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 HUARAZ

(Provincia de Huaraz, región Áncash)

Informe Técnico n.° 029-2026/IGP CIENCIAS DE LA TIERRA SÓLIDA



Lima, Perú
Septiembre 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 Huaraz
Informe técnico

Sergio Morera
Jhon Orrillo
Shirley Contreras
Jorge Laura
Michael Sánchez
Kithner Espinoza
Jhon Villanueva
Deysi Yana
Jennifer Ruiz
Fernando Prudencio
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 elaborado 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, septiembre 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 Provincial de Huaraz (MPH), de la región Áncash, por el apoyo logístico y las convocatorias para el inicio y el 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 Laboratory for Sciences of Climate and Environment (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 HUARAZ

(Provincia de Huaraz, región Áncash)



Lima, Perú
Septiembre de 2026

RESUMEN

El Instituto Geofísico del Perú (IGP) realizó el diagnóstico de la erosión hídrica de los suelos del distrito de Huaraz (Áncash) mediante trazadores radioisotópicos (Cs-137 y Pb-210ex), microparcelas, monitoreo hidrosedimentológico y modelado WaTEM/SEDEM, con 306 muestras sólidas y 784 líquidas procesadas en el laboratorio MoSSARD. El territorio comprende las subcuencas Quillcay, Pariac, Ututo Pampa, Purucuta, Santa Catalina y Carayoc; depósitos cuaternarios, incluidos cuerpos glaciares, 196 km² (46 %); suelos de origen glaciar en el 57 %; y pendientes mayores de 15° en el 64 % del área analizada. Entre 1988 y 2021, la agricultura aumentó del 11 % al 13 % (57 km²), mientras que la vegetación herbácea y/o arbustiva disminuyó del 59 % al 55 % (232 km²). La precipitación se concentra entre octubre y marzo (>70 % anual), con máximos cercanos a 160 mm/mes en marzo.

Los trazadores radioisotópicos Cs-137 y Pb-210ex permitieron reconstruir la pérdida histórica de suelo en cinco laderas representativas del distrito. Las laderas agrícolas registraron las tasas más altas: 38 t/ha/año en los últimos 60 años y 30 t/ha/año en los últimos 100 años. Los pajonales presentaron pérdidas de 2-6 t/ha/año y acumulaciones de 4-9 t/ha/año en sectores de retención. Las plantaciones de pino mostraron tasas intermedias de 5-8 t/ha/año, mientras que los bofedales actuaron como sumideros, con ganancias de 1-2 t/ha/año.

En la comunidad de Purush se instalaron diez microparcelas de 1 m² y dos parcelas de 100 m² en una terraza de formación lenta. Las zonas alta y media-baja bajo cultivo de trigo registraron 66 t/ha/año y 65 t/ha/año durante la ventana crítica de enero a marzo; la zona de banco retuvo hasta el 85 % del sedimento movilizado, con tasas de 6-11 t/ha/año. El modelo *random forest* identificó la intensidad de precipitación (Pi) como el factor dominante de la pérdida, y posicionó la cobertura vegetal como la única variable de control disponible a corto plazo.

El modelado WaTEM/SEDEM, aplicado sobre 239 km² del área efectiva modelada del distrito, evidenció una matriz mayormente estable: 196 km² (82 %) permanecen por debajo de 12.5 t/ha/año. Sin embargo, 42 km² (18 %) superan la categoría de erosión fuerte, 20 km² (8 %) alcanzan categorías de severa a extrema (>30 t/ha/año) y 7 km² (3 %) corresponden a la categoría extrema (>60 t/ha/año). Quillcay y Pariac registraron máximos cercanos a 180 t/ha/año y P90 de 49 t/ha/año y 47 t/ha/año, respectivamente, mientras que la agricultura y las cárcavas explicaron el 96 % de la superficie severa.

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

14 Competencia analítica y caracterización metrológica

17 Análisis del sistema físico-territorial

17 Relieve y geología

19 Clima e hidrología

20 Uso del suelo en las últimas décadas

22 Diagnóstico de la erosión

22 Historia de las últimas décadas

26 Dinámica y monitoreo de la erosión actual

31 Dinámica de los sedimentos en suspensión

31 Caracterización de los sedimentos

33 Mapeo de las tasas y la severidad de erosión

33 Construcción del modelo espacial de erosión

34 Espacialización de la severidad de pérdida de suelo

36 Conclusiones y recomendaciones para la gestión

36 ¿Qué nos dicen los isótopos, las trampas y el modelado?

36 Huaraz frente al umbral de tolerancia

36 Prioridades para la gestión

37 Capacidad técnica y tecnológica

38 Referencias

SIGLAS, ACRÓNIMOS Y CONVENCIONES

USOS DEL SUELO Y COBERTURA VEGETAL	
Agr	Áreas agrícolas heterogéneas/frontera agrícola.
Hrb	Áreas con vegetación herbácea natural.
Urb	Áreas urbanizadas.
AHu	Áreas húmedas continentales.
CuA	Aguas continentales.
Gla	Área glaciar.
PFo	Bosques forestales.
SVg	Área altoandina con escasa o sin vegetación.

VARIABLES BIOFÍSICAS, HIDROLÓGICAS Y EDÁFICAS	
C	Factor de cobertura vegetal.
CSS	Concentración de sedimentos en suspensión.
dCSS/dt	Tasa de cambio temporal de la concentración de sedimentos en suspensión.
Fa	Fracción de agregados libres del suelo.
Hs	Humedad antecedente del suelo.
I_{30}	Intensidad máxima de precipitación 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.
P90	Percentil 90.
PP	Volumen total de precipitación.
Pi	Intensidad de precipitación.
Q	Caudal.
Q90, Q95, Q99	Percentiles 90, 95 y 99 del caudal.
R	Factor de erosividad.
R^2	Coeficiente de determinación.
Rc	Coeficiente de escorrentía.
RMSE	Raíz del error cuadrático medio.
SDR	Relación de entrega de sedimentos.
SL	Pérdida de suelo por evento (*soil loss*).
Sp	Pendiente.
SPI	Índice de potencia de corriente.
TWI	Índice de humedad topográfica.
Vc	Cobertura vegetal total sobre la superficie del suelo (en modelo PLS-R).

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

INSTITUCIONES	
CONCYTEC	Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación Tecnológica.
IGP	Instituto Geofísico del Perú.
INEI	Instituto Nacional de Estadística e Informática.
LSCE	Laboratory for Sciences of Climate and Environment.
MIDAGRI	Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego.
MoSSARD	Laboratorio de Monitoreo de Suelos, Sedimentos y Agua ante Riesgos de Desastres.
MPH	Municipalidad Provincial de Huaraz.
OIEA	Organismo Internacional de Energía Atómica.

NORMAS Y MÉTODOS	
DEM	Modelo digital de elevación.
GASEMT	Evaluación global de técnicas de modelado de erosión del suelo (*Global Assessment of Soil Erosion Modelling Techniques*).
IEC	Comisión Electrotécnica Internacional.
ISO	Organización Internacional de Normalización.
LD	Límite de detección.
MRC	Materiales de referencia certificados.
NTP	Norma Técnica Peruana.
POE	Procedimientos operativos estándar.
RAIN4PE	*Rain for Peru and Ecuador* (lluvia para Perú y Ecuador).
TXRF	Fluorescencia de rayos X por reflexión total.
WaTEM/SEDEM	Modelo de erosión y transporte de sedimentos en cuencas.

GLOSARIO DE TÉRMINOS CLAVE Y CONCEPTOS FUNDAMENTALES

Erosión hídrica	Proceso de degradación donde 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 masivo de sedimentos en el distrito.
Cárcavas y caminos	Zanjas profundas y vías no pavimentadas que mantienen conexión directa con los cauces, concentran el flujo superficial y favorecen el transporte acelerado de sedimentos hacia la red hídrica.
Saturación del suelo	Estado en el que la tierra ya no puede absorber más agua, lo que desencadena la erosión inmediata.
Trazadores isotópicos	Átomos (^{137}Cs y $^{210}Pb_{ex}$) que permiten reconstruir la "memoria" del suelo y cuantificar las tasas de erosión o sedimentación ocurridas en los últimos 60 a 100 años.
Carbono orgánico (CO)	Indicador del estado de conservación del suelo; niveles inferiores al 1 % reducen la cohesión entre partículas e incrementan la susceptibilidad a la erosión.
Sedimentos en suspensión (SS)	Cantidad de partículas sólidas arrastradas por el río.
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 predecir el riesgo de erosión.
Concentración de sedimentos en suspensión (CSS)	Cantidad de partículas sólidas transportadas en la columna de agua, expresada como masa por unidad de volumen.



Paisaje altoandino del distrito de Huaraz, región Áncash.

1. Introducción

La erosión hídrica depende de la erosividad, la erodabilidad, la topografía, la cobertura y el manejo, factores que controlan el desprendimiento, el transporte y la redistribución de partículas. Borrelli et al. (2017) estimaron una erosión potencial global de 35 900 millones de toneladas/año en 2012. Este valor fue 2.5 % mayor que en 2001. Montgomery (2007) mostró que la agricultura convencional puede elevar la erosión entre uno y dos órdenes de magnitud. Sin embargo, la magnitud erosionada no determina por sí sola cuánto sedimento abandona el paisaje.

En ambientes montañosos, el almacenamiento y la conectividad controlan qué fracción del material erosionado alcanza la red fluvial (Quinton & Fiener, 2024). Esta relación adquiere especial importancia en la vertiente occidental peruana, donde el clima, el relieve y la cobertura presentan fuertes gradientes espaciales. Rosas et al. (2023) analizaron 21 cuencas y registraron 2130 t/km²/año y 2300 t/km²/año entre 6° y 11° de latitud sur. Al sur, los rendimientos variaron entre 39 t/km²/año y 551 t/km²/año. El Q90 y la pendiente fluvial explicaron el 55 % de la variabilidad y el 63 % al incorporar la cobertura terrestre. Durante El Niño extremo, el rendimiento de sedimentos suspendidos aumentó entre 3 y 60 veces (Morera et al., 2017). Estos contrastes evidencian una respuesta sedimentaria controlada por la hidrología, la topografía, la cobertura y las perturbaciones extremas.

Esta interacción también se observa en la cuenca del Santa. Morera et al. (2013) estimaron 779 ± 162 t/km²/año de sedimento suspendido en el Santa. En Tablachaca, el rendimiento alcanzó 2204 ± 337 t/km²/año, aunque el caudal del Santa fue aproximadamente cuatro veces mayor. En la cordillera Blanca, más del 80 % de la precipitación ocurre entre octubre y abril. El deshielo aporta 10-20 % del caudal anual del Santa y puede superar 40 % durante el estiaje (Baraer et al., 2012). Esta marcada estacionalidad hidroglaciar condiciona el funcionamiento de las cuencas que descienden hacia el Callejón de Huaylas.

Morera et al. (2013) incluyeron puntos de muestreo en Entrada Huaraz, el río Santa y Quillcayhuanca. El distrito de Huaraz posee una superficie oficial de 433 km² (INEI, 2025a) y 70 876 habitantes proyectados para 2024 (INEI, 2025b). Su densidad alcanza 164 hab/km². Los análisis geoespaciales emplearon una geometría vectorial de 423 km² como superficie de referencia cartográfica*. Las áreas agropecuarias abarcan 10 500 ha y la cobertura agrícola ocupa 7887 ha. Papa, trigo, cebada, maíz amiláceo y alfalfa concentran la actividad agrícola. La papa produjo 5720 t en 513 ha cosechadas (MIDAGRI, s. f.). La actividad pecuaria se sustenta principalmente en ovinos, vacunos y porcinos. Entre 2015 y 2019, el valor bruto pecuario aumentó de S/ 111 840 a S/ 127 942. En ese periodo, el rendimiento de carne vacuna aumentó 31 % (MIDAGRI, s. f.). Estas actividades configuran condiciones de cobertura y manejo cuya respuesta depende del relieve, de la hidrología y de la conectividad local.

La evidencia andina confirma que esos controles deben evaluarse de manera integrada. Vanacker et al. (2022) registraron pérdidas medias de 287 t/km²/año bajo vegetación natural protegida. Los valores ascendieron a 3250 t/km²/año en cultivos y 5140 t/km²/año en suelo desnudo. Sin embargo, los resultados de parcela no representan directamente la transferencia sedimentaria a escala de cuenca. A escala nacional, el PP 0089 estimó 3 701 600 ha de suelos degradados en 52 distritos de ocho regiones. Persisten vacíos sobre tasas locales de erosión, manejo y transferencia efectiva de sedimentos. Huaraz requiere, por ello, un diagnóstico multiescala que integre cobertura, presión agropecuaria, hidrología, relieve, redistribución y conectividad fluvial.

* La superficie oficial de Huaraz es de 433 km² (INEI, 2025a), mientras que la cartografía vectorial empleada en el estudio registra 423 km². Esta diferencia de 10 km² podría responder a distintos criterios de delimitación geométrica. Para garantizar la consistencia de los análisis espaciales, se adoptó la superficie cartográfica de 423 km², procesada en UTM WGS 84, zona 18S.

2. Instrumentación y laboratorio

2.1 Redes de monitoreo e instrumentación

Para caracterizar la respuesta hidrológica y el transporte de sedimentos en una unidad representativa del distrito de Huaraz, se implementó un monitoreo hidrosedimentológico y meteorológico (Figura 2.1.1). La red integró una estación meteorológica en Purush, subcuenca Pariac, para el análisis de la precipitación, y una estación hidrosedimentológica en la cuenca Quillcayhuanca, representativa de los sistemas glaciares de cabecera de la cordillera Blanca. En esta estación se registraron la respuesta hidrológica y el transporte de sedimentos asociados a eventos de escorrentía. La superficie cartográfica empleada para el análisis del distrito de Huaraz abarca aproximadamente 423 km² y comprende las subcuencas Quillcay, Pariac, Ututo Pampa, Purucuta, Santa Catalina y Carayoc. La subcuenca Quillcay constituye la unidad hidrográfica dominante, con aproximadamente 248 km². La red de monitoreo se distribuye sobre un sistema caracterizado por fuertes gradientes altitudinales, relieve glaciar y elevada conectividad hidrológica. Esta configuración permitió evaluar procesos hidrometeorológicos representativos de cabeceras altoandinas y su respuesta integrada a escala de cuenca.

Como parte del monitoreo complementario, se implementó el muestreo de suelos para la aplicación de la técnica de radioisótopos Cs-137. La distribución espacial de los puntos de monitoreo permitió cubrir sectores representativos de las principales subcuencas y de los gradientes altitudinales del distrito.

