suelo según cobertura vegetal. Barras rojas: pérdida; barras verdes: ganancia (t/ha/año), estimadas mediante Cs-137 y Pb-210ex. Barras de error: desviación estándar.

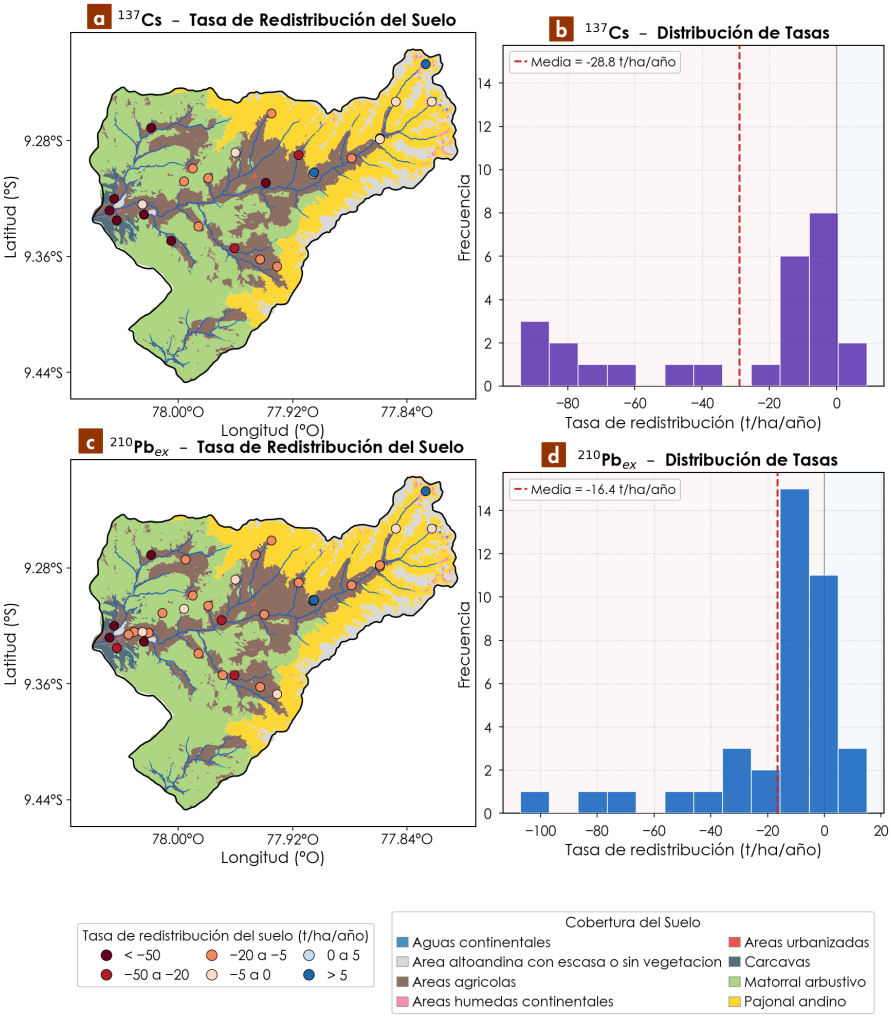


Figura 4.1.5. Distribución espacial de las tasas de redistribución estimadas mediante Cs-137 (a) y Pb-210ex (c), con histogramas distritales (b, d).

pajonal no se detectaron diferencias. En Cs-137 se observa un patrón equivalente, aunque no significativo tras la corrección múltiple, lo que es coherente con el menor tamaño muestral.

La comparación directa entre coberturas perturbadas (agricultura y suelo desnudo) y coberturas perennes (matorral y pajonal) permite cuantificar esta diferencia: los suelos perturbados pierden 6 veces más según Pb-210ex y 21.5 veces más según Cs-137 (Mann-Whitney unilateral: Cs-137, $p = 1.2 \times 10^{-4}$, $r = 1.00$; Pb-210ex, $p = 6.5 \times 10^{-5}$, $r = 0.81$).

La topografía, en cambio, no ejerce un control independiente sobre la erosión. Las correlaciones globales entre variables topográficas y tasas de redistribución son débiles ($|\rho| \leq 0.40$) y se disipan al controlar por cobertura mediante correlación parcial de Spearman (todos $|\rho| \leq 0.30$). Dentro de la cobertura agrícola, la curvatura de perfil muestra una asociación moderada con Cs-137 ($\rho = 0.64$, $p = 0.026$), pero ninguna variable topográfica es consistente en ambos trazadores simultáneamente (Figura 4.1.6).

4.2 Dinámica y monitoreo de la erosión actual

4.2.1 Red de microparcelas experimentales

El monitoreo de la escorrentía y la pérdida de suelo por evento se realizó mediante 26 microparcelas experimentales de 1 m^2, distribuidas en dos estaciones: 14 en Marcopampa (3534 m s. n. m.) y 12 en Quillo (1315 m s. n. m.). Cada parcela cuenta con bordes metálicos, canal colector y recipiente de captación; las estaciones meteorológicas asociadas registran la precipitación con una resolución de 5 minutos y la temperatura, lo que permite vincular cada muestra con las condiciones exactas del evento (Figura 4.2.1).

En Marcopampa se monitorearon cuatro coberturas: holantao (*Pisum sativum* L. var. *saccharatum*), suelo desnudo tipo *badlands*, pastos naturales (*Calamagrostis* sp.) y matorral (*Baccharis* sp.); este último fue excluido del análisis por volumen insuficiente. En Quillo se monitorearon suelo desnudo y pastos naturales (poáceas: *Calamagrostis* sp.). El conjunto reúne 38 observaciones: 21 de holantao, 12 de suelo desnudo y 5 de pastos.

4.2.2 Poder erosivo de la lluvia

La pérdida de suelo por evento (SL) muestra dos niveles diferenciados (Figura 4.2.2). Holantao y suelo desnudo presentan medianas similares: 1.2 g/m^2 y 1.3 g/m^2, respectivamente, con rangos intercuartílicos superpuestos, mientras que los pastos se sitúan un orden de magnitud por debajo (mediana: 0.1 g/m^2). La convergencia entre holantao y suelo desnudo resulta de mecanismos distintos. En Marcopampa, el suelo desnudo genera más escorrentía (coeficiente de escorrentía mediano de 0.18, frente a 0.13 en holantao), pero con una concentración de sedimentos tres veces menor (0.5 g/L frente

