PERÚ | Ministerio del Ambiente | Instituto Geofísico del Perú

IGP Instituto Geofísico del Perú

TOMO I
DIAGNÓSTICO DE LA EROSIÓN HÍDRICA DE LOS SUELOS, IDENTIFICACIÓN DE FUENTES, PRODUCCIÓN Y TRANSPORTE DE SEDIMENTOS DEL DISTRITO DE LA ENCAÑADA - CAJAMARCA

PROGRAMA PRESUPUESTAL N° 0089
REDUCCIÓN DE LA DEGRADACIÓN DE LOS SUELOS AGRARIOS

Medición del Deterioro del Suelo por Erosión Hídrica



Lima, 2025

PROGRAMA PRESUPUESTAL N° 0089 "REDUCCIÓN DE LA DEGRADACIÓN DE LOS SUELOS AGRARIOS"

Agradecimientos a las personas y actores institucionales que colaboraron en la elaboración o revisión del presente estudio tales como: Municipalidad Distrital de La Encañada del departamento de Cajamarca, Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) 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) y el Laboratorio de Ciencias del Clima y del Medio Ambiente - Francia (LSCE).

EQUIPO DE *INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA*

Sergio Morera Julca
Coordinador Técnico del PP0089 del IGP

Jhon Orrillo Vigo
Monitor General

Shirley Contreras Acho
Coordinadora del Laboratorio MoSSARD

Jorge Laura Santos
Monitor de Radioisótopos

Michael Sánchez Muñoz
Monitor de Procesos Físicos y Climáticos

Kithner Espinoza Varillas
Monitor de Modelado de Erosión de Suelos

Jhon Villanueva Portella
Asistente de Investigación en Modelado

Diana Díaz Llatas
Asistente de Investigación en Uso de Trazadores

Deysi Yana Quispe
Asistente de Investigación en Análisis Elemental

Jennifer Ruiz Alarcón
Especialista en Geología

Fernando Prudencio Paredes
Especialista en Teledetección

César Huincho Taipe
Coordinador Administrativo

IGP, 2025. Diagnóstico de la erosión hídrica de los suelos, identificación de fuentes, producción y transporte de sedimentos del distrito de La Encañada - Cajamarca.

Este documento incluye figuras, tablas, ecuaciones y material cartográfico elaborado por el equipo técnico del PP0089-IGP, excepto que se indique explícitamente lo contrario.

Fecha de publicación: 6 de octubre de 2025

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN
Página 14
1.1 Antecedentes
Página 14
1.2 Objetivo del Tomo I
Página 16
2. DIAGNÓSTICO DEL DISTRITO DE LA ENCAÑADA
Página 17
2.1. Cambio de cobertura y uso del suelo
Página 17
2.1.1. Generalidades
Página 17
2.1.2. Discusión
Página 17
2.1.3. Conclusiones
Página 19
2.2. Geología
Página 19
2.2.1. Generalidades
Página 20
2.2.2. Discusión y Conclusiones
Página 20
2.3. Hidrología
Página 22
2.3.1 Generalidades
Página 22
2.3.2. Discusión y Conclusiones
Página 23
3. EROSIÓN HÍDRICA DEL SUELO
Página 24
3.1. Trampas de sedimentos
Página 24
3.1.1. Resultados
Página 24
3.1.1.1. Datos de precipitación obtenido del modelo RAIN4PE
Página 24
3.1.1.2. Precipitación anual estimada por RAIN4PE (1981–2015)
Página 25

CONTENIDO

3.1.1.3. Precipitación mensual y eventos erosivos
Página 26
3.1.1.4. Distribución horaria de la precipitación y su frecuencia de ocurrencia
Página 28
3.1.1.5. Producción de sedimentos por tipo de cobertura y uso del suelo
Página 29
3.1.1.6. Análisis multivariado y modelado de pérdida de suelo
Página 30
3.1.2. Discusión
Página 32
3.1.3. Conclusiones
Página 33
3.2. Radioisótopos
Página 34
3.2.1. Resultados
Página 34
3.2.2. Discusión
Página 39
3.2.3. Conclusiones
Página 39
4. IDENTIFICACIÓN DE LAS FUENTES DE SEDIMENTOS
Página 39
4.1. Geología Forense (color del suelo)
Página 40
4.1.1. Resultados
Página 41
4.1.1.1 Cabecera de la cuenca del río Llaucano
Página 41
4.1.1.2 Cabecera de la cuenca del río Chonta
Página 42
4.1.1.3 Cabecera de la cuenca del río Namora
Página 43
4.1.2. Discusión
Página 44
4.1.3. Conclusiones
Página 45
5. PRODUCCIÓN Y TRANSPORTE DE SEDIMENTOS
Página 47

CONTENIDO

5.1. Transporte de sedimentos
Página 47
5.1.1. Resultados
Página 47
5.1.2. Discusión
Página 50
5.1.3. Conclusiones
Página 52
***6.* LABORATORIO**
Página 53
6.1. Ambiente físico y técnicas de aplicación
Página 53
6.2. Gestión y control de muestras
Página 54
6.3. Preparación y análisis de muestras
Página 54





SIGLAS, ACRÓNIMOS Y CONVENCIONES

USO DEL SUELO

Agr	Area agricola heterogenea
CuA	Aguas continentales
Hrb	Area con vegetacion herbacea y/o arbustivo
Min	Area de extraccion minera
Pas	Pasturas-ganadería
Pfo	Bosques forestales
Svg	Suelo desnudo o con cobertura estacional
Urb	Areas urbanizadas
BPl	Bosques plantados
ZAE	Zona agroecológica

VARIABLES BIOFÍSICAS, HIDROLÓGICAS Y EDÁFICAS

C	Factor de cobertura vegetal
Ch	Altura de cultivo
Cs-137	Radioisótopo Cesio-137
E	Energía cinética de la precipitación
Ero	Fracción de costras de erosión
Fa	Fracción de agregados libres
Fg	Fracción de gravas libres del suelo
Grc	Fracción de gravas embebidas en el suelo
Hs	Humedad antecedente del suelo

K	Factor de erodabilidad del suelo
KTC	Coeficiente de capacidad de transporte de sedimentos
LS	Factor de longitud y pendiente
P	Factor de prácticas de conservación
Pb-210ex	Radioisótopo Plomo-210 en exceso
Pi	Intensidad de precipitación
PP	Precipitación
R	Factor de erosividad de la lluvia
Rc	Coeficiente de escorrentía
Rn	Rugosidad del suelo
Ro	Escorrentía superficial
SL	Pérdida de suelo por evento de precipitación
Sp	Pendiente
SSC	Concentración de sedimento en suspensión
SSL	Pérdida anual del suelo
St	Costras estructurales
Vc	Cobertura vegetal
Wc	Cobertura de malezas

INSTITUCIONES, NORMAS, PROGRAMAS Y MÉTODOS

EN	Asociación Española de Normalización y Certificación
ES	Sitio de erosión
ISO	Organización Internacional de Normalización
LSCE	Laboratorio de Ciencias del Clima y del Medio Ambiente (Francia)

MoSSARD	Monitoreo de Suelos y Sedimentos Ante Riesgos y Desastres
NTP	Normas Técnicas Peruanas
PLS-R	Regresión por mínimos cuadrados parciales
POE	Procedimientos operativos estándar
PP0089	Programa Presupuestal Reducción De La Degradación De Los Suelos Agrarios
RAIN4PE	Rain for Peru and Ecuador (Lluvia para Perú y Ecuador)
RD	Sitio de redistribución
RISE	Repositorio de Indicadores de Seguimiento
RS	Sitio de referencia
TEST	Modelo de Erosión en Terrazas y Transporte de Sedimentos
TXRF	Fluorescencia de rayos X por reflexión total

DIAGNÓSTICO DE LA EROSIÓN HÍDRICA DE LOS SUELOS AGRÍCOLAS E IDENTIFICACIÓN DE FUENTES, PRODUCCIÓN Y TRANSPORTE DE SEDIMENTOS DEL DISTRITO DE LA ENCAÑADA, CAJAMARCA

Resumen Ejecutivo

El distrito de La Encañada abarca el rango altitudinal de 2695 a 4231 msnm., con 635 km². Los suelos aluviales son los más representativos, cubren 94 km², y se caracterizan por ser una mezcla heterogénea de bolones, gravas y arenas en llanuras aluviales y terrazas. También destacan los suelos eluviales (19 km²), formados in situ por erosión de rocas y mínimamente transportados en zonas como los centros poblados de San Luis y El Milagro, así como los suelos fluvioglaciares (16 km²) con depósitos de cantos, gravas y arenas en laderas de montaña y valles glaciales. Mediante el método de georadar se identificaron dos horizontes: los primeros 25 cm con abundancia de raíces vegetales y el siguiente estrato, hasta los 70 cm, suelos con predominancia de materia orgánica.

En los últimos 37 años, 1986 hasta 2022, la expansión agrícola (Agr) se incrementó de 70 km² a 126 km², mientras que la vegetación herbácea (Hrb) se redujo de 490 km² a 396 km². Sobre los 4000 msnm., se identificó el 68 km² de pasturas-ganadería (Pas), las cuales han duplicado su cobertura (112 km²) para dicho periodo. Mismo panorama se observa con la actividad minera, que tuvo un incremento de 0 km² a 4 km².

Para entender los procesos y las tasas de erosión de los suelos a escala de ladera del distrito de La Encañada, se emplearon los radioisótopos de Cesio-137 (Cs-137) y Plomo 210 en exceso (Pb-210ex). El uso combinado de ambos trazadores permitió establecer las tasas medias anuales de erosión de las últimas 6 décadas (1963-2023) y 100 años (1923-2023). Ambas escalas temporales presentan valores similares en laderas con pajonales y matorrales; las mayores tasas de erosión se encontraron en la parte inicial de cárcavas desnudas (100 t/ha/año), seguidas de laderas con agricultura (16 t/ha/año), plantación de pinos (6 t/ha/año), matorrales (3 t/ha/año) y pajonales (2 t/ha/año).

Se instalaron dos estaciones meteorológicas y treinta parcelas experimentales en el distrito de La Encañada para evaluar la producción de sedimentos. Se identificó que los suelos agropecuarios sin cobertura y los caminos presentan las tasas más elevadas de pérdida de suelo (72 y 69 t/ha/año, respectivamente), mientras que coberturas como quinual, pino e ichu

exhibieron valores significativamente menores (1.7 a 5.2 t/ha/año). Además, la mayoría de los eventos de precipitación erosiva fueron de intensidad media y duración moderada. El modelado estadístico identificó a las costras de erosión y la cobertura vegetal como los principales determinantes de la producción de sedimentos, validando su aplicabilidad para futuras estrategias de gestión sostenible del suelo.

Se implementó un modelo distribuido WaTEM/SEDEM para estimar las tasas y rangos de erosión hídrica en el distrito de La Encañada, empleando factores de cobertura, longitud-pendiente, erosividad y erodabilidad, junto con datos de calibración obtenidos mediante Cs-137. Las tasas medias anuales oscilaron entre 1–179 t/ha/año en Chonta, 1–201 en Llaucano y 2–164 en Namora. Las áreas clasificadas como moderada a fuerte (10–35 t/ha/año) comprenden entre 56% y 59% de cada subcuenca, mientras que las clases severas a extremas (>35 t/ha/año) alcanzan hasta 7%. Estos resultados evidencian la alta heterogeneidad espacial de la erosión y la urgencia de implementar estrategias de conservación de suelos adaptadas a las condiciones locales del distrito.

Finalmente, mediante un muestreo espacial distribuido en todo el distrito, se identificó en febrero de 2023 la procedencia de los sedimentos. Los resultados obtenidos muestran aportes de sedimentos por parte de los suelos expuestos y erosión tipo cárcavas de hasta el 67%, seguido de suelos con actividad agrícola con aportes de hasta el 32%, mientras que, en menor porcentaje, se encuentran los suelos de bosques y coberturas naturales.

1. INTRODUCCIÓN

El suelo proporciona directa o indirectamente el 95% de todos los productos que consumimos a diario (FAO, 2015). Numerosas investigaciones a nivel mundial han indicado que la degradación de los suelos agrícolas es un fenómeno silencioso que se manifiesta cada vez más debido al cambio climático. Más aún, en países en desarrollo, los cambios de cobertura y uso del suelo, así como el sobrepastoreo en territorios sin una Zonificación Agro Ecológica (ZAE), han generado conflictos de uso del suelo con una degradación ambiental severa y un limitado desarrollo económico. Este último, sobre todo, en los pequeños agricultores andinos, catalogados como la población más vulnerable.

La gestión y planificación en nuestros territorios más vulnerables se inicia con un diagnóstico del territorio en el cambio del uso de suelo, prácticas de conservación y degradación de los suelos a escala de cuenca, ladera y parcela. Es así que todos ellos, en su conjunto, devienen instrumentos claves para un mayor aprovechamiento de nuestros suelos en función de la sostenibilidad económica.

1.1 Antecedentes

A nivel del Programa Presupuestal Reducción De La Degradación De Los Suelos Agrarios (PP0089), se tiene identificado como problema el deficiente aprovechamiento del recurso suelo en el ámbito agrario a nivel nacional. A partir de un análisis multicriterio de ocho bases de datos oficiales y reconocidas por el estado peruano, entre los principales se destacan mapas de pobreza (INIA, 2017), población según actividad económica agrícola, pecuaria y forestal (MIDAGRI, 2012), deforestación (MINAM, 2017), entre otros (PP0089, 2019-Anexo 2); se determinó la población objetivo, la cual asciende a 3’701.600 hectáreas de suelo degradado. Mediante un análisis estadístico espacial, se identificó que dichos suelos se encuentran distribuidos, en mayor proporción, en 52 distritos de 8 departamentos del Perú. Es oportuno indicar que la población objetivo representa el 34% de la población potencial.

El 4 de julio de 2022, el indicador de desempeño del programa PP0089, específicamente para el Instituto Geofísico del Perú (IGP), fue aprobado y registrado en el Repositorio de Indicadores de Seguimiento (RISE) del Ministerio de Economía y Finanzas (MEF). Este indicador mide el porcentaje de área cartografiada con intensidades de erosión del suelo y viene siendo utilizado desde el 2023.

De este modo, el IGP generará conocimiento científico, contribuyendo la gestión y planificación estratégica que desarrolle el estado peruano.

1.2 Objetivo del Tomo I

Los estudios científicos que se desarrollan en el IGP abarcan la erosión hídrica, sedimentación, transporte de sedimentos e identificación de fuentes de sedimentos. En el marco del PP0089 los estudios y productos se difunden a nivel de distrito y se dividen en dos tomos.

El objetivo del presente documento (**Tomo I**) es brindar el diagnóstico y los principales resultados obtenidos mediante cinco herramientas o técnicas analíticas, que incluyen: granulometría por difracción láser, colorimetría, fluorescencia de rayos-X por reflexión total, detector de rayos gamma, y modelado espacio-temporal, empleados para estimar la erosión hídrica, el transporte de sedimentos y la identificación de sus fuentes a nivel del distrito de La Encañada.

El Tomo I constituye una herramienta útil que permitirá a técnicos, especialistas y las autoridades institucionales de los tres niveles de gobierno dedicados a la planificación territorial en el Perú, contar con un diagnóstico completo y detallado para la planificación y gestión de nuestro territorio.

Mientras que el **Tomo II** describe las tareas y actividades desarrolladas en campo y gabinete para el desarrollo de cada una de las técnicas. Es decir, proporciona un conjunto de técnicas y métodos para estimar la erosión hídrica, el transporte de sedimentos y la identificación de sus fuentes.

2. DIAGNÓSTICO DEL DISTRITO DE LA ENCAÑADA

2.1. Cambio de cobertura y uso del suelo

2.1.1. Generalidades

El suelo proporciona servicios ecosistémicos esenciales como la producción de alimentos, la regulación hídrica, el secuestro de carbono y la provisión de hábitat.