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 Huaraz 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 se describen detalladamente en el estudio de referencia de Morera et al. (2026). Sobre esta

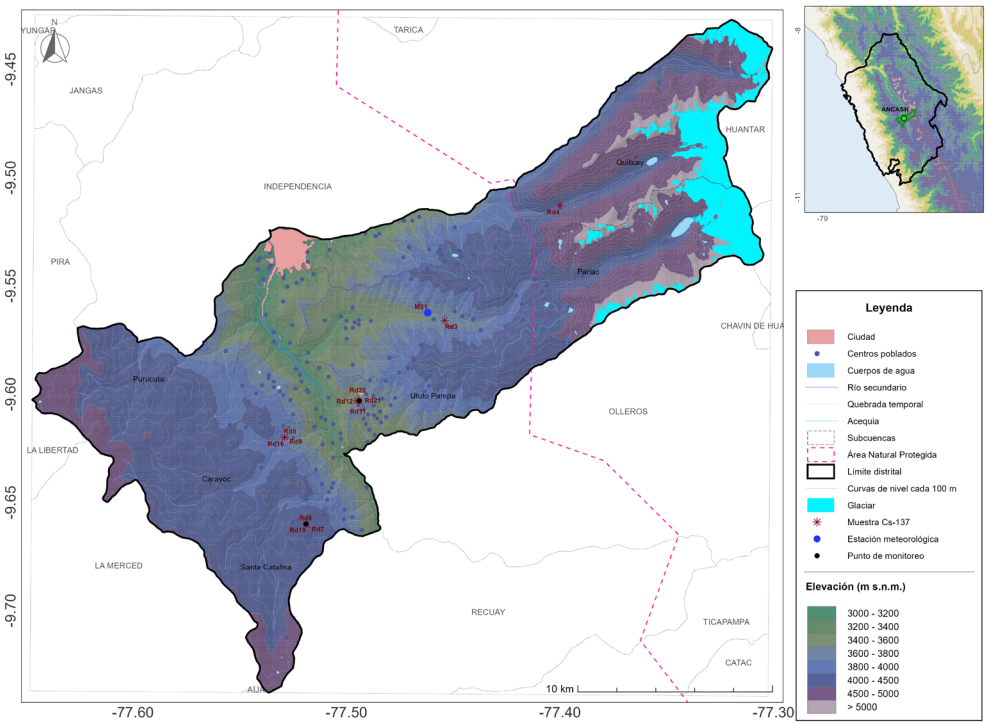


Figura 2.1.1. Mapa de ubicación geográfica del distrito de Huaraz.

base metodológica, las lecturas instrumentales desarrolladas para este estudio garantizan la precisión, trazabilidad y validez técnica de los insumos analíticos requeridos para la caracterización y modelamiento 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 1090 unidades de muestras ambientales correspondientes al distrito de Huaraz (Figura 2.2.2a). El volumen preanalítico estuvo dominado por las matrices líquidas, donde las muestras de sedimentos en suspensión en microparcelas representaron el 71.9 %. En relación con las matrices sólidas, se acondicionaron 227 unidades de suelos y sedimentos superficiales, destinadas a la caracterización granulométrica, geoquímica y colorimétrica, mientras que 79 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 alinea con el rigor técnico exigido por los procedimientos operativos estándar (POE) y garantiza la eficiencia en los tiempos de respuesta analítica (Figura 2.2.2b).



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

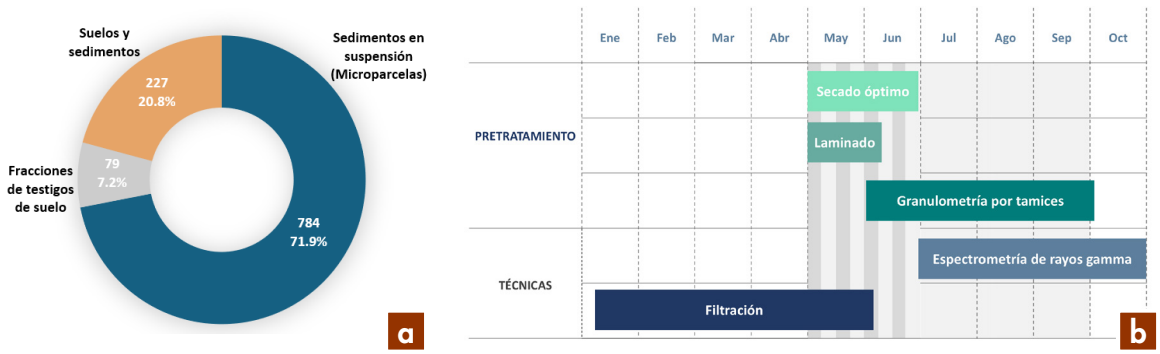


Figura 2.2.2. a) Volumen de muestras y b) balance de los tiempos de respuesta y del rendimiento analítico para el distrito de Huaraz en 2023.

2.2.3 Rangos dinámicos y métricas analíticas por técnica

La caracterización multianalítica de las muestras del distrito de Huaraz 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 uso de la tierra, las lecturas por espectrometría de rayos gamma mostraron una respuesta analítica definida por una actividad mínima detectable (MDA), con límites de detección (LD) de 0.1 Bq/kg y un control estricto de la variabilidad metrológica. Las incertidumbres combinadas se mantuvieron por debajo del 30 % en la cuantificación de los fotopicos de interés (Figura 2.2.3).

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

La caracterización gravimétrica de las matrices líquidas procesadas por filtración al vacío permitió cuantificar la concentración de sedimentos en suspensión (CSS) en la estación de Purush (Figura 2.2.4). El valor mediano de la concentración total de sedimento se sitúa en 4.45 g/L; 2.15 g/L corresponden a la fracción de partículas finas y 1.66 g/L, a las partículas gruesas. No obstante, durante eventos pluviales de alta intensidad, la respuesta erosiva de la microparcela registró arrastres masivos de sedimento con máximos puntuales que alcanzaron hasta 50.8 g/L en la fracción fina y 96.8 g/L en la fracción gruesa. Esta amplia dispersión refleja que, si bien la erosionabilidad basal en condiciones estándar es moderada, la susceptibilidad del suelo ante eventos extremos puede desencadenar pérdidas de suelo dominadas por sedimentos limosos y arcillosos en suspensión.

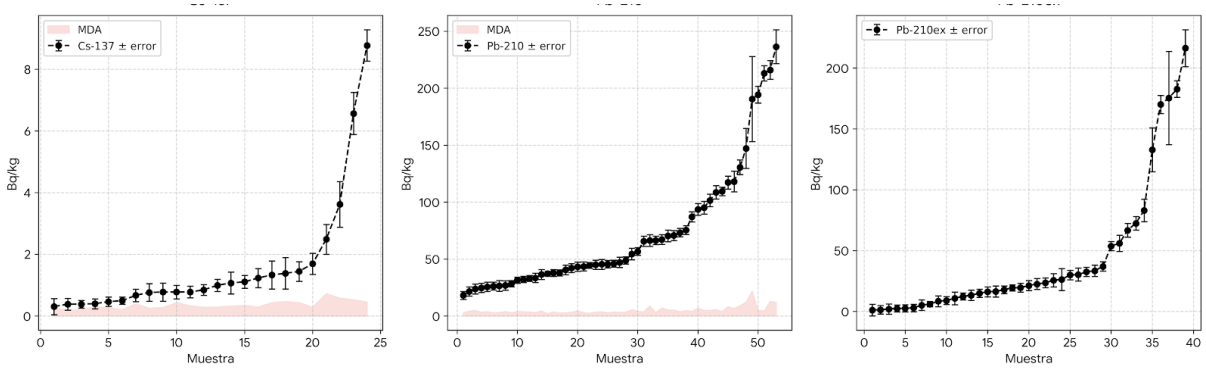


Figura 2.2.3. Límites de detección e incertidumbres en fracciones de testigos de suelos en el distrito de Huaraz.

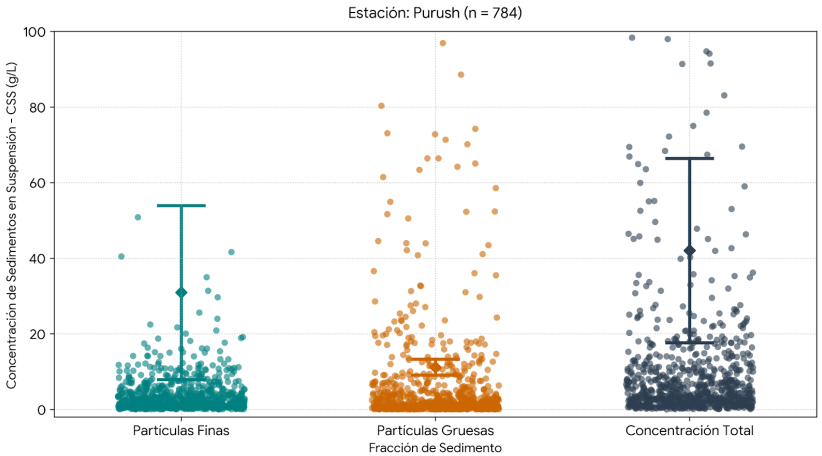


Figura 2.2.4. Concentración de sedimentos en suspensión (CSS, en g/L) en microparcelas experimentales de la estación Purush en el distrito de Huaraz.

3. Análisis del sistema físico-territorial

3.1 Relieve y geología

3.1.1 Geología

El distrito de Huaraz presenta 29 unidades litoestratigráficas comprendidas entre el Jurásico superior y el Cuaternario reciente (Figura 3.1.1). Seis unidades concentran la mayor superficie: depósito glaciar 1, 96 km² (23 %); batolito de la cordillera Blanca, 53 km² (12 %); área glaciar, 35 km² (8 %); Volcánico Calipuy Miembro Medio, 28 km² (7 %); Volcánico Huinoc-Alto Ruri Superior, 27 km² (6 %); y Formación Chicama, 23 km² (6 %). En conjunto, abarcan 262 km² (62 %).

La Formación Chicama comprende areniscas cuarzosas, lutitas oscuras y pizarras fracturadas; el Calipuy, derrames andesíticos y piroclastos; y los depósitos glaciares, bloques, gravas y matrices areno-limoarcillosas. Los depósitos cuaternarios, incluidos los cuerpos glaciares, ocupan 196 km² (46 %). Esta configuración diferencia rocas competentes de materiales semicompactos, sueltos e inconsolidados, especialmente en los depósitos fluviales del río Santa, los aluviales de Quillcay y los fluvioglaciares recientes. La granulometría, la matriz y el grado de consolidación controlan la disponibilidad de sedimento superficial y la susceptibilidad erosiva local.

3.1.2 Relieve

El análisis morfométrico del distrito de Huaraz se realizó a partir de un modelo digital de elevación (DEM) de alta resolución, procesado para garantizar la consistencia espacial con las variables empleadas en el modelamiento. A partir de este insumo se derivó la pendiente del terreno, cuya distribución espacial se presenta en la Figura 3.1.3.

Como se observa, el 36 % de la superficie analizada (150 km²) se ubica en el rango de 0° a 15°, concentrado en fondos de valle y superficies de acumulación, donde la menor energía del flujo favorece procesos de deposición. En contraste,

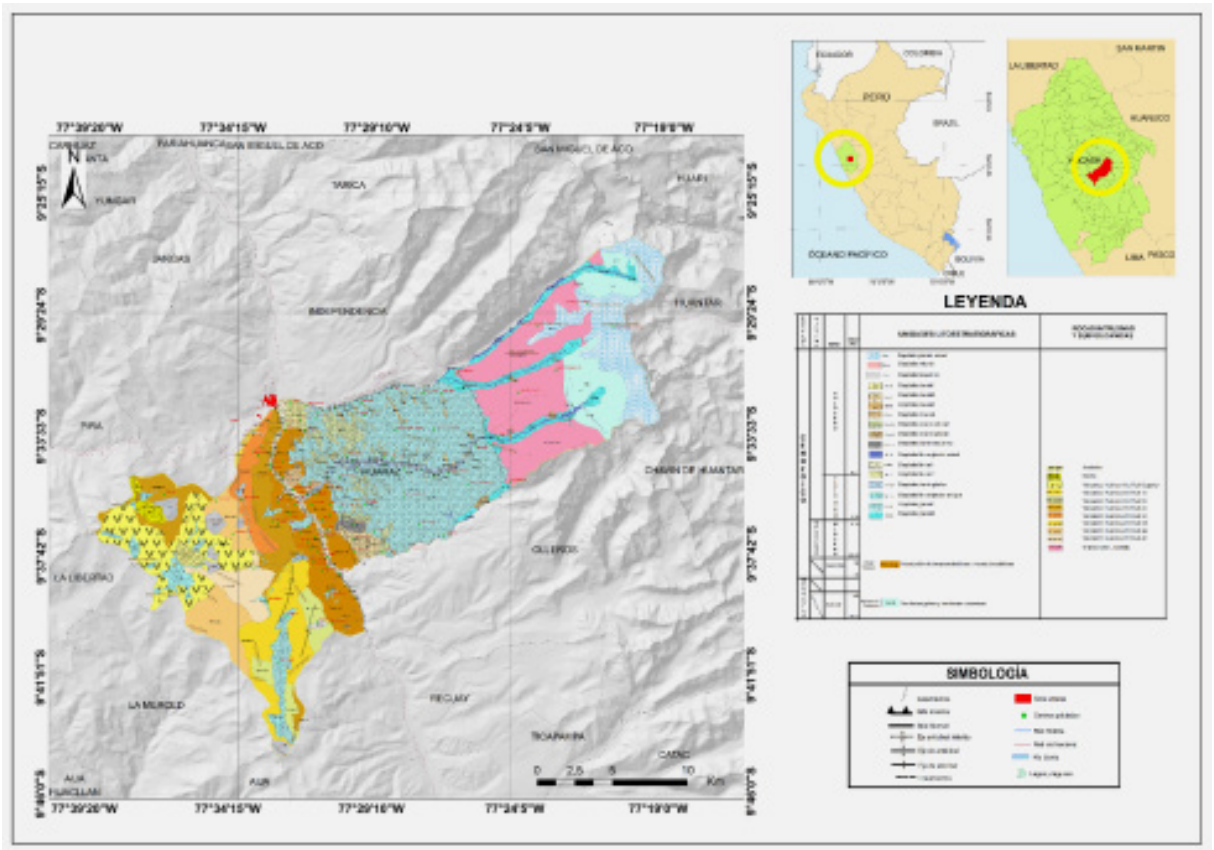


Figura 3.1.1. Mapa geológico del distrito de Huaraz a escala 1:20 000.

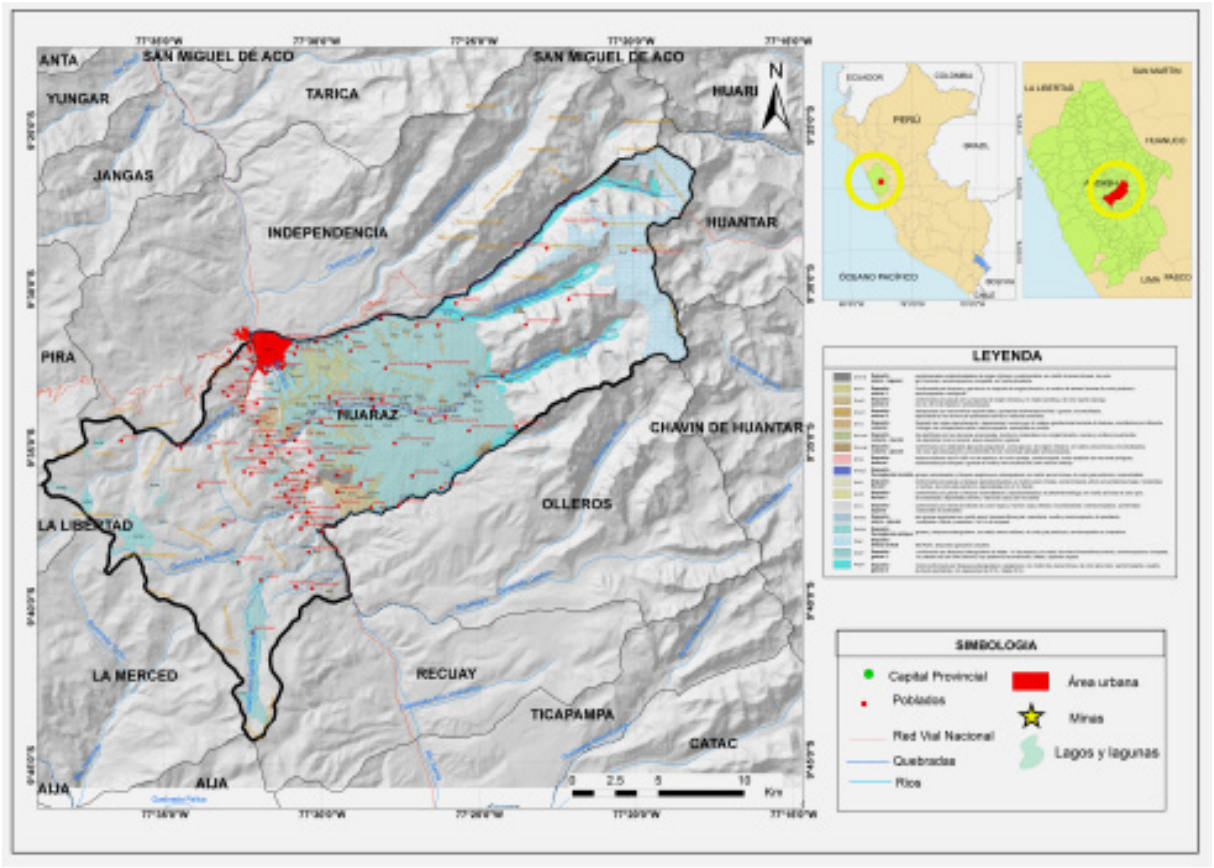


Figura 3.1.2. Mapa de suelos según su origen en el distrito de Huaraz a escala 1:20 000.