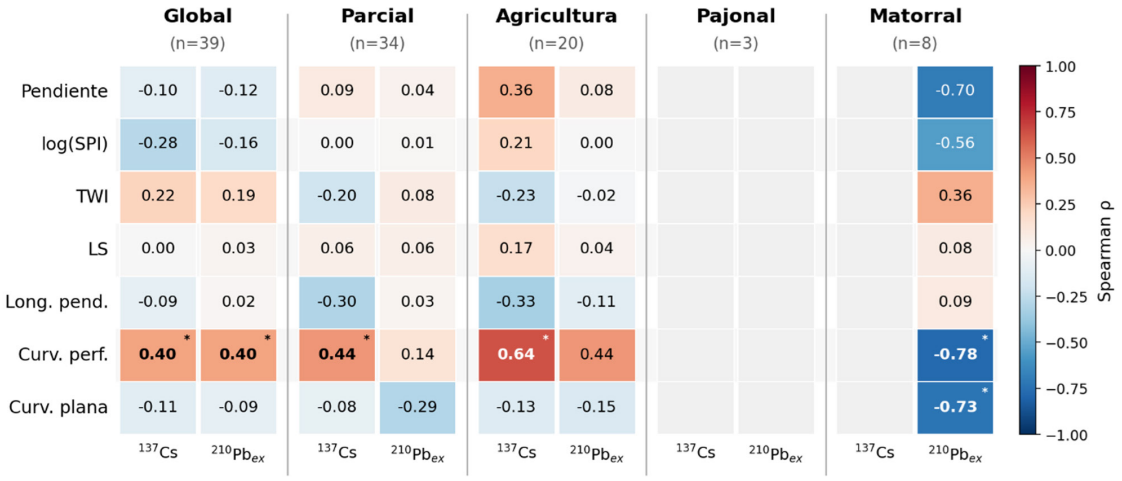


Figura 4.1.6. Correlaciones de Spearman (ρ) entre variables topográficas y tasas de redistribución del suelo en el distrito de Quillo. Celdas en blanco: n < 4. Asteriscos: * p < 0.05; ** p < 0.01; *** p < 0.001.



Figura 4.2.1. Instalaciones de monitoreo del proyecto en el distrito de Quillo. (a) Vista general de las laderas con cultivo de holantao en terrazas, estación Marcopampa (3534 m s. n. m.); (b) detalle de la microparcela con cultivo de holantao, en el que se observan los bordes metálicos perimetrales y el canal de captación de escorrentía y sedimentos.

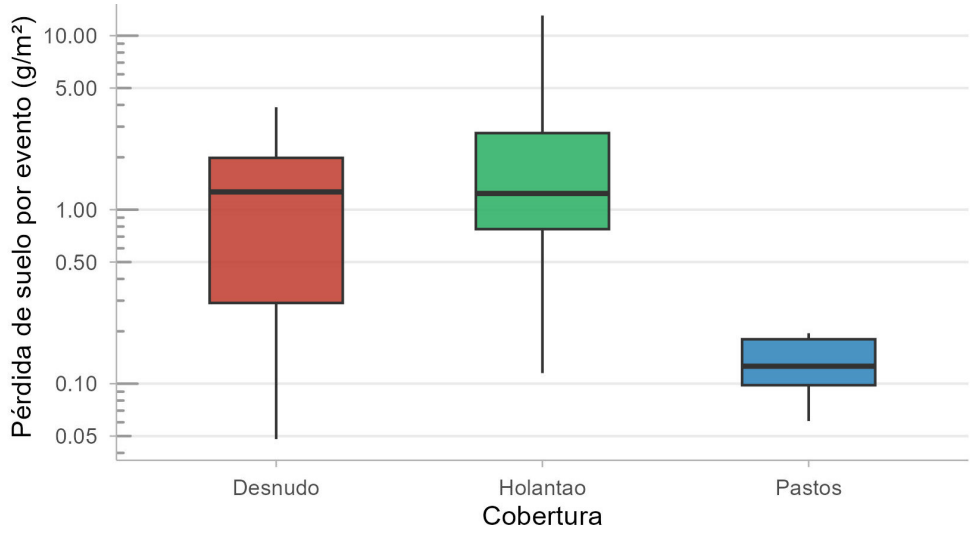


Figura 4.2.2. Pérdida de suelo por evento (g/m²) según cobertura, distrito de Quillo, campaña febrero-abril de 2024. Escala logarítmica en el eje vertical. Los puntos representan observaciones individuales; la línea central indica la mediana; los límites de la caja delimitan el rango intercuartílico Q25-Q75. Desnudo: n = 12; holantao: n = 21; pastos: n = 5.

a 1.8 g/L). En holantao, el menor volumen de escorrentía arrastra más partículas por litro, lo que es consistente con un suelo más removido por el laboreo entre surcos.

La variabilidad interna del holantao es la más elevada, con valores entre 0.1 g/m² y 13 g/m² por evento. Esa variabilidad proviene tanto de las diferencias entre parcelas como de las diferencias entre eventos: en el evento del 11 de abril, la pérdida varió entre 1.3 g/m² y 13 g/m² según la parcela, y en una misma parcela varió entre 0.7 g/m² y 12 g/m² según el evento. El suelo desnudo, en cambio, presenta un rango más acotado (de 0.05 g/m² a 3.9 g/m²).

La comparación entre estaciones para suelo desnudo muestra pérdidas de suelo similares por mecanismos distintos. Las medianas de SL son muy próximas (1.3 g/m² en Marcopampa y 1.2 g/m² en Quillo), pero en Quillo el coeficiente de escorrentía fue menos de la mitad (0.08 frente a 0.18) y la concentración de sedimentos, más del doble (1.3 g/L frente a 0.5 g/L). La menor escorrentía de Quillo, coherente con la campaña atípicamente seca descrita en la sección 3.3.2, se compensó con una mayor carga de sedimento por litro.

4.2.3 Factores que controlan la pérdida de suelo y modelo predictivo

El análisis de correlaciones de Spearman entre la pérdida de suelo por evento y el conjunto de variables meteorológicas, hidrológicas y edáficas permite identificar una jerarquía clara de predictores (Figura 4.2.3). La intensidad I_{30} (rs = 0.56), la intensidad I_5 (rs = 0.55), el coeficiente

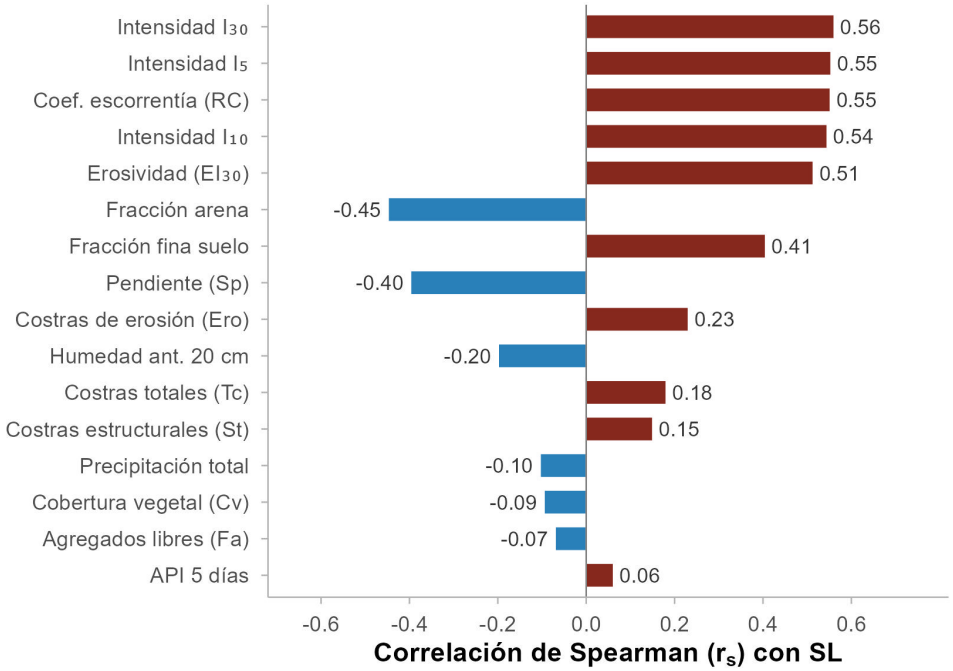


Figura 4.2.3. Correlaciones de Spearman (rs) entre la pérdida de suelo por evento (g/m²) y las variables predictoras, distrito de Quillo, campaña febrero-abril de 2024. Las barras hacia la derecha indican correlación positiva y, hacia la izquierda, negativa. Variables ordenadas por el valor absoluto de rs.