Cuantificar la dinámica del cambio en el uso del suelo es fundamental para abordar desafíos sociales globales como la seguridad alimentaria, el cambio climático y la pérdida de biodiversidad. En las últimas seis décadas, a nivel mundial, se ha generado un cambio de 32%.

A escala mundial, el 60% de los cambios en el uso y la cobertura del suelo tienen como origen la actividad humana, mientras que el 40% depende de factores externos como el cambio climático. Esto altera significativamente el equilibrio energético y los ciclos biogeoquímicos de la Tierra, convirtiéndose en una causa y consecuencia del cambio climático.

2.1.2. Discusión

El anillo agrícola para el distrito de La Encañada se extiende desde los 2695 hasta los 4231 msnm. En los últimos 37 años, desde 1986 hasta 2022, la expansión agrícola (Agr) se incrementó de 70 km² a 126 km², mientras que la vegetación herbácea (Hrb) se redujo de 490 km² a 396 km². Sobre los 4000 msnm, se identificó el 68 km² de pasturas-ganadería (Pas), las cuales han duplicado su cobertura (112 km²) para dicho periodo, así como una actividad minera que se incrementó de 0 km² a 4 km² (Figura 2.1.1).

El distrito de La Encañada está conformado por el área de influencia de tres subcuencas: (i) el río Llaucano (234 km²), (ii) el río Chonta (204 km²) y (iii) el río Namora (185 km²).

(i) La cuenca del río Llaucano abarca el 37% del distrito y presenta una predominancia (64%) de cobertura herbácea (Hrb. 149 km²), seguido de 18.8% de pasturas (Pas. 44 km²) y 12% de uso agrícola (Agr. 27 km²).

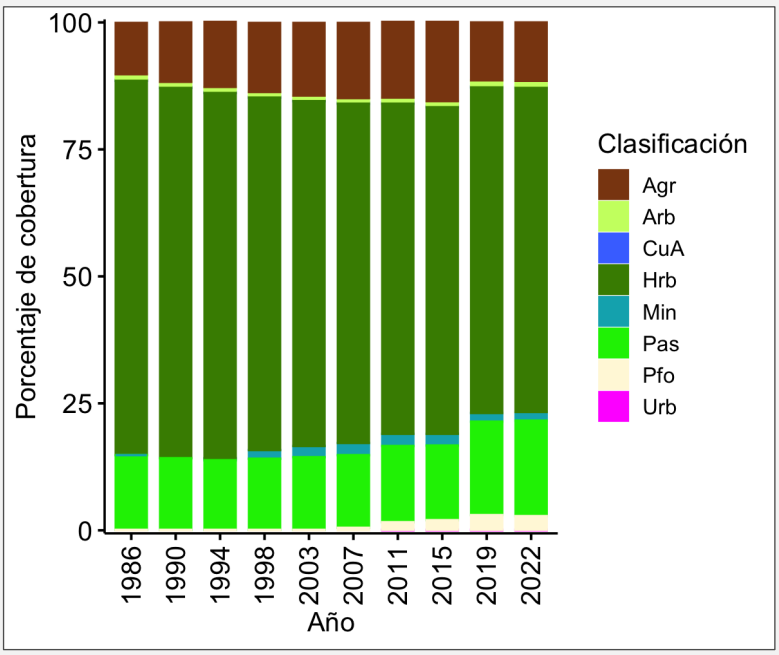

Figura 2.1.1. Dinámica de la cobertura vegetal y uso del suelo en la cuenca del río Llaucano durante los últimos 37 años.

(ii) La cuenca del río Chonta (Figura 2.1.2), abarca el 32% del distrito y presenta una predominancia (56%) de cobertura herbácea (Hrb. 114 km²), seguido de 23% de uso agrícola (Agr. 46 km²) y 17% de pasturas (Pas. 35 km²).

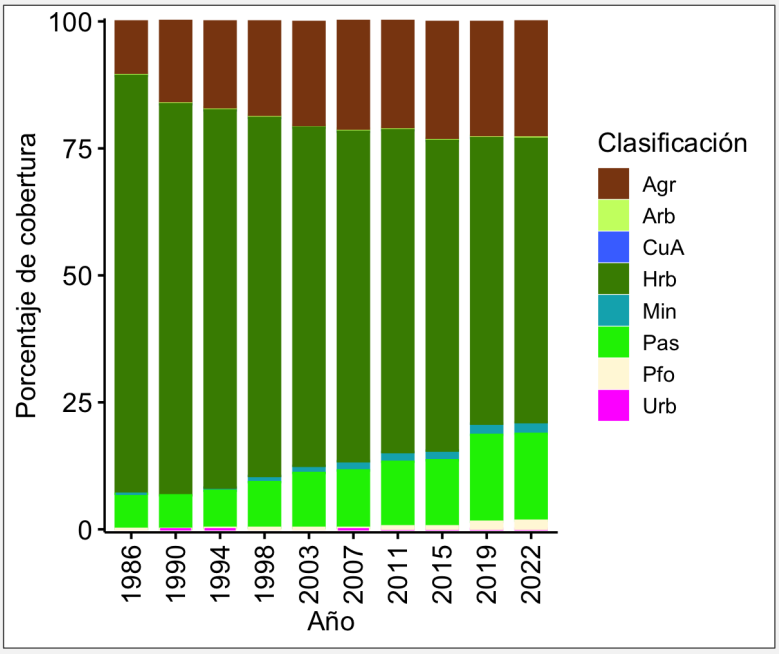

Figura 2.1.2. Dinámica de la cobertura vegetal y uso del suelo en la cuenca del río Chonta durante los últimos 37 años.

(iii) La cuenca del río Namora (Figura 2.1.3) abarca el 29% del distrito y presenta una predominancia (50%) de cobertura herbácea (Hrb. 93 km²), seguido de 29% de uso agrícola (Agr. 54 km²) y 17% de pasturas (Pas. 32 km²).

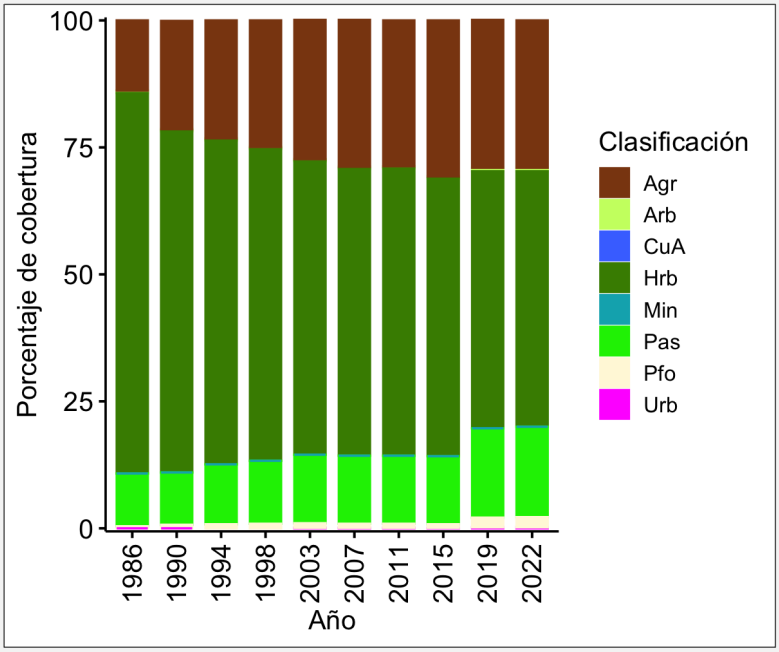

Figura 2.1.3. Dinámica de la cobertura vegetal y uso del suelo en la cuenca del río Namora durante los últimos 37 años.

A escala de cuencas, las actividades en las cuencas de los ríos Chonta y Namora presentan una dinámica similar. No obstante, la cuenca del río Llaucano presenta una riqueza de cobertura herbácea o pastos naturales que cubre el 64% de su territorio. A su vez, la principal actividad económica es la minería (Min), actividad que se incrementó desde el 0% en los años 80 hasta los 4 km² en 2022.

2.1.3. Conclusiones

Nuestro análisis de la cobertura y uso del suelo para el distrito de La Encañada, para el periodo de 1986 hasta 2022 (37 años) concluye que el herbazal (366 km²) predomina (58%) en la actualidad; no obstante, este se ha reducido en 145 km². La segunda cobertura más extendida corresponde a la actividad agrícola con 126 km², la cual se incrementó en 56 km² durante el periodo de estudio. La expansión urbana se incrementó de 0.02 km² a 0.8 km². Sobre los 4000 msnm se identificó el 68 km² del pastos-pajonales (Pas), los cuales han duplicado su cobertura (112 km²) para dicho periodo, así como una actividad minera pasó de estar ausente a ocupar 4 km².

2.2. Geología

2.2.1. Generalidades

El distrito de La Encañada, con 635 km², exhibe una geología diversa representada por 44 unidades litoestratigráficas que abarcan desde el Cretáceo inferior hasta el Cuaternario reciente (Figura 2.2.1). Entre estas formaciones destacan la formación Yumagual, que comprende el 11.2% del área con 71 km², y se caracteriza por intercalaciones de calizas nodulares y lutitas negras. Asimismo, el grupo Pulluicana (10.6%, 67.3 km²) presenta calizas modulares y lutitas. Estas dos unidades exhiben características geotécnicas similares, entre las que destacan la resistencia de las calizas y la moderada capacidad de las lutitas en términos de susceptibilidad a la remoción de masas. Adicionalmente, se identificaron 163.1 km² de depósitos cuaternarios que representan el 25.6% del territorio. Estos depósitos, denominados suelos según su origen, comprenden 7 tipos (depósitos aluviales, eluviales, coluviales, fluviales, fluvioglaciares, morrenicos, coluvio aluviales) (Figura 2.2.1), siendo los depósitos aluviales los más extensos con 94.3 km².

2.2.2. Discusiones y Conclusiones

La evaluación de la pendiente del terreno revela que el 56% del distrito posee una susceptibilidad media a la remoción de masas o erosión. Este análisis resalta la importancia de comprender la topografía en relación con la vulnerabilidad del terreno. Los depósitos aluviales, que cubren el 15% del área total, son especialmente susceptibles a la erosión debido a su naturaleza no consolidada. Estos depósitos, presentes en llanuras aluviales y terrazas, afectan áreas pobladas como Yerba Buena de Polloc, Santa Margarita y Rosario de Polloc.

La composición mineralógica de las unidades litoestratigráficas contribuye significativamente a la diversidad de elementos químicos y minerales en los suelos. La formación Farrat, compuesta por cuarcitas, contribuye con sílice (SiO_2), mientras que las calizas del grupo Pulluicana aportan calcio ($CaCO_3$). La presencia de lutitas y nódulos calcáreos en la formación Yumagual agrega minerales como arcillas y carbonatos.

En la clasificación de los suelos cuaternarios, según su origen, destacan siete tipos que abarcan el 25% del área total del distrito. Los suelos aluviales, con un 15% de extensión, presentan una mezcla heterogénea de bolones, gravas, arenas, limos y arcillas, con regular a buena selección y espesores de 3 m a 5 m. Más de la mitad del distrito tiene una susceptibilidad media a la remoción de masas o erosión. La diversidad de suelos, desde eluviales hasta fluviales, morrénicos y coluviales, refleja la complejidad edáfica en la región.

Los suelos fluviales, con una extensión del 2.2%, presentan alta permeabilidad y son fácilmente removibles, lo que contribuye a la erosión fluvial e inundaciones periódicas. La compleja geología, con las formaciones Yumagual y Pulluicana como protagonistas, lleva a destacar la necesidad de abordar con cuidado los desafíos asociados a la remoción de masas y la erosión en el distrito de La Encañada.

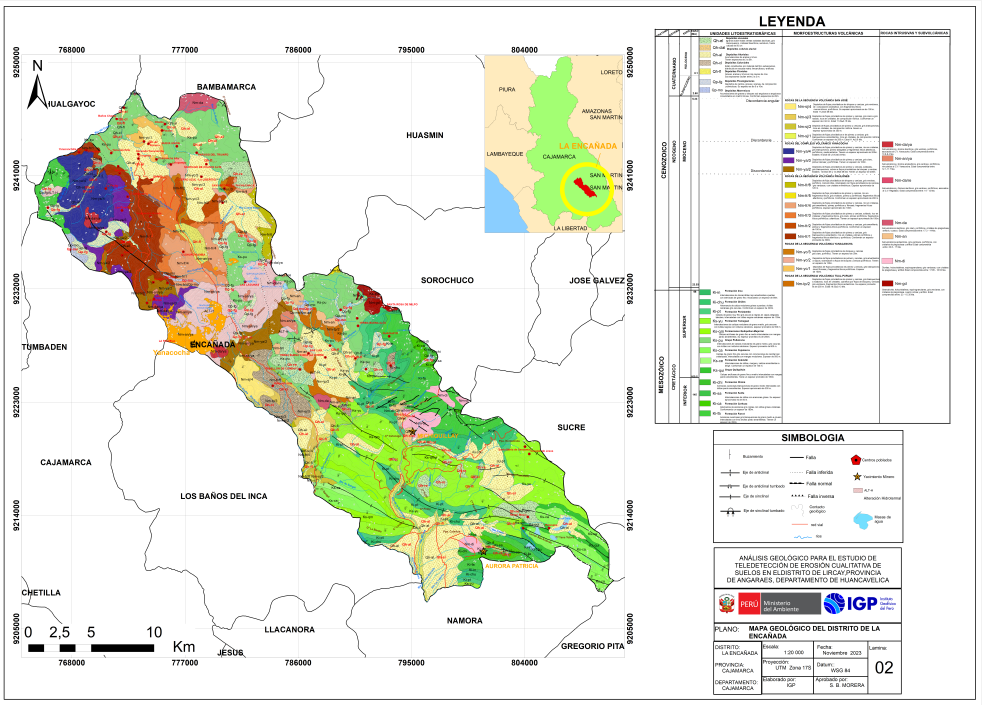

Figura 2.2.1. *Mapa geológico del distrito de La Encañada, a escala 1:20 000.*

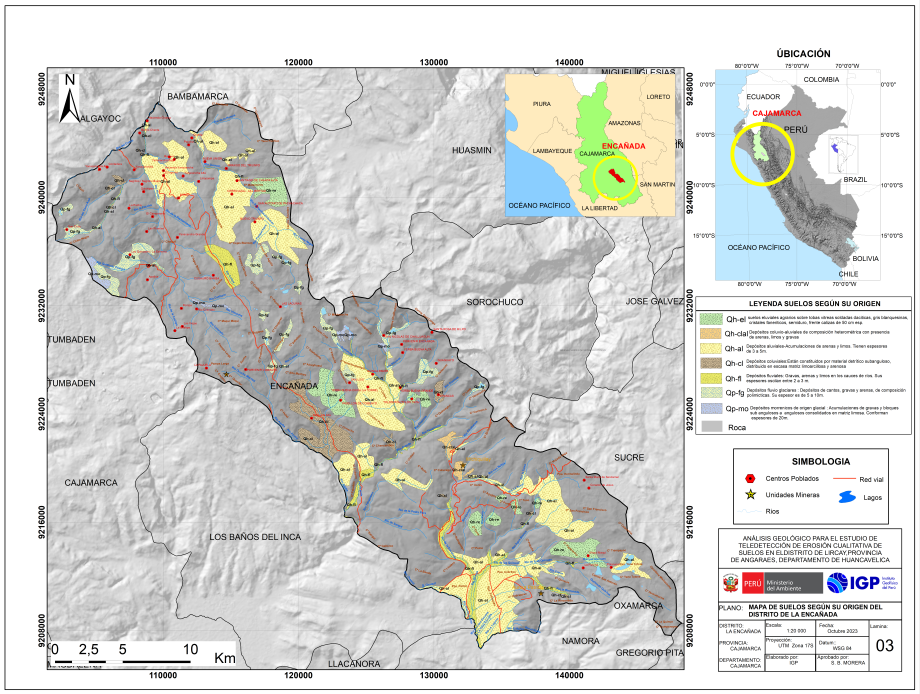

Figura 2.2.2. Mapa de suelos según su origen del distrito de La Encañada, a escala 1:20 000.