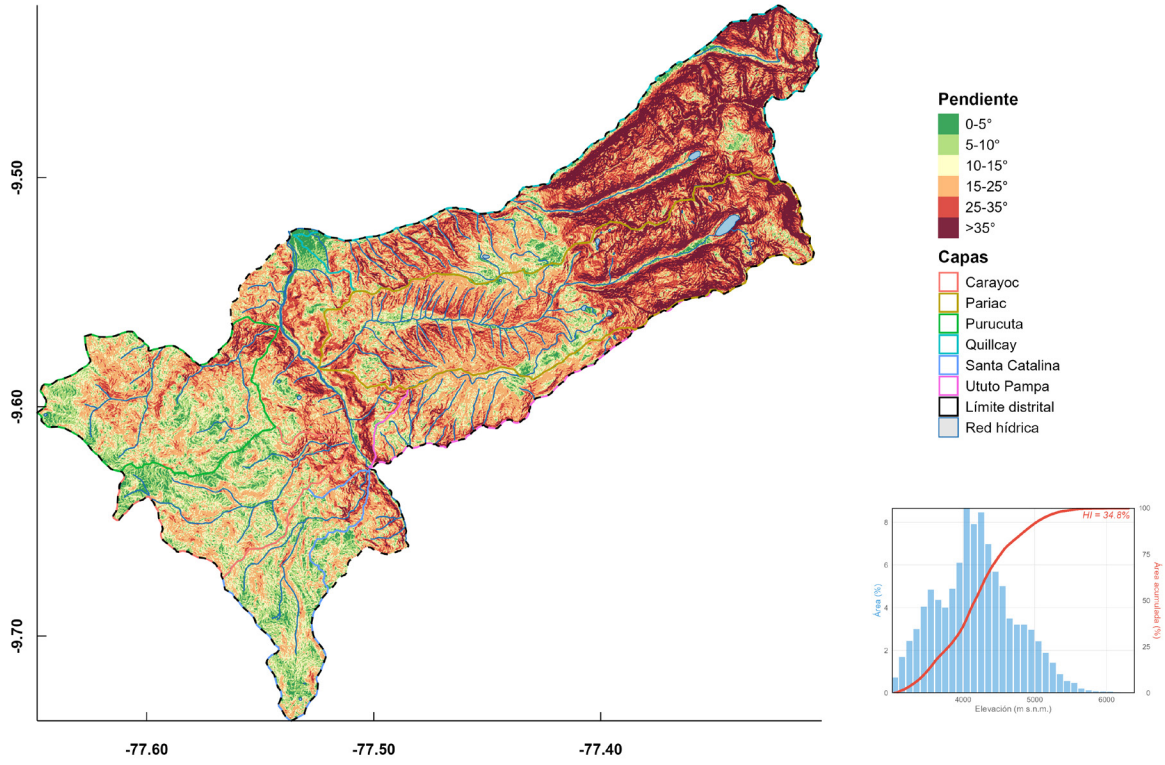


Figura 3.1.3. Mapa de pendientes del distrito de Huaraz.

el 32 % del área (137 km²) presenta pendientes entre 15° y 25°, lo que define zonas de transición donde se incrementa la escorrentía superficial y se activan procesos de erosión laminar. Asimismo, el 32 % de la superficie analizada (134 km²) supera los 25°, lo que configura sectores de alta criticidad geomorfológica, donde la aceleración del flujo favorece la erosión concentrada y el transporte eficiente de sedimentos.

En conjunto, la Figura 3.1.3 evidencia que el 64 % de la superficie analizada presenta pendientes mayores de 15°, lo que configura un sistema con alta capacidad potencial de generación de sedimentos. No obstante, esta capacidad depende de la conectividad con la red de drenaje y de la presencia de zonas de almacenamiento en áreas de menor pendiente. Este patrón morfométrico constituye la base estructural del factor LS en el modelamiento de erosión y explica la distribución espacial de las tasas estimadas a escala de subcuenca.

3.2 Clima e hidrología

3.2.1 Comportamiento del agua en la cuenca

La serie hidrométrica de la estación Cayesh, en la cuenca Quillcayhuanca, comprendió 823 mediciones válidas de caudal obtenidas a intervalos nominales de 5 minutos durante ventanas discontinuas entre el 22 de marzo y el 19 de mayo de 2021. Del registro disponible, el caudal medio fue de 1154 L/s y la mediana de 1146 L/s, con valores mínimo y máximo de 1119 L/s y 1214 L/s, respectivamente. El rango intercuartílico se situó entre 1122 L/s y 1187 L/s, mientras que los percentiles Q90, Q95 y Q99 alcanzaron 1204 L/s, 1209 L/s y 1213 L/s. El coeficiente de variación fue de 3 %, lo que evidencia una variabilidad reducida dentro de las ventanas efectivamente monitoreadas.

3.2.2 Régimen de precipitación

La precipitación anual en el distrito de Huaraz presenta una media de 857 mm/año (Fernandez-Palomino et al., 2021), con una desviación estándar de 147 mm y un coeficiente de variación de 17 %, lo que indica una variabilidad interanual moderada. El rango anual oscila entre 556 mm y 1235 mm. A escala intraanual, más del 70 % de la precipitación se concentra en el periodo húmedo (octubre-marzo), con máximos cercanos a 160 mm/mes en marzo y mínimos inferiores a 10 mm/mes entre junio y agosto (Figura 3.2.1).

3.2.3 Distribución mensual

El año hidrológico 2021 en la comunidad de Purush registró su mayor carga hídrica en

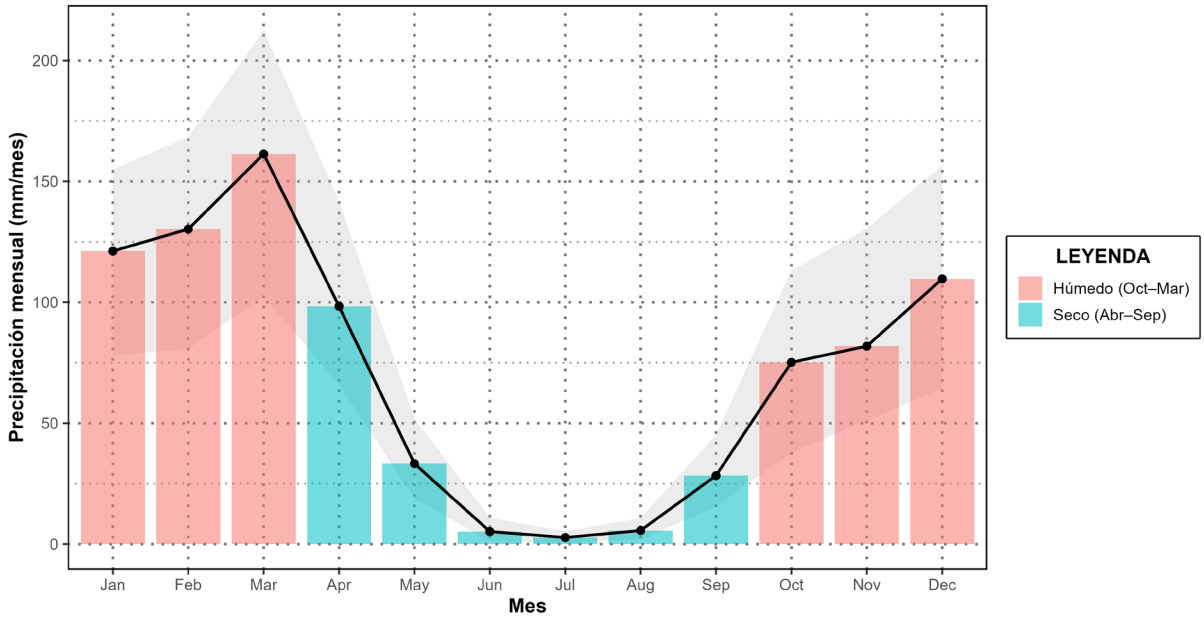


Figura 3.2.1. Régimen intraanual de precipitación y estacionalidad húmeda-seca en el distrito de Huaraz. Fuente: Elaboración propia con datos del producto RAIN4PE.

enero (280 mm) y marzo (259 mm), meses que concentraron el 63 % de la precipitación del periodo de monitoreo (noviembre-mayo; Figura 3.2.2). La clasificación de los 118 eventos según la intensidad máxima en 30 minutos (I_{30}), basada en los umbrales de Borja et al. (2018), revela una asimetría marcada: los eventos de categoría baja (I_{30} < 10 mm/h) representan el 59 % de los registros, pero aportan solo el 24 % de la lámina total, mientras que los moderados (10-20 mm/h) concentran el 58 % del volumen en el 36 % de los eventos. Los cinco eventos de categoría alta (20-25 mm/h) y extrema (>25 mm/h) aportan el 17 % de la lámina total; los tres extremos superaron en promedio 8.6 mm/h el umbral crítico de 23 mm/h documentado por Borja et al. (2018) para la movilización activa de sedimentos, con duraciones medias de 30 minutos.

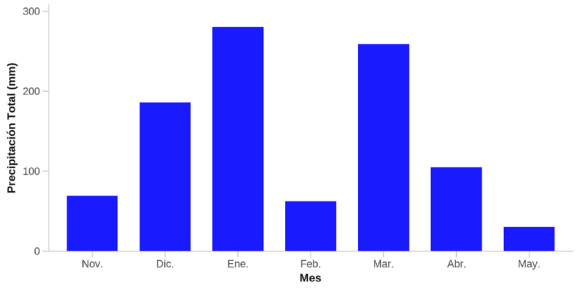


Figura 3.2.2. Precipitación acumulada mensual y distribución del régimen hídrico durante el año hidrológico 2021 en la comunidad de Purush.

3.2.4 Distribución horaria

El 78 % de la carga hídrica total se concentra entre las 14:00 y las 19:00 horas, con un pico a las 16:00 horas, que acumula 145 mm en ese intervalo (Figura 3.2.3); durante la mañana, la actividad pluvial es prácticamente nula. El patrón vespertino amplifica la capacidad erosiva: el ciclo de secado matutino debilita la capa superficial y, cuando la lluvia de alta intensidad impacta al final de la tarde, el sellado superficial suprime la infiltración y convierte la precipitación en escorrentía erosiva en minutos. Los registros de humedad antecedente en los meses de mayor erosión (enero y marzo) confirman valores entre 22 % y 36 %, condición que potencia el desprendimiento de partículas durante los eventos vespertinos. La recurrencia del pico a las 16:00 horas indica que la mayor parte de la pérdida de suelo anual en Purush ocurre en una ventana aproximada de 120 minutos diarios.

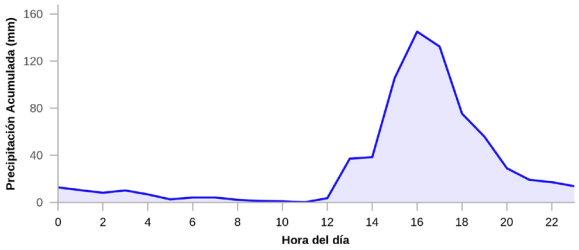


Figura 3.2.3. Distribución horaria de la precipitación acumulada durante el año hidrológico 2021 en la comunidad de Purush. Se observa la concentración crítica de eventos entre las 15:00 y las 17:00 horas.

3.3 Uso del suelo en las últimas décadas

3.3.1 Dinámica multitemporal en el distrito de Huaraz (1988-2021)

El análisis multitemporal del distrito de Huaraz evidencia que el uso del suelo se ha mantenido relativamente estable durante el periodo 1988-2021 (Figura 3.3.1). Los cambios observados están asociados principalmente a la expansión de actividades antrópicas y a la reducción de coberturas naturales. La agricultura (Agr) ha experimentado un aumento del 11 % al 13 % (57 km²). El suelo desnudo o con cobertura estacional (SVg) se mantiene en (16 ± 1) % (70 km²). La vegetación herbácea natural (Hrb) disminuyó de 59 % a 55 % (232 km²), lo que representa una reducción de 19 km².

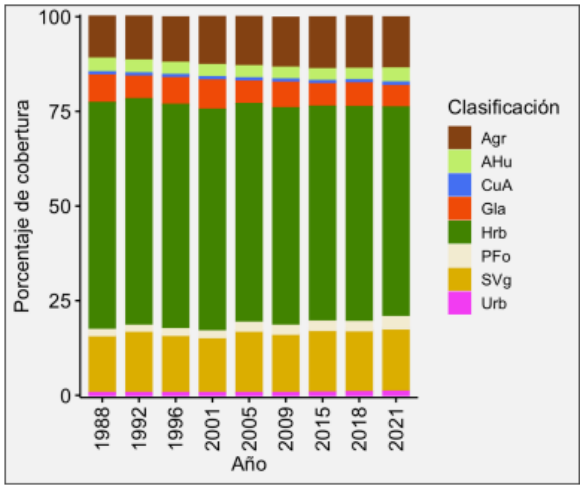


Figura 3.3.1. Dinámica de la cobertura vegetal y uso del suelo en el distrito de Huaraz durante el periodo 1988-2021.

Los humedales (AHu) se mantuvieron alrededor del 4 %, con un ligero aumento de 15 km² a 16 km². Los bosques forestales (PFo) aumentaron del 2 % al 4 % (15 km²). El área urbana (Urb) presenta un incremento constante del 0.7 % al 1 % (4 km²). En conjunto, estos cambios reflejan una expansión progresiva de la actividad agrícola y urbana en detrimento de coberturas naturales. A pesar de ello, la estructura general del paisaje se mantiene sin modificaciones abruptas.