de escorrentía RC (rs = 0.55), la intensidad I_{10} (rs = 0.54) y la erosividad EI_{30} (rs = 0.51) encabezan el ordenamiento, lo que indica que la pérdida de suelo en Quillo responde principalmente a la intensidad de la lluvia y al volumen de flujo superficial generado. Le sigue la textura del suelo (arena: rs = –0.45; finos: rs = 0.41), lo que es consistente con una mayor erodibilidad de los suelos más finos. La pendiente presenta una correlación negativa (rs = –0.40) que no debe interpretarse como un efecto físico: varía poco entre parcelas (de 12° a 20°) y coincide con la cobertura (12° en holantao y de 18° a 20° en pastos), por lo que su correlación refleja sobre todo la diferencia entre coberturas. La precipitación total del evento, la cobertura vegetal y la humedad antecedente presentan correlaciones débiles ($|rs| \leq 0.20$), lo que indica que, en el rango de condiciones observado durante la campaña, estas variables no fueron determinantes de primer orden.

La integración de los predictores en un modelo de regresión múltiple produce la siguiente ecuación.

$$\ln(SL) = -1.69 + 1.13 \cdot \ln(EI_{30} \cdot RC) - 0.01 \cdot Cv + 0.08 \cdot Finos$$

El término $\ln(EI_{30} \cdot RC)$ combina energía cinética y fracción de lluvia convertida en escorrentía; su exponente (1.13 ≈ 1) indica un crecimiento aproximadamente proporcional a la demanda erosiva, consistente con el modelo TEST (Van Dijk & Bruijnzeel, 2004; Patin et al., 2018). Cada punto porcentual de cobertura vegetal (Cv) reduce la SL en 1 %, y cada punto porcentual adicional de Finos incrementa la SL en 8 %, lo que refleja la mayor erodibilidad de los suelos de textura fina. Esta última variable extiende el modelo TEST base y se incorporó porque el contenido de finos varió entre parcelas (de 18 % a 35 %).

El modelo explica el 68 % de la varianza (R^2 = 0.7, R^2_{aj} = 0.7, n = 38), con un RMSE de 0.8 en escala logarítmica y sin sesgo sistemático en todo el rango observado (de 0.1 g/m² a 10 g/m²). Los puntos de validación independiente se distribuyen dentro de la banda de error, lo que respalda la capacidad predictiva del modelo (Figura 4.2.4).

4.2.4 Proyección anualizada y umbrales de sostenibilidad

La proyección de las tasas de pérdida de suelo a escala anual se obtuvo mediante la aplicación del modelo TEST a la totalidad de los eventos registrados durante la campaña y la extrapolación del resultado al régimen pluviométrico histórico del distrito (RAIN4PE, 1981-2015). Para la estación Quillo, cuya campaña fue atípicamente seca (30 mm frente a una media histórica de

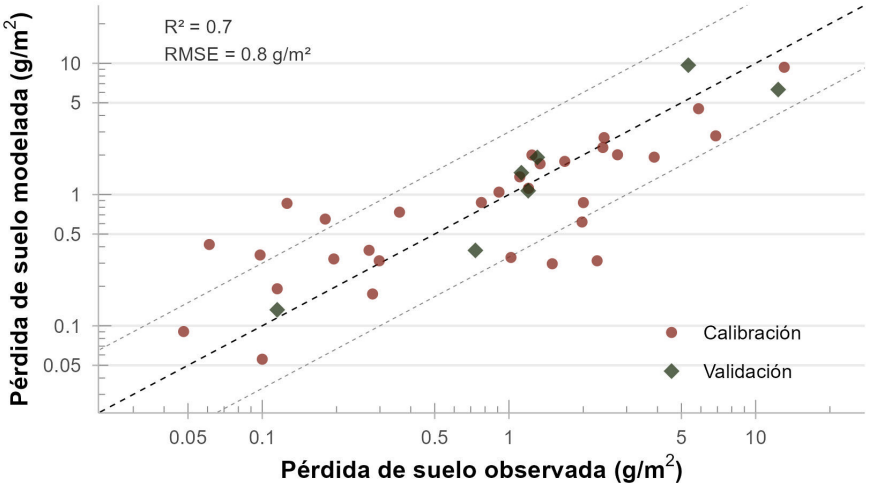


Figura 4.2.4. Valores observados frente a los predichos por el modelo TEST extendido para la pérdida de suelo por evento (g/m²), escala logarítmica. La línea discontinua central representa la línea 1:1. Círculos: datos de calibración (n = 32); rombos: datos de validación independiente (n = 6). R^2 = 0.7; RMSE = 0.8.

febrero-abril de 246 mm), la proyección se realizó con base en el régimen de la estación Marcopampa. Este procedimiento asegura la comparabilidad entre coberturas y con otros distritos del programa, y es consistente con la limitación de resolución espacial de la grilla RAIN4PE descrita en la sección 3.3.1. Los intervalos de confianza al 95 % se obtuvieron mediante *bootstrap* con 1000 iteraciones.

Las tasas anualizadas sitúan al suelo desnudo y al holantao en niveles equivalentes y críticos: 32 t/ha/año y 31 t/ha/año, respectivamente, ambos más de tres veces por encima del umbral global de sostenibilidad de 10 t/ha/año (Figura 4.2.5). Los pastos naturales (*Calamagrostis* sp.), en cambio, registran 3 t/ha/año, por debajo del umbral y con un intervalo de confianza acotado (IC 95 %: de 2 t/ha/año a 5 t/ha/año). Los intervalos de confianza amplios para suelo desnudo (IC 95 %: de 7 t/ha/año a 50 t/ha/año) y holantao (IC 95 %: de 23 t/ha/año a 61 t/ha/año) reflejan principalmente la variabilidad entre parcelas y entre eventos. En holantao, incluso el límite inferior del intervalo (23 t/ha/año) supera el umbral de referencia; en suelo desnudo, el límite inferior (7 t/ha/año) queda por debajo de él.