2.3. Hidrología

2.3.1. Generalidades

El distrito de La Encañada está conformado por el área de influencia de tres subcuencas principales: (i) el río Llaucano (234 km²), (ii) el río Chonta (204 km²) y (iii) el río Namora (185 km²). El distrito de La Encañada se encuentra ubicado en la región hidrográfica del Amazonas. Su extensión territorial está ubicada entre las cuencas de Crisnejas, con una extensión superficial de 2455 km², un caudal medio interanual de 51 m³/s; e Intercuenca Alto Marañon IV, con una extensión superficial de 2597 km², una precipitación media interanual de 450 mm y un caudal de 94 m³/s.

La información climatológica a partir de la red de monitoreo meteorológico se detalla en la sección 3.1.1.

El distrito de La Encañada presenta precipitaciones anuales que oscilan entre 500 y 1000 mm, concentradas principalmente durante la temporada de lluvias (diciembre a febrero) y que pueden prolongarse hasta abril. En escenarios asociados a eventos de La Niña, la precipitación media anual puede incrementarse hasta alcanzar 1200 mm, registrándose un mayor número de eventos de alta intensidad. Por otro lado, las condiciones térmicas presentan una temperatura media anual de aproximadamente 10.5 °C.

2.3.2. Discusiones y Conclusiones

La evaluación de la hidrología del distrito de La Encañada fue realizada a partir de la implementación de una red de monitoreo hidrométrico para el periodo febrero a mayo de 2023, lo que ha permitido caracterizar el régimen hidrológico de dos de las tres cuencas principales que la conforman: cuenca de Chonta y Llaucano. Durante este periodo se ha observado que la cuenca del río Llaucano presenta un caudal medio de 13.4 m^3/s, mientras que la cuenca del río Chonta presentó un caudal medio de 3.7 m^3/s.

3. EROSIÓN HÍDRICA DEL SUELO

3.1. Trampas de sedimentos

Las microparcelas experimentales, también conocidas como trampas de sedimentos a escala de 1 m² (Figura 3.1.1), son una herramienta eficaz para evaluar la erosión hídrica en sitios con distintos usos del suelo. Estas pueden instalarse en terrenos con diferentes pendientes y cultivos, lo que permite obtener datos precisos sobre la pérdida de suelo bajo diversas condiciones agroecológicas. Esta metodología es fundamental para implementar medidas de conservación y prevenir la degradación de suelos en zonas vulnerables.



Figura 3.1.1. *Trampa de sedimentos instalada en cultivo de maíz en el distrito de La Encañada, correspondiente a una microparcela de 1 m² utilizada para la medición de pérdida de suelo por erosión.*

3.1.1. Resultados

3.1.1.1. Datos de precipitación obtenidos del modelo RAIN4PE

El análisis de los patrones de precipitación en el distrito de La Encañada se complementó con datos obtenidos mediante dos estaciones meteorológicas

automáticas estratégicamente instaladas por el Instituto Geofísico del Perú (IGP), operativas durante la campaña de campo entre marzo y mayo de 2023 (Figura 3.1.2). La estación Cushurobamba, localizada en la subcuenca del río Llaucano, y la estación Sangal, en la subcuenca del río Chonta, sirvieron como puntos de referencia para el registro de variables climáticas locales y el seguimiento de 30 parcelas experimentales (15 por estación) destinadas al estudio de la producción de sedimentos.



Figura 3.1.2. Estación meteorológica automática instalada en la subcuenca del río Llaucano (Cushurobamba), utilizada para el monitoreo climático entre marzo y mayo de 2023.

Con el fin de contextualizar estos registros locales con información de largo plazo, se utilizó el modelo RAIN4PE, un conjunto de datos diarios de precipitación a escala regional (~0.1° de resolución espacial), calibrado para Perú y Ecuador. Este producto integra observaciones satelitales, datos de estaciones meteorológicas, variables topográficas y análisis climáticos.

3.1.1.2. Precipitación anual estimada por RAIN4PE (1981–2015)

Los registros anuales de precipitación obtenidos del modelo RAIN4PE para el periodo 1981–2015 revelan una marcada variabilidad interanual en ambas zonas de estudio:

• En Cushurobamba, los valores oscilaron entre 571 mm (1985) y 1331 mm (1993), con una media anual cercana a los 1000 mm. Años particularmente

lluviosos fueron 1993, 1994, 1999 y 2001.

• En Sangal, los acumulados anuales se situaron entre 525 mm (1985) y 1250 mm (1993), destacando los mismos años con máximos pluviales.

Ambas estaciones muestran coincidencias temporales en los años húmedos y secos, lo que sugiere una influencia regional común en la dinámica de la precipitación interanual.

3.1.1.3. Precipitación mensual y eventos erosivos

La Figura 3.1.3 presenta la comparación mensual entre los datos de precipitación del modelo RAIN4PE (promedio y desviación estándar del periodo 1981–2015) y las precipitaciones registradas por las estaciones automáticas del IGP durante los meses de marzo a mayo de 2023. Además, se incluye el análisis del contenido de humedad del suelo y la frecuencia de evento de precipitación erosiva clasificado según su intensidad y duración.
En Cushurobamba (Figura 3.1.3 a), marzo fue el mes más lluvioso del periodo monitoreado, con 144.6 mm, seguido de abril (119.6 mm) y mayo (48.2 mm). La humedad del suelo mostró una leve tendencia ascendente de marzo a abril, alcanzando un máximo de 31.4% en abril, para luego disminuir en mayo (31.0%). Estos valores se mantuvieron dentro del rango medio observado por RAIN4PE para este periodo del año. En cuanto a los eventos erosivos registrados (Figura 3.1.3 b), el 69.6% correspondieron al tipo B (precipitaciones de intensidad y duración media), mientras que los eventos tipo A representaron el 26.1%, y los de tipo C solo el 4.3% (Ver Tomo II). Esta distribución sugiere una predominancia de eventos de duración superior a una hora, pero con capacidad erosiva moderada.
En Sangal (Figura 3.1.3 d), la precipitación fue menor en comparación con Cushurobamba, con 111.6 mm en marzo, 62.0 mm en abril y 41.0 mm en mayo. La humedad del suelo presentó una tendencia decreciente: alcanzó su valor máximo en marzo (28.1%), descendiendo progresivamente hasta 26.5% en mayo. En la clasificación de eventos erosivos (Figura 3.1.3 e), se observó que el 72.2% fueron de tipo B, el 16.7% tipo A y el 11.1% tipo C, lo que refleja una distribución similar a la observada en Cushurobamba, aunque con menor ocurrencia de eventos intensos.

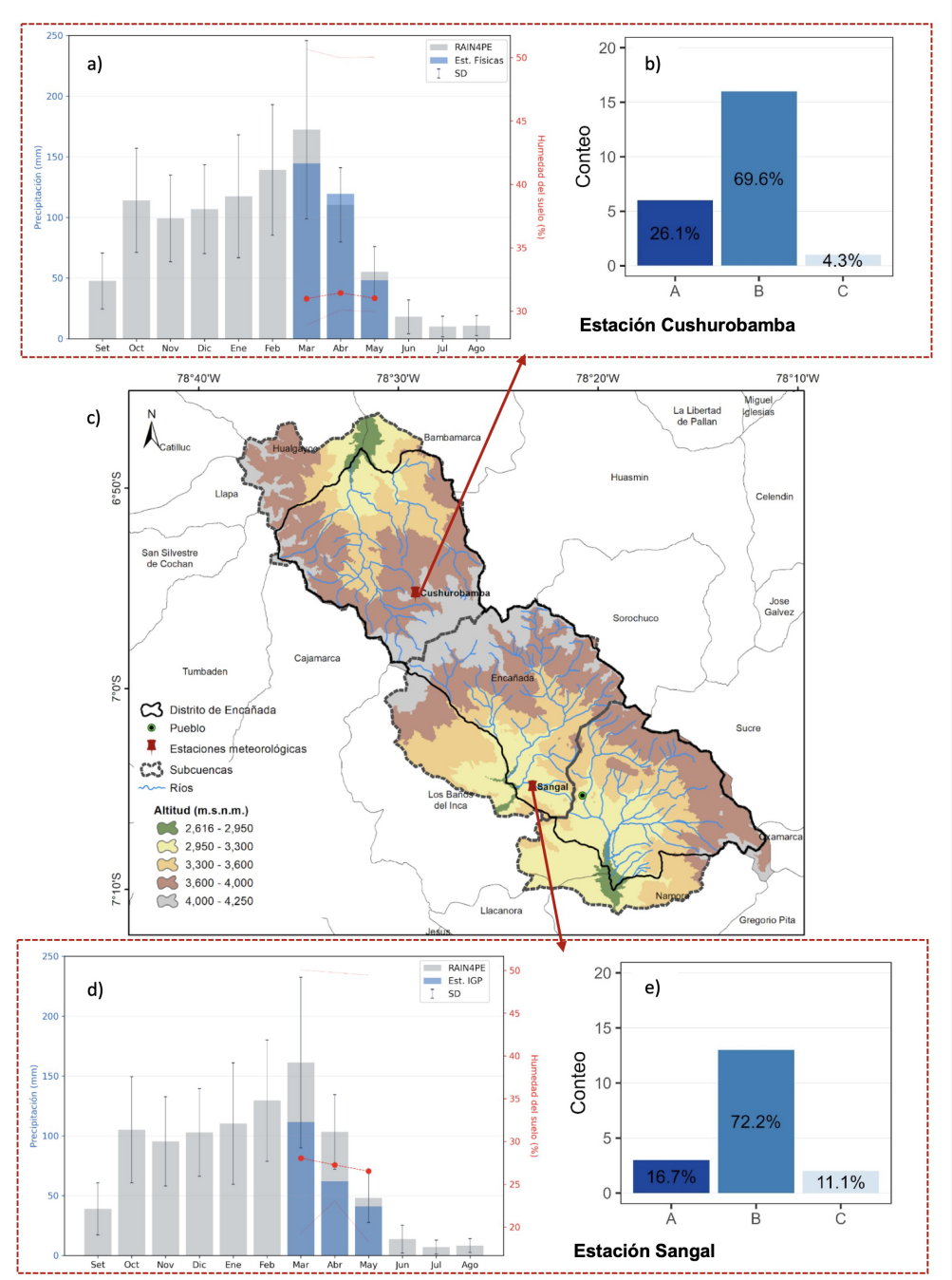

Figura 3.1.3. *Comparación mensual entre datos de precipitación del modelo RAIN4PE y estaciones automáticas IGP, contenido de humedad del suelo y clasificación de eventos de precipitación erosiva. (a) Precipitación mensual y humedad del suelo – Cushurobamba, (b) Distribución de eventos erosivos según tipo – Cushurobamba, (c) Ubicación geográfica de las estaciones meteorológicas en el distrito de La Encañada, (d) Precipitación mensual y humedad del suelo – Sangal, (e) Distribución de eventos erosivos según tipo – Sangal.*

3.1.1.4. Distribución horaria de la precipitación y su frecuencia de ocurrencia

La Figura 3.1.4 muestra el comportamiento horario de la precipitación acumulada (barras azules) y la frecuencia relativa de ocurrencia (línea púrpura) de eventos con lluvia en las estaciones de Cushurobamba y Sangal, durante el periodo de monitoreo de marzo a mayo de 2023.

En Cushurobamba (Figura 3.1.4 a), se observa un incremento sostenido de la precipitación a partir de las 10:00, alcanzando su máximo entre las 13:00 y 14:00 horas, con valores de 46.2 mm y 43.6 mm, respectivamente. En términos de ocurrencia, el mayor porcentaje de eventos con precipitación también se concentra entre las 13:00 y 17:00 horas, con picos del 39.7% a las 14:00 y 32.8% a las 16:00 y 17:00. Esta coincidencia sugiere una marcada influencia de los procesos convectivos diurnos, comunes en zonas altoandinas.

En Sangal (Figura 3.1.4 b), el patrón presenta dos picos relevantes de precipitación acumulada: uno durante la madrugada (02:00 con 16.8 mm) y otro más extendido en la tarde (14:00 a 17:00), alcanzando un máximo de 18.0 mm a las 15:00. La distribución horaria de la ocurrencia muestra una mayor dispersión, aunque también se concentra en horas de la tarde, con un 32.1% de ocurrencia a las 14:00 y más del 25% entre las 13:00 y 17:00. Sin embargo, a diferencia de Cushurobamba, Sangal registra eventos relevantes incluso en la madrugada, lo que sugiere una mayor variabilidad en los mecanismos locales de generación de lluvia.

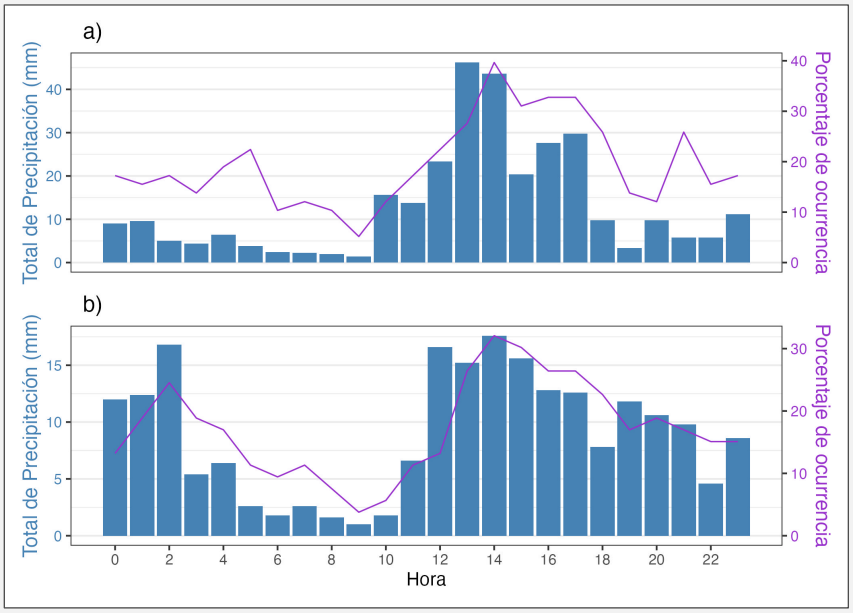

Figura 3.1.4. *Distribución horaria de la precipitación acumulada y frecuencia de ocurrencia de eventos con lluvia durante el periodo marzo–mayo de 2023. (a) Estación Cushurobamba, (b) Estación Sangal.*

3.1.1.5. Producción de sedimentos por tipo de cobertura y uso del suelo

La Figura 3.1.5 presenta los valores promedio de producción anual de sedimentos (SSL, t/ha/año) obtenidos en las microparcelas de 1 m² instaladas bajo distintas coberturas vegetales y usos del suelo. Los resultados evidencian diferencias marcadas en la magnitud de la pérdida de suelo entre tratamientos.

Los mayores niveles de producción de sedimentos se registraron en parcelas con escasa cobertura vegetal, tanto en áreas agrícolas como en caminos, con valores promedio de 71.8 t/ha/año y 69.4 t/ha/año, respectivamente. Estos tratamientos también presentaron una desviación estándar considerable (12.8 y 12.6), lo que indica una alta variabilidad en las pérdidas registradas.

En contraste, los menores niveles de erosión se observaron en coberturas forestales y vegetación densa. Destacan las parcelas con quinual (1.7 t/ha/año, ±0.2) y pino (4.3 t/ha/año, ±1.8), seguidos por coberturas naturales como ichu (5.2 t/ha/año, ±1.6) y pastos naturales (6.8 t/ha/año, ±2.2).