3.3.2 Análisis altitudinal del cambio (3041-4000 m s. n. m.)

A partir del producto generado, se extrajeron las zonas por debajo de los 4000 m s. n. m., con el objetivo de analizar el cambio del uso del suelo en este rango (Figura 3.3.2). En este contexto, la expansión agrícola (Agr) aumentó de 47 km² a 57 km², lo que evidencia la ocupación progresiva de zonas accesibles en cotas medias en reemplazo de coberturas de vegetación natural. Asimismo, el suelo desnudo (SVg) abarca 4 ± 1 km² dentro de este rango altitudinal, lo que indica una baja representación relativa respecto de su extensión total.

En contraste, el 96 % (67 km²) del suelo desnudo se localiza por encima de los 4000 m s. n. m., donde constituye la cobertura dominante y presenta alta variabilidad, con una posible expansión de hasta 10 km² en condiciones de sequía. La cobertura glaciar disminuyó de 33 km² a 26 km² durante el periodo de estudio, lo que evidencia cambios en las zonas de mayor altitud que condicionan la dinámica superficial. Por debajo de los 4000 m s. n. m., se encuentran 6 km² de los 16 km² de humedales (AHu), mientras que aproximadamente el 60 % de la vegetación arbustiva se concentra en este rango, lo que marca una diferenciación altitudinal clara en la distribución de coberturas.

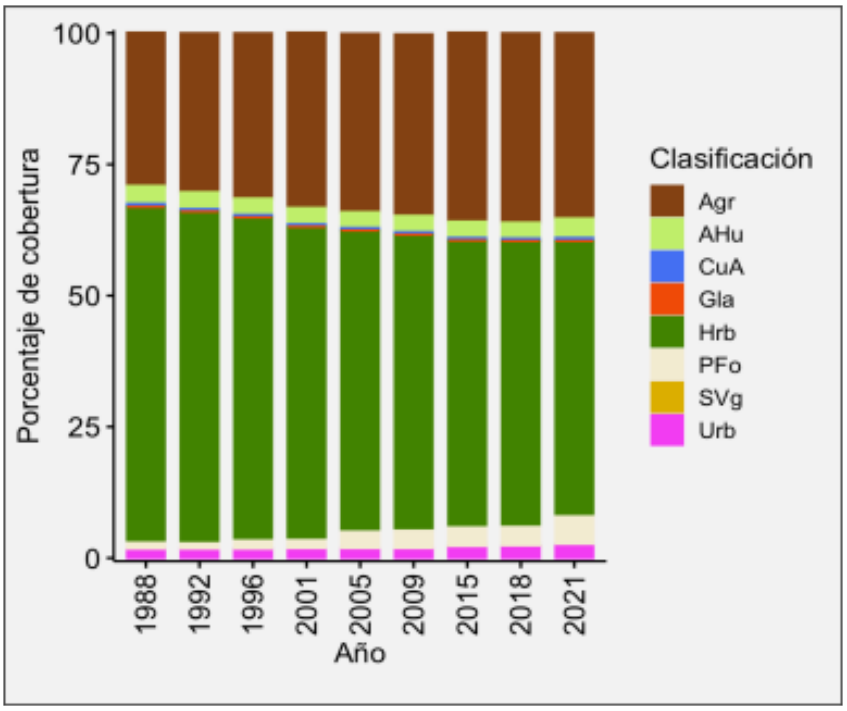


Figura 3.3.2. Dinámica de la cobertura vegetal y uso del suelo en el distrito de Huaraz durante los últimos 33 años, entre 3041 m s. n. m. y 4000 m s. n. m.

4. Diagnóstico de la erosión

4.1 Historia de las últimas décadas

El Perú carece de registros históricos continuos de erosión, lo que dificulta comprender cómo ha cambiado el territorio en el largo plazo. Los trazadores radioisotópicos Cs-137 y Pb-210ex reconstruyen esa historia a partir de la señal que dejan en el suelo. El Cs-137, originado en los ensayos nucleares atmosféricos de mediados del siglo XX, estima la pérdida de suelo de los últimos 60 años (1963-2023); el Pb-210ex, de origen natural, extiende esa ventana a 100 años (1923-2023). La comparación entre el inventario de cada trazador en un punto de ladera y el de un sitio de referencia no perturbado permite calcular la redistribución del suelo.

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

a. Diseño de muestreo

Se seleccionaron cinco laderas representativas (T1-T5), que abarcan las coberturas dominantes del distrito. En cada ladera se estableció un transecto lineal en la dirección de la pendiente, con puntos de muestreo en las posiciones alta, media y baja, para caracterizar el gradiente de redistribución (Figura 4.1.2). Además, se muestrearon puntos independientes bajo distintas coberturas para registrar la variabilidad espacial de las tasas de erosión.

Se recolectaron 27 núcleos de suelo con un muestreador cilíndrico de 8 cm de diámetro y 20 cm de profundidad. Los testigos de referencia se laminaron en capas de 5 cm, mientras que

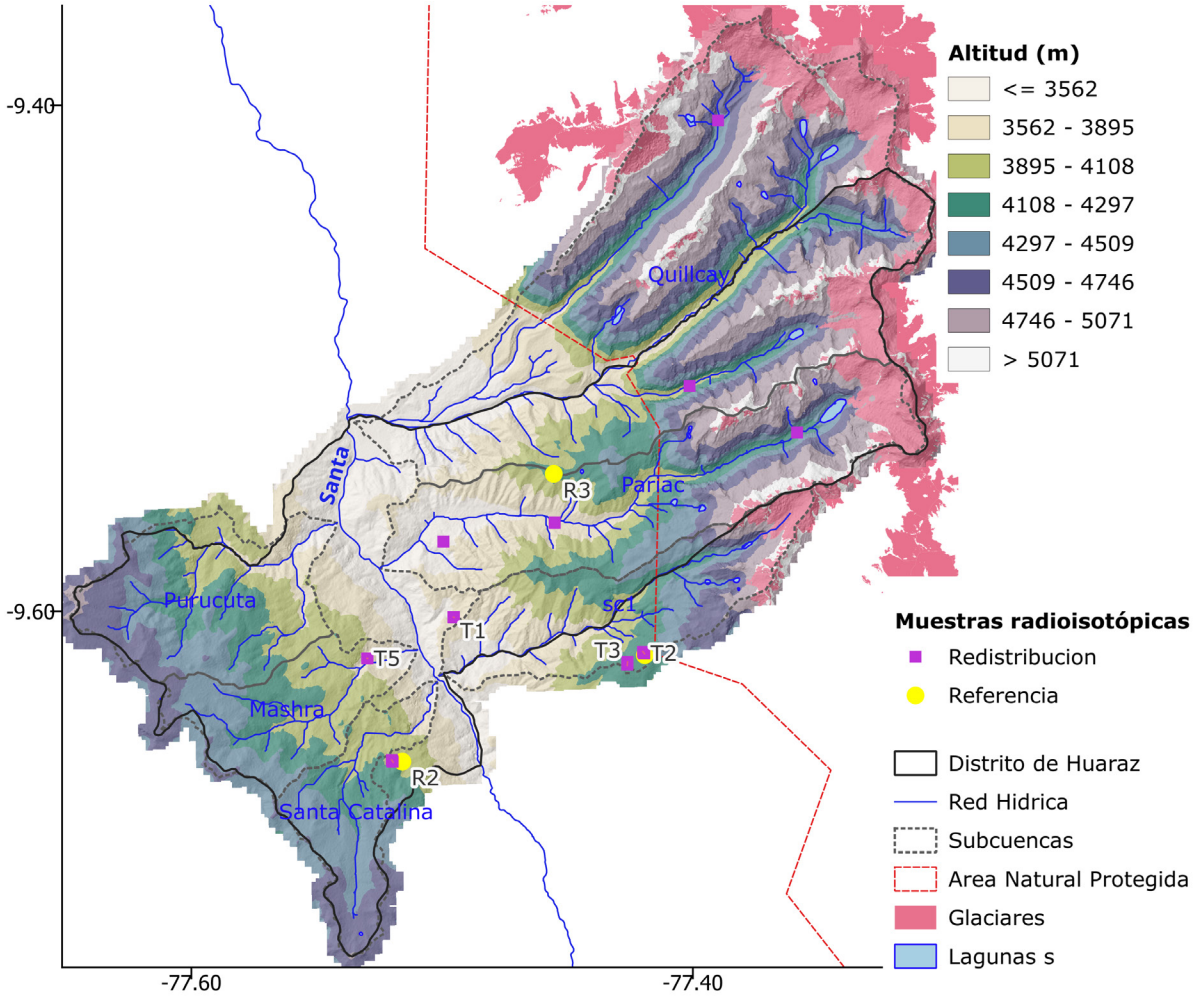


Figura 4.1.1. Muestras recolectadas en sitios de redistribución y referencia en el distrito de Huaraz.



Figura 4.1.2. Evidencia fotográfica del muestreo en las diversas coberturas de suelo a nivel de transectos (T1-T5) y puntos independientes.

los de redistribución se laminaron cada 10 cm, lo que generó 79 muestras para análisis por espectrometría gamma. El Cs-137 se detectó en 24 muestras (30 %) y el Pb-210ex en 39 (49 %); en las muestras restantes, la actividad quedó por debajo del límite de detección (LD = 0.1 Bq/kg), calculado según Currie (1968) con un nivel de confianza del 95 %, y se les asignó un inventario de cero para los cálculos de redistribución.

b. Validación de los sitios de referencia

Se identificaron tres sitios de referencia (R1-R3), ubicados en áreas planas con mínima intervención humana. En todos los casos, el inventario fue mayor en la capa superficial y disminuyó exponencialmente hasta los 15 cm (Figura 4.1.3). Los coeficientes de variación (Cs-137: 12 %; Pb-210ex: 13 %) se mantuvieron por debajo del umbral del 30 % recomendado en la literatura, lo que confirma la estabilidad espacial de los sitios.

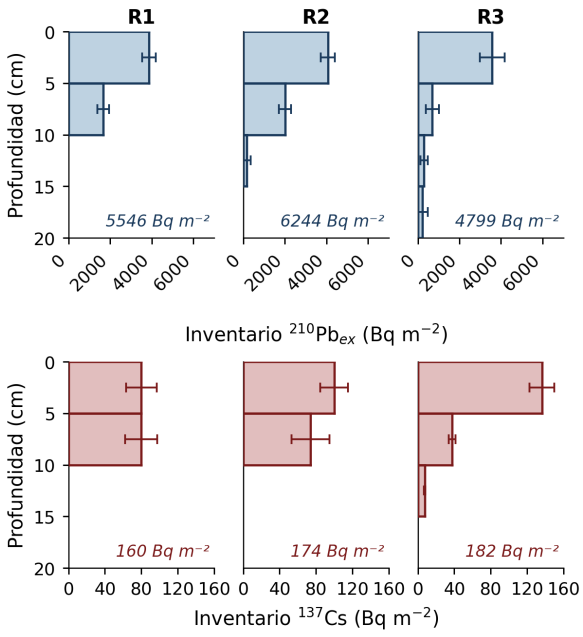


Figura 4.1.3. Distribución de Cs-137 y Pb-210ex en el perfil del suelo de los sitios de referencia.

4.1.2 Diagnóstico de la pérdida de suelo por uso de la tierra

Las tasas de redistribución de Cs-137 se calcularon con el modelo de balance de masa de Soto y Navas (2004, 2008); las de Pb-210ex, con el modelo de balance de masa en sitios agrícolas y con el modelo de migración-difusión en coberturas naturales.

La agricultura es el uso que más suelo pierde en el distrito, con tasas medias de 38 t/ha/año en los últimos 60 años y 30 t/ha/año en el último siglo (Figura 4.1.4). Las plantaciones de pino muestran el patrón inverso: pierden más en el periodo centenario (8 t/ha/año) que en el reciente (5 t/ha/año), lo que sugiere que la cobertura forestal ha comenzado a frenar la erosión con el tiempo. El pajonal presenta un comportamiento mixto según la posición topográfica, con tasas entre 3 y 6 t/ha/año. El bofedal es el único uso que gana suelo en ambos periodos (1-2 t/ha/año), con muy poca variación entre sitios.

4.1.3 Movimiento histórico del suelo a escala de ladera

Para reconstruir el movimiento histórico del suelo en las laderas de estudio (T1 a T5) se analizaron los perfiles de profundidad y las tasas de redistribución en tres posiciones topográficas (ladera alta, media y baja) para cada transecto (Figura 4.1.5 y Figura 4.1.6).

En las laderas agrícolas (T1 y T5), T1 es la más corta (41 m) y empinada (27°) del estudio (Figura 4.1.6). En los últimos 60 años, el Cs-137 fue removido de la capa superficial (0-20 cm) en los tres puntos de muestreo y la tasa de erosión de este periodo (60 t/ha/año, Cs-137) supera en 28 % la tasa promedio de los últimos 100 años (47 t/ha/año, Pb-210ex). La ladera T5 (27 m, 18°) presenta tasas más bajas —17 t/ha/año (Cs-137) y 13 t/ha/año (Pb-210ex)— y una tasa de entrega de sedimentos (SDR) igual a 1.

Las laderas de pajonal (T2, T3 y T4) presentan baja pérdida de suelo. T2 (125 m, 10°) y T4 (119 m, 11°) pierden entre 2 t/ha/año y 6 t/ha/año. En T3 (165 m, 8°), la ladera alta erosiona entre 3 t/ha/año y 8 t/ha/año, pero en la parte media, donde la pendiente disminuye de 12° a 7°, el suelo se retiene internamente, con depósitos de 4 t/ha/año a 9 t/ha/año, en lugar de continuar ladera abajo.

4.1.4 Factores que controlan la erosión histórica a escala de ladera

La cobertura vegetal es el factor dominante: la diferencia entre las tasas de erosión de suelos agrícolas y pajonales es estadísticamente significativa en ambos trazadores (Kruskal-Wallis: Cs-137, $H = 9.95$, $p = 0.002$, $\eta^2 = 0.64$; Pb-210ex, $H = 10.29$, $p = 0.001$, $\eta^2 = 0.66$) y explica entre el 64 % y el 66 % de la variabilidad de las tasas de redistribución.

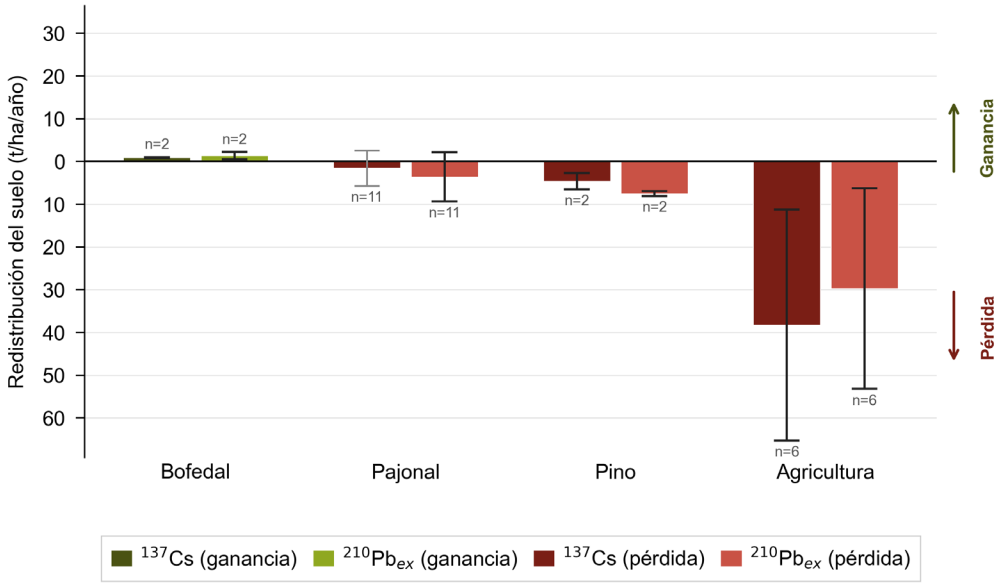


Figura 4.1.4. Balance de redistribución de suelo según cobertura vegetal. Las barras representan las tasas de pérdida (rojas) y ganancia (verdes), en t/ha/año. Las barras de error indican la desviación estándar asociada a la cobertura del suelo.