El resultado central es la equivalencia entre holantao y suelo desnudo en pérdida de suelo anual. Que un cultivo comercial erosione al mismo ritmo que un suelo sin cobertura sugiere que las prácticas asociadas al holantao (laboreo, remoción entre surcos y escasa cobertura basal) anulan el efecto protector esperado de la vegetación. Los pastos naturales, con tasas diez veces menores, constituyen la referencia de cobertura protectora para el distrito.

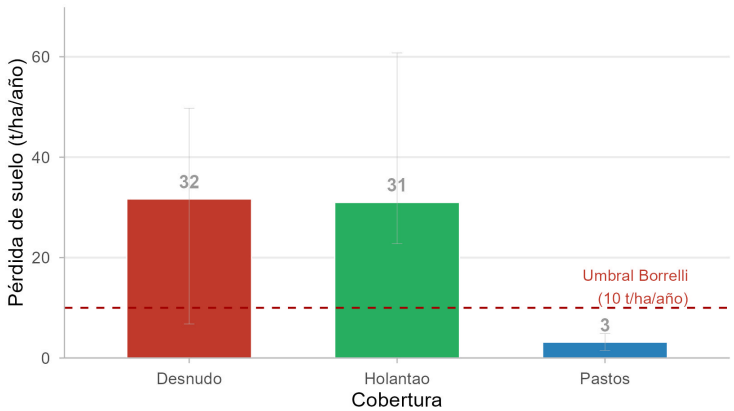


Figura 4.2.5. Tasas de pérdida de suelo anualizadas (t/ha/año) por cobertura, distrito de Quillo. Las barras representan la mediana proyectada; las líneas de error indican el intervalo de confianza al 95 % (*bootstrap*, 1000 iteraciones). La línea discontinua roja señala el umbral global de sostenibilidad de 10 t/ha/año (Borrelli et al., 2017).

5. Dinámica de los sedimentos

5.1 Caracterización de los sedimentos

5.1.1 Monitoreo de la concentración de sedimentos en suspensión

La estación hidrométrica H01 (1177 m s. n. m.), ubicada a la salida de la cuenca del distrito, reunió 443 muestras de sedimentos en suspensión entre febrero y mayo de 2024. Las concentraciones de sedimentos en suspensión (CSS) presentaron una distribución asimétrica, con media de 37.3 mg/L y mediana de 18.8 mg/L. El percentil 75 fue 28.7 mg/L y aproximadamente el 82 % de las observaciones permaneció por debajo de 35 mg/L. Los valores oscilan entre 0.4 mg/L y 1967 mg/L, lo que evidencia una elevada heterogeneidad temporal.

El 10 % de las observaciones de mayor magnitud concentró el 54 % de la suma acumulada de CSS y el 20 % superior concentró el 65 %. La mayor parte de las muestras presentó concentraciones bajas, mientras que pocos pulsos explicaron gran parte de la variabilidad temporal.

5.1.2 Dinámica temporal de la concentración de sedimentos en suspensión

Marzo registró la mayor concentración media mensual, con 57.4 mg/L y una mediana de 24.3 mg/L; además, concentró 7 observaciones superiores a 200 mg/L y alcanzó un máximo de 628 mg/L. Febrero presentó una media de 47.5 mg/L y concentró el máximo absoluto de la campaña, con 1967 mg/L. Abril registró una media de 25 mg/L y una mediana de 15.5 mg/L, aunque incluyó el segundo máximo de la serie, con 722 mg/L. Mayo presentó las menores concentraciones mensuales, con una media de 20.3 mg/L y una mediana de 11.9 mg/L.

Estos resultados complementan el capítulo 4, pero representan escalas distintas. Las microparcelas cuantificaron pérdidas anualizadas de 32 t/ha/año y 31 t/ha/año para suelo desnudo y holantao, respectivamente, mientras que H01 caracterizó la CSS en el cauce de salida, expresada en mg/L.

6. Mapeo de las tasas y la severidad de la erosión

6.1 Construcción del modelo espacial de erosión

La caracterización de la erosión hídrica en el distrito de Quillo se realizó mediante WaTEM/SEDEM. El modelo representó espacialmente procesos potenciales de generación, redistribución y conectividad sedimentaria. El análisis integró las subcuencas Cabecera Sechín, Casma b/ Tomeque, Huacuy, Sechín b/ Ichiallcan y Sechín en E. A. Puente Quillo, sobre aproximadamente 371 km² de superficie modelada. Las mayores tasas potenciales se concentraron principalmente en áreas agrícolas y sectores localizados con elevada conectividad hacia la red hídrica, mientras que las condiciones de menor severidad se distribuyeron con mayor frecuencia en sectores territorialmente más estables.

El modelo se construyó mediante los factores R, K y LS, derivados de información climática, edáfica y topográfica. El factor de erosividad (R) se estimó mediante el producto RAIN4PE ajustado con información local y representó las condiciones medias de precipitación del periodo 1981-2015. El factor de erodabilidad (K; Figura 6.1.1B) se estimó a partir de SoilGrids250m (Hengl et al., 2017) mediante la formulación propuesta por Wischmeier y Smith (1978), con valores aproximados entre 0.024 y 0.028, lo que evidencia una variabilidad espacial baja dentro del distrito. El factor topográfico (LS) se calculó a partir de un DEM de 20 m. Cada celda representó 400 m²; por ello, el modelo no representa explícitamente cárcavas ni flujos concentrados de pequeña extensión.

El factor de cobertura vegetal y uso del suelo (C; Figura 6.1.1A) presentó valores entre 0 y 0.95, de acuerdo con el tipo de cobertura y el grado de exposición superficial. La matriz territorial estuvo dominada por el matorral arbustivo, con 142 km², las áreas agrícolas, con 97 km², y el pajonal andino, con 93 km²; en conjunto, estas tres coberturas ocuparon aproximadamente 332 km², equivalentes al 89 % del área modelada. El matorral presentó C = 0.18 y el pajonal C = 0.28, mientras que las áreas altoandinas con escasa o sin vegetación alcanzaron C = 0.35 y las áreas agrícolas C = 0.50. El valor máximo, C = 0.95, correspondió a cárcavas, cuya extensión territorial fue reducida. Esta distribución permitió diferenciar la matriz dominante de los sectores con mayor exposición potencial a la pérdida de suelo.