En el grupo de cultivos anuales, los valores de pérdida de suelo fueron intermedios. Por ejemplo, parcelas con maíz y haba presentaron tasas de 10.5 t/ha/año (±2.1) y 10.2 t/ha/año (±2.5), respectivamente. Otros cultivos como nabo, trigo y heno mostraron variaciones menores, entre 11.0 y 22.7 t/ha/año.

Estos resultados resaltan el efecto protector de la cobertura vegetal sobre los procesos de erosión, así como el riesgo asociado a superficies desnudas o con cobertura mínima.

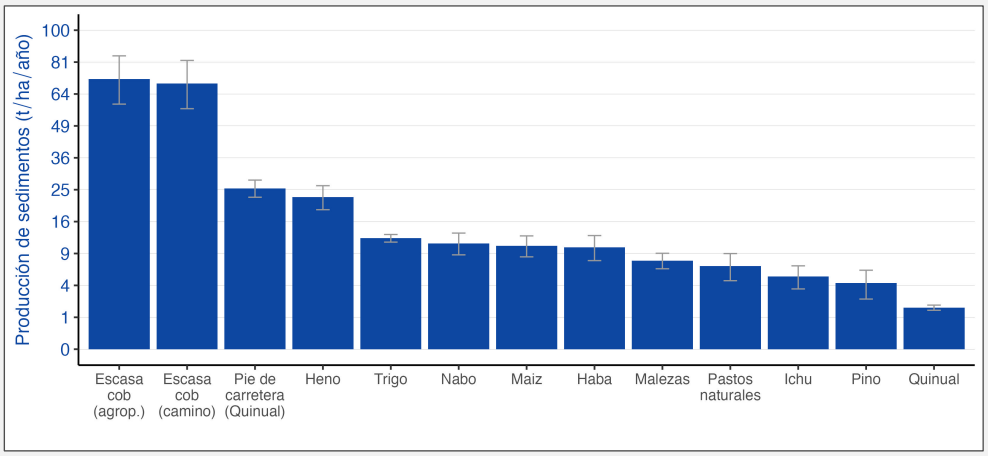

Figura 3.1.5. Producción de sedimentos anual (t/ha/año) según tipo de cobertura vegetal y uso del suelo. Las barras indican la media y el error estándar.

3.1.1.6. Análisis multivariado y modelado de pérdida de suelo

Para identificar los factores más relevantes asociados a la pérdida de suelo por eventos (SL) en las parcelas experimentales, se aplicó un análisis de regresión por mínimos cuadrados parciales (Partial Least Squares Regression, PLS-R). En la Figura 3.1.6, los dos primeros componentes muestran que los vectores correspondientes a las variables Ero (costras de erosión), Rc (coeficiente de escorrentía), Rn (rugosidad del suelo) y Vc (cobertura vegetal) están estrechamente alineados con la dirección del vector de la variable respuesta SL, lo que indica una fuerte relación positiva con la pérdida de suelo. En contraste, otras variables presentaron una contribución limitada al modelo, al ubicarse alejadas de la dirección de influencia de SSI. Entre ellas se encuentran la escorrentía (Ro), los residuos de cobertura (Res), la pendiente (Sp), la precipitación en parcela (PP), y distintos parámetros de energía de lluvia (E, Pi). También se incluyeron variables edáficas como la humedad inicial del suelo (Hs), la materia orgánica (Mo), las gravas embebidas (Grc), así como características estructurales del cultivo y malezas: altura de cultivo (Ch), cobertura de malezas (Wc), altura de malezas (Wh) y agregados libres (Fa).

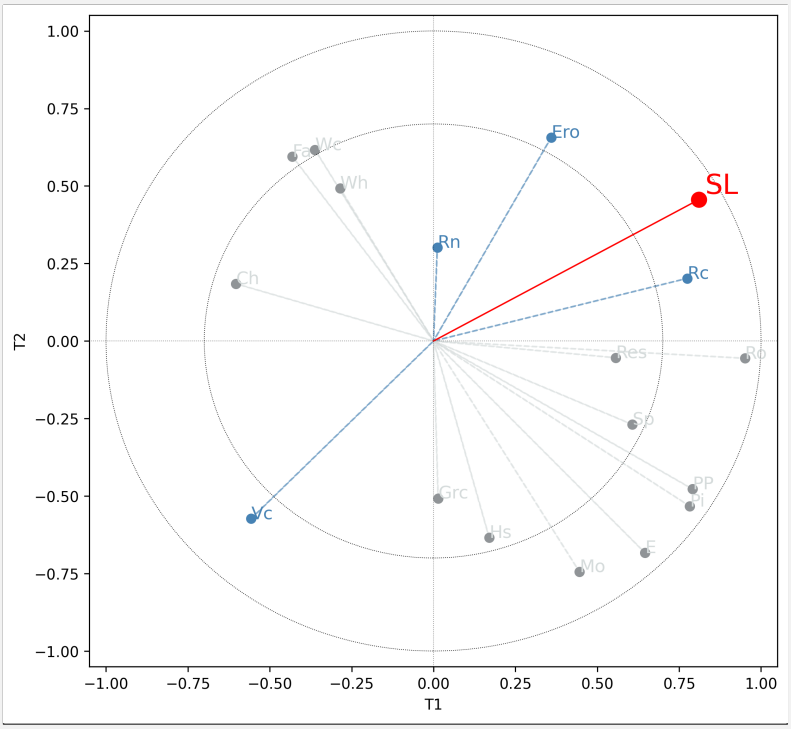

Figura 3.1.6. Componentes principales del análisis PLS-R. La variable respuesta SL (pérdida de suelo por evento) se alinea principalmente con Rc, Ero y Vc, indicando su fuerte relevancia en el modelo predictivo.

A partir del análisis de importancia de las variables utilizando el índice VIP (Variable Importance in Projection), se verificó que las variables Rc, Vc y ero presentaron valores superiores al umbral crítico (VIP > 1). En consecuencia, fueron seleccionadas como los predictores principales en el modelo.
Con base en estos resultados, se ajustó un modelo de Erosión en Terrazas y Transporte de Sedimentos (Terrace Erosion and Sediment Transport, TEST). para estimar la pérdida de suelo por evento de precipitación. Este modelo incluyó como variables explicativas a la energía cinética de la lluvia (E), el coeficiente de escorrentía (Rc), la proporción de costras de erosión (Ero) y la cobertura vegetal (Vc). La ecuación resultante fue la siguiente:

$$Log(SL) = -2.72 + 0.90\ Log(E\ Rc) + 0.70\ Ero - 0.80\ Vc$$

Dónde: SL: pérdida de suelo por evento (g/m^2), E: energía cinética por evento de lluvia (J/m^2), Rc: coeficiente de escorrentía (adimensional), Ero: costras de erosión (%), Vc: cobertura vegetal (%)

El modelo presentó un buen ajuste, con un R^2 de calibración de 0.82 y una eficiencia de Nash-Sutcliffe (NASH) de 0.55, lo cual indica una capacidad predictiva aceptable. La validación cruzada evidenció un comportamiento consistente del modelo, especialmente en eventos de magnitud media y alta, con menor precisión en eventos de baja pérdida.

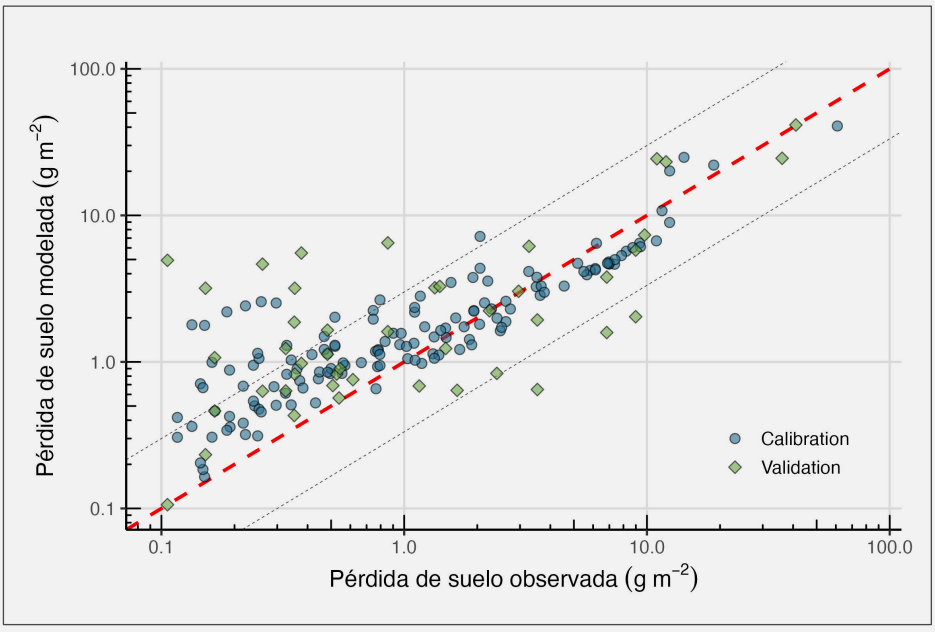

Figura 3.1.7. Relación entre pérdida de suelo observada y modelada por evento de precipitación (SL). Se muestran los datos de calibración (azul) y validación cruzada (verde).

3.1.2. Discusión

Los resultados indican una notable variabilidad en las tasas de erosión del suelo según el tipo de cobertura vegetal, siendo particularmente preocupantes en áreas con escasa vegetación y en terrenos agrícolas que carecen de un manejo adecuado.

El modelo calibrado muestra una alta capacidad explicativa (R^2 = 0.82) y aceptable poder predictivo en validación (NASH = 0.55), lo que respalda la solidez del enfoque combinado de regresión por mínimos cuadrados parciales (Partial Least Squares Regression, PLS-R) y modelado de Erosión en Terrazas y Transporte de Sedimentos (Terrace Erosion and Sediment Transport, TEST).

En contextos altoandinos como La Encañada, la pérdida de suelo puede superar umbrales críticos de sostenibilidad. El estudio global de Borrelli et al. (2017) define un umbral de alerta ecológica en torno a las 10 t/ha/año, valor que en este estudio fue ampliamente superado en sistemas agrícolas con escasa cobertura (p. ej., hasta 72 t/ha/año en condiciones de agricultura sin manejo de suelo). Este patrón es coherente con lo reportado por Romero et al. (2007), quienes identificaron en la misma zona tasas de erosión similares en suelos agrícolas expuestos.

Además, la dispersión de los datos sugiere un comportamiento erosionante altamente condicionado por el tipo de cobertura. Coberturas como quinual, pino e ichu presentaron pérdidas inferiores a 5 t/ha/año, confirmando su rol protector. Esta observación coincide con lo planteado por Krois & Schulte (2014), quienes destacaron la eficacia de sistemas de conservación (como terrazas vegetadas y revegetación natural) en zonas aledañas de la cuenca Ronquillo.

A nivel regional, Baigorria et al. (2007) menciona la fragilidad de los suelos en Cajamarca frente a lluvias concentradas y prácticas agrícolas tradicionales. El presente estudio refuerza esta preocupación al evidenciar que eventos individuales de precipitación pueden inducir pérdidas considerables de suelo, incluso bajo coberturas parcialmente protegidas.

La modelación por evento aporta una ventaja crítica frente a enfoques agregados anuales, al capturar la naturaleza episódica de los procesos erosivos, lo cual es especialmente relevante en paisajes de alta pendiente y baja cobertura vegetal. Tal como indica el modelo TEST, factores como la formación de costras de erosión y la escasa vegetación son determinantes inmediatos en la generación de sedimentos, superando en influencia a

características edáficas como granulometría o humedad inicial del suelo.

Estos resultados deben ser considerados en la planificación de intervenciones. Así como, el enfoque propuesto por Krois (2014), donde indica la identificación de zonas prioritarias para técnicas de conservación como terrazas vivas, cultivos en fajas o revegetación asistida pueden disminuir de manera efectiva la escorrentía superficial y la erosión del suelo en microcuencas como la de Encañada.

Finalmente, a pesar de las diferencias metodológicas entre diversas investigaciones, se observa una tendencia común: la erosión en áreas altoandinas, especialmente en aquellas con uso agrícola intensivo y sin medidas de conservación, alcanza niveles significativos. Aunque los resultados presentados provienen de un periodo de estudio relativamente corto, refuerzan la necesidad de implementar políticas públicas más dinámicas y adaptadas a cada localidad, enfocadas en la restauración de la cobertura vegetal y en el rediseño de prácticas productivas en estos territorios cruciales para garantizar la seguridad hídrica regional.

3.1.3. Conclusiones

El presente estudio muestra que la erosión hídrica en sistemas agrícolas altoandinos del distrito de La Encañada alcanza niveles altos a microescala, especialmente en zonas con coberturas vegetales escasas y sin manejo del suelo, donde las pérdidas de suelo superan los 70 t/ha/año. El modelo utilizado, calibrado con datos de microparcelas y precipitaciones reales, mostró que las costras de erosión son un factor clave en la generación de sedimentos, mientras que la cobertura vegetal actúa como un elemento de mitigación esencial. Coberturas como quinual, ichu y pino evidenciaron tasas de pérdida de suelo menores a 5 t/ha/año. Estos resultados indican la urgencia de dar prioridad a ciertas prácticas de conservación específicas en políticas públicas agrarias y ambientales, orientadas a reducir la degradación del suelo en zonas de alta pendiente y fragilidad ecológica. En este contexto, la importancia de estudios multiescalares y adaptativos para orientar decisiones de gestión sostenible en paisajes de montaña es de suma importancia.

3.2. Radioisótopos

Las regiones montañosas presentan grandes desafíos para el mapeo confiable de las tasas de redistribución del suelo a escala espacial, debido al terreno accidentado, la inaccesibilidad y los eventos extremos. Estas limitaciones dificultan la adquisición de datos precisos sobre erosión en áreas extensas. Como alternativa, se propone el uso combinado de Cs-137 y Pb-210 en exceso. La metodología se basa en comparar el inventario del radioisótopo entre sitios de muestreo y referencia, permitiendo estimar tasas de erosión y depósito a escala puntual usando modelos de conversión. Esta técnica ofrece múltiples ventajas para lograr datos retrospectivos de los últimos 50 años; no obstante, también presenta desafíos y limitaciones como la baja concentración de Cs-137 en el hemisferio sur, tiempos de medición largos (>24 horas por cada muestra), así como equipos multidisciplinarios con expertos en ciencias del suelo y técnicas nucleares.

3.2.1. Resultados

En el distrito La Encañada, se recolectaron un total de 102 muestras. Se abordaron diez transectos de ladera y se establecieron cinco sitios de referencia. Se evaluaron los usos más predominantes en la cuenca, como agricultura, matorral, pajonal, plantaciones de pino y usos combinados de pino con pajonal. Las laderas abarcan pendientes desde planas (<2°) hasta empinadas (>25°). Las zonas de muestreo se presentan en las Figuras 3.2.1. y 3.2.2.

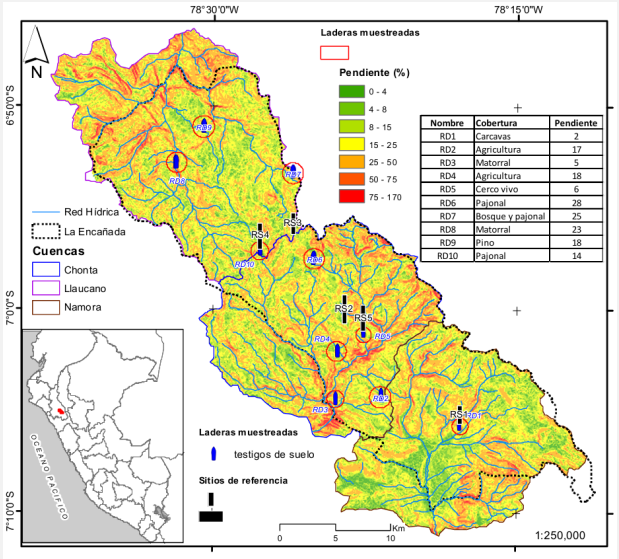

Figura 3.2.1. Muestras recolectadas en sitios de redistribución y referencia en el distrito de La Encañada.



