



**Cantidad y calidad de las aguas y sedimentos históricos generados en
la operación y mantenimiento de los diques instalados en la quebrada Urku
Huayku del volcán Ilaló como una solución basada en la naturaleza**

Brito Nazareno, María José y Criollo Sandoval, Andrés David

Departamento de Ciencias de la Tierra y de la Construcción

Carrera de Ingeniería Civil

Trabajo de integración curricular, previo a la obtención del título de Ingeniera/o Civil

Ing. Carrera Villacrés, David Vinicio, Ph.D.

12 de septiembre del 2023



Departamento de Ciencias de la Tierra y de la Construcción
Carrera de Ingeniería Civil



MIC-PI_FINAL_BritoM_CriolloA .CP2.pdf

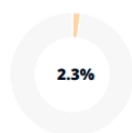
Scan details

Scan time:
August 24th, 2023 at 14:17 UTC

Total Pages:
104

Total Words:
25757

Plagiarism Detection



| Types of plagiarism | | Words |
|---------------------|------|-------|
| Identical | 0.2% | 52 |
| Minor Changes | 0.1% | 30 |
| Paraphrased | 2% | 519 |
| Omitted Words | 0% | 0 |

AI Content Detection



Text coverage

- AI text
- Human text



Firmado electrónicamente por:
DAVID VINICIO
CARRERA VILLACRES

Ing. Carrera Villacrés, David Vinicio, Ph.D.

C. C. 1712218518

Director



Departamento de Ciencias de la Tierra y de la Construcción

Carrera de Ingeniería Civil

Certificación

Certifico que el trabajo de integración curricular: **“Cantidad y calidad de las aguas y sedimentos históricos generados en la operación y mantenimiento de los diques instalados en la quebrada Urku Huayku del volcán Ilaló como una solución basada en la naturaleza”** fue realizado por los señores **Brito Nazareno, María José y Criollo Sandoval, Andrés David**, el mismo que cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, además fue revisado y analizada en su totalidad por la herramienta de prevención y/o verificación de similitud de contenidos; razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que se lo sustente públicamente.

Sangolquí, 11 de Septiembre del 2023



DAVID VINICIO
CARRERA VILLACRES

Ing. Carrera Villacrés, David Vinicio, Ph.D.

C. C. 1712218518



Departamento de Ciencias de la Tierra y de la Construcción

Carrera de Ingeniería Civil

Responsabilidad de Autoría

Nosotros, **Brito Nazareno, María José y Criollo Sandoval, Andrés David**, con cédulas de ciudadanía n° 1727141275 y 1720110665, declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de integración curricular: **“Cantidad y calidad de las aguas y sedimentos históricos generados en la operación y mantenimiento de los diques instalados en la quebrada Urku Huayku del volcán Ilaló como una solución basada en la naturaleza”** es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Sangolquí, 04 de Septiembre del 2023

.....
María José Brito Nazareno

C.C.: 1727141275

.....
Andrés David Criollo Sandoval

C.C.: 1720110665



Departamento de Ciencias de la Tierra y de la Construcción

Carrera de Ingeniería Civil

Autorización de Publicación

Nosotros **Brito Nazareno, María José y Criollo Sandoval, Andrés David**, con cédulas de ciudadanía n° 1727141275 y 1720110665, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de integración curricular: **Título: "Cantidad y calidad de las aguas y sedimentos históricos generados en la operación y mantenimiento de los diques instalados en la quebrada Urku Huayku del volcán Ilaló como una solución basada en la naturaleza"** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.

Sangolquí, 04 de Septiembre del 2023

.....
María José Brito Nazareno

C.C.: 1727141275

.....
Andrés David Criollo Sandoval

C.C.: 1720110665

Dedicatoria

Dedico este trabajo a mis padres, Xavier Brito y Maritza Nazareno fuente de inspiración y guía en cada paso de este camino académico, por su esfuerzo, apoyo y amor incondicional, han sido mi mayor motivación para culminar este periodo de mi vida.

A mi abuelita, hermanos y toda mi familia por su motivación, confianza y sus consejos que me inspiran a superarme cada día.

A mis mejores amigos Andrés, Adrián y Francisco por su amistad incondicional y a todos mis compañeros con quienes he compartido conocimientos, experiencias y risas.

A mi mejor amiga Alejandra con quien compartí momentos y experiencias inolvidables en el colegio y universidad, una de las personas que más quiero y admiro.

A mis amigos que han formado parte de este proceso en mis años de estudiante, Joe, Paco, Kevin, Daniel, Jimmy, Antony, Pedro y Sebastián.

María José Brito Nazareno

Dedicatoria

Dedico este trabajo principalmente a mi madre Luisa Sandoval quien ha sido el pilar fundamental para todo este proceso y culminación de mi carrera, es la persona que ha estado en toda circunstancia a mi lado, ayudándome y apoyándome. A mi hermana Dennisse Criollo quien es y siempre será mi inspiración a seguir, sus logros me los comparte al igual que yo lo hago con esta dedicatoria. A mi padre Víctor Criollo por ser aquel ser sabio que me llena de consejos y apoyo en mi vida. Al resto de mi familia que siempre me han apoyado y especialmente a mis abuelitos maternos que lamentablemente no se encuentran a mi lado, pero toda su vida la dedicaron a cuidarme, mimarme y amarme como a nadie, donde quiera que se encuentren estas dos personitas especiales les dedico este trabajo que tanto anhelaron poder ver y verme concluir esta etapa.

Dedico este trabajo a mis mejores amigos de la universidad María José Brito, Adrián Araujo y Francisco Ayala que han puesto su granito de arena en mi formación y personalidad, con quienes he compartido los momentos más especiales en esta etapa de mi vida, dedico a todos mis demás amigos que han formado parte de este proceso en mis años de estudiante principalmente a Angélica Almeida, Kevin Suntaxi, Daniel Pisuña, Jimmy Maigua, Andrés Romero, Antony Pilamunga, Pedro Vallejo y Joe Jiménez y por último dedico este proyecto a mi mejor amigo de vida Steven Cueva, que de lejos siempre supo brindarme su compañía y amistad a lo largo de estos años.

Andrés David Criollo Sandoval

Agradecimiento

Expresamos nuestro agradecimiento a todas las personas que han contribuido de manera significativa en la realización de este trabajo de integración curricular. Su apoyo ha sido fundamental en cada etapa de este proceso.

El principal agradecimiento a Dios, quien nos ha guiado y ha dado la fortaleza para seguir adelante.