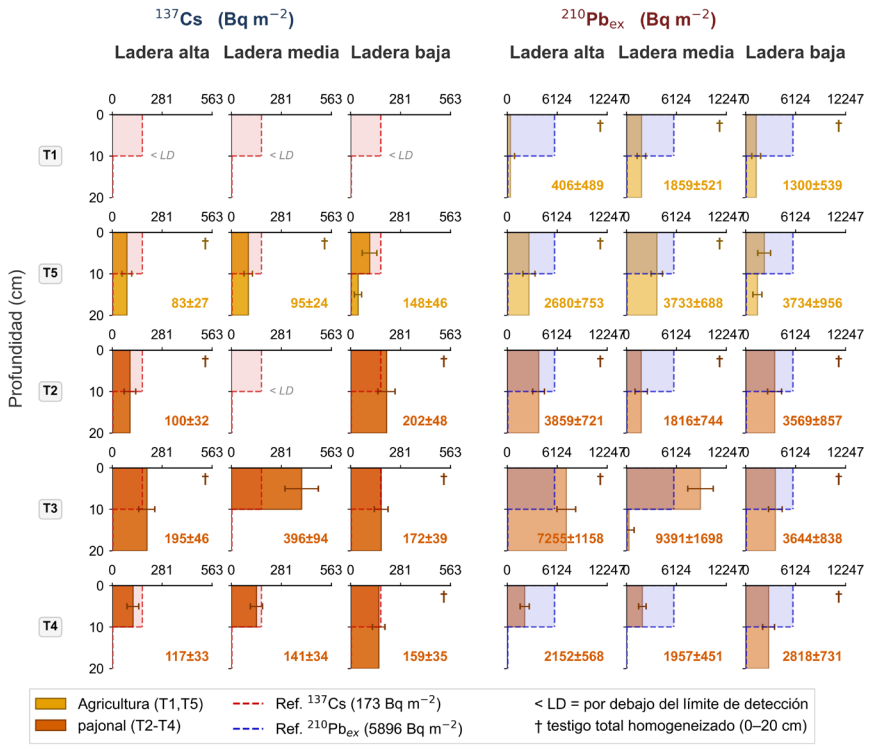


Figura 4.1.5. Inventarios de Cs-137 y Pb-210ex (Bq/m²) por perfil de suelo en transectos de ladera alta, media y baja. El valor al pie = total ± incertidumbre. Líneas discontinuas: distribución esperada si no hubiera erosión ni acumulación. < LD = señal por debajo del límite de detección; n.d. = no muestreado.

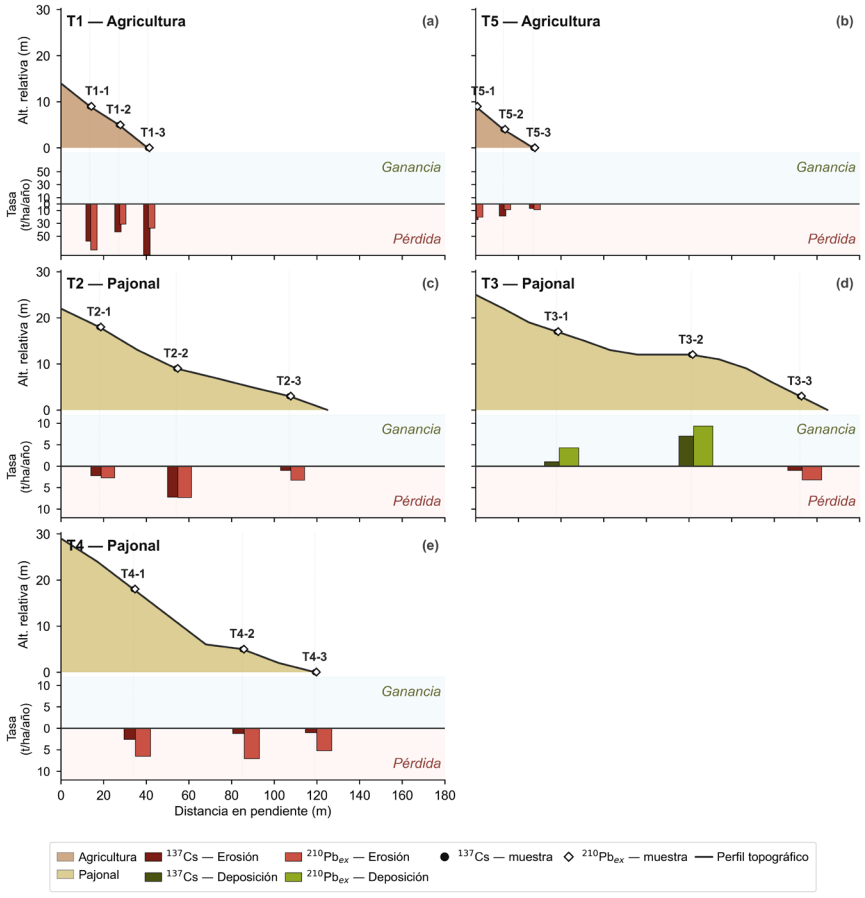


Figura 4.1.6. Tasas de redistribución histórica en las laderas T1 y T5 (agricultura) y T2-T4 (pajonal).

La topografía amplifica la erosión donde no hay cobertura vegetal. La pendiente, el factor LS, el índice de potencia de corriente (SPI) y el índice de humedad topográfica (TWI) se correlacionan significativamente con las tasas de erosión en suelos desprotegidos (Spearman: pendiente, $r = -0.79$, $p < 0.001$; LS, $r = -0.69$, $p < 0.01$; log(SPI), $r = -0.76$, $p < 0.001$; TWI, $r = +0.63$, $p < 0.05$). El signo negativo en pendiente, LS y SPI indica que valores mayores de estas variables se asocian con tasas de redistribución más negativas y, por tanto, con una mayor pérdida de suelo; en cambio, el signo positivo en TWI refleja que las zonas de convergencia hídrica tienden a acumular sedimento.

Esta interacción se observa directamente en T1 (26°-27°), donde las pérdidas oscilan entre 43 t/ha/año y 79 t/ha/año; en T5, con pendiente menor (13°-21°), disminuyen proporcionalmente a 7-25 t/ha/año. En los pajonales, en cambio, la pendiente deja de ser determinante: los puntos con hasta 18° de inclinación (T4-1) pierden menos de 3 t/ha/año, y T3-2 (3°) incluso acumula entre 4 t/ha/año y 9 t/ha/año.

4.2 Dinámica y monitoreo de la erosión actual

4.2.1 Pérdida de suelo por tipo de cobertura

En la comunidad de Purush (Huaraz) se estableció una red de monitoreo continuo para cuantificar la pérdida real de suelo mediante la captura directa de escorrentía y sedimentos a escala de evento y relacionar la respuesta del suelo con las características físicas de cada lluvia.

Las trampas de sedimentos, construidas con latón galvanizado de 20 cm de altura, aíslan la unidad de muestreo e impiden el ingreso de flujo externo. De este modo, garantizan que el sedimento recolectado corresponda exclusivamente al área delimitada (Figura 4.2.1).

El diseño experimental es multiescalar: diez microparcelas de 1 m² distribuidas en pares a lo largo del gradiente de la terraza de formación

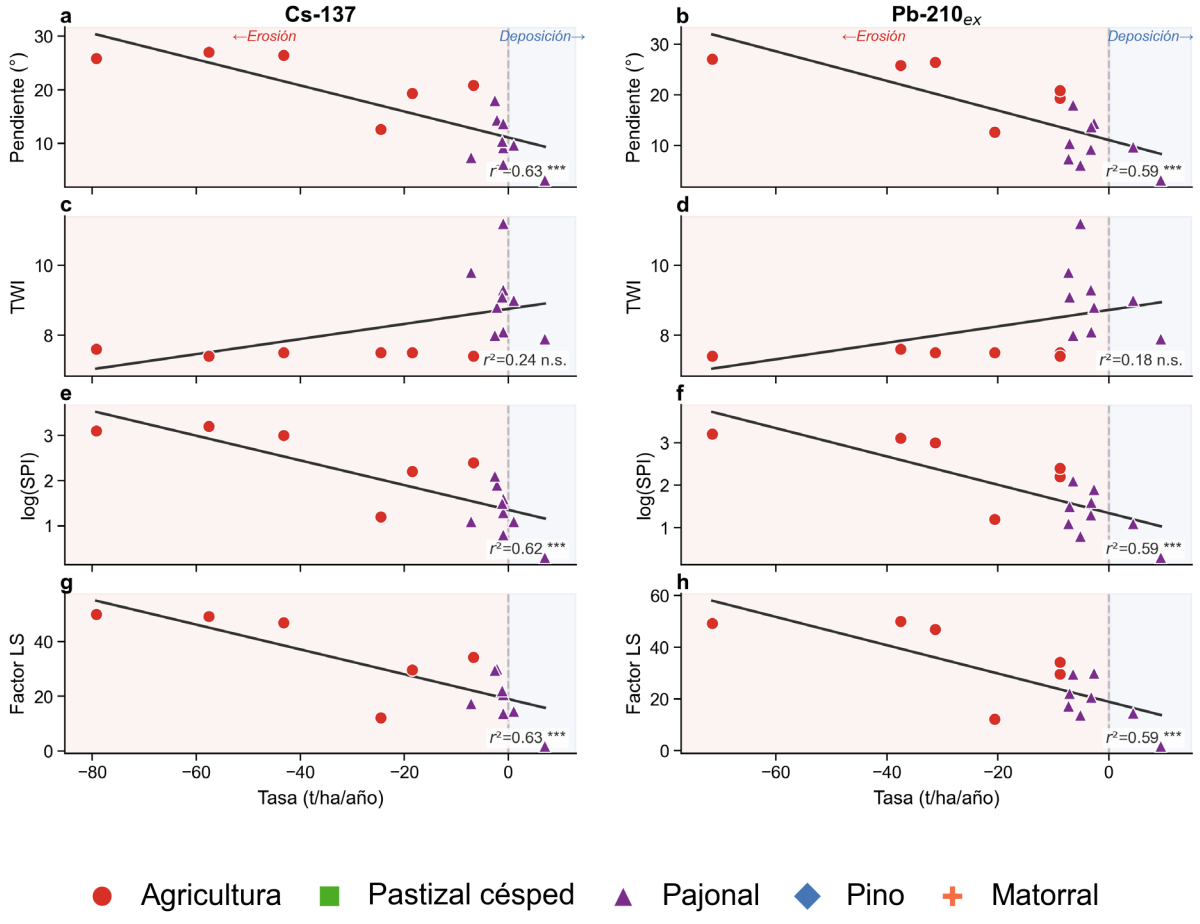


Figura 4.1.7. Relación entre las tasas de erosión/deposición estimadas con Cs-137 y Pb-210ex y cuatro variables topográficas. La línea negra corresponde a la regresión lineal global.



Figura 4.2.1. Detalle constructivo de una microparcela de 1 m² en la comunidad de Purush. Estructura de latón galvanizado para la delimitación del área y el sistema de captación de escorrentía hacia depósitos de almacenamiento.

lenta, para aislar los procesos de erosión por salpicadura (*splash*) y flujo laminar; y dos parcelas de 100 m² para monitorear procesos de transporte más complejos, como la formación de microsurcos y el escurrimiento concentrado (Figura 4.2.2). La distribución desde la cabecera hasta el pie de la terraza permite identificar zonas de desprendimiento activo y de acumulación neta dentro de la misma estructura.

El sistema se sincronizó con una estación meteorológica automática y sensores de humedad del suelo a 15 cm de profundidad. Tras cada evento, se recolectó la escorrentía total y se extrajeron alícuotas de 500 mL para su procesamiento en el laboratorio MoSSARD.



Figura 4.2.2. Vista aérea de la distribución espacial del diseño experimental en la terraza de formación lenta en Purush. A la derecha, parcelas de 100 m² (transporte); a la izquierda, red de microparcelas de 1 m² (desprendimiento), distribuidas en pares (1-10) a lo largo del perfil de pendiente.

4.2.2 Efecto de la cobertura y la pendiente sobre la pérdida de suelo

La pérdida de suelo en Purush durante el año hidrológico 2021 varió según la posición en el perfil topográfico de la terraza de formación lenta (Figura 4.2.3). Los registros máximos en microparcelas de 1 m² se concentraron en la zona alta (66 t/ha/año) y la zona media-baja (65 t/ha/año), con mecanismos diferenciados: en la zona alta, la erosión está gobernada por el impacto mecánico de la gota (*splash*) y el inicio del flujo laminar sobre suelos con cobertura en desarrollo; en la zona media-baja, la pérdida responde a la energía acumulada del flujo superficial, que alcanza su máxima capacidad de transporte antes de ser interceptado por la estructura de la terraza.

La parcela de ladera de 100 m² registró una tasa promedio de 39 t/ha/año, inferior a los picos puntuales de las microparcelas. La diferencia entre escalas indica que parte del sedimento desprendido en las zonas altas se redistribuye y deposita dentro de la ladera antes de alcanzar el punto de salida. Este comportamiento es típico de laderas con topografía irregular, donde el transporte está limitado por la capacidad del flujo laminar.

La zona de banco registró las tasas más bajas del sistema, entre 6 t/ha/año y 11 t/ha/año, lo que representa una retención de hasta el 85 % de los sedimentos movilizados desde los sectores superiores y valida la eficiencia de las terrazas de formación lenta como estructuras de control hidrosedimentológico. Sin esta infraestructura, el sedimento generado en la zona alta (66 t/ha/año) alcanzaría directamente el sistema fluvial, lo que aceleraría la colmatación de los cauces.

La comparación con el año hidrológico 2020, cuando los máximos no superaron los 8 t/ha/año, confirma el concepto de año crítico: un año húmedo como 2021 activa el potencial degradativo del sistema en niveles más de ocho veces mayores que los del año seco previo. Las medidas de conservación deben dimensionarse para periodos de alta pluviometría, fase en la que ocurre la mayor transferencia de masa superficial (Figura 4.2.4).