Figura 3.2.2. Sitios de redistribución muestreados en el distrito de La Encañada.

En la Figura 3.2.3. se presenta la distribución de Cs-137 y Pb-210ex en el perfil de los suelos de los cinco sitios de referencia establecidos a lo largo de las cuencas del distrito de La Encañada. Ambos radioisótopos presentan la mayor concentración en los primeros 5 cm del suelo; posteriormente, disminuyen de forma exponencial. Esta distribución indica una deposición progresiva de los radionúclidos sin sufrir disturbaciones, por lo que los sitios de referencia fueron seleccionados correctamente.

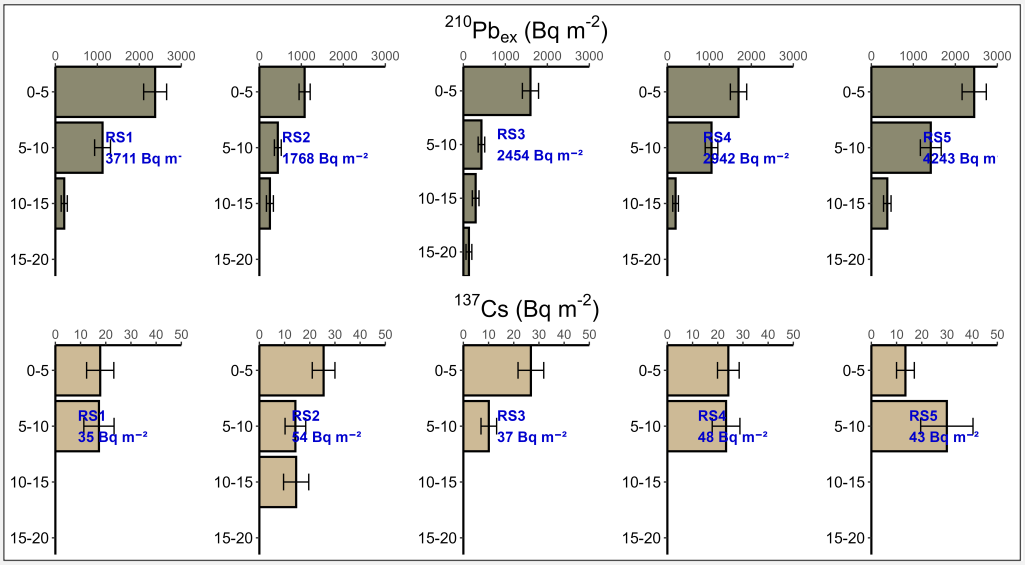

Figura 3.2.3. Distribución de Cs-137 y Pb-210 en exceso en el perfil del suelo de sitios de referencia.

La Figura 3.2.4 muestra el proceso de redistribución en una ladera con agricultura en descanso y con barreras vivas que permiten reducir las tasas de erosión. El CS-137 fue removido en su totalidad de la ladera, lo cual indica que desde 1963 se perdió una lámina de suelo igual o mayor a la profundidad de muestreo (20 cm). Respecto al Pb-210ex, se muestra un transporte activo del suelo. Los datos del perfil indican que el matorral ubicado al final de la ladera con agricultura logra controlar la erosión con tasas de depósito de 0.2 t/ha/año.

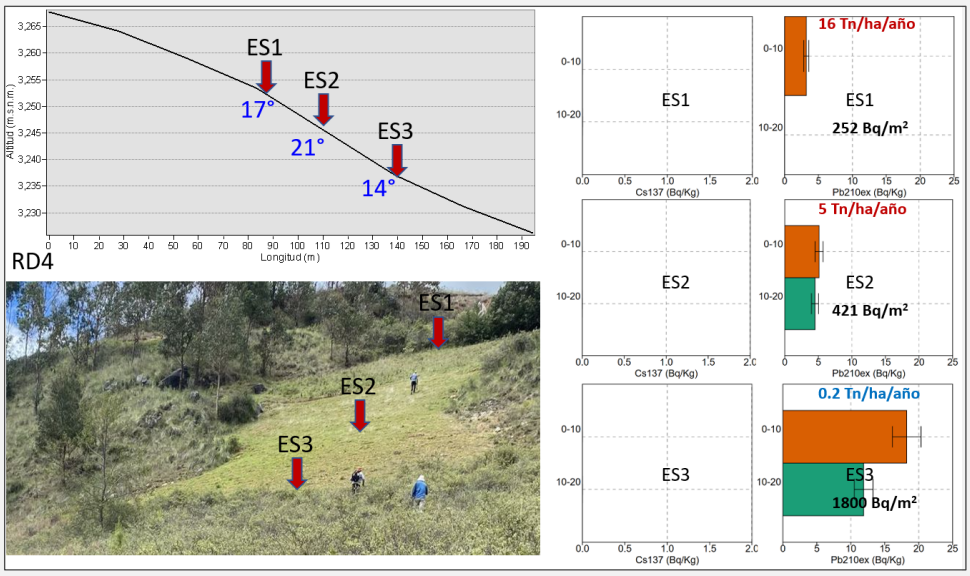

Figura 3.2.4. Redistribución del suelo en RD4 en la parte inicial de una cárcava.

La Figura 3.2.5 muestra el proceso de redistribución en una ladera con agricultura activa, pero con barreras vidas. El Cs-137 fue removido en su totalidad, a excepción de la parte media de la ladera, donde la pendiente es suave (14°). Respecto al Pb-210ex, se muestra un transporte activo del suelo. Se estima una tasa de erosión de 4 t/ha/año, la cual es menos de la mitad de la ladera en descanso descrita en la Figura 3.2.4. Esta diferencia se atribuye a la diferencia de pendiente entre ambas laderas y las prácticas de conservación empleadas en los últimos 100 años en estas laderas. El RD4 tiene una pendiente empinada de 20° y el RD2 tiene 12°.

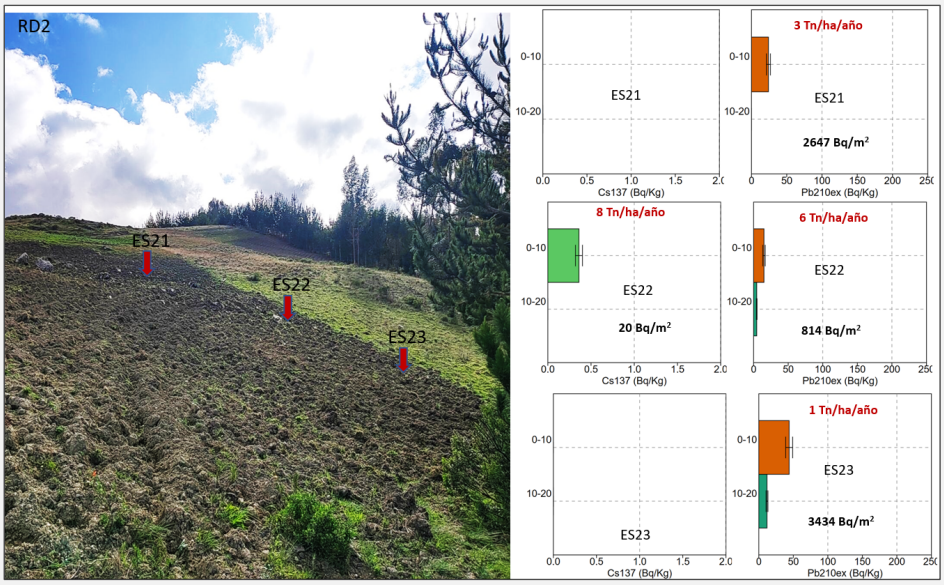

Figura 3.2.5. Redistribución del suelo en RD2 en una zona de agricultura.

La Figura 3.2.6 muestra el proceso de redistribución en una ladera con cobertura densa de pajonal. El Cs-137 está presente en toda la ladera, sobre todo en las primeras capas. De la misma forma, el Pb-210ex está presente en toda la ladera. Si bien en las partes de mayor pendiente hay una pérdida de hasta 2 t/ha/año, estos van siendo depositados en las partes bajas donde la cobertura y la pendiente cumplen un rol importante para la acumulación de los suelos.

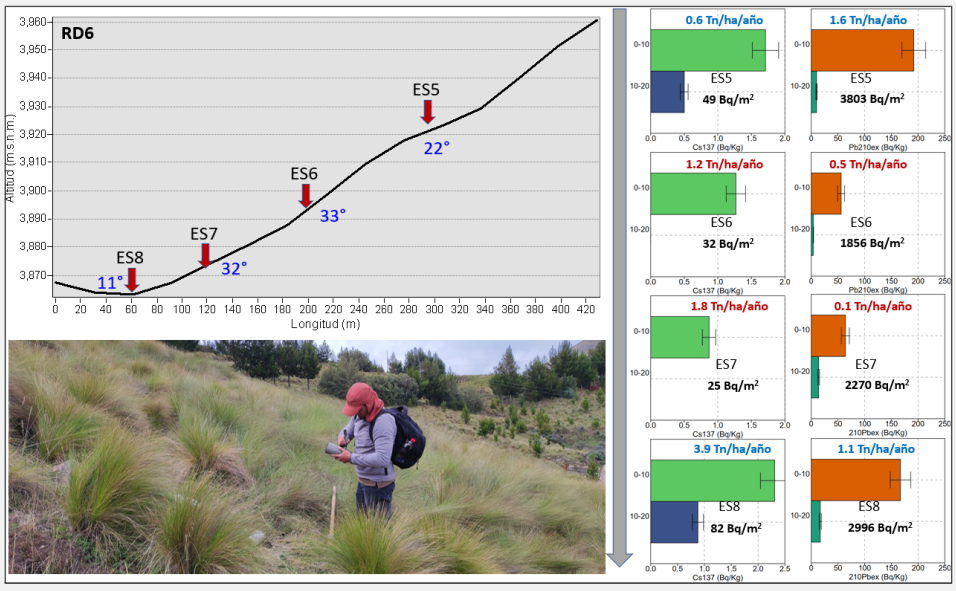

Figura 3.2.6. Redistribución del suelo en RD6 en una zona de pajonal.

En la Figura 3.2.7 se resumen las tasas de erosión en el distrito de La Encañada a escala de ladera. Las mayores tasas se encontraron en zonas desnudas con cárcava (100 t/ha/año). Luego se tienen a las zonas con agricultura que pueden alcanzar hasta 16 t/ha/año, pastos naturales (9 t/ha/año), plantación de pinos (6 t/ha/año), matorrales (4 t/ha/año), pajonal (2t/ha/año) y la cobertura combinada de pino con pajonal (1 t/ha/año).

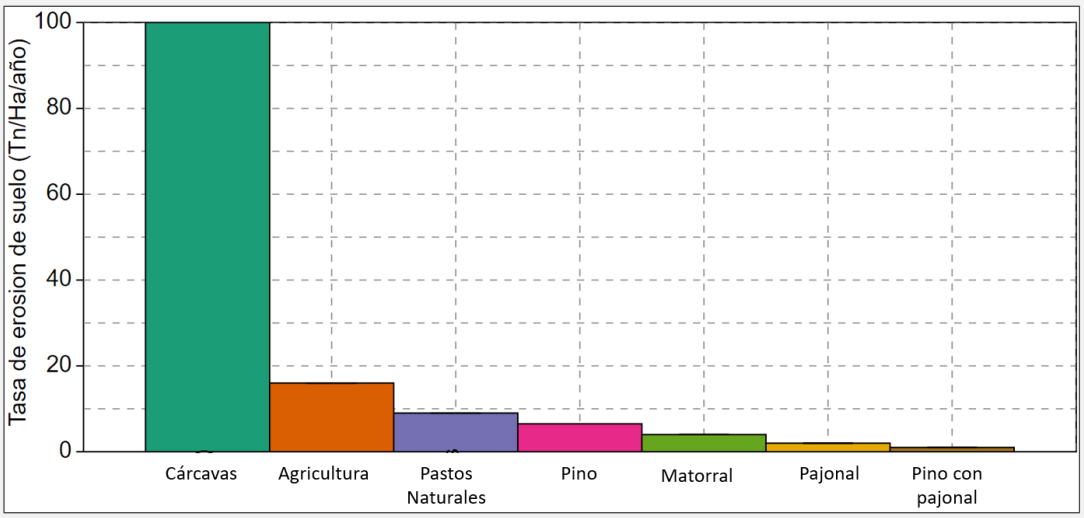

Figura 3.2.7. *Resumen de las tasas de redistribución de suelos en el distrito La Encañada a escala de ladera.*

Las laderas que mejor conservan los suelos son pajonales densos en combinación con plantaciones de pino, los cuales logran las menores tasas de erosión (2 t/ha/año); en tanto, en las partes bajas, donde se presenta una deflexión de la pendiente empinada a suave menor a 8°, se logra retener hasta 3.8 t/ha/año de suelo.

3.2.2. Discusión

Es importante precisar que las tasas de redistribución obtenidas corresponden a un valor promedio interanual de 60 años (1963-2023), para el caso del Cs-137, y un promedio interanual de 100 años (2023-1923) para el caso de Pb210ex. Sin embargo, en paisajes complejos como los Andes peruanos, Cabrera et al. (2023) señalan que el Pb-210ex es más sensible a eventos erosivos recientes, especialmente en los últimos 22 años, mientras que el Cs-137 refleja con mayor precisión procesos erosivos ocurridos en décadas pasadas.

En laderas cubiertas por pajonales, las tasas de redistribución obtenidas con ambos trazadores fueron similares, lo que sugiere que estas áreas no experimentaron cambios sustanciales. En contraste, en laderas sometidas a actividad agrícola, donde la mezcla del suelo por prácticas de labranza y su exposición a la erosión hídrica es mayor, se obtuvieron resultados divergentes. Así mismo, en más del 40 % de los puntos muestreados, el Cs-137 estuvo por debajo del límite de detección, lo que impidió estimar tasas de erosión con este trazador; en dichos casos, el Pb-210ex fue la única fuente de información disponible.

Finalmente, debe enfatizarse que las tasas reportadas no pueden atribuirse de forma absoluta a la cobertura observada durante el muestreo. En laderas agrícolas, los resultados reflejan un valor promedio de erosión asociado a una combinación de coberturas sucesivas, por ejemplo, pajonal seguido de agricultura, integradas en el tiempo dentro del trazador.

3.2.3. Conclusiones

Las tasas de erosión promedio de las últimas seis décadas (1963-2023) y 10 décadas (1923-2023), presentan valores similares en laderas con pajonales y matorrales, mientras que, en zonas de agricultura y zona de cárcavas, el Cs-137 fue removido en su totalidad de la capa superficial del suelo en 45% de los puntos muestreados.
Las mayores tasas se encontraron en zona de cárcavas jóvenes (100 t/ha/año), zonas con agricultura (16 t/ha/año), pastos naturales (9 t/ha/año), plantación de pinos (6 t/ha/año), matorrales (4 t/ha/año), pajonales (2 t/ha/año) y pino con pajonal (1 t/ha/año). Asimismo, se encontró que las laderas con pajonales densos y plantaciones de pino con pajonal denso y pendientes menores a 8° logran retener hasta 3.8 t/ha/año.

4. IDENTIFICACIÓN DE LAS FUENTES DE SEDIMENTOS

4.1. Geología forense (color del suelo)

La geología forense es una disciplina que combina los principios de la geología para estudiar eventos relacionados con la Tierra. Para ello, utiliza la composición y características de los suelos en un área específica. En este caso sirvió para identificar la procedencia de los sedimentos que están llegando a los ríos utilizando el color del suelo como trazador.