Extendemos nuestro agradecimiento al Dr. David Carrera, nuestro tutor, por su orientación, paciencia y dedicación. Sus consejos y comentarios críticos han enriquecido enormemente este trabajo.

Nuestro reconocimiento se dirige también a los Ingenieros y Doctores Paulina Guevara, Oliva Atiaga, Petronio Gavilanes y Juan Haro, por su generosa asistencia, paciencia y comprensión en los trabajos de laboratorio, y a todos los ingenieros que conforman el Departamento de Ciencias de la Tierra y de la Construcción, por sus conocimientos compartidos a lo largo de toda la carrera, han sido fundamentales para lograr los resultados esperados durante nuestro trabajo de investigación.

Queremos expresar un especial agradecimiento a nuestros familiares y amigos por su constante respaldo emocional y aliento a lo largo de este desafiante camino.

Igualmente, extendemos nuestro reconocimiento a los estudiantes de 6º, 7º y 8º nivel, cuya colaboración en la recopilación de información ha sido esencial para la conclusión exitosa de este proyecto.

Este logro no habría sido posible sin el esfuerzo colectivo y apoyo incondicional de cada uno de ustedes. Les brindamos nuestro más profundo agradecimiento por ser parte de este viaje académico y por haber contribuido a la realización de este trabajo.

María José Brito y Andrés Criollo

Tabla de Contenidos

| | |
|---|-----------|
| Resumen | 16 |
| Abstract | 17 |
| Capítulo I Generalidades | 18 |
| Introducción..... | 18 |
| Antecedentes..... | 20 |
| Planteamiento del Problema..... | 21 |
| Justificación e importancia..... | 23 |
| Objetivos | 24 |
| Objetivo General..... | 24 |
| Objetivos específicos..... | 24 |
| Capítulo II Fundamentación Teórica..... | 26 |
| Volcán Ilaló | 26 |
| Origen del volcán Ilaló | 27 |
| Primeros asentamientos humanos del volcán Ilaló | 28 |
| Suelo volcánico..... | 29 |
| Formación de la cangahua..... | 29 |
| Características de la cangahua..... | 30 |
| Erosión | 31 |
| Erosión hídrica..... | 32 |
| Erosión eólica | 34 |
| Control de la erosión | 36 |
| Control de la erosión en laderas | 37 |
| Control de la erosión en cuencas..... | 39 |
| Diques de contención..... | 39 |

| | |
|--|-----------|
| Sistema hidrológico | 42 |
| Cuenca hidrográfica | 43 |
| Cantidad de agua | 44 |
| Caudal | 44 |
| Calidad del agua | 45 |
| Variables para evaluar la calidad del agua | 46 |
| Temperatura | 46 |
| Conductividad eléctrica (CE)..... | 47 |
| Potencial hidrógeno (pH)..... | 47 |
| Nutrientes | 48 |
| Sulfatos en el agua..... | 52 |
| Sólidos en suspensión (SST) y sólidos totales disueltos (SDT)..... | 54 |
| Sedimentos en las cuencas | 56 |
| Calidad de los sedimentos | 57 |
| Variables para evaluar la calidad del sedimento | 57 |
| Potencial hidrógeno (pH)..... | 58 |
| Conductividad eléctrica (CE)..... | 58 |
| Densidad..... | 58 |
| Materia orgánica..... | 59 |
| Calidad biológica | 60 |
| Capítulo III Metodología | 62 |
| Descripción del área de estudio | 62 |
| Metodología del proyecto | 62 |
| Toma de muestras de agua y sedimentos | 63 |
| Metodología para el análisis del agua | 63 |
| Análisis de sulfatos, fosfatos, nitratos y sólidos en suspensión | 63 |

| | |
|---|-----------|
| Análisis de pH..... | 64 |
| Análisis de conductividad eléctrica (CE) y sólidos disueltos totales (SDT) | 64 |
| Metodología para el análisis de sedimentos | 65 |
| Análisis de pH y conductividad eléctrica | 65 |
| Análisis de la densidad del sedimento..... | 66 |
| Análisis de la materia orgánica | 67 |
| Metodología para la medición y cálculo del caudal..... | 69 |
| Análisis de la calidad biológica..... | 69 |
| Índices Biológicos..... | 70 |
| Índices de Diversidad..... | 71 |
| Metodología para el procesamiento de datos | 72 |
| Series temporales..... | 73 |
| Componentes de una serie de tiempo | 73 |
| Análisis de una serie temporal | 73 |
| Estacionariedad de una serie temporal | 74 |
| Metodología para la determinación de la zona de instalación de nuevos diques | 75 |
| Capítulo IV Resultados y discusión..... | 77 |
| Tipo de suelo de la microcuenca Urku Huayku..... | 77 |
| Volumen de sedimentos generado en los diques..... | 77 |
| Parámetro hidrológico: precipitación..... | 80 |
| Calidad del agua de la quebrada Urku Huayku | 80 |
| Temperatura | 80 |
| Potencial hidrógeno (pH)..... | 81 |
| Conductividad eléctrica (CE)..... | 84 |
| Nutrientes: Nitratos..... | 87 |
| Nutrientes: Fosfatos | 89 |

| | |
|--|------------|
| | 12 |
| Sulfatos..... | 92 |
| Sólidos en suspensión (SST)..... | 95 |
| Sólidos totales disueltos (SDT)..... | 98 |
| Cantidad de agua de la quebrada Urku Huayku..... | 100 |
| Calidad de los sedimentos de la quebrada Urku Huayku..... | 102 |
| Potencial hidrógeno (pH) y Conductividad eléctrica (CE)..... | 102 |
| Densidad..... | 107 |
| Materia orgánica..... | 112 |
| Calidad biológica..... | 123 |
| Determinación de la zona de instalación de nuevos diques..... | 127 |
| Socialización de los resultados a la Comuna San Francisco de Baños..... | 132 |
| Capítulo V Conclusiones y recomendaciones..... | 133 |
| Conclusiones..... | 133 |
| Recomendaciones..... | 135 |
| Bibliografía..... | 137 |