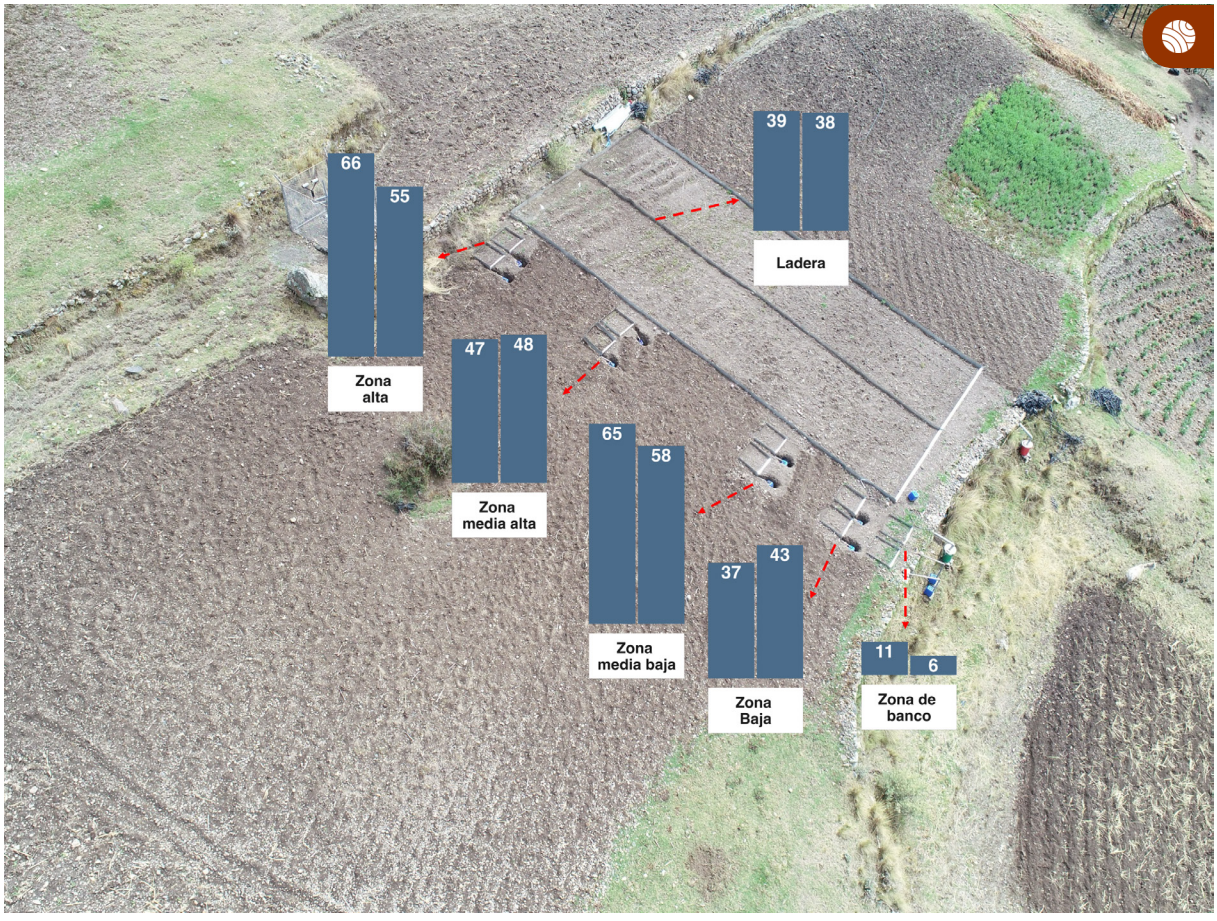


Figura 4.2.3. Distribución espacial de la pérdida de suelo anual (t/ha/año) en la terraza experimental de Purush.

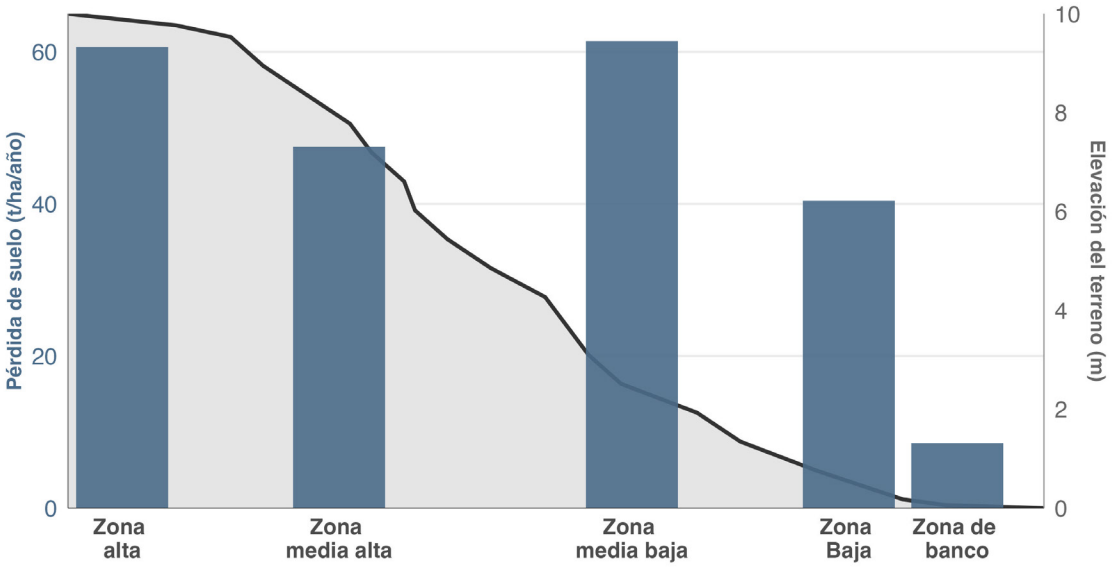


Figura 4.2.4. Relación entre la elevación del terreno y el promedio de pérdida de suelo (SL). Se evidencia la función de la terraza como zona de sedimentación y amortiguamiento hídrico.

4.2.3 Factores determinantes de la degradación

Para identificar los factores climáticos, topográficos y vegetativos con mayor peso en la pérdida de suelo a escala de evento, se implementó un modelo *random forest* sobre la base de datos de alta resolución del año 2021.

El análisis de importancia por permutación revela una jerarquía clara (Figura 4.2.5): la intensidad máxima de la precipitación (Pi) es el predictor dominante, con un valor de importancia de 829, lo que confirma que la erosión en Purush responde a un proceso de umbral en el que el desprendimiento depende más de la energía de impacto de la gota que del volumen acumulado. El volumen total de precipitación (PP) ocupa el segundo lugar, con importancia considerablemente menor. El coeficiente de escorrentía (Rc) y la cobertura vegetal (Vc) son la tercera y la cuarta variables en relevancia; la baja importancia relativa de los agregados del suelo (Fa) indica que, ante eventos de alta intensidad, incluso los suelos estructuralmente estables son vulnerables sin protección vegetativa durante la ventana crítica de enero a marzo. La cobertura actúa simultáneamente como disipador de la energía cinética de la gota y como regulador del coeficiente de escorrentía, y constituye la única variable de control que puede gestionarse en el corto plazo.

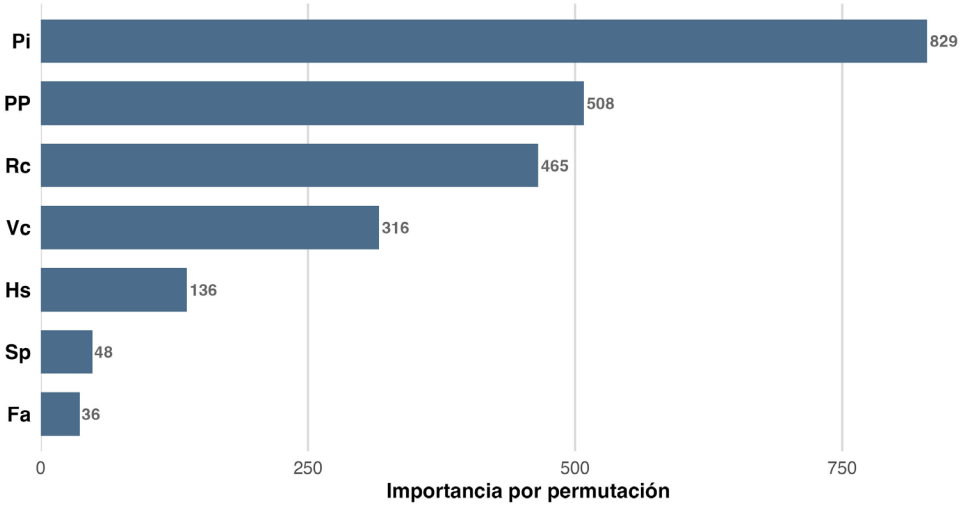


Figura 4.2.5. Jerarquía de importancia de variables predictoras en la generación de sedimentos. Se destaca el predominio de la intensidad máxima (Pi) sobre las propiedades físicas intrínsecas del suelo.

El modelo alcanzó R^2 = 0.96 en calibración y R^2=0.73 en validación, con RMSE de 29 g/m² (Figura 4.2.6). En valores bajos (<10 g/m²), el modelo tiende a sobreestimar la pérdida, comportamiento esperable en algoritmos entrenados sobre años de alta pluviometría; en el rango medio y alto (10-200 g/m²), la concordancia mejora y los registros convergen alrededor de la línea 1:1. Dado que la intensidad (Pi) es el factor dominante, la red de monitoreo meteorológico permite anticipar periodos de alto riesgo erosivo y habilitar una gestión preventiva de suelos antes de que el daño ocurra.

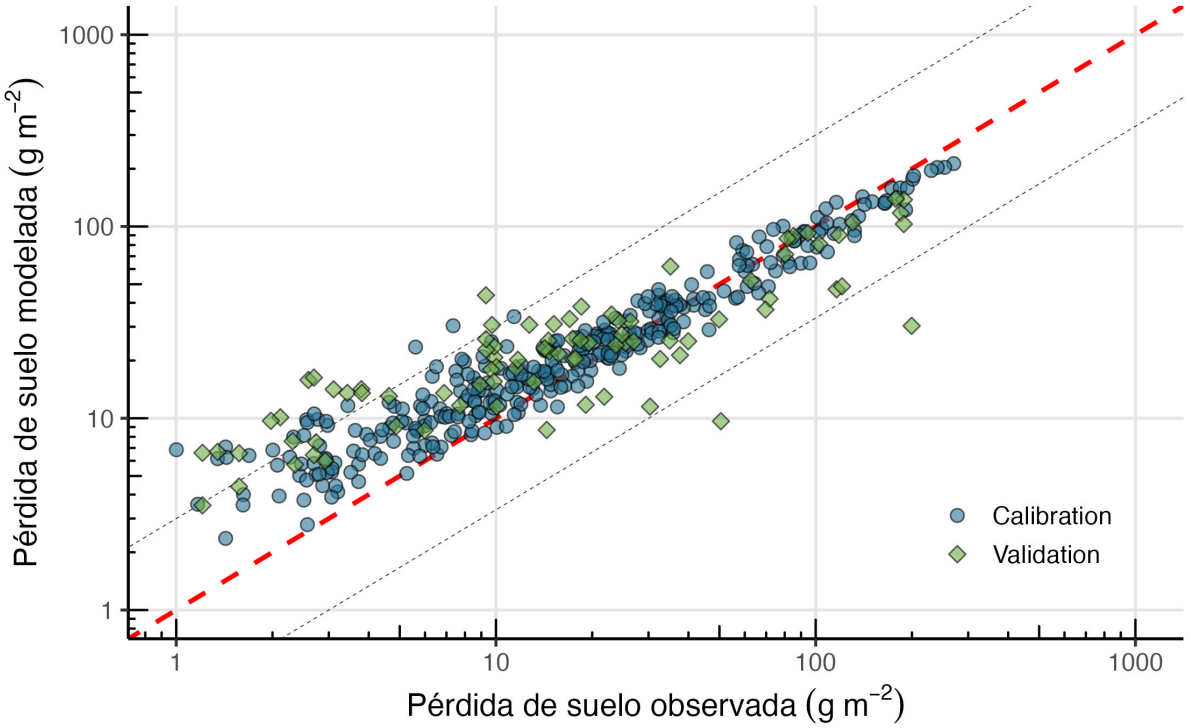


Figura 4.2.6. Validación del modelo predictivo de pérdida de suelo. La alineación de los eventos cerca de la línea 1:1 confirma la alta precisión del sistema para estimar la degradación a escala de evento.

5. Dinámica de los sedimentos en suspensión

5.1 Caracterización de los sedimentos

5.1.1 Monitoreo de la concentración de sedimentos en suspensión

El monitoreo de sedimentos en suspensión en la estación Quillcayhuanca comprendió tres eventos completos registrados durante marzo de 2022. Las concentraciones máximas variaron entre 579 mg/L y 1593 mg/L, mientras que las medias oscilaron entre 302 mg/L y 670 mg/L. El evento 2 registró la mayor concentración de sedimentos en suspensión, con una CSS máxima de 1593 mg/L y una media de 670 mg/L. El evento 1 presentó los valores más bajos, con un máximo de 579 mg/L y una media de 302 mg/L. El evento 3 mostró condiciones intermedias, con una CSS máxima de 1481 mg/L y una media de 515 mg/L. La diferencia entre las medias y los máximos evidencia una distribución marcadamente asimétrica, dominada por pulsos breves de alta concentración.

La dinámica de las fracciones granulométricas presentó diferencias importantes entre las partículas finas (<63 µm) y gruesas (>63 µm). La fracción fina mantuvo una respuesta más persistente durante gran parte de los eventos, mientras que la fracción gruesa presentó oscilaciones abruptas y pulsos de corta duración. Este comportamiento fue más evidente durante el evento 2, en el que la señal fina disminuyó progresivamente durante aproximadamente seis horas, mientras que la fracción gruesa registró reactivaciones episódicas hacia las fases media y final. Asimismo, las trayectorias de dCSS/dt presentaron amplitudes inferiores a ±40 mg/L/min en el evento 1 y cercanas a ±80 y ±90 mg/L/min en los eventos 2 y 3, respectivamente. Estos resultados evidencian una elevada variabilidad temporal en la concentración y composición granulométrica de los sedimentos en suspensión.

5.1.2 Dinámica temporal de la concentración de sedimentos en suspensión

La Figura 5.1.1d-f muestra la evolución temporal de la concentración de sedimentos en suspensión respecto de su tasa de cambio (dCSS/dt) durante los tres eventos registrados en la estación Quillcayhuanca. El evento 1 presentó una CSS máxima de 579 mg/L y variaciones entre −25 mg/L/min y 40 mg/L/min, con una trayectoria relativamente compacta (Figura 5.1.1d). En contraste, el evento 2 alcanzó 1593 mg/L y tasas entre −85 mg/L/min y 75 mg/L/min, y mostró la mayor amplitud de CSS y de su tasa de cambio en el conjunto (Figura 5.1.1e). El evento 3 alcanzó 1481 mg/L, con incrementos rápidos desde concentraciones cercanas a 300 mg/L hasta valores superiores a 1400 mg/L (Figura 5.1.1f).

Las trayectorias presentan múltiples cruces sobre la línea dCSS/dt = 0, lo que evidencia fases sucesivas de incremento y disminución de la concentración. En los tres eventos, el pico principal de CSS ocurre cuando dCSS/dt converge hacia valores cercanos a cero. El evento 2 desarrolla la mayor cantidad de trayectorias secundarias entre 400 mg/L y 900 mg/L, mientras que el evento 3 presenta oscilaciones cercanas a ±90 mg/L/min durante la fase descendente. Asimismo, las fracciones finas (<63 µm) mantienen respuestas más continuas, mientras que la fracción gruesa desarrolla pulsos abruptos y discontinuos, especialmente durante los eventos 2 y 3 (Figura 5.1.1a-c).