Los trazadores permiten agrupar las muestras de suelo en "fuentes de sedimentos" teniendo en cuenta características similares. En el caso del distrito de La Encañada se tomaron muestras de suelo en febrero de 2023, se midieron las características colorimétricas y porcentaje de carbono orgánico de dichas muestras y, finalmente, se realizó el agrupamiento según características similares.

Las características colorimétricas del suelo permitieron realizar cuatro grupos de fuentes según el tipo de cobertura descrita en el momento del muestreo:

- Bosques
- Suelos con cobertura natural
- Suelos cultivados
- Suelos expuestos (cárcavas, laderas y bancos de ríos)

La identificación de las fuentes de sedimentos permite identificar cuál grupo aporta mayor cantidad de sedimento hacía los ríos; esto se logra analizando el sedimento depositado o transportado en los ríos.

El distrito de La Encañada abarca las cabeceras de las cuencas del río Llaucano, río Chonta y río Namora. Debido a la importancia de las mencionadas cuencas, el análisis de aporte de sedimentos se realizó a nivel de cabecera de cuenca; por lo tanto, los resultados obtenidos representan el aporte de sedimentos depositados a finales de 2022 y enero de 2023, ya que es el periodo más cercano a la fecha de muestreo.

4.1.1. Resultados
4.1.1.1. Cabecera de la cuenca del río Llaucano

Se extrajeron dos mezclas de sedimento del río Llaucano, a las que se les denominó C567 y C533 (Figura 4.1.1 a). Las muestras fueron evaluadas y se estimaron los porcentajes de aporte de sedimento de cada grupo de fuentes. Los resultados obtenidos mostraron que el aporte de los sedimentos provenientes de suelos expuestos como laderas, bancos de ríos y cárcavas aportaron fue de hasta el 67%; en tanto, el sedimento proveniente de suelos agrícolas aportó hasta el 30% y, finalmente, los bosques y suelos con cobertura natural tuvieron aportes menores al 9%.

Como se puede observar en la Figura 4.1.1 b, las muestras de suelos desnudos y cárcavas se encuentran, en su mayoría, en pendientes mayores al 25%, las cuales son denominadas empinadas, muy empinadas y extremadamente empinadas. Estas condiciones son factores clave, ya que influyen en la aceleración de los procesos erosivos debido a que afectan la estabilidad de los suelos, además de la velocidad y la fuerza de la escorrentía.

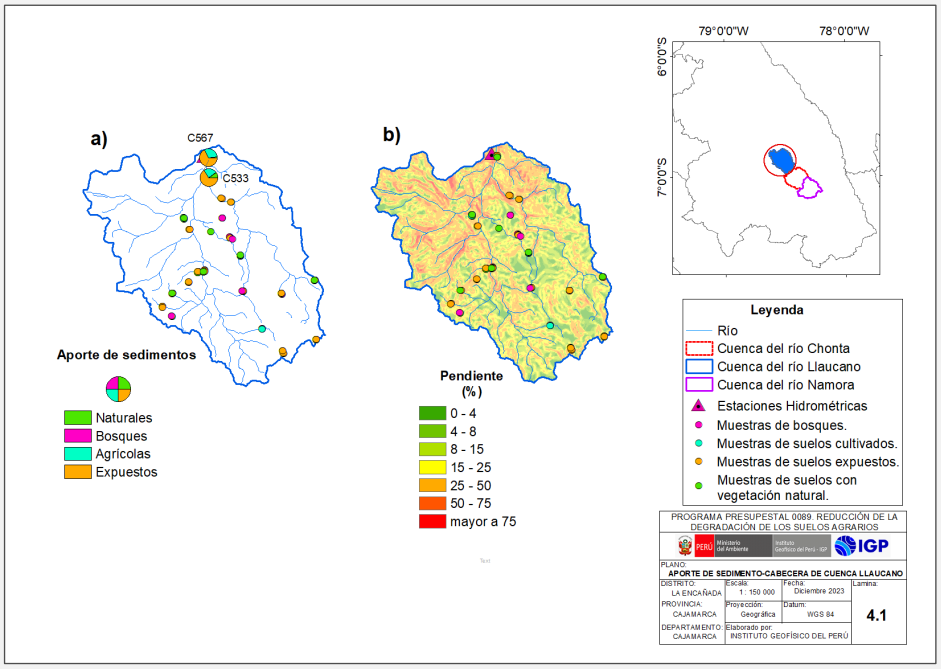

Figura 4.1.1. Sedimento predominante en las mezclas del río Llaucano, localizado dentro del distrito de La Encañada.

4.1.1.2. Cabecera de la cuenca del río Chonta

Se extrajeron dos mezclas en la cabecera del río Chonta: C532, extraída del río Chonta, y C444 del río Grande (Figura 4.1.2 a).
A diferencia de las mezclas analizadas en el río Llaucano, en la cuenca del río Chonta, el segundo suelo predominante en ambas muestras corresponde al proveniente de suelos con vegetación natural, los cuales aportaron hasta el 23%, mientras que el menor aporte se obtuvo de los suelos provenientes de bosques y agricultura, suelos que aportaron hasta el 8% en ambas muestras. Respecto a los suelos expuestos, la situación es similar entre las tres cuencas, ya que estos se encuentran cerca de los cauces en su mayoría y con pendientes mayores al 25% (Figura 4.1.2 b), las cuales son denominadas empinadas, muy empinadas y extremadamente empinadas.
Por otro lado, se observó que el segundo grupo con mayor aporte de sedimentos corresponde a los provenientes de suelos naturales, los cuales ocupan el 60% del área de esta zona de estudio.

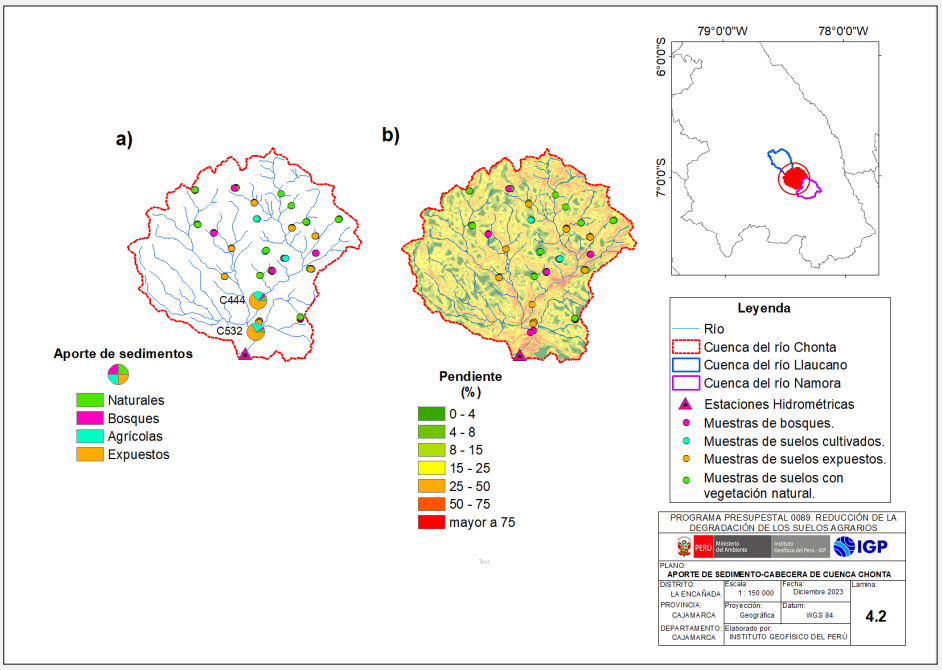

Figura 4.1.2. Sedimento predominante en las mezclas del río Chonta, localizado dentro del distrito de La Encañada.

4.1.1.3. Cabecera de la cuenca del río Namora

Se extrajeron dos mezclas en la cabecera del río Namora: C448, extraída del río Chuchun, y C452 del río La Quispa (Figura 4.1.3 a).
La mezcla de sedimento del río Chuchun tuvo contribución del 46% de suelos expuestos como laderas y cárcavas, mientras que el 32% corresponde a suelos con actividades agrícolas. Los suelos con cobertura natural aportaron el 20%, mientras que el restante correspondió a bosques.
En la mezcla C452 del río La Quispa se obtuvo que el 66% de aporte de sedimentos fue de áreas expuestas, mientras que el 25% fueron agrícolas y el restante de suelos con cobertura natural y bosques.
A diferencia de la cuenca del río Chonta, en esta parte del distrito se observó como segundo grupo predominante a los suelos agrícolas, los cuales se encuentran muy cercanos a los ríos y cuyo aporte de sedimento hacia ellos es inmediato cuando se produce escorrentía debido a las precipitaciones.

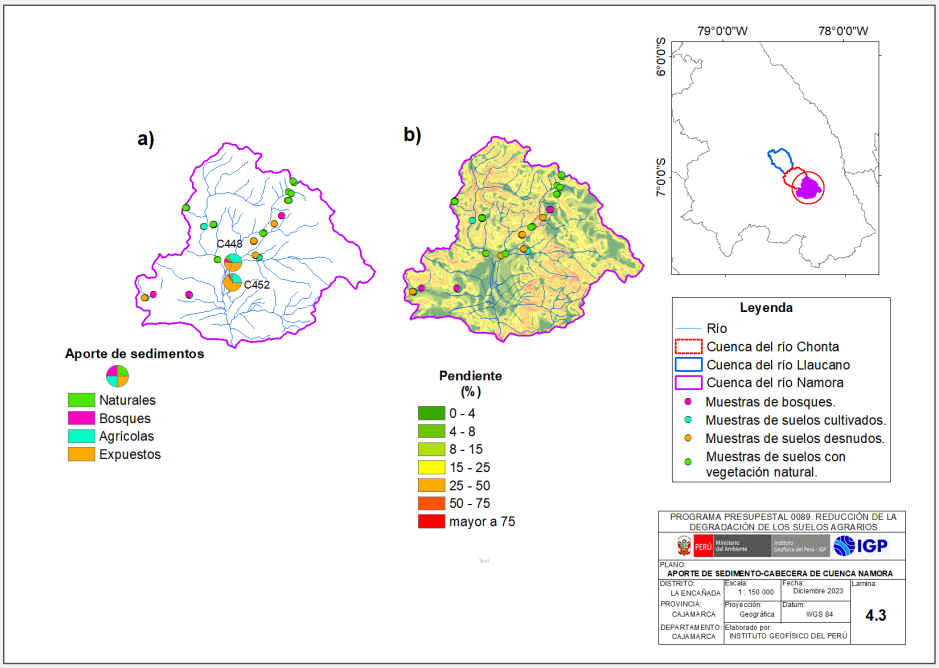

Figura 4.1.3. Sedimento predominante en las mezclas del río Namora, localizado dentro del distrito de La Encañada.

4.1.2 Discusión

Revelar la interconectividad de todos los entornos de la cuenca y los cauces son claves para identificar y entender la procedencia de los sedimentos que llegan hacia los cauces, ya que mediante esta conectividad se realizará el aporte de sedimentos hacia los ríos.

Como se ha podido observar en las tres cuencas analizadas, el sedimento predominante proviene de suelos expuestos. La erosión en este tipo de fuentes se puede dar en forma de cárcavas, surcos y láminas. Esta forma de erosión aporta sedimentos hacia los cauces debido a que se encuentran directamente o cercanos a ellos.

La segunda fuente que contribuyó a las mezclas de los ríos de las tres cuencas analizadas corresponde a las áreas agrícolas, con contribuciones de hasta 30% en la cuenca Llaucano, hasta 23% en la cuenca Chonta y 32% en la cuenca Namora. Que estas fuentes estén aportando sedimento hacia los ríos revela que hay una interconectividad importante con los ríos debido a que se encuentran cercanas a ellos.

Las segundas fuentes que aportaron sedimento en menores cantidades corresponden a los bosques y cobertura natural, aunque durante las campañas de campo se observaron áreas con cobertura natural con baja densidad de cobertura. A pesar de que el suelo de estas fuentes no está llegando hacia los ríos, es importante tomar acciones, ya que estas características, sumadas a las actividades de sobrepastoreo intensivo, incendios y condiciones climáticas, además de la topografía, pueden acelerar los procesos erosivos.

Muchas veces, los patrones de erosión de suelos se encuentran relacionados al porcentaje de carbono orgánico de los suelos, ya que el carbono orgánico puede aumentar o disminuir según las prácticas que se realicen en el área de estudio.

El cambio de cobertura, uso del suelo y el cambio climático son los principales factores para la pérdida de carbono orgánico de los suelos. Respecto a las cuencas analizadas, los valores de las medianas del porcentaje de carbono orgánico (Figura 4.1.4) de las zonas agrícolas son mucho menores que los de los bosques y vegetación natural, lo cual puede ser un indicador de que no se está realizando un adecuado manejo de suelos para actividades agrícolas y que se está ocasionando pérdida de carbono orgánico en el suelo.

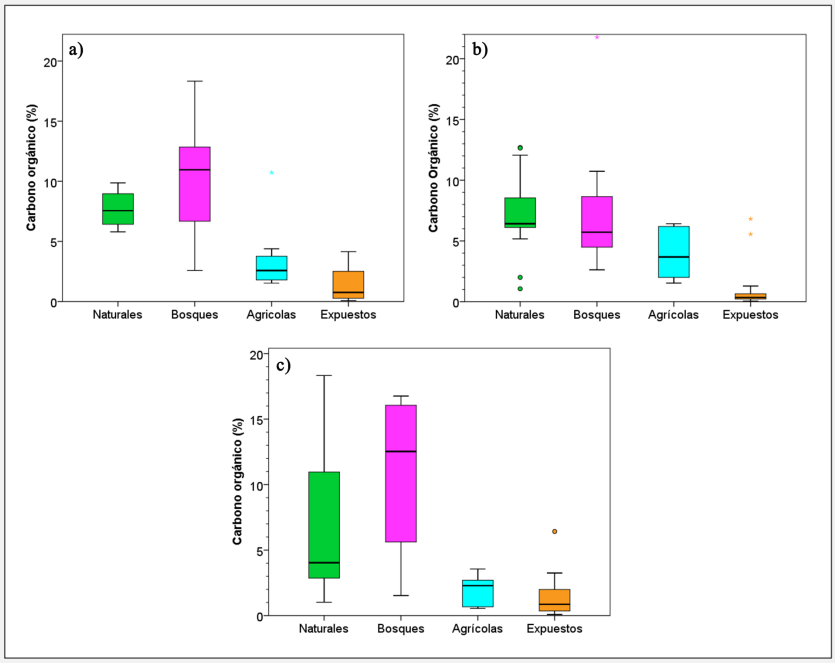

Figura 4.1.4. Porcentajes de carbono orgánico medidos en cada grupo de fuentes de la cabecera de a) cuenca del río Llaucano, b) cuenca del río Chonta y, c) cuenca del río Namora, en el distrito de La Encañada.

Los porcentajes promedios más altos se obtuvieron en los grupos de bosques, resultado que se ve reflejado en los bajos porcentajes de aporte que se estimaron en las mezclas de sedimento de río.
La técnica de rastreo de sedimentos es un gran aporte para los estudios de erosión de suelos, ya que permite identificar las principales fuentes de erosión y brinda herramientas claves para la implementación de los programas de gestión y conservación de cuencas. De esta forma, se logra gestionar la transferencia de los sedimentos hacia los cauces y reducir los efectos secundarios que acarrean.

4.1.3 Conclusiones

Las muestras fueron extraídas en febrero de 2023, por lo que los resultados representarían al sedimento depositado a finales de 2022 o enero de 2023.
Los aportes de las fuentes a nivel de cuenca fueron los siguientes:

- Cabecera de la cuenca del río Llaucano: en ambas mezclas, el sedimento predominante fue de suelos expuestos, hasta con un 67%; en segundo lugar, los suelos agrícolas con aportes de hasta el 30%. Los porcentajes restantes fueron de bosques y suelos con vegetación natural.