Índice de tablas

| | |
|--|-----|
| Tabla 1 <i>Clasificación de las aguas de acuerdo a la CE</i> | 64 |
| Tabla 2 <i>Clasificación del suelo, de acuerdo a su pH</i> | 65 |
| Tabla 3 <i>Clasificación del suelo, de acuerdo a su CE</i> | 66 |
| Tabla 4 <i>Clasificación del suelo, de acuerdo a la densidad aparente</i> | 66 |
| Tabla 5 <i>Clasificación del suelo, de acuerdo a la materia orgánica</i> | 68 |
| Tabla 6 <i>pH de las muestras de agua de la microcuenca Urku Huayku</i> | 81 |
| Tabla 7 <i>CE de las muestras de agua de la microcuenca Urku Huayku</i> | 84 |
| Tabla 8 <i>Nitratos de las muestras de agua de la microcuenca Urku Huayku</i> | 87 |
| Tabla 9 <i>Fosfatos de las muestras de agua de la microcuenca Urku Huayku</i> | 90 |
| Tabla 10 <i>Sulfatos de las muestras de agua de la microcuenca Urku Huayku</i> | 92 |
| Tabla 11 <i>SST de las muestras de agua de la microcuenca Urku Huayku</i> | 95 |
| Tabla 12 <i>SDT de las muestras de agua de la microcuenca Urku Huayku</i> | 98 |
| Tabla 13 <i>Caudal de la microcuenca Urku Huayku</i> | 101 |
| Tabla 14 <i>pH de las muestras de sedimento de la microcuenca Urku Huayku</i> | 103 |
| Tabla 15 <i>CE de las muestras de sedimento de la microcuenca Urku Huayku</i> | 105 |
| Tabla 16 <i>Densidad aparente</i> | 108 |
| Tabla 17 <i>Densidad real</i> | 109 |
| Tabla 18 <i>Cromatogramas del mes de abril</i> | 113 |
| Tabla 19 <i>Cromatogramas del mes de junio</i> | 116 |
| Tabla 20 <i>Cromatogramas del mes de julio</i> | 116 |
| Tabla 21 <i>Porcentaje de materia orgánica por calcinación</i> | 120 |
| Tabla 22 <i>Resultados de muestreo antes de la colocación de diques</i> | 124 |
| Tabla 23 <i>Resultados de muestreo después de la colocación de diques</i> | 126 |
| Tabla 24 <i>Porcentaje de la pendiente de cada tramo de la microcuenca Urku Huayku</i> | 128 |
| Tabla 25 <i>Porcentaje de la pendiente de cada tramo de la microcuenca Urku Huayku</i> | 130 |

Índice de figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1 <i>Cárcavas y cangahua aflorante en el volcán Ilaló</i> | 19 |
| Figura 2 <i>Crecimiento poblacional de 50 años en la zona del volcán Ilaló</i> | 22 |
| Figura 3 <i>Mapa hidrológico del Volcán Ilaló</i> | 26 |
| Figura 4 <i>Mapa geológico del Volcán Ilaló</i> | 28 |
| Figura 5 <i>Presencia de cangahua en el Volcán Ilaló</i> | 30 |
| Figura 6 <i>Signos de erosión visibles en el campo</i> | 33 |
| Figura 7 <i>Degradación del paisaje por erosión eólica</i> | 36 |
| Figura 8 <i>Geosintéticos para el control de la erosión</i> | 37 |
| Figura 9 <i>Dique de poste de pino ubicado en la cuenca poniente del poblado de Sierras de Bellavista, Chile</i> | 40 |
| Figura 10 <i>Acumulación de sedimentos por la implementación de diques</i> | 41 |
| Figura 11 <i>Esquema de una cuenca Hidrográfica</i> | 43 |
| Figura 12 <i>Proceso de eutrofización</i> | 49 |
| Figura 13 <i>Proliferación de algas por presencia excesiva de fósforo en ríos</i> | 51 |
| Figura 14 <i>Presencia de sulfato de hierro en un arroyo</i> | 53 |
| Figura 15 <i>Proceso de sedimentación</i> | 56 |
| Figura 16 <i>Composición de un suelo común</i> | 59 |
| Figura 17 <i>Macroinvertebrados presentes en el corte transversal de un río</i> | 60 |
| Figura 18 <i>Delimitación de la microcuenca Urku Huayku</i> | 62 |
| Figura 19 <i>Recopilación de muestras con red Surber</i> | 70 |
| Figura 20 <i>Niveles de tolerancia BMWP y ABI</i> | 71 |
| Figura 21 <i>Índice de diversidad Shannon</i> | 72 |
| Figura 22 <i>Representación gráfica de una serie temporal</i> | 73 |
| Figura 23 <i>Página de la NASA para obtener el raster de la zona de estudio</i> | 75 |
| Figura 24 <i>Acumulación de sedimentos</i> | 77 |

| | |
|---|-----|
| Figura 25 Volumen de sedimentos en los diques de la microcuenca Urku Huayku..... | 78 |
| Figura 26 Serie temporal del pH en las muestras de agua de cada dique | 82 |
| Figura 27 Serie temporal de la CE en las muestras de agua de cada dique..... | 85 |
| Figura 28 Serie temporal de los nitratos en las muestras de agua de cada dique | 88 |
| Figura 29 Serie temporal de los fosfatos en las muestras de agua de cada dique | 91 |
| Figura 30 Serie temporal de los sulfatos en las muestras de agua de cada dique | 93 |
| Figura 31 Serie temporal de los SST en las muestras de agua de cada dique..... | 96 |
| Figura 32 Serie temporal de los SDT en las muestras de agua de cada dique..... | 99 |
| Figura 33 Serie temporal del caudal de la microcuenca Urku Huayku | 102 |
| Figura 34 Relación de pH y profundidad de una muestra | 104 |
| Figura 35 Presencia de sulfato de hierro en la microcuenca..... | 105 |
| Figura 36 Relación de CE ($\mu S\ cm^{-1}$) y la profundidad de una muestra | 106 |
| Figura 37 Relación de densidad aparente $g\ cm^{-3}$ y profundidad de una muestra | 108 |
| Figura 38 Compactación de los sedimentos..... | 110 |
| Figura 39 Relación de densidad real $g\ cm^{-3}$ y profundidad de una muestra..... | 111 |
| Figura 40 Diferenciación de zonas en el cromatograma | 115 |
| Figura 41 Diferenciación de zonas en el cromatograma | 118 |
| Figura 42 Posibles resultados de cromatografía en papel | 119 |
| Figura 43 Presencia de excremento en las cercanías de la microcuenca | 121 |
| Figura 44 Relación de materia orgánica y la profundidad de la muestra | 122 |
| Figura 45 Calidad biológica antes de la colocación de diques..... | 124 |
| Figura 46 Calidad biológica después de la colocación de diques..... | 126 |
| Figura 47 Tramos de la microcuenca Urku Huayku..... | 127 |
| Figura 48 Histograma de frecuencias altimétricas de la microcuenca Urku Huayku..... | 129 |
| Figura 49 Partes de una cuenca hidrográfica | 131 |