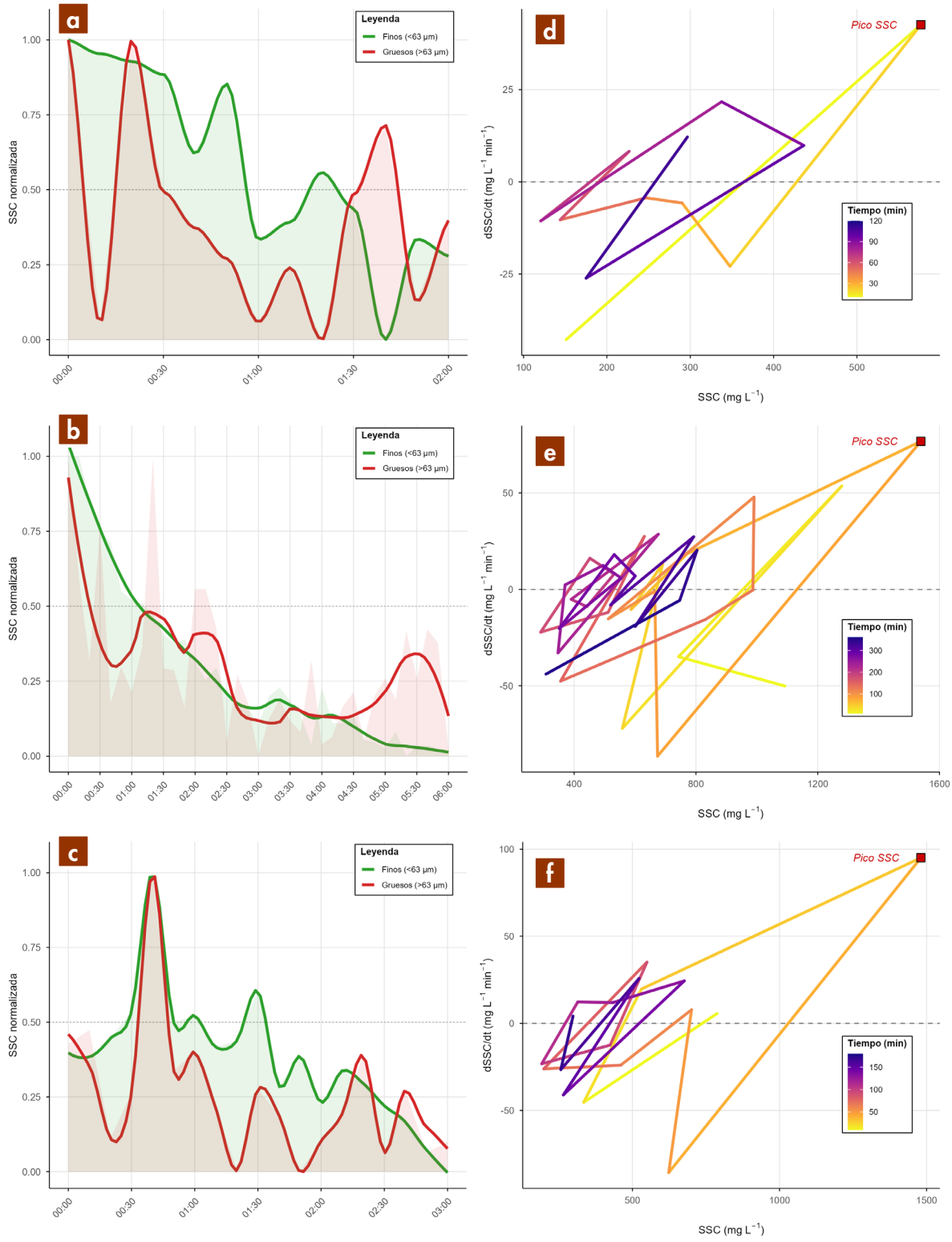


Figura 5.1.1. Análisis temporal de los sedimentos en suspensión en la estación Quillcayhuanca. (a-c) Evolución temporal normalizada de las fracciones granulométricas. (d-f) Diagramas de CSS frente a dCSS/dt durante los eventos monitoreados.

6. Mapeo de las tasas y la severidad de erosión

6.1 Construcción del modelo espacial de erosión

La caracterización de la erosión hídrica en el distrito de Huaraz se realizó mediante WaTEM/SEDEM. La configuración fisiográfica y de las coberturas se describió previamente en el capítulo 3. El modelo representó espacialmente los procesos de generación, redistribución y conectividad sedimentaria potencial. El análisis integró las subcuencas Pariac, Quillcay, Ututo Pampa, Carayoc, Purucuta y Santa Catalina. La superficie cartográfica de referencia comprende 423 km²; sin embargo, el análisis efectivo abarcó 239 km². La diferencia corresponde principalmente a los sectores glaciares y las áreas naturales protegidas que fueron excluidos.

El modelo se construyó mediante los factores R, K y LS derivados de información climática y topográfica. Los factores C y P representaron la cobertura vegetal y el manejo del suelo (capítulo 3). El factor de erosividad (R) se estimó mediante el producto RAIN4PE, ajustado con información local. Este factor representó las condiciones medias de precipitación entre 1981 y 2015 (capítulo 3.2.2). El factor de erodabilidad (K; Figura 6.1.1b) se derivó del producto SoilGrids250m (Hengl et al., 2017) mediante la formulación de Wischmeier y Smith (1978). Su distribución espacial mostró una variabilidad moderada dentro del distrito. El factor topográfico (LS) se calculó mediante un modelo digital de elevación de 20 m. Cada celda representó aproximadamente 400 m². Esta resolución no representa explícitamente las cárcavas ni los flujos concentrados de pequeña extensión.

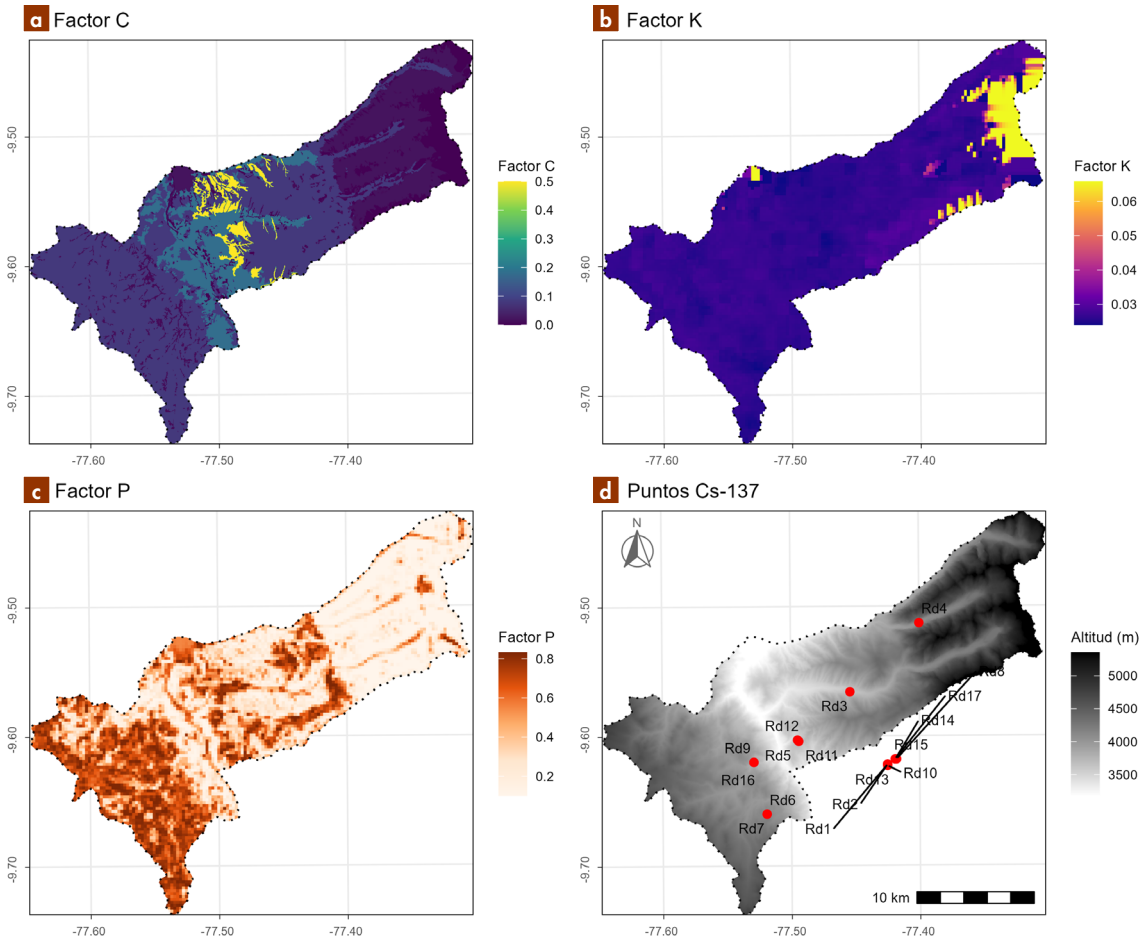


Figura 6.1.1. Variables de ingreso del modelo distribuido WaTEM/SEDEM en el distrito de Huaraz. a) Cobertura vegetal del distrito de Huaraz. b) Factor K, estimado a partir de datos de SoilGrids. c) Distribución espacial del factor P en el distrito. d) Tasas de erosión medidas con Cs-137, utilizadas en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

El factor de cobertura vegetal (C; Figura 6.1.1a) presentó valores entre 0 y 0.5 según el uso del suelo. La distribución espacial mostró predominio de valores bajos (0.01-0.1). Estos valores correspondieron principalmente a coberturas herbáceas y sectores altoandinos dominantes. Los valores intermedios (0.1-0.2) mostraron distribución transicional sobre laderas intervenidas. Los valores altos (0.25-0.5) se concentraron en áreas agrícolas y sistemas de cárcavas. Este patrón definió una matriz dominante de cobertura natural con focos localizados de intervención antrópica.

El factor de prácticas de conservación (P; Figura 6.1.1c) presentó valores entre 0.1 y 0.9. La distribución espacial mostró un predominio de valores altos entre 0.8 y 0.9. Estos valores dominaron principalmente en sectores con limitada conservación del suelo. Los valores bajos, entre 0.1 y 0.4, se concentraron sobre áreas agrícolas localizadas. Este patrón evidenció una escasa implementación distrital de prácticas efectivas de control de la escorrentía. Finalmente, las tasas de erosión obtenidas mediante Cs-137 (Figura 6.1.1d) se emplearon como referencia en la etapa de calibración del modelo. Estos datos integran procesos erosivos de escala decadal descritos previamente en el capítulo 4.1.

6.2 Espacialización de la severidad de pérdida de suelo

La espacialización de las tasas de erosión hídrica en Huaraz evidencia un sistema dominado por erosión baja, pero con focos críticos bien definidos (Figura 6.2.1). Sobre los 239 km² efectivamente modelados, las categorías muy débil (<2.5 t/ha/año) y débil (2.5-7.5 t/ha/año) concentraron 171 km², equivalentes al 72 % del área evaluada. La categoría moderada (7.5-12.5 t/ha/año) ocupó 25 km² (10 %). En conjunto, las clases menores a 12.5 t/ha/año abarcaron 196 km², equivalentes al 82 % del territorio modelado. En contraste, 42 km² superaron el umbral de erosión fuerte (>12.5 t/ha/año), de los cuales 20 km² correspondieron a categorías severa, muy severa y extrema (>30 t/ha/año). La categoría extrema (>60 t/ha/año) alcanzó 7 km², equivalente al 3 % del área evaluada.

A escala de subcuenca, Quillcay, Pariac y Ututo Pampa concentraron las condiciones más críticas. Sus valores P90 alcanzaron 49 t/ha/año, 47 t/ha/año y 39 t/ha/año, respectivamente, mientras que las tasas máximas se aproximaron a 180 t/ha/año. Las proporciones clasificadas en la categoría severa o superior fueron del 17 %, 18 %

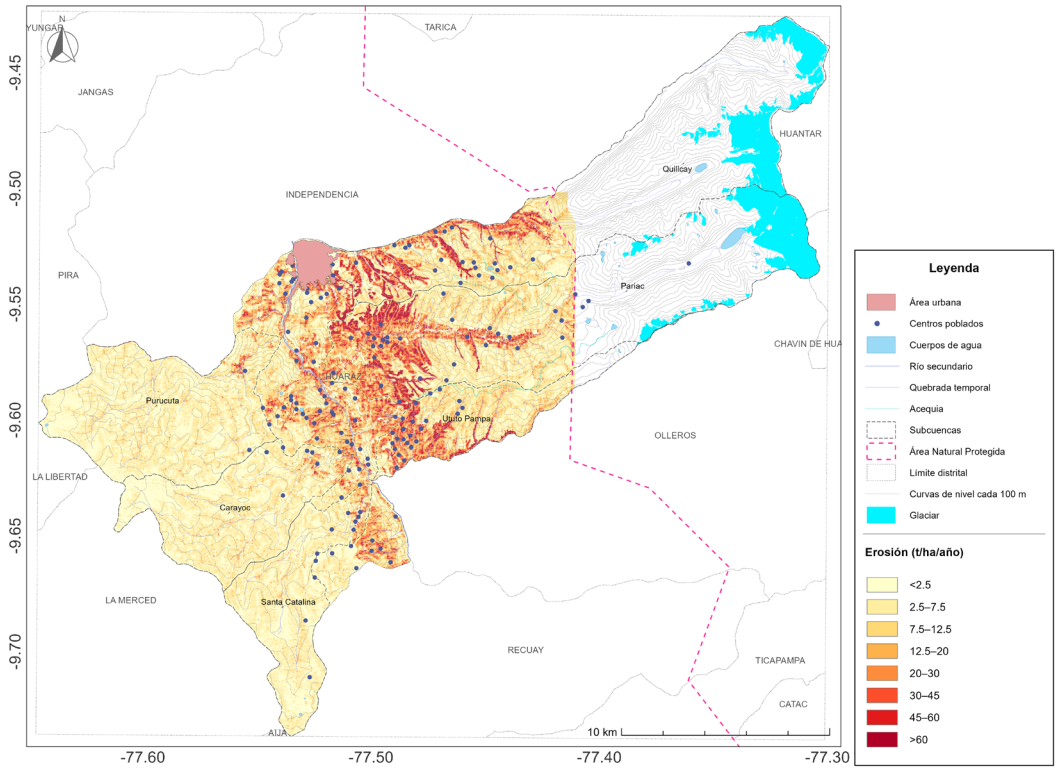


Figura 6.2.1. Mapa de las tasas de erosión hídrica en el distrito de Huaraz.

y 15 % de las áreas evaluadas, respectivamente. En las zonas topográficamente bajas, los valores P90 aumentaron a 66 t/ha/año, 74 t/ha/año y 62 t/ha/año. Bajo el criterio combinado de erosión superior a 30 t/ha/año, distancia menor de 50 m al cauce y pendiente mayor de 35°, los núcleos críticos abarcaron 8 ha, 5 ha y 2 ha en Quillcay, Pariac y Ututo Pampa, respectivamente.

En los sectores cercanos a los cauces, el percentil 90 alcanzó 53 t/ha/año, con 18 % de superficie en categorías severa o superior y 9 % en condición extrema. En cambio, en los sectores más alejados, el percentil 90 disminuyó a 13 t/ha/año, la superficie severa o superior bajó a 4 % y la categoría extrema a 2 %. Esta diferencia indica que las mayores tasas no dependen solo de la magnitud local de la erosión, sino de la conexión potencial entre laderas, cárcavas y ejes de drenaje. Por ello, la severidad en Huaraz se organiza alrededor de corredores hidrosedimentológicos funcionales, más que como una degradación homogénea del territorio.