- Cabecera de la cuenca del río Chonta: Los resultados obtenidos muestran que el aporte de los sedimentos provenientes de suelos expuestos aportó el 64% de sedimento en la mezcla tomada del río Grande y el 65% en el caso del río Chonta. Los suelos de actividad agrícola aportaron el 23%, mientras que el restante estuvo asociado a suelos con cobertura natural y bosques.

- Cabecera de la cuenca del río Namora: Las mezclas de sedimento del río Chuchun y La Quispa tuvieron contribuciones del 46% y 66% de suelos expuestos, respectivamente, mientras que los suelos con actividad agrícola contribuyeron hasta el 32%. En menor porcentaje se encuentran los suelos agrícolas y bosques.

5. PRODUCCIÓN Y TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

5.1. Transporte de sedimentos

El suelo es uno de los recursos naturales más importantes para sostener la vida y los ecosistemas. Su degradación implica la desintegración en partículas más pequeñas —rocas, arenas, limos, arcillas y minerales— que son arrastradas, transportadas y depositadas a lo largo de la cuenca hidrográfica, alterando su estructura, fertilidad y capacidad de regulación hidrológica.

La principal limitación para estudiar la conservación y degradación del recurso suelo es la falta de registros continuos en el espacio y el tiempo. Para superar estas brechas, los modelos hidrológicos y de transporte de sedimentos permiten analizar procesos clave como la erosión, el balance hídrico, la variabilidad climática y el movimiento de nutrientes, contaminantes y sedimentos, brindando una visión integral del comportamiento del suelo en la cuenca.

Los avances en herramientas matemáticas, el aumento de la capacidad computacional y el perfeccionamiento del conocimiento sobre la dinámica de los procesos hidrológicos han impulsado el desarrollo de modelos más precisos y confiables. Estos progresos resultan esenciales para mejorar la planificación y la gestión sostenible del suelo, permitiendo diseñar medidas de conservación más eficaces y adaptadas a las condiciones locales.

En este sentido, los modelos semi-distribuidos y distribuidos se han consolidado como herramientas clave para espacializar la información y simular detalladamente los procesos en la cuenca. En línea con este enfoque, y con el objetivo de mantener al Perú a la vanguardia en la gestión del recurso suelo, el Instituto Geofísico del Perú (IGP) ha implementado un modelo semi-distribuido y distribuido para caracterizar la respuesta hidrológica, así como las tasas de erosión y su severidad en el distrito de La Encañada. Este esfuerzo contribuye a generar conocimiento científico aplicado que respalde a la sociedad en la gestión y conservación del recurso suelo.

5.1.1. Resultados

La implementación del modelo distribuido WaTEM/SEDEM en su versión GUI permitió, caracterizar la respuesta hidrológica de las cuencas Llaucano (313 km^2), Chonta (282 km^2) y Namora (254 km^2). El proceso de caracterización de las tasas de erosión empleando WaTEM/SEDEM en el distrito de La Encañada, aborda un área de 635 km^2; no obstante, la sumatoria de las tres subcuencas

se extiende hasta 849 km² (Figura 5.1.1). Para estimar las tasas de erosión se aplicaron las ecuaciones que calculan los factores LS, P, Cobertura, erodabilidad y erosividad. Luego, mediante simulación MONTE CARLO y las tasas obtenidas del Cs-137, se ajustó espacialmente el mapa.

El proceso de implementación caracterizó la topografía a partir del modelo de elevación digital SRTM con resolución de 30 metros (Figura 5.1.1), insumo base para la generación del factor LS y la delimitación espacial de la cuenca. La cobertura del suelo se clasificó conforme a lo descrito en la sección 2.1, mientras que el mapa de tipos de suelo se elaboró a partir del producto SoilGrids, del cual se extrajeron variables texturales y contenido de materia orgánica necesarios para estimar el factor de erodabilidad (K) mediante la fórmula de Wischmeier et al. (1971).

El factor de erosividad de la lluvia (R) se calculó utilizando el producto grillado RAIN4PE (1981–2015). Para mejorar su representatividad local, se aplicó una corrección mensual basada en datos registrados por dos estaciones meteorológicas durante los meses de enero a mayo, ajustando el grid mediante factores de sesgo. Posteriormente, se estimó R mediante la fórmula de Arnoldus (1980), obteniendo un raster continuo de erosividad climática. Todos los insumos fueron estandarizados espacialmente y convertidos a formatos compatibles con la interfaz del modelo WaTEM/SEDEM GUI.

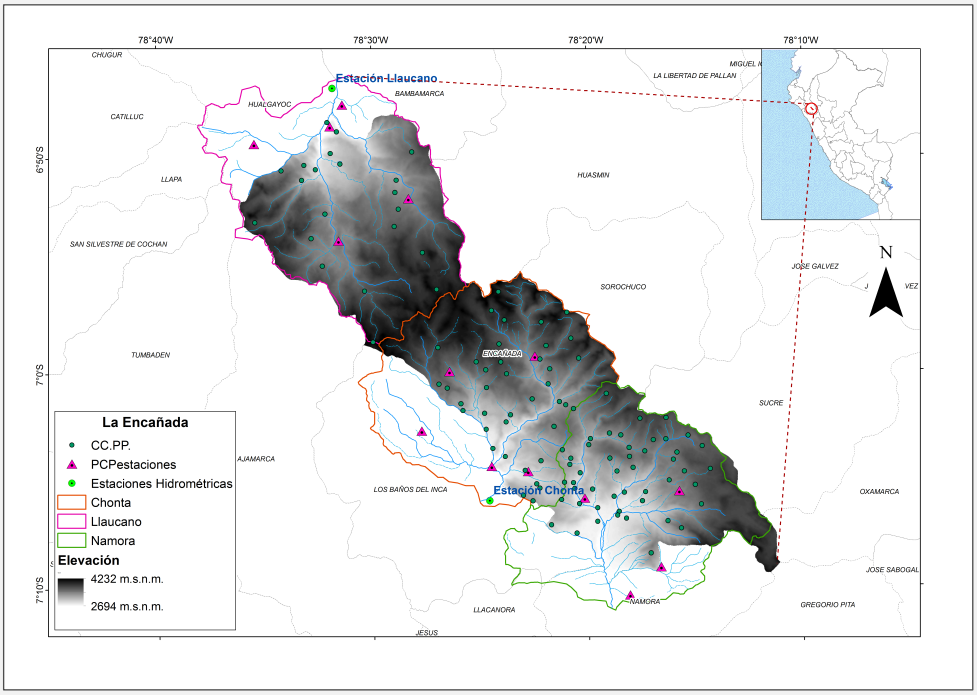

Figura 5.1.1. Red de monitoreo hidrosedimentológico y pseudoestaciones meteorológicas en el distrito de La Encañada.

La aplicación del modelo WaTEM/SEDEM en su versión GUI evidenció una La estructura operativa del modelo WaTEM/SEDEM se completa con la estimación de los factores LS, C y P. El factor LS, que representa la influencia topográfica sobre el transporte de sedimentos, fue calculado mediante la metodología de Moore y Burch (1986), integrando la pendiente y la acumulación de flujo por celda para identificar zonas con mayor susceptibilidad a la erosión.
El factor C, correspondiente a la cobertura del suelo, se construyó a partir de la clasificación previamente descrita en la sección 2.1, asignando valores codificados según el esquema oficial del modelo GUI. Esta representación permite al modelo diferenciar niveles de cobertura vegetal y su efecto sobre la reducción de la erosión. Finalmente, el factor P fue definido en función de la pendiente del terreno y la presencia o ausencia de prácticas de conservación, integrando criterios técnicos apropiados para áreas sin manejo estructurado. Todos los factores fueron estandarizados y preparados en formato ráster compatible con el entorno gráfico del modelo.
Los inputs de entrada del modelo se presentan en la Figura 5.1.2.

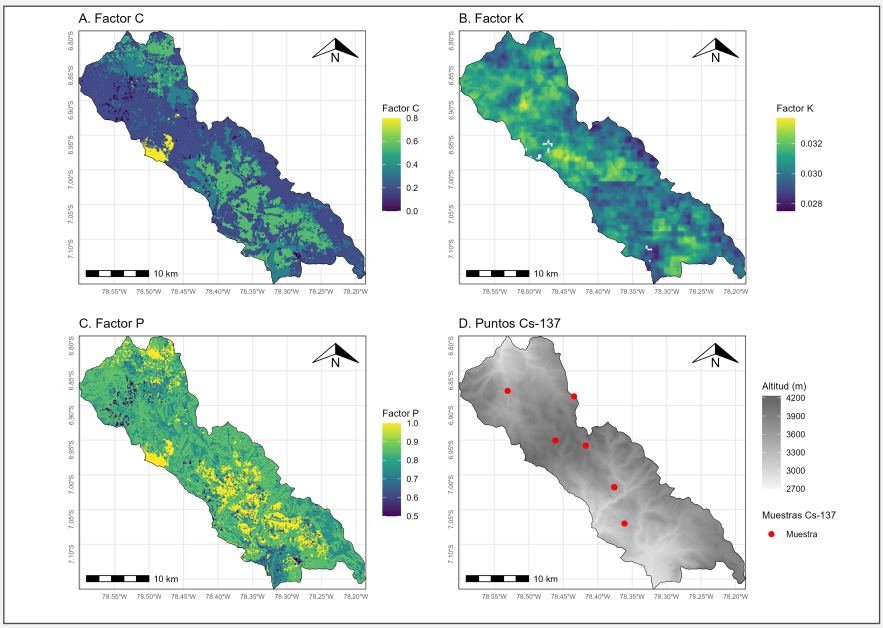

Figura 5.1.2. *Variables de ingreso del modelo distribuido WaTEM/SEDEM el distrito de La Encañada. A) Factor de cobertura vegetal del distrito de La Encañada. B) Factor K, estimado a partir de datos de SoilGrids. C) Distribución espacial del factor P en el distrito. D) Tasas de erosión medidas con Cs-137, utilizadas en la etapa de calibración del modelo.*

La calibración del modelo se basó en mediciones de Cs-137 obtenidas a partir de muestras de suelo recolectadas en campo, conforme a lo descrito en el apartado 3.2. Esta información permitió validar los resultados simulados y

ajustar el modelo espacialmente. Se aplicó además un enfoque de simulación Monte Carlo para explorar combinaciones de parámetros y optimizar el ajuste, incluyendo la calibración del coeficiente de capacidad de transporte de sedimentos (KTC). Los resultados permitieron generar mapas de erosión (t/ha/año), identificar su variación espacial y delimitar zonas críticas para la gestión de suelos.

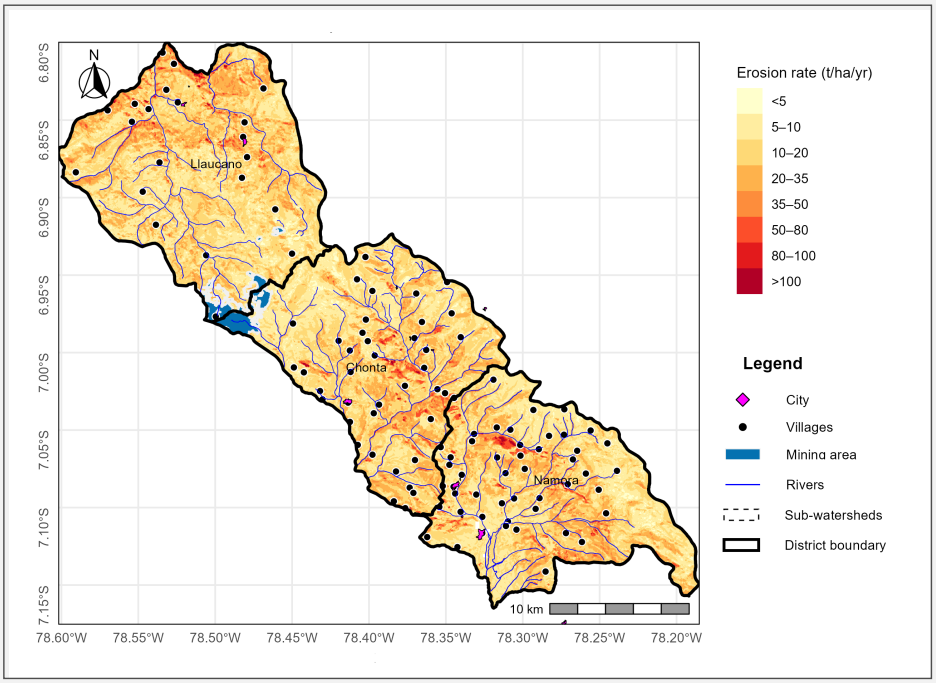

Figura 5.1.3. Mapa de la distribución de las tasas de erosión de suelos en las principales subcuencas con influencia en el distrito de La Encañada. La subcuenca de Chonta presenta tasas de erosión media interanual que varían entre 1 y 179 t/ha/año; la subcuenca Llaucano muestra un rango de 1 a 201 t/ha/año, alcanzando las mayores tasas registradas en el distrito; mientras que la subcuenca Namora presenta tasas de erosión media interanual entre 2 y 164 t/ha/año

5.1.2. Discusión

La aplicación del modelo WaTEM/SEDEM en su versión GUI evidenció diversas limitaciones relacionadas con la disponibilidad y calidad de los datos de entrada, como se observa en la Figura 5.1.2. La escasa cobertura de estaciones meteorológicas en la cuenca obligó a utilizar productos grillados como RAIN4PE, los cuales, si bien ofrecen continuidad espacial y temporal, requieren ajustes locales para mejorar su representatividad. En este estudio, se aplicó una corrección estacional basada en los registros de las dos estaciones meteorológicas disponibles, lo que permitió afinar la estimación del factor R durante los meses más representativos del ciclo hidrológico.

En relación con la caracterización de la cobertura del suelo (Figura 5.1.2 a),

se logró codificar las clases conforme a los requerimientos del modelo; sin embargo, la representación de las prácticas de manejo (factor P, Figura 5.1.2 c) fue simplificada debido a la escasa evidencia de conservación estructural en el área de estudio. Asimismo, el valor de KTC, parámetro clave que regula la capacidad de transporte de sedimentos, debió ser ajustado mediante simulaciones Monte Carlo, dada la incertidumbre asociada a su calibración empírica directa.

Una de las principales fortalezas del estudio fue la integración de mediciones de Cs-137 (Figura 5.1.2 d) como base para la calibración y validación espacial del modelo. Esta técnica permitió contrastar los patrones simulados con evidencia directa de pérdida de suelo, contribuyendo a una mejor delimitación de zonas críticas. A partir de estos análisis, se estimaron tasas medias anuales de erosión en un rango de 1 a más de 201 t/ha/año, con variaciones que reflejan la heterogeneidad morfológica, las pendientes y la cobertura vegetal en el área del distrito.

Los resultados obtenidos proporcionan una línea base sólida para priorizar intervenciones de manejo y conservación de suelos en zonas altoandinas con limitada información disponible. Este estudio destaca la relevancia de combinar modelos distribuidos con técnicas isotópicas como el Cs-137 para mejorar la comprensión de los procesos erosivos, avanzar en la gestión sostenible del recurso suelo y fortalecer las capacidades locales para enfrentar los desafíos de la degradación ambiental en ambientes de montaña.