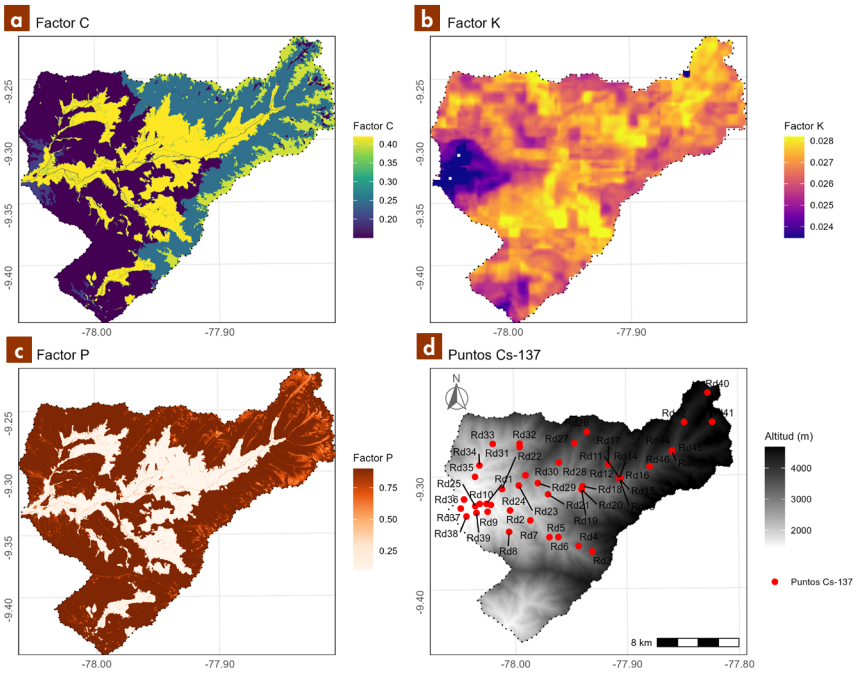


Figura 6.1.1. Variables de ingreso del modelo distribuido WaTEM/SEDEM en el distrito de Quillo. A) Cobertura vegetal del distrito de Quillo. B) Factor K, estimado a partir de datos de SoilGrids. C) Distribución espacial del factor P en el distrito. D) Tasas de erosión medidas con Cs-137, utilizadas en la etapa de calibración del modelo.

El factor de prácticas de conservación (P; Figura 6.1.1C) presentó valores entre 0.1 y 0.9. Predominaron valores altos (0.8-0.9) sobre gran parte del distrito, lo que indica limitada efectividad territorial de prácticas de control de escorrentía; los valores bajos (0.1-0.4) se concentraron en áreas agrícolas localizadas. Las tasas derivadas de Cs-137 (Figura 6.1.1D) se emplearon en la calibración multiobjetivo de WaTEM/SEDEM mediante 1200 evaluaciones con el algoritmo NSGA-II. Se ajustaron R, ktc_low, ktc_high y C_mult utilizando NSE y KGE como criterios de desempeño. Los mejores valores obtenidos fueron NSE = 0.6 y KGE = 0.25.

6.2 Espacialización de la severidad de la pérdida de suelo

El análisis espacial de las tasas modeladas mostró valores de erosión potencial inferiores a 2.5 t/ha/año y un máximo de 163t/ha/año(Figura6.2.1).Lascategoríasmuydébil (<2.5 t/ha/año) y débil (2.5-7.5 t/ha/año) concentraron 43 km², equivalentes al 12 % del área modelada. La categoría moderada (7.5-12.5 t/ha/año) ocupó 110 km² y representó el 30 %. En conjunto, las clases con tasas inferiores a 12.5 t/ha/año abarcaron 153 km², equivalentes al 41 % del territorio evaluado. En contraste, las categorías fuerte (de 12.5 t/ha/año a 20 t/ha/año) y muy fuerte (de 20 t/ha/año a 30 t/ha/año) ocuparon 195 km², equivalentes al 53 %, y constituyeron la fracción erosiva predominante del sistema distrital. La validación frente a Cs-137 mostró un bajo sesgo global (PBIAS = −2.2 %), con MAE = 23.5 t/ha/año y RMSE = 34.7 t/ha/año. El análisis de sensibilidad identificó a R y ktc_low como los parámetros de mayor influencia (r = 0.9; ρ = 0.6), mientras que la incertidumbre paramétrica presentó valores relativos de hasta el 74 %.

Las categorías severa (de 30 t/ha/año a 45 t/ha/año), muy severa (de 45 t/ha/año a 60 t/ha/año) y extrema (>60 t/ha/año) ocuparon 24 km², equivalentes al 6 % del área modelada. La categoría severa abarcó 19 km², mientras que las clases muy severa y extrema ocuparon aproximadamente 3 km² y 1 km², respectivamente. Los puntos críticos erosivos —definidos por tasas >30 t/ha/año, pendientes >35° y proximidad <50 m a la red hídrica— sumaron 46 ha; de este total, Sechín en E. A. Puente Quillo concentró 45 ha, equivalentes al 98 %, con una mediana interna de 38 t/ha/año y máximos de 163 t/ha/año. Casma b/ Tomeque y Huacuy concentraron conjuntamente menos de 1 ha bajo estas condiciones críticas.

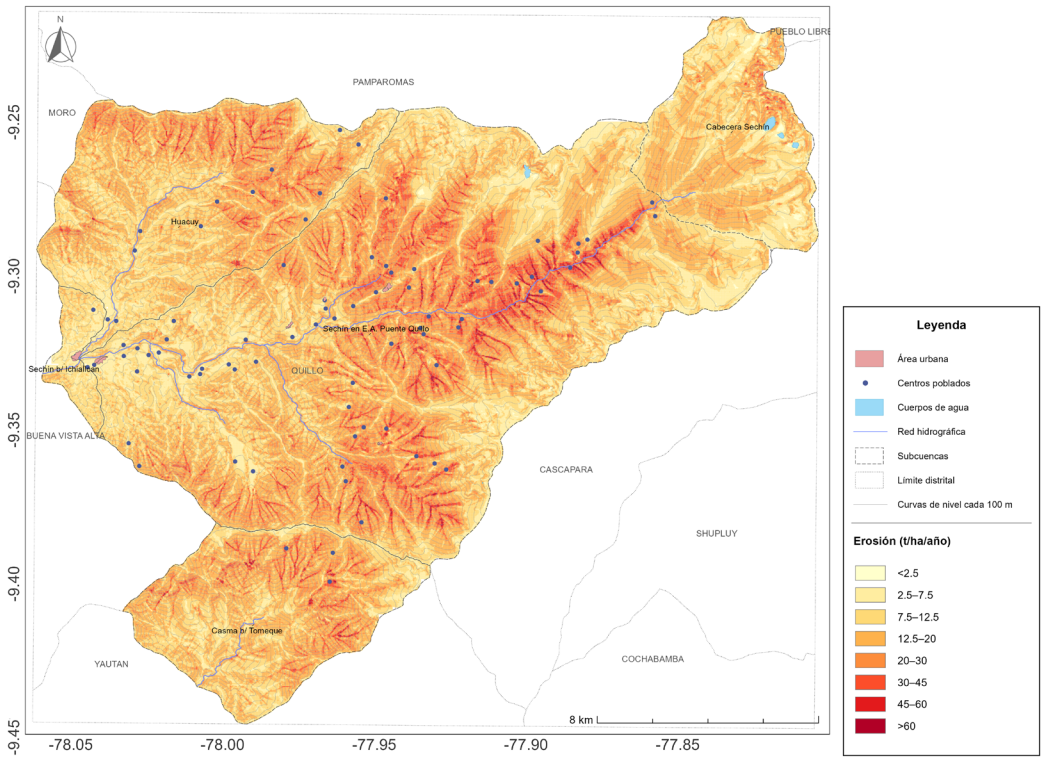


Figura 6.2.1. Distribución espacial de las tasas de erosión hídrica en el distrito de Quillo.