La relación entre cobertura y severidad confirma un desacople entre dominancia territorial e intensidad erosiva (Figura 6.2.2). La vegetación herbácea y arbustiva ocupó 181 km², pero solo el 5 % de esta cobertura presentó erosión fuerte o superior (>12.5 t/ha/año) y menos de 1 % alcanzó categorías severas o superiores (>30 t/ha/año). En contraste, las áreas agrícolas abarcaron 28 km² y concentraron el 73 % de su superficie en erosión fuerte o superior, además del 31 % en condición severa, muy severa o extrema. El comportamiento más crítico correspondió a las cárcavas: aunque ocuparon 13 km², el 97 % de su superficie presentó erosión fuerte o superior y el 79 % alcanzó categorías severas o superiores. En conjunto, agricultura y cárcavas explicaron aproximadamente el 96 % de la superficie severa del área modelada.

En conjunto, las Figuras 6.2.1 y 6.2.2 muestran que la erosión hídrica en Huaraz no constituye una degradación uniforme del territorio. La severidad se organiza en núcleos localizados donde coinciden la intervención del suelo, las formas concentradoras de flujo, el relieve bajo relativo y la proximidad a la red hídrica. Por ello, la priorización espacial debe enfocarse en reducir la conectividad sedimentaria de estos focos críticos, en lugar de intervenir de manera generalizada en toda el área modelada.

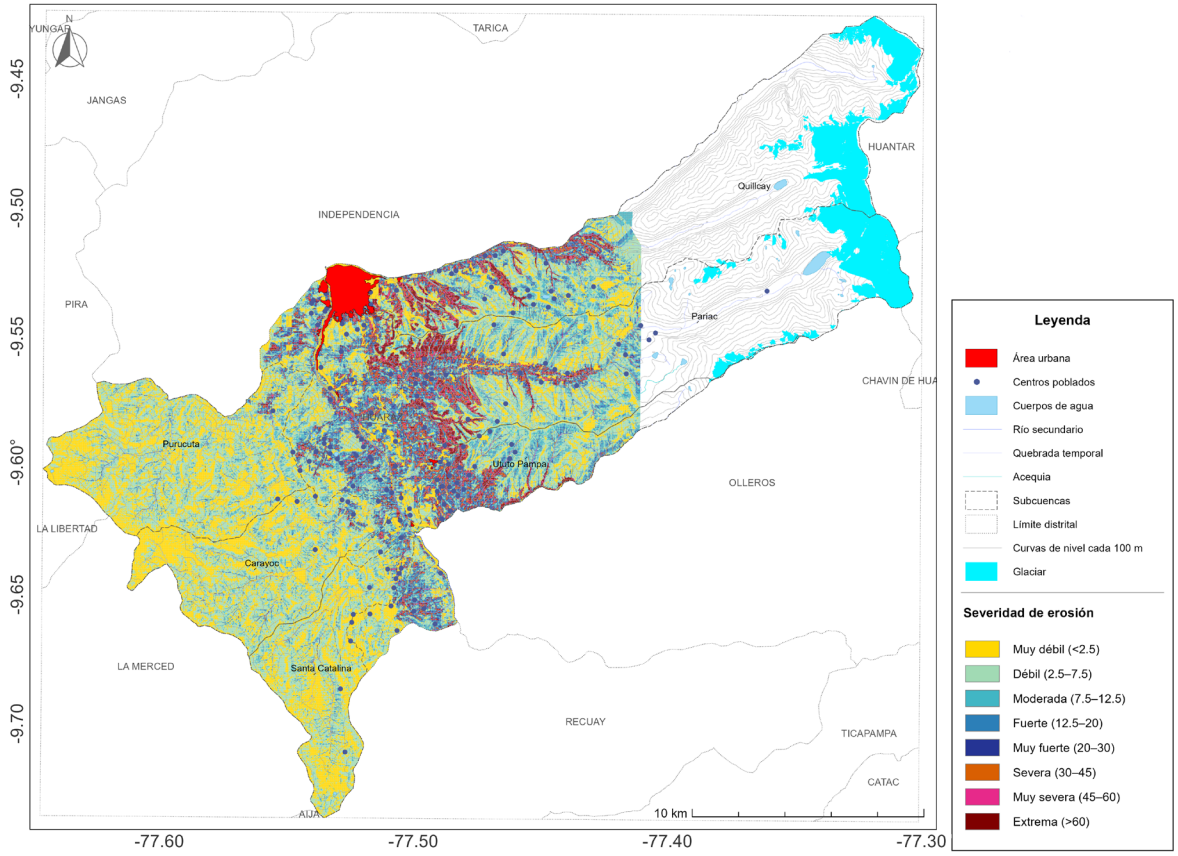


Figura 6.2.2. Mapa de severidad: identificación de las áreas con mayor pérdida de suelo.

7. Conclusiones y recomendaciones para la gestión

El presente estudio integra la memoria isotópica, el monitoreo en tiempo real y el modelamiento geoespacial para establecer que la pérdida de suelo en el distrito de Huaraz no es un problema exclusivamente agrícola, sino una amenaza directa a la regulación hídrica y la productividad del distrito. Los resultados permiten formular conclusiones y recomendaciones orientadas a la acción.

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

Los trazadores radioisotópicos muestran la memoria erosiva del distrito. En laderas agrícolas, las tasas alcanzaron 38 t/ha/año con Cs-137 y 30 t/ha/año con Pb-210ex; en contraste, los pajonales registraron pérdidas bajas, entre 2 t/ha/año y 6 t/ha/año, e incluso acumulación de 4 t/ha/año a 9 t/ha/año en sectores de retención. Los bofedales actuaron como sumideros, con ganancias de 1 t/ha/año a 2 t/ha/año. La cobertura explicó entre 64 % y 66 % de la variabilidad de la redistribución del suelo, lo que confirma que la protección superficial pesa más que la pendiente cuando se evalúa la estabilidad de largo plazo.

Las microparcelas de Purush captaron la respuesta actual del sistema bajo lluvia intensa. Las zonas alta y media-baja de la terraza experimental registraron 66 t/ha/año y 65 t/ha/año, mientras que la zona de banco redujo la pérdida a 6-11 t/ha/año y retuvo hasta el 85 % del sedimento movilizado. La parcela de 100 m^2 alcanzó 39 t/ha/año, lo que muestra que parte del suelo desprendido se redistribuye antes de salir de la ladera. El modelo *random forest* identificó la intensidad de la precipitación como el predictor dominante, con importancia de 829, y obtuvo R^2 de 0.96 en calibración y 0.73 en validación.

El monitoreo en Quillcayhuanca confirmó que la concentración de sedimentos en suspensión se manifiesta en forma de pulsos cortos. En tres eventos de marzo de 2022, la CSS máxima varió entre 579 mg/L y 1593 mg/L, con tasas de cambio de hasta ±90 mg/L/min. El modelado WaTEM/SEDEM completó esta lectura espacial: de 239 km^2 evaluados, 196 km^2 permanecen por debajo de 12.5 t/ha/año, pero 42 km^2 superan el umbral de erosión fuerte, 20 km^2 alcanzan una condición severa o superior y 7 km^2 corresponden a la categoría extrema. Quillcay y Pariac registraron máximos de 180 t/ha/año y los valores P90 más altos del distrito. En síntesis, Huaraz no pierde suelo por igual; pierde suelo donde la fuente está conectada.

7.2 Huaraz frente al umbral de tolerancia

Frente al umbral internacional de tolerancia de 10 t/ha/año establecido por Borrelli et al. (2017), Huaraz presenta una condición dual. Las coberturas conservadas se mantienen dentro de rangos funcionales: los pajonales, los bofedales y las coberturas herbáceas reducen la pérdida, almacenan sedimentos y amortiguan su transferencia. En cambio, las laderas agrícolas y los sectores de flujo concentrado exceden ampliamente el umbral: 38 t/ha/año en la memoria isotópica agrícola, 66 t/ha/año en microparcelas y hasta 180 t/ha/año en los máximos modelados. Estas cifras evidencian una presión erosiva capaz de comprometer la capa fértil en pocos ciclos húmedos.

La severidad crítica, sin embargo, está espacialmente acotada. El 72 % del área modelada se ubica en categorías muy débil y débil, y el 82 % permanece por debajo del umbral de erosión fuerte. La alerta surge en la fracción conectada: cerca de cauces, el P90 alcanza 53 t/ha/año, con 18 % de superficie severa o superior y 9 % extrema; lejos de la red hídrica, esos valores caen a 13 t/ha/año, 4 % y 2 %. Por ello, el problema estratégico de Huaraz no es solo reducir tasas altas, sino impedir que esas tasas se conviertan en entrega sedimentaria efectiva.

7.3 Prioridades para la gestión

La gestión ambiental en Huaraz debe concentrarse en reducir la conectividad sedimentaria, porque la exportación efectiva de sedimentos se concentra en sectores reducidos donde confluyen laderas, cárcavas y red fluvial. En consecuencia, las intervenciones deben priorizar los procesos que controlan la transferencia hacia los cauces principales:

- **Intervención en focos críticos de erosión:** Quillcay, Pariac y Ututo Pampa concentran las condiciones más severas, con 17 %, 18 % y 15 % de sus áreas evaluadas en categorías severas o superiores. En sus zonas bajas relativas, los valores P90 alcanzan 66 t/ha/año, 74 t/ha/año y 62 t/ha/año. Además, los núcleos críticos definidos por erosión superior a 30 t/ha/año, distancia menor de 50 m al cauce y pendiente mayor de 35° abarcan 8 ha, 5 ha y 2 ha, respectivamente. Estas áreas requieren intervención inmediata.

- **Estabilización de sectores conectados con drenajes activos:** las cárcavas ocupan 13 km², pero el 97 % supera el umbral de erosión fuerte y el 79 % alcanza una condición severa o superior. Las áreas agrícolas abarcan 28 km², con 73 % en erosión fuerte y 31 % en condición severa o superior. En conjunto, agricultura y cárcavas explican el 96 % de la superficie severa modelada. Se deben implementar barreras vegetativas, zanjas de infiltración, terrazas funcionales, disipadores de escorrentía y estructuras de retención en las salidas de las parcelas.

- **Conservación de pajonales, bofedales y coberturas herbáceas:** estas coberturas constituyen infraestructura natural de regulación hidrosedimentológica. Los pajonales registraron pérdidas bajas frente a las áreas agrícolas y los bofedales funcionaron como zonas de acumulación, con ganancias de 1-2 t/ha/año. La vegetación herbácea y arbustiva ocupa 181 km², pero solo el 5 % supera el umbral de erosión fuerte y menos del 1 % alcanza una condición severa. Su conservación permite desacoplar áreas fuente, laderas y drenajes activos.

- **Gestión de eventos extremos y laderas agrícolas:** las microparcelas de Purush registraron pérdidas de hasta 66 t/ha/año durante lluvias intensas. Los eventos de categoría alta y extrema representaron cerca del 4 % de los registros pluviométricos, pero aportaron el 17 % de la lámina total. Las prácticas de manejo deben ejecutarse antes del periodo enero-marzo y orientarse a reducir la movilización rápida mediante coberturas temporales, residuos vegetales, control de la escorrentía superficial y mantenimiento de estructuras de retención.

7.4 Capacidad técnica y tecnológica

- El laboratorio MoSSARD del Instituto Geofísico del Perú se consolida como una plataforma científica especializada para el estudio integrado de erosión hídrica, transporte de sedimentos y dinámica hidrosedimentológica en ecosistemas altoandinos. En Huaraz, la integración de monitoreo experimental, radionúclidos ambientales, análisis hidrosedimentológico y modelado espacial permitió caracterizar la degradación del suelo bajo un enfoque multiescala y trazable.

- Durante el estudio se procesaron matrices sólidas y líquidas correspondientes a suelos, sedimentos, testigos radioisotópicos y muestras procedentes del monitoreo hidrosedimentológico. La aplicación de la granulometría por difracción láser, la espectrometría gamma y el análisis de sedimentos en suspensión permitió caracterizar las propiedades físicas, sedimentológicas y radioisotópicas mediante protocolos estandarizados de control de calidad.

- La implementación progresiva del marco NTP-ISO/IEC 17025, el uso de materiales de referencia certificados y la trazabilidad metrológica internacional fortalecen la confiabilidad de los resultados. Asimismo, la cadena de custodia y la planificación operativa permitieron sostener el flujo analítico requerido por estudios multicomponente en cuencas de montaña.

- En conjunto, estas capacidades posicionan a MoSSARD como soporte técnico-científico estratégico para identificar áreas críticas, verificar medidas de intervención y orientar la gestión de suelos en Huaraz. Su integración experimental, isotópica, hidrológica y espacial constituye una base robusta para diagnósticos territoriales complejos en los Andes peruanos.

Referencias

- Baraer, M., Mark, B. G., McKenzie, J. M., Condom, T., Bury, J., Huh, K.-I., Portocarrero, C., Gómez, J., & Rathay, S. (2012). Glacier recession and water resources in Peru's Cordillera Blanca. *Journal of Glaciology, 58*(207), 134–150. https://doi.org/10.3189/2012JoG11J186

- Borja, P., Molina, A., Govers, G., & Vanacker, V. (2018). Check dams and afforestation reducing sediment mobilization in active gully systems in the Andean mountains. *Catena, 165*, 42–53. https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.01.013

- 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

- 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

- 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) [Conjunto de datos]. GFZ Data Services. https://doi.org/10.5880/pik.2020.010

- 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

- Instituto Nacional de Estadística e Informática. (2025a). *Consultar datos en el Sistema de Información Distrital del INEI*. Plataforma del Estado Peruano. https://www.gob.pe/27392

- Instituto Nacional de Estadística e Informática. (2025b). *Perú: Población total proyectada al 30 de junio de cada año, según departamento, provincia y distrito, 2018-2026* [Conjunto de datos]. https://www.gob.pe/institucion/inei/informes-publicaciones/6894980-peru-poblacion-total-proyectada-al-30-de-junio-de-cada-ano-segun-departamento-provincia-y-distrito-2018-2026

- Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego. (s. f.). *Sistema Integrado de Estadística Agraria (SIEA)*. https://siea.midagri.gob.pe/

- 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 (1968–2012). *Scientific Reports, 7*, 11947. https://doi.org/10.1038/s41598-017-12220-x

- Morera, S. B., Condom, T., Vauchel, P., Guyot, J.-L., Galvez, C., & Crave, A. (2013). Pertinent spatio-temporal scale of observation to understand suspended sediment yield control factors in the Andean region: The case of the Santa River (Peru). *Hydrology and Earth System Sciences, 17*(11), 4641–4657. https://doi.org/10.5194/hess-17-4641-2013

- Morera, S., Orrillo, J., Contreras, S., Laura, J., Sánchez, M., Espinoza, K., Villanueva, J., Díaz, D., Yana, D., Ruiz, J., & Prudencio, F. (2026). *Diagnóstico de la erosión hídrica de los suelos e identificación de fuentes de producción y transporte de sedimentos en el distrito de Lircay (provincia de Angaraes, región Huancavelica)*. Instituto Geofísico del Perú. https://hdl.handle.net/20.500.12816/5858

- Quinton, J. N., & Fiener, P. (2024). Soil erosion on arable land: An unresolved global environmental threat. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment, 48*(1), 136–161. https://doi.org/10.1177/03091333231216595

- 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 ^{137}Cs 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 ^{137}Cs 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

- Vanacker, V., Molina, A., Rosas, M. A., Bonnesoeur, V., Román-Dañobeytia, F., Ochoa-Tocachi, B. F., & Buytaert, W. (2022). The effect of natural infrastructure on water erosion mitigation in the Andes. *SOIL, 8*, 133–147. https://doi.org/10.5194/soil-8-133-2022

- 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.

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