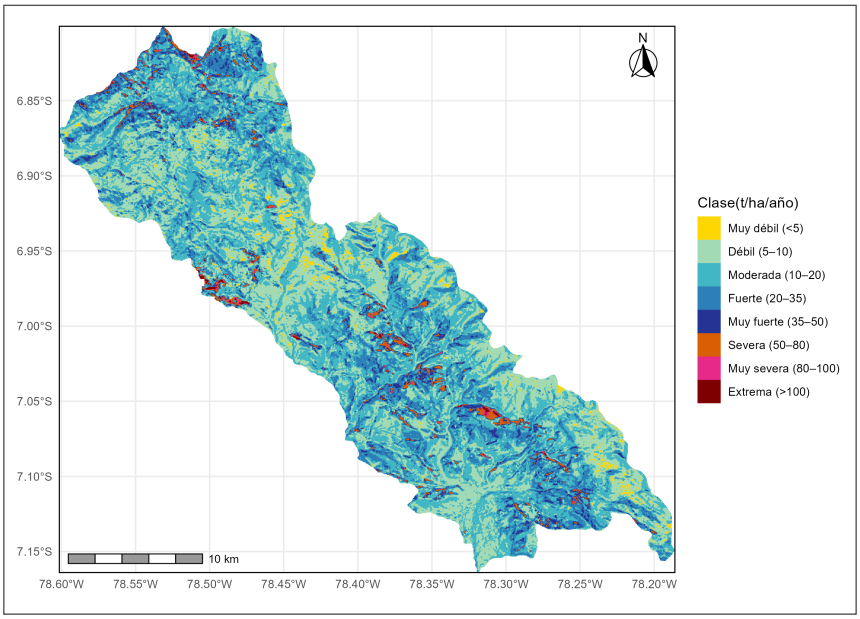

Figura 5.1.4. *Grados de erosión hídrica en las subcuencas con influencia en el distrito de La Encañada. La figura muestra los grados de erosión hídrica en el distrito de La Encañada, según la clasificación adoptada. En la subcuenca Chonta predomina la erosión moderada (40%), seguida de débil (33%) y fuerte (18%). En Llaucano, la clase moderada representa el 39% del área, seguida de fuerte (20%) y débil (31%). En Namora destacan las clases moderada (38%) y fuerte (19%), mientras que el 35% del área presenta erosión débil.*

5.1.3. Conclusiones

El análisis del distrito de La Encañada revela que la erosión hídrica se concentra principalmente en los grados moderado (10–20 t/ha/año) y fuerte (20–35 t/ha/año), los cuales en conjunto abarcan en promedio el 58% del territorio, como se muestra en la Figura 5.1.3. Esto significa que más de la mitad del distrito experimenta pérdidas de suelo superiores a 10 t/ha/año, alcanzando niveles que comprometen la productividad y estabilidad de los suelos.

Las clases más severas —muy fuerte (35–50 t/ha/año), severa (50–80 t/ha/año), muy severa (80–100 t/ha/año) y extrema (>100 t/ha/año)— representan en conjunto entre el 2% y 6% del área, localizándose en focos críticos que pueden observarse en la Figura 5.1.4. Por otro lado, aproximadamente el 36% del territorio mantiene condiciones de erosión débil o muy débil (tasas inferiores a 10 t/ha/año), lo que confirma que los procesos erosivos afectan de manera generalizada a la mayor parte del distrito.

A nivel de subcuencas, Chonta presenta un 58% del área en clases moderada y fuerte, con rangos de erosión que alcanzan hasta 179 t/ha/año; Llaucano muestra un 59% en estas clases, con un máximo de 201 t/ha/año, consolidándose como el principal foco de pérdida de suelo; mientras que Namora evidencia un 57% en estas clases, con un rango que llega a 164 t/ha/año, indicando zonas de erosión severa aunque más dispersas.

Estos resultados evidencian la urgente necesidad de implementar estrategias de conservación de suelos y manejo integrado de cuencas en el distrito, priorizando las zonas críticas identificadas en las Figuras 5.1.3 y 5.1.4, con el fin de reducir las tasas de erosión, mitigar la degradación ambiental y garantizar la sostenibilidad de la producción agrícola y los servicios ecosistémicos.

6. LABORATORIO

6.1. Ambiente físico y técnicas de aplicación

El IGP cuenta con un laboratorio de investigación especializado en el análisis físico, colorimétrico, multielemental y radioisotópico de muestras de suelos, sedimentos y aguas (Figura 6.1.1). El laboratorio dispone de equipos sofisticados de última generación para el estudio de los suelos, esto con base en las técnicas de granulometría por difracción láser, colorimetría, espectrometría de fluorescencia de rayos X por reflexión total (TXRF) y espectrometría de rayos gamma. Asimismo, cuenta con una serie de equipos menores complementarios y necesarios para el desarrollo de tratamiento de muestras y métodos de ensayo. La gestión y operación del laboratorio se vienen implementando conforme a los lineamientos de las Normas Técnicas Peruanas (NTP) aplicables a laboratorios de ensayo y calibración, las cuales proporcionan directrices para asegurar la competencia técnica, la calidad de los resultados y la trazabilidad de los procesos analíticos. Además, los métodos aplicados para el tratamiento y análisis de muestras se ejecutan conforme a normas ISO específicas, seleccionadas en función de cada técnica empleada. La implementación de instrumental calibrado según estándares internacionales, el cumplimiento de protocolos normalizados y el uso de materiales de referencia certificados internacionalmente, garantizan la calidad, trazabilidad y confiabilidad tanto de los procedimientos operativos estándar (POE) como de los resultados obtenidos.



Figura 6.1.1. Equipos sofisticados del laboratorio especializado para análisis de suelo y agua.

6.2. Gestión y control de muestras

Para el 2023, el laboratorio MoSSARD ha realizado el pretratamiento y análisis de 1529 muestras sólidas y 3351 muestras líquidas. En este punto, para el distrito de La Encañada, se han procesado 468 muestras sólidas y 1179 muestras líquidas (Tabla 6.2.1) categorizadas en tres grupos, conforme al tipo de muestra. A través de una cadena de custodia se recepcionan las muestras provenientes de campo y se realiza un inventario general observando el estado de la muestra. Seguidamente, se asigna un código único de laboratorio, el cual es utilizado para identificar el proceso actual de tratamiento o análisis. Finalmente, se planifican los procedimientos para cada tipo de muestra y la aplicación de cada técnica físico-química.

Tabla 6.2.1. Cantidad de muestras sólidas y líquidas

Ítem	Grupos de Trabajo	Tipo de Muestra	Lugar de Procedencia	Cantidad de Muestras
1	0004_COD	Suelos y sedimentos	La Encañada - Cajamarca	366
2	0009_COD	Testigos de suelo	La Encañada - Cajamarca	102
3	00012_COD	Sedimentos en suspensión	La Encañada - Cajamarca	1179

6.3. Preparación y análisis de muestras

La fase de pretratamiento se compone de diferentes procesos de acuerdo con el tipo y al estado de las muestras provenientes de campo. Se han establecido los POE para el tratamiento de muestras e implementado las normas ISO para el análisis de estas. En la Figura 6.3.1 a se visualiza el flujograma de los procedimientos establecidos para muestras sólidas, donde se especifica los productos finales del pretratamiento por tamizado y las técnicas de aplicación postratamiento: análisis de materia orgánica, granulometría por tamices, colorimetría y espectrometría de rayos Gamma (Figura 6.3.2). El pretratamiento de muestras líquidas (Figura 6.3.1 b) consiste en la separación de partículas, principalmente mediante un sistema de filtrado, secado de sedimentos y control de pesos (Figura 6.3.3). Finalmente, se obtiene como producto la concentración de sedimentos de suspensión recolectados en el río y en trampas experimentales de sedimentos instalados en diferentes tipos de cultivos.

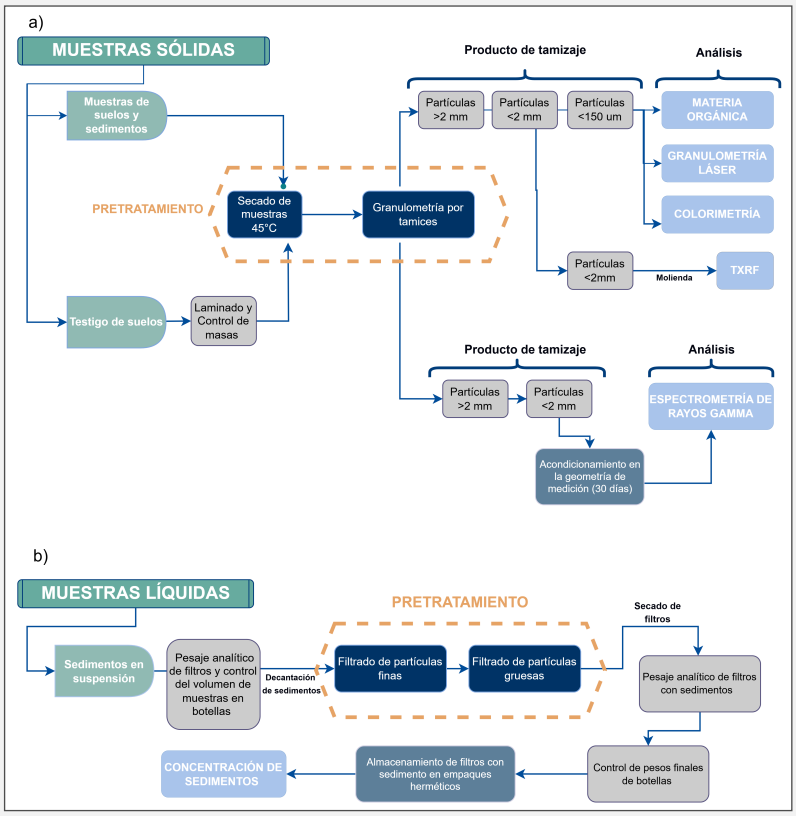

Figura 6.3.1. *Flujograma del pretratamiento de muestras. a) Procesos y productos finales del tamizaje de muestras sólidas. b) Procesos de separación de partículas y obtención de la concentración de sedimentos en muestras líquidas.*

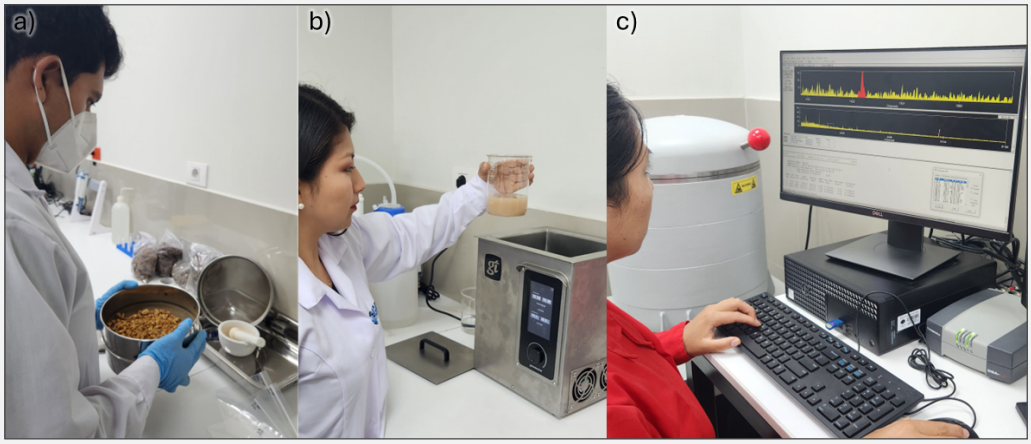

Figura 6.3.2. *a) Granulometría por tamices, b) Pretratamiento para granulometría láser, y c) Espectrometría de rayos gamma.*

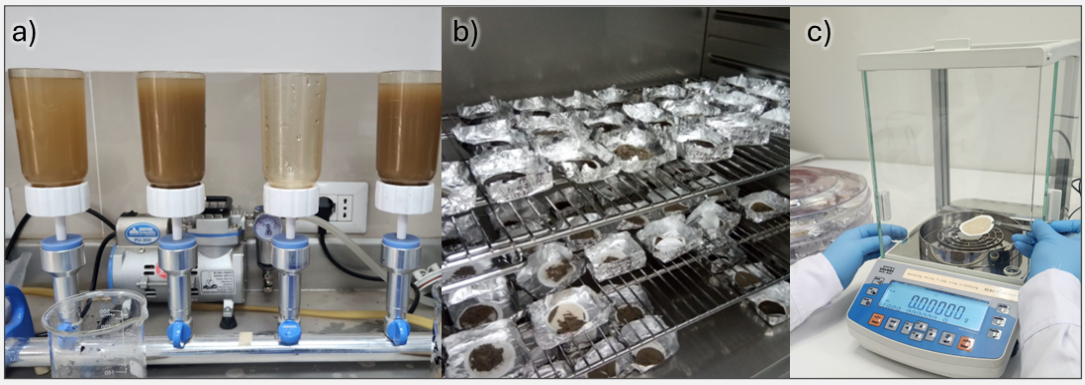

Figura 6.3.3. a) Sistema de filtración de sedimentos, b) proceso de secado y c) Pesaje analítico de sedimentos.

Tabla 6.3.1. Tiempo de producción de las técnicas aplicadas

Ítem	Técnica	Tipo de Análisis	Tipo de Pretratamiento	Tiempo de Medición
1	Granulometría por Difracción Láser	Análisis Físico	25 h/01 muestra	0.7 h/01 muestra
2	Colorimetría	Análisis Físico	2 h/01 muestra	0.5 h/01 muestra
3	Espectrometría de Fluorescencia de Rayos X por Reflexión Total (TXRF)	Análisis Elemental	1 h/01 muestra	4 h/01 muestra
4	Espectrometría de Rayos Gamma	Análisis Radioisótopico	35 días/01 muestra	24-48 h/01 muestra

De acuerdo con el tipo de muestra, procedimientos operativos estándar y el análisis en los equipos sofisticados, se obtienen tiempos de producción variable para cada técnica (Tabla 6.3.1), siendo la técnica de espectrometría de rayos gamma la que requiere mayor tiempo de medición. Así también, se presenta en la Figura 6.3.4 los periodos de pretratamiento y análisis de las muestras provenientes del distrito de La Encañada (Cajamarca). Cada proceso tiene un periodo variable con base en el estado de la muestra proveniente de campo y a la capacidad de medición de cada equipo sofisticado.

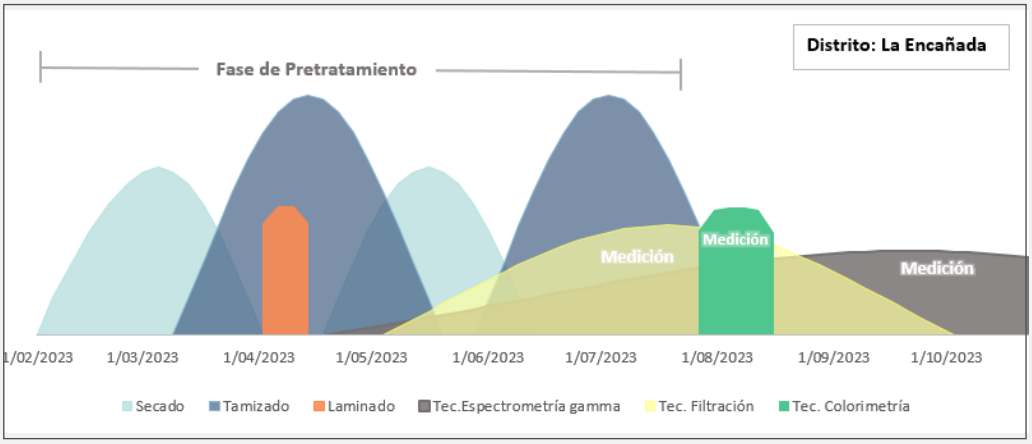

Figura 6.3.4. Periodos de pretratamiento y análisis de muestras extraídas del distrito de La Encañada.



www.igp.gob.pe

© Instituto Geofísico del Perú
Calle Badajoz N° 169
Urb. Mayorazgo, IV Etapa
Ate, Lima - Perú
(511) 317-2300