Resumen

Los suelos de la Sierra ecuatoriana presentan problemas de erosión, en especial los que son de origen volcánico, el volcán Ilaló, ubicado en la provincia de Pichincha, es uno de los lugares con mayor tasa de erosión del suelo, aproximadamente 2 t/ha-año. De igual manera, en 100 años ha perdido aproximadamente el 80% de sus vertientes, es por eso que se debe manejar la cuenca hidrográfica de manera integral, teniendo el control tanto del agua, como del suelo. Por lo tanto, el objetivo de este trabajo fue generar una serie temporal de datos de calidad y cantidad de agua y sedimentos, así como también la calidad biológica que se generó en los tres diques construidos en la quebrada Urku Huayku, ubicada en el volcán Ilaló, como una medida de solución basada en la naturaleza para rescatar los suelos y mejorar la cantidad y calidad de las aguas, mediante la recolección semanal de muestras de agua y sedimentos, que posteriormente fueron monitoreados a través de métodos estandarizados en el laboratorio de medio ambiente y mecánica de suelos, y procesados estadísticamente con la ayuda del software libre RStudio, el cual, sirvió para analizar la variación de cada parámetro a lo largo del tiempo y buscar una tendencia en ellos, demostrando así, que estas intervenciones fueron efectivas, ya que se aportó al cumplimiento del objetivo de desarrollo sustentable ODS #6: Agua limpia y saneamiento y #15: Vida de ecosistemas terrestres. Además, utilizando el software libre QGIS se determinó en que otros puntos de la quebrada es factible la colocación de más diques para prevenir la erosión del suelo en dichas zonas del volcán Ilaló. Finalmente, los resultados obtenidos del proyecto fueron comunicados a la comunidad de San Francisco de Baños y el colectivo Ilaló Verde.

Palabras clave: calidad, cantidad, agua, sedimentos, Urku Huayku.

Abstract

The soils of the Ecuadorian Sierra present erosion problems, especially those of volcanic origin, the Ilaló volcano, located in the province of Pichincha, is one of the places with the highest rate of soil erosion, approximately 2 t/ha- anus. In the same way, in 100 years it has lost approximately 80% of its slopes, which is why the hydrographic basin must be managed in an integral way, having control of both water and soil. Therefore, the objective of this work was to generate a time series of water and sediment quality and quantity data, as well as the biological quality that was generated in the three dams built in the Urku Huayku stream, located on the Ilaló volcano. , as a nature-based solution measure to rescue soils and improve the quantity and quality of water, through the weekly collection of water and sediment samples, which were subsequently monitored through standardized methods in the environmental laboratory. and soil mechanics, and statistically processed with the help of the free software RStudio, which served to analyze the variation of each parameter over time and look for a trend in them, thus demonstrating that these interventions were effective, since Contribution was made to meeting the sustainable development goal SDG #6: Clean water and sanitation and #15: Life on land. In addition, using the free QGIS software, it was determined in which other points of the ravine it is feasible to place more dikes to prevent soil erosion in said areas of the Ilaló volcano. Finally, the results obtained from the project were communicated to the community of San Francisco de Baños and the Ilaló Verde collective.

Key words: quality, quantity, water, sediments, Urku Huayku.

Capítulo I

Generalidades

Introducción

El volcán Ilaí se ha convertido en una zona urbanizada y de gran concurrencia para turistas y deportistas, como consecuencia, sus zonas hídricas se han visto deterioradas, actualmente ha presentado problemas por la realización de actividades agrícolas inapropiadas, destrucción de los bosques por la tala de árboles, y la principal, la erosión del suelo que es considerada una de las crisis ambientales más graves en la actualidad a nivel mundial, (Tian et al., 2021), producto del aumento de las actividades humanas (Chuenchum et al., 2020).

La erosión es un proceso complejo impulsado por muchos factores, como las precipitaciones, el suelo, la topografía, la vegetación y las prácticas de gestión del uso de la tierra (Delgado et al., 2022).

El estrato principal del suelo de la quebrada Urku Huayku es la Cangahua, este material derivado de la fragmentación de las cenizas volcánicas endurecidas, es fuertemente propenso a la erosión pluvial, esta erosión del suelo causada por las lluvias es uno de los principales problemas de degradación del suelo en Ecuador y tiene importantes implicaciones en la conservación y manejo de los recursos hídricos y del suelo (Delgado et al., 2022).

La degradación del suelo provocada por la erosión causa la disminución de producción de cultivos y del rendimiento del suelo, ya que, se reduce la velocidad de absorción del agua, esto afecta su capacidad de retención, nutrientes y biota, poniendo en riesgo la seguridad alimentaria global, y generando la pérdida de grandes terrenos de cultivo cada año, lo que resulta en considerables pérdidas económicas (Matthews et al., 2022). También tiene un impacto en los servicios ecosistémicos como la calidad y cantidad del agua y de sedimentos.

Es indispensable enfrentar la erosión del suelo para cumplir con los objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la ONU (López-Ruiz et al., 2020), que reconoce el acceso al agua como un derecho humano (Hinojosa et al., 2017), mencionado en el objetivo número 6, el cual, garantiza la disponibilidad y la gestión sostenible del agua y el saneamiento para todos (Arcentales-Ríos et al., 2022), esto implica que la población necesita disponer de un abastecimiento satisfactorio, seguro y de fácil acceso. Y el objetivo número 15, el cual hace hincapié en proteger, restaurar y fomentar la práctica sostenible de mantener los ecosistemas terrestres, gestionar los bosques, luchar contra la desertificación y detener la degradación de la tierra y, por lo tanto, restringir la pérdida de biodiversidad (Nirmal & Jacob, 2022).

En el año 2021, como parte de un trabajo de titulación, se realizó una propuesta de recuperación hidrológica de la quebrada Urku Huayku, que pertenece al vocal Ilaló, se tomó como base los problemas de cárcavas que se formaban en el suelo de la zona debido a la erosión, como se observa en la Figura 1, se eligieron las zonas con mayor falta de vegetación y pendientes pronunciadas para colocar diques de caña guadua, que además de ser un material biodegradable, también es asequible (Duarte et al., 2021).

Figura 1

Cárcavas y cangahua aflorante en el volcán Ilaló



Nota. Recuperado de (I. Palacios Orejuela et al., 2020).