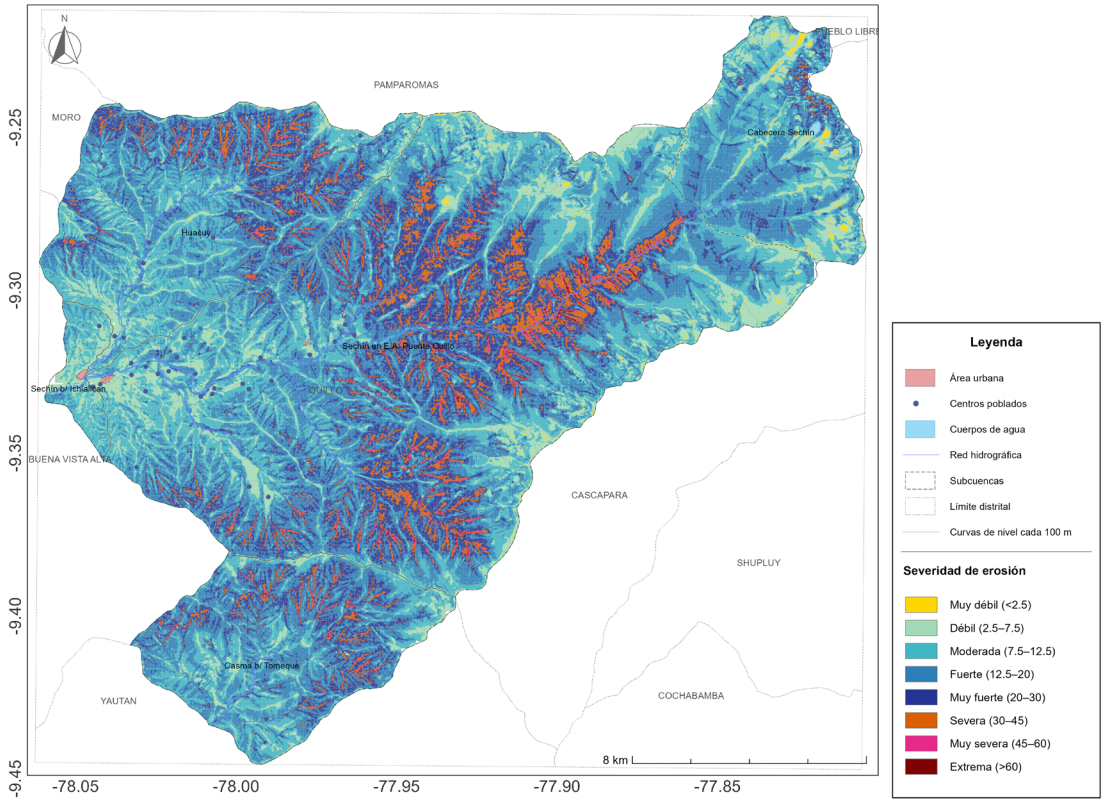


Figura 6.2.2. Mapa de severidad: identificación de las áreas con mayor pérdida de suelo.

Las diferencias entre subcuencas fueron marcadas. Sechín en E. A. Puente Quillo registró el percentil 90 más alto, con 29 t/ha/año; Huacuy y Casma b/ Tomeque alcanzaron aproximadamente 25 t/ha/año, Cabecera Sechín 19 t/ha/año y Sechín b/ Ichiallcan 13 t/ha/año. En proporción interna, Casma b/ Tomeque presentó 64 % de su superficie bajo erosión fuerte o superior (>12.5 t/ha/año), Puente Quillo 61 %, Huacuy 60 %, Cabecera Sechín 46 % e Ichiallcan 12 %. Puente Quillo concentró además 18 km² con tasas >30 t/ha/año, equivalentes al 77 % del total distrital; Huacuy aportó 3 km² (13 %), Casma b/ Tomeque 2 km² (9 %) y Cabecera Sechín 24 ha (1 %), mientras Ichiallcan no registró categorías severas.

La relación entre cobertura y severidad mostró un contraste entre extensión territorial e intensidad erosiva. El matorral arbustivo y el pajonal andino ocuparon conjuntamente 235 km²; el 67 % y el 52 % de sus superficies, respectivamente, presentaron erosión fuerte o superior, pero solo el 5 % y el 2 % alcanzaron categorías severas. La agricultura ocupó 97 km² y registró el 71 % de su superficie bajo erosión fuerte o superior y el 15 % bajo categorías severas; además, aportó 15 km², equivalentes al 62 % de toda la superficie distrital >30 t/ha/año. El matorral aportó otro 28 % y el pajonal, el 7 % del total severo. Las áreas altoandinas con escasa o sin vegetación ocuparon 30 km², con el 22 % bajo erosión fuerte o superior y menos del 1 % en categorías severas. Las cárcavas presentaron la mayor intensidad relativa, con el 100 % de su superficie en erosión fuerte o superior y el 83 % en categoría severa o superior, aunque aportaron alrededor del 1 % del área severa distrital.

La proximidad a la red hídrica mostró una respuesta diferenciada, pero no un gradiente lineal simple entre las cinco clases evaluadas. El percentil 90 osciló entre 26 t/ha/año y 33 t/ha/año y la proporción de superficie severa, entre el 6 % y el 13 %; la categoría extrema permaneció por debajo del 1 % en todas las clases. Las dos clases con mayor percentil 90 alcanzaron aproximadamente 33 t/ha/año y cerca del 13 % de superficie severa, mientras que la de menor valor registró 26 t/ha/año y el 6 %. Por tanto, la proximidad al drenaje no explicó por sí sola la severidad; los puntos críticos se concentraron donde coincidieron tasas >30 t/ha/año, pendientes >35° y distancias <50 m a la red hídrica.

La integración de los resultados muestra que la erosión hídrica en Quillo responde a un patrón

espacial concentrado. Las clases con tasas inferiores a 12.5 t/ha/año ocuparon 153 km² (41 %), mientras que 218 km² (59 %) presentaron erosión fuerte o superior; 24 km² superaron 30 t/ha/año y cerca de 1 km² alcanzó la categoría extrema. Sechín en E. A. Puente Quillo concentró el 77 % de la superficie severa distrital y el 98 % de los puntos críticos. La agricultura aportó el 62 % del área severa total, seguida por el matorral, con el 28 %, y el pajonal, con el 7 %, mientras que las cárcavas destacaron por su elevada severidad relativa. En conjunto, la pérdida potencial de suelo se organizó en focos donde coincidieron la intervención del suelo, la pendiente y la conectividad con la red de drenaje.

7. Conclusiones y recomendaciones para la gestión

7.1 ¿Qué nos dicen los isótopos, las microparcelas y el modelado?