Los diques son estructuras efectivas para la conservación del suelo y el agua en todo el mundo, que juegan un papel importante en la preservación y control de la erosión del suelo, así como también para interceptar los sedimentos (Luan et al., 2022), son una de las medidas de ingeniería más eficaces para reducir la pérdida del suelo y agua y han sido ampliamente promovidas y construidas en todo el mundo (Qin et al., 2022)

Por lo tanto, el objetivo de este trabajo fue generar una serie temporal de datos de calidad y cantidad de agua y sedimentos, así como también la calidad biológica que se generó en los tres diques construidos en la quebrada Urku Huayku, como una medida de solución basada en la naturaleza para rescatar los suelos y mejorar la cantidad y calidad de las aguas, mediante la recolección y análisis de muestras de agua y sedimentos, a través de métodos estandarizados y procesados estadísticamente con la ayuda del software libre RStudio, el cual, sirvió para analizar la variación de cada parámetro a lo largo del tiempo, demostrando así, que estas intervenciones fueron efectivas, Además, utilizando el software libre QGIS se determinó en que otros puntos de la quebrada es factible la colocación de más diques para prevenir la erosión del suelo en dichas zonas del volcán Ilaló.

Antecedentes

A lo largo de la historia de la humanidad, se ha mantenido una estrecha conexión con el medio ambiente, ya que se han utilizado los recursos que nos brinda para obtener la materia prima necesaria para el desarrollo de los seres humanos.

El suelo y el agua se reconocen como recursos naturales renovables, es decir, que tienen la capacidad de regenerarse a lo largo del tiempo. Su utilización y manejo deben ser abordados desde una perspectiva de largo plazo, en consonancia con el enfoque de desarrollo sustentable y la promoción de una agricultura sostenible (Villasanti et al., 2013).

Aproximadamente el 25% de la superficie de los países andinos de Latinoamérica, son capas de suelo de origen volcánico compactados en diversas profundidades (Taruchaín Arteaga, 2020).

En Ecuador, investigaciones previas indican que existe una superficie alrededor de 240,000 hectáreas en todo el país. De estas, aproximadamente 36,000 hectáreas se encuentran a nivel superficial debido a la erosión, mientras que otras 44,000 hectáreas tienen una capa de suelo fértil de aproximadamente 20 centímetros de espesor, adecuada para actividades agrícolas (I. F. Palacios Orejuela et al., 2018).

Un ejemplo de una formación edofóbica que contribuye significativamente a los procesos de erosión del suelo es la cangahua (Trujillo & Zebrowski, 1998). Esta formación geológica está compuesta por cenizas ryodacíticas (Podwojewski & Germain, 2005). La cangahua proviene de flujos piroclásticos que ocurrieron durante el período Cuaternario. Esta formación se forma principalmente por la acumulación de cenizas volcánicas de tamaño inferior a 2 mm, las cuales son resultado de caídas piroclásticas.

Una parte significativa del suelo presente en el volcán Ilaló está siendo afectada por procesos erosivos, los cuales tienen causas naturales y antropogénicas. Además, la existencia de cangahua en este suelo limita las oportunidades para llevar a cabo actividades agrícolas (Chuquimarca Lala & Toaza Vinueza, 2012).

Planteamiento del Problema

La topografía accidentada característica de la región andina de Ecuador, junto con el uso inapropiado de técnicas agrícolas y la deforestación, ha resultado en la erosión del suelo en las faldas del volcán Ilaló, dicho fenómeno afecta gravemente a los ecosistemas y las actividades agrícolas en Ecuador. La presencia de cangahua empeora este problema, ya que, las precipitaciones y el viento aumentan notablemente la pérdida de suelo y provocan la exposición de esta capa endurecida en la superficie.

La pérdida de suelo debido a la erosión tiene impactos directos en los

ecosistemas, ya que provoca la degradación de la biodiversidad, la pérdida de hábitats naturales y la alteración de los ciclos hidrológicos.

La quebrada Urku Huayku perteneciente al volcán Ilaló presenta problemas de deterioro de sus zonas hídricas debido a la erosión por la rápida urbanización de la zona, como se indica en la Figura 2 y la falta de conocimiento del manejo de recursos naturales como son el suelo y el agua por parte de la comunidad.

Figura 2

Crecimiento poblacional de 50 años en la zona del volcán Ilaló



Nota. Recuperado de (El Comercio, 2019).

La calidad del suelo se ve deteriorada por la erosión y por la pérdida de fertilidad, estos factores pueden restringir la capacidad de autosustento y la seguridad en la disponibilidad de alimentos. Esto es especialmente preocupante para los pequeños agricultores, cuyos medios de vida dependen de los rendimientos de sus cultivos. Estos desafíos agravan la pobreza alimentaria y sus consecuencias (Cotler et al., 2020).

El deterioro de las zonas hídricas se refiere a los efectos negativos que afectan a los cuerpos de agua, como ríos, lagos y cuencas. Esto incluye la contaminación del agua, la disminución de la calidad y cantidad de recursos hídricos, así como la alteración de los ecosistemas acuáticos. Este problema es especialmente preocupante, ya que el agua es un recurso esencial para la supervivencia humana y diversas actividades productivas (Rehman Khan et al., 2022).

Debido al aumento de la demanda del agua, la escasez y el deterioro de la calidad del agua se están convirtiendo en una gran preocupación en varias partes del mundo (S. Hou et al., 2023).

En Ecuador la falta de estudios sobre la erosión del suelo, es alarmante y genera la incompreensión de las consecuencias que este fenómeno natural puede causar (Tian et al., 2021).

La comuna “San Francisco de Baños”, aledaña a la quebrada necesita garantizar que el agua que recorre por este tramo se la pueda llegar a utilizar como un recurso para trabajar la tierra y su ganado por lo que, las evaluaciones integrales de servicios de agua y escasez de agua requieren información que integre tanto la cantidad como la calidad del agua (Yin & Xu, 2020).

Justificación e importancia

El volcán inactivo Ilaló, como la mayoría de los páramos del Ecuador funciona como el inicio de vertientes de agua, las cuales sirven para sustentar a las poblaciones que se encuentran a su alrededor. El problema actual de los recursos hídricos en todo el mundo es uno de los asuntos importantes para superar los obstáculos al desarrollo sostenible (Costa E Silva et al., 2020).

Existe un problema de erosión en el volcán Ilaló por diversos factores, entre ellos, la actividad de tala de árboles en la zona y las inadecuadas prácticas agrícolas, lo cual ha tenido como consecuencia el deterioro en la calidad y cantidad de agua en sus vertientes. Anteriormente, se realizaron estudios en la quebrada Urcu Huayku para analizar la situación en este sector, concluyendo con la propuesta y desarrollo de diques en puntos estratégicos para la conservación y mejoramiento del agua y sus sedimentos.