Las tres técnicas ordenan las coberturas de forma similar, aunque difieren en la magnitud de las tasas. Según el Cs-137, que integra los últimos 61 años, los suelos desnudos pierden 76 t/ha/año y los agrícolas, 44 t/ha/año, frente a 3-5 t/ha/año en pajonal, pastos y matorral. Las microparcelas, que cubren los eventos de una sola campaña, separan igualmente las coberturas perturbadas de las perennes: 32 t/ha/año en suelo desnudo, 31 t/ha/año en holantao y 3 t/ha/año en pastos naturales. El modelo distribuido concentra en la agricultura el 62 % de la superficie con tasas superiores a 30 t/ha/año, pese a que esta cobertura ocupa solo el 26 % del distrito.

En suelo desnudo, los trazadores estiman 76 t/ha/año y las microparcelas, 32 t/ha/año. La diferencia no indica que uno de los métodos sea incorrecto: cada escala mide procesos distintos. A escala de parcela de 1 m^2, el sedimento procede casi exclusivamente de la erosión entre surcos, mientras que los surcos y las cárcavas efímeras solo pasan a dominar a escala de ladera (Ke & Zhang, 2024). Los trazadores, en cambio, integran la redistribución por laboreo y décadas de eventos extremos, de modo que acotan el orden de magnitud del proceso acumulado. Las tasas de Cs-137 son, por tanto, las que corresponden a la escala de ladera, mientras que las microparcelas aportan el contraste entre coberturas y la respuesta por evento.

El modelado espacial indica que las tasas de erosión fuerte o superior abarcan 218 km^2, equivalentes al 59 % del área modelada, pero la fracción crítica está concentrada: 24 km^2 superan 30 t/ha/año y solo 46 ha reúnen simultáneamente tasas superiores a 30 t/ha/año, pendientes mayores de 35° y menos de 50 m de distancia a la red de drenaje. El 98 % de esos focos se localiza en la subcuenca Sechín en E. A. Puente Quillo, que concentra además el 58 % del territorio distrital, el principal núcleo agrícola, con 74 km^2, el 77 % de la superficie distrital con tasas superiores a 30 t/ha/año y el 74 % del incremento agrícola registrado entre 1988 y 2024.

7.2 Situación de Quillo en el contexto andino

Quillo se encuentra en el sector de mayor relieve de la vertiente occidental. Se ubica a unos 9.3° S, dentro de la franja entre 6° S y 11° S, donde la llanura costera se estrecha y el relieve se intensifica (Rosas et al., 2023). El 72 % de su superficie supera los 25° de pendiente y su altitud va de 1112 m s. n. m. a 4948 m s. n. m. Cabe esperar, por tanto, tasas de erosión superiores al promedio de la vertiente.

Los datos comparables más próximos son los publicados para el río Santa, obtenidos a partir del rendimiento de sedimentos medido en el cauce. En años sin El Niño extremo, el Santa exporta 1350 t/km^2/año en Condorcerro y 1925 t/km^2/año en Tablachaca (Morera et al., 2017), frente a la erosión media modelada para Quillo, de 1600 t/km^2/año.

Ambas cifras, sin embargo, miden procesos distintos. WaTEM/SEDEM estima la erosión laminar y en surcos de las laderas, mientras que el rendimiento de un río incluye además el sedimento procedente de cárcavas, deslizamientos, márgenes y cauces, además de los aportes glaciares presentes en la cuenca del Santa y ausentes en Quillo.

Las mediciones de 2024 corresponden a un año sin evento extremo. Durante los eventos extremos de El Niño, la producción de sedimentos en esta vertiente aumenta entre 3 y 60 veces (Morera et al., 2017). Las pérdidas en microparcelas y las concentraciones de sedimento en suspensión no reflejan, por ello, el máximo del sistema.

Los radioisótopos, en cambio, sí incorporan los eventos extremos. El Cs-137 integra los últimos 61 años y el Pb-210ex, unos 100 años. Ambos periodos incluyen los eventos El Niño de 1982-1983, 1997-1998 y 2017. Las tasas de Cs-137, de 76 t/ha/año en suelo desnudo y 44 t/ha/año en agricultura, representan así el promedio de largo plazo con eventos extremos incluidos.

7.3 Acciones prioritarias para la gestión

La degradación más severa del distrito no está distribuida de forma homogénea, sino que se encuentra focalizada en puntos concretos con alta conectividad hidrológica. La inversión pública

puede alcanzar alta eficiencia si se dirige a los focos identificados en el mapa de severidad, en lugar de repartirse uniformemente sobre 371 km².

- **Prioridad 1. Proteger bofedales, pajonales y matorrales como infraestructura natural de regulación.** Pajonal y matorral registran de 3 t/ha/año a 5 t/ha/año, un orden de magnitud menos que las coberturas perturbadas, y el bofedal presenta una ganancia neta de 7 t/ha/año a 9 t/ha/año. Entre 1988 y 2024, el matorral perdió 13 km² y el pajonal, 10 km², principalmente a favor de la agricultura. El instrumento aplicable es una zonificación que restrinja la conversión de matorral y pajonal en laderas de más de 25° y proteja los bofedales identificados.

- **Prioridad 2. Conservar y ampliar las terrazas de tierra en la agricultura de ladera.** Las terrazas registran pérdidas de 9 t/ha/año a 10 t/ha/año, entre 4 y 5 veces menores que las de la agricultura sin esta práctica (44 t/ha/año). El 74 % de la superficie agrícola se desarrolla por encima de los 25°. El instrumento aplicable es la habilitación y rehabilitación de terrazas en las subcuencas Sechín en E. A. Puente Quillo y Huacuy, donde la agricultura supera el 20 % de la superficie. Se debe tener en cuenta que las terrazas no producen mejoras de fertilidad durante los primeros 4 años (Posthumus & Stroosnijder, 2010).

- **Prioridad 3. Reducir la exposición del suelo en las parcelas de cultivo.** El suelo desnudo registra las tasas más altas del distrito según ambos trazadores isotópicos: 76 t/ha/año según Cs-137 y 77 t/ha/año según Pb-210ex. Asimismo, la tasa anualizada derivada del monitoreo con microparcelas alcanza 32 t/ha/año, valor prácticamente idéntico al registrado en el holantao (31 t/ha/año). Que un cultivo comercial en producción presente una tasa de erosión similar a la de un suelo sin cobertura indica que el margen de mejora no está en la elección del cultivo, sino en el manejo del suelo entre surcos y durante el descanso. El instrumento aplicable consiste en planes de asistencia técnica agraria orientados a la incorporación de residuos, los cultivos de cobertura durante el barbecho, la labranza reducida y la siembra en contorno.

- **Prioridad 4. Intervenir las cárcavas activas.** Las cárcavas ocupan 7 km², menos del 2 % del distrito, pero presentan el 100 % de su superficie bajo erosión fuerte o superior y el 83 % en categoría severa o superior. El modelo distribuido no las representa explícitamente, dado que su resolución de 20 m no resuelve flujos concentrados de pequeña extensión, de modo que su contribución real es probablemente mayor que la estimada. El instrumento aplicable consiste en diques de retención, revegetación y estabilización mecánica, con prioridad para las cárcavas conectadas directamente a la red de drenaje.

Referencias

- Borrelli, P., Robinson, D. A., Fleischer, L. R., Lugato, E., Ballabio, C., Alewell, C., Meusburger, K., Modugno, S., Schütt, B., Ferro, V., Bagarello, V., Van Oost, K., Montanarella, L., & Panagos, P. (2017). An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion. *Nature Communications, 8*, 2013. https://doi.org/10.1038/s41467-017-02142-7

- Brown, L. C., & Foster, G. R. (1987). Storm erosivity using idealized intensity distributions. *Transactions of the ASAE, 30*(2), 379–386. https://doi.org/10.13031/2013.31957

- Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres. (s. f.). *Evaluaciones de riesgo por lluvias intensas en el distrito de Quillo, provincia de Yungay, departamento de Áncash* [Colección de informes; documentos 5178, 5181, 7426 y 7427]. Sistema de Información para la Gestión del Riesgo de Desastres (SIGRID). Recuperado el 16 de octubre de 2026, de https://sigrid.cenepred.gob.pe/sigridv3/

- Comisión Multisectorial encargada del Estudio Nacional del Fenómeno El Niño. (2017). *Informe técnico extraordinario n.° 001-2017/ ENFEN: El Niño Costero 2017.*

- Currie, L. A. (1968). Limits for qualitative detection and quantitative determination: Application to radiochemistry. *Analytical Chemistry, 40*(3), 586–593. https://doi.org/10.1021/ac60259a007

- Dirección General de Asuntos Ambientales Agrarios. (2024). *Estudio geológico-litológico del distrito de Quillo*. Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego.

- Fernandez-Palomino, C. A., Hattermann, F. F., Krysanova, V., Lobanova, A., Vega-Jácome, F., Lavado, W., Santini, W., Aybar, C., & Bronstert, A. (2021). *Rain for Peru and Ecuador (RAIN4PE)* (Version 1.0) [Data set]. GFZ Data Services. https://doi.org/10.5880/pik.2020.010

- Foucher, A., Morera, S., Sanchez, M., Orrillo, J., & Evrard, O. (2023). El Niño–Southern Oscillation (ENSO)-driven hypersedimentation in the Poechos Reservoir, northern Peru. *Hydrology and Earth System Sciences, 27*, 3191–3204. https://doi.org/10.5194/hess-27-3191-2023

- Gyssels, G., Poesen, J., Bochet, E., & Li, Y. (2005). Impact of plant roots on the resistance of soils to erosion by water: A review. *Progress in Physical Geography, 29*(2), 189–217. https://doi.org/10.1191/0309133305pp443ra

- 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., & 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

- Ke, Q., & Zhang, K. (2024). Scale issues in runoff and sediment delivery (SIRSD): A systematic review and bibliometric analysis. *Earth-Science Reviews, 251,* 104729. *https://*doi.org/10.1016/j.earscirev.2024.104729

- Marin Alvarez, Y. E. (2020). *Cuantificación y clasificación de las tasas de sedimentación en el reservorio de Poechos*.

- Ministerio del Ambiente. (2020). *Meta y medidas para alcanzar la neutralidad en la degradación de la tierra al 2030: Informe final.*

- Montgomery, D. R. (2007). Soil erosion and agricultural sustainability. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 104*(33), 13268–13272. https://doi.org/10.1073/pnas.0611508104

- Morera, S. B., Condom, T., Crave, A., Steer, P., & Guyot, J. L. (2017). The impact of extreme El Niño events on modern sediment transport along the western Peruvian Andes. *Scientific Reports, 7*, 11947. https://doi.org/10.1038/s41598-017-12220-x

- Patin, J., Mouche, E., Ribolzi, O., Sengtahevanghoung, O., Latsachak, K. O., Soulileuth, B., Chaplot, V., & Valentin, C. (2018). Effect of land use on interrill erosion in a montane catchment of Northern Laos: An analysis based on a pluri-annual runoff and soil loss database. *Journal of Hydrology, 563*, 480–494. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.05.044

- Posthumus, H., & Stroosnijder, L. (2010). To terrace or not: The short-term impact of bench terraces on soil properties and crop response in the Peruvian Andes. *Environment, Development and Sustainability, 12*(2), 263–276. https://doi.org/10.1007/s10668-009-9193-4

- Presidencia del Consejo de Ministros. (2026). *Decreto Supremo n.° 039-2026-PCM: Decreto Supremo que prorroga el Estado de Emergencia en algunos distritos de varias provincias de los departamentos de Áncash, Ica, La Libertad, Lambayeque, Lima, Moquegua, Piura y Tumbes, por peligro inminente ante intensas precipitaciones pluviales.* Diario Oficial El Peruano.

- Rosas, M. A., Vanacker, V., Viveen, W., Gutiérrez, R. R., & Huggel, C. (2020). The potential impact of climate variability on siltation of Andean reservoirs. *Journal of Hydrology, 581*, 124396. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124396

- Rosas, M. A., Viveen, W., & Vanacker, V. (2023). Spatial variation in specific sediment yield along the Peruvian western Andes. *CATENA, 220*, 106699. https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106699

- Soto, J., & Navas, A. (2004). A model of 137Cs activity profile for soil erosion studies in uncultivated soils of Mediterranean environments. *Journal of Arid Environments, 59*(4), 719–730. https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2004.02.003

- Soto, J., & Navas, A. (2008). A simple model of Cs-137 profile to estimate soil redistribution in cultivated stony soils. *Radiation Measurements, 43*(7), 1285–1293. https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2008.02.024

- Tote, C., Govers, G., Van Kerckhoven, S., Filiberto, I., Verstraeten, G., & 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

- Van Dijk, A. I. J. M., & Bruijnzeel, L. A. (2004). Runoff and soil loss from bench terraces. 2. An event-based erosion process model. *European Journal of Soil Science, 55*(2), 317–334. https://doi.org/10.1111/j.1365-0754.2004.00605.x

- Vanacker, V., Bellin, N., Molina, A., & Kubik, P. W. (2014). Erosion regulation as a function of human disturbances to vegetation cover: A conceptual model. *Landscape Ecology, 29*, 293–309. https://doi.org/10.1007/s10980-013-9956-z

- Walling, D. E., & He, Q. (1999). Using fallout lead-210 measurements to estimate soil erosion on cultivated land. *Soil Science Society of America Journal, 63*(5), 1404–1412. https://doi.org/10.2136/sssaj1999.6351404x

- Wischmeier, W. H., & Smith, D. D. (1978). *Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning* (Agriculture Handbook No. 537). U.S. Department of Agriculture, Science and Education Administration. http://topsoil.nserl.purdue.edu/usle/AH_537.pdf

Información clave para ti

Puedes consultar, descargar y compartir desde el Repositorio Geofísico Nacional (REGEN) los diferentes **reportes**, **boletines** e **informes** que genera el IGP.

RECUERDA: La Gestión del Riesgo de Desastres (GRD) se fundamenta en la investigación científica. El IGP es una entidad líder en la generación de conocimiento científico en el país.

REGEN



Sede central del Instituto Geofísico del Perú (IGP)


IGP
Instituto
Geofísico
del Perú