El objetivo de los diques colocados a lo largo de la quebrada, fue retener el mayor tiempo posible el agua para provocar un mejoramiento en el suelo, reteniendo minerales y nutrientes en los sedimentos, que sirven para regenerar la estructura y la capacidad

biológica del suelo, ya que permite la existencia de macroinvertebrados acuáticos, que son el bioindicador más eficaz para evaluar la calidad del agua (Gamboa et al., 2008).

Es así que este proyecto tuvo como finalidad demostrar que el uso de diques construidos con materiales biodegradables en puntos estratégicos, mejora la calidad y cantidad de agua y sedimentos, así como también la calidad biológica a lo largo de la quebrada Urcu Huayku, proporcionando información obtenida en laboratorio para justificar el efecto que tienen los diques colocados en la zona.

A través de este proyecto se evidenció que con obras básicas y de bajo presupuesto se pueden rescatar quebradas, las cuales tienen un impacto tanto ecológico y económico para la comuna que vive a los alrededores de la quebrada.

Es importante demostrar que los diques naturales cumplen con su finalidad para servir de ejemplo a otros sectores que necesitan de estas obras civiles para controlar la calidad y cantidad de sus aguas y mejorar ecológicamente sus tierras.

Objetivos

Objetivo General

Generar una serie temporal de datos históricos de calidad y cantidad de agua y sedimentos, así como también la calidad biológica que se están generando en los diques construidos con materiales biodegradables en la quebrada Urcu Huayku, ubicada en el volcán Ilaló, como una medida de solución basada en la naturaleza para rescatar los suelos y las aguas, así, demostrar que con obras civiles básicas y de bajo presupuesto se pueden rescatar las quebradas.

Objetivos específicos

- Recopilar información histórica de previos análisis y recolectar datos actuales semanales de muestras de agua, sedimentos y macroinvertebrados de los diques ubicados en la quebrada Urcu Huayku, así como la medición del caudal y volúmenes de sedimentos generados en el sitio.

- Monitorear semanalmente la cantidad y calidad, tanto del agua, como de los sedimentos, a través, de los métodos estandarizados en el laboratorio de medio ambiente y de mecánica de suelos del campus matriz de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, para generar una serie temporal en la quebrada Urku Huayku.
- Procesar estadísticamente en el software libre RStudio, las series temporales generadas en cantidad y calidad del agua y de sedimentos, para así demostrar que la construcción de los diques, como una solución basada en la naturaleza, es una alternativa viable.
- Desarrollar el modelamiento de la quebrada Urku Huayku en el software libre QGIS para evaluar en que puntos estratégicos es necesario implementar diques que contribuyan a la rehabilitación del suelo y agua de la zona.
- Socializar con la comunidad San Francisco de Baños ubicada en el volcán Ilaló los resultados obtenidos del trabajo de integración curricular.

Capítulo II

Fundamentación Teórica

Volcán Ilaló

El volcán Ilaló es un estratovolcán extinto, que se ubica en la cordillera de los Andes, en la provincia de Pichincha, su altura es de 3200 m.s.n.m y posee pendientes de 50 a 70° con gran riesgo de movimiento de masa, su zona es considerada como una región subhúmeda (Cornejo, 1983).

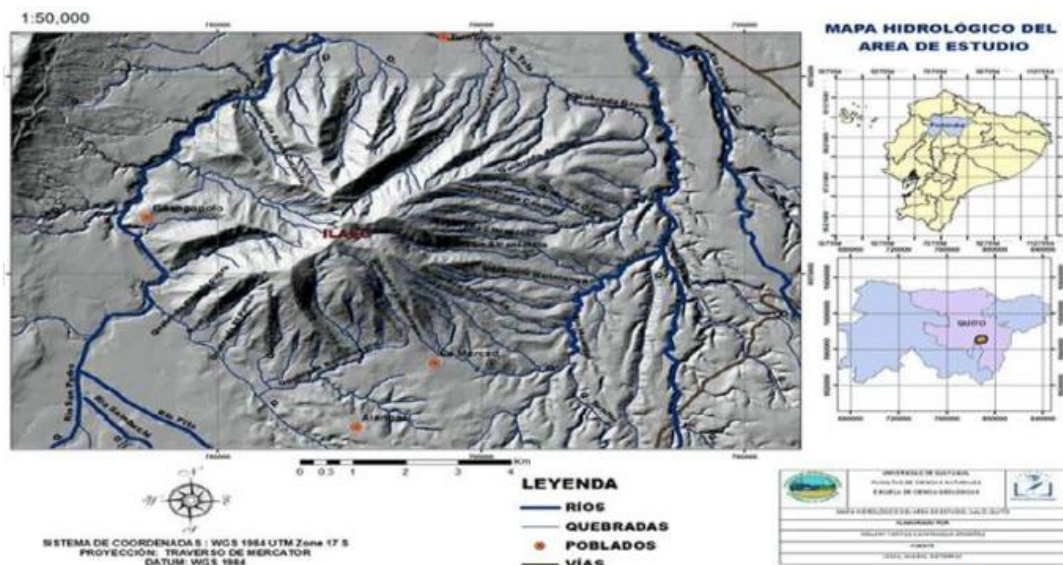
La precipitación anual promedio en la zona es de 1300 mm, con la presencia de dos estaciones lluviosas. La estación principal abarca desde enero hasta junio, mientras que la segunda ocurre de octubre a diciembre. La temperatura mensual promedio es de 15,7°C, con una humedad relativa del 75% y más de 2000 horas de insolación al año. (Carrera-Villacrés et al., 2019).

Los fluidos del Ilaló son de tipo bicarbonatados-sódico, con componentes magnésicos. Se encuentra conformado por lavas volcánicas diaclasadas, formación de cangahua, tobas andesíticas de color café claro, lapilli y cenizas, está compuesto por diversas formaciones geológicas de origen Pleistocénico, incluyendo rocas andesíticas, máficas, basálticas, brechas y lavas (Cornejo, 1983).

El volcán Ilaló forma parte de la cuenca del río Esmeraldas, ya que allí corresponde su demarcación hidrográfica. Presenta varias quebradas y microcuencas que drenan hacia los ríos San Pedro y Chiche como indica la Figura 3. En la ladera sur del volcán Ilaló se encuentra la quebrada Urku Huayku.

Figura 3

Mapa hidrológico del Volcán Ilaló



Nota. Recuperado de (Caiminagua, 2020).

El volcán Ilaló se encuentra rodeado por 12 comunas, conformadas por una población aproximada de 9000 habitantes. Por lo general los habitantes de las comunidades dedican la mayor parte de su tiempo a las actividades de agricultura y ganadería. También es una importante zona de turismo donde se realizan actividades como caminatas, ciclismo, camping, además de contar con varios balnearios.

En cuanto a la vegetación es común encontrar pasto, cultivos, bosques de eucalipto, arbustos y zonas sin cobertura vegetal debido a la erosión por el desarrollo de la agricultura (Caiminagua, 2020).

Origen del volcán Ilaló

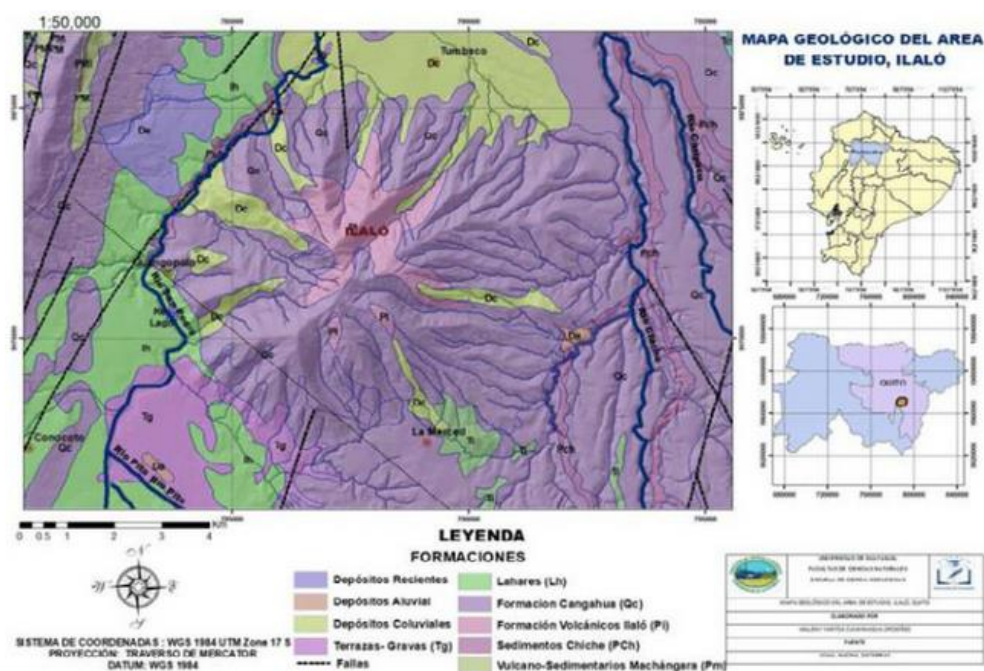
El volcán Ilaló pertenece a uno de los nueve volcanes que conforman la Hoya de Guayllabamba. Se formó durante el periodo Cuaternario, en la época del Holoceno, que corresponde al Plio-Pleistoceno Inferior. Tiene una edad estimada de 1.62 millones de años y se caracteriza por ser un cono volcánico de forma irregular. Su composición principal está constituida por lavas y brechas volcánicas (Cornejo, 1983). Se estima que el periodo de formación del volcán Ilaló fue: formación del volcán, erosión glaciár,

acumulación de cangahua, acumulación y formación del chiche, erosión, segunda acumulación de cangahua y formación del suelo actual (López, 1985).

En la Figura 4, se observa el mapa geológico de la zona de estudio, donde se demuestra que la zona de estudio es una formación de cangahuas.

Figura 4

Mapa geológico del Volcán Ilaló



Nota. Recuperado de (Caiminagua, 2020).

Primeros asentamientos humanos del volcán Ilaló

Se manifiesta que los primeros aparecimientos de humanos en esta área datan de alrededor de 12,000 años a.C (Costales, 2006). Los hallazgos, encontrados en su mayoría ubicados cerca de quebradas o pequeños cursos de agua, indican que el área estaba densamente poblada y se utilizaba como lugar de paso o descanso. No se encontraron evidencias de asentamientos permanentes, solo se hallaron herramientas de obsidiana (Salazar, 1980).

Existen evidencias que sugieren que alrededor del año 4,000 a.C, los seres humanos comenzaron a practicar la agricultura utilizando cultivos nativos como el maíz, el frijol y la papa. Sin embargo, en ese tiempo, las comunidades indígenas tenían un enfoque de conservación y cuidado del territorio, utilizando únicamente la superficie necesaria para su sustento y manteniendo en buen estado los bosques, fuentes de agua y ríos. A partir del año 1534, cuando se estableció el cabildo de Quito, empezó la explotación de las laderas del volcán Ilaló debido a la repartición de tierras a indígenas y españoles (Costales, 2006).

Se puede afirmar que la deforestación intensiva ha sido una constante desde la época colonial hasta la actualidad, y se han registrado eventos como incendios forestales que también han contribuido a la propagación de la erosión del suelo.

Suelo volcánico

Los suelos volcánicos ocupan aproximadamente la cuarta parte del área de algunos países de América del Sur y América Central, estos materiales volcánicos se localizan en los lahares de los volcanes, es necesario mejorar las propiedades de estos suelos y sean eficientes para las actividades agrícolas.

En Ecuador y muchos países de Latinoamérica, existen grandes áreas de terreno proveniente de cenizas volcánicas, estas se conocen como cangahua.

Formación de la cangahua

En la actualidad, una extensa área del volcán Ilaló se encuentra recubierta por una capa de material conocido como Cangahua. Este depósito eólico consiste en una mezcla de piroclastos de origen, edad y composición variada que se ha acumulado en la superficie a lo largo de un periodo de tiempo prolongado. El espesor de esta capa de Cangahua puede alcanzar entre 30 y 100 metros (Estrella et al., 1983).

Se trata de un tipo de suelo formado por piroclastitas que se han endurecido tras la emisión volcánica y que generalmente constituye la capa dura que se encuentra en el

perfil del suelo. Aproximadamente el 20% del valle interandino de Ecuador está cubierto por este suelo denominado cangahua (Zebrowsky, 1996).

La cangahua superficial se encuentra presente a lo largo del callejón interandino, formando parte de las vertientes. Este material volcánico tiene una distribución altitudinal que va desde los 1,320 metros sobre el nivel del mar (msnm) hasta los 4,030 msnm. Es importante destacar que la aparición de cangahua en la superficie, especialmente en altitudes entre 3,300 y 4,000 msnm, indica un uso irracional del suelo y su degradación en las zonas altoandinas. Esta situación genera un impacto negativo en las vertientes naturales presentes en estas áreas (Quishpe, 2019).

En la Figura 5 se puede observar la presencia de cangahua en la parte baja de las laderas del volcán Ilaló cubierta por una capa de suelo en la parte superior.

Figura 5

Presencia de cangahua en el Volcán Ilaló



Nota. Fotografía tomada por el Dr. David Carrera en una visita técnica al volcán Ilaló.

Características de la cangahua

La palabra "Cangahua" proviene del quichua y se refiere a un tipo de suelo caracterizado por su dureza y falta de fertilidad. También se le conoce como "arena seca"

debido a su textura arenosa y limosa. La textura del suelo varía desde franco arcilloso hasta franco arenoso, siendo la cantidad de arcilla generalmente inferior al 40 %, excepto en casos excepcionales. Los porcentajes aproximados son: arena 38 %, limo 35 % y arcilla 27 % (C. Prat et al., 1997).

Este suelo tiene una baja concentración de nutrientes, es compacto y presenta dificultades para trabajarla (Brown et al., 2017), tiene características físicas y químicas que limitan la penetración del agua, pues su capacidad de infiltración es mínima (Taruchaín Arteaga, 2020) y el desarrollo normal de las raíces de ciertas plantas que se adapten a estos ambientes.

La cangahua presenta varias limitaciones en términos de su uso para fines agrícolas. Entre estas limitaciones se encuentran su dureza, su bajo contenido de materia orgánica, nitrógeno y fósforo, así como una actividad biológica reducida (Etchevers et al., 1992).

Erosión

La erosión del suelo representa una de las principales razones de la degradación de la tierra a nivel mundial, poniendo en riesgo la seguridad alimentaria y los beneficios proporcionados por los ecosistemas (Arias-Muñoz et al., 2023).

La erosión es el fenómeno en el cual las partículas del suelo se desprenden, se transportan y se depositan nuevamente mediante la acción de agentes naturales, tales como el agua y el viento, sin embargo, su magnitud y extensión está influenciada por factores como la topografía, el clima y la vegetación (Han et al., 2023).

En la región interandina de la Sierra ecuatoriana, se han presentado diversas problemáticas que incluyen altas tasas de deforestación, un crecimiento desordenado de la población, cambios en el uso del suelo y una topografía escarpada. Estos factores han contribuido al avance de los procesos erosivos, provocando el deterioro del suelo, que es un recurso mayormente no renovable y esencial para la vida. Asimismo, el uso incorrecto

de técnicas agrícolas y el mal clima son obstáculos para la preservación de terrenos aptos para la agricultura, los cuales se expanden ha regiones de elevada altitud, poniendo en peligro los bosques y los suelos de páramo (Breure et al., 2018).

Se estima que alrededor del 47,9% del territorio ecuatoriano presenta erosión en diferentes niveles de intensidad. La región de la Sierra es la más severamente afectada por el proceso de erosión activa. Esta situación se debe a que, durante el invierno, la erosión hídrica es el proceso dominante, mientras que en verano prevalece la erosión eólica (Camila Antonella Hinojosa Jara, 2019).

Erosión hídrica

La erosión hídrica, causada por el agua, no solo provoca la erosión in situ, sino que también conlleva efectos externos, como la pérdida de nutrientes, la contaminación del agua y el daño a los ecosistemas marinos (Borrelli et al., 2022).

Las precipitaciones son la base de la erosión hídrica, (Lai et al., 2016) El proceso de erosión del suelo se ha acelerado debido al aumento en la frecuencia de precipitaciones extremas en las últimas décadas, como resultado del calentamiento global (Dai et al., 2023).

La creciente magnitud de las ráfagas de lluvia de corta duración, como subproducto del aumento de la temperatura, tiene el potencial de causar impactos erosivos y geomórficos significativos (Shmilovitz et al., 2023).

La tasa de erosión en una cuenca está influenciada por diversos factores fisiográficos naturales y sociales. Los cambios en la cobertura del suelo pueden tener un impacto significativo en la erosión y representar una amenaza para la conservación del suelo. Las áreas con una alta cobertura de vegetación natural son más resistentes a la erosión, ya que la vegetación actúa como una protección contra el impacto directo de las gotas de lluvia y reduce la generación de escorrentía al mejorar la infiltración.

En el ámbito agrícola, la erosión del suelo plantea un desafío importante en términos de sostenibilidad y productividad, ya que provoca la degradación y contaminación del medio ambiente. La disminución de la capa de suelo cultivable conlleva a una reducción en la fertilidad del suelo, lo que a su vez limita su habilidad para retener tanto agua como nutrientes, afectando negativamente el desarrollo de los cultivos (Carrera Villacrés, 2022). Este efecto tiene consecuencias en la seguridad alimentaria de la población, especialmente en las comunidades rurales que confían en la agricultura como su principal fuente de sustento (Dong et al., 2023).

Las actividades humanas también son un factor importante que influye en la erosión hídrica. La tasa acelerada de urbanización y el aumento significativo de la densidad de población han dado lugar a un pastoreo y cultivo excesivos (W. Chen et al., 2018). Esto ha generado un entorno propicio para la erosión hídrica al modificar los patrones de uso del suelo, disminuir la cobertura vegetal y ralentizar las velocidades de infiltración (Y. Li et al., 2019). La variabilidad climática y las actividades humanas evidentemente causan cambios en la erosión hídrica.

La erosión hídrica es una realidad constante que afecta a los suelos en todo el planeta Tierra. Los factores que aceleran o reducen la influencia de la erosión son la cantidad e intensidad de precipitación (Echavarría-Cháirez et al., 2020).

En la Figura 6 se observan los tipos de erosión hídrica que se producen en el suelo.

Figura 6

Signos de erosión visibles en el campo



Nota. Recuperado de (Ares & Varni, 2016).

La forestación y la restauración de pastizales intentan reducir la erosión del suelo mediante la revegetación. La vegetación puede mitigar la erosión del suelo reduciendo los efectos de las salpicaduras de lluvia, cubriendo el suelo y disminuyendo las partículas del suelo que se desprenden (Han et al., 2023).

Erosión eólica

La erosión eólica es un fenómeno natural en el que el viento transporta y desgasta partículas de suelo y sedimentos, alterando la superficie terrestre, es una preocupación medioambiental extendida a nivel global, que impacta aproximadamente un tercio de la superficie terrestre y afecta a alrededor de una sexta parte de la población mundial (Yang et al., 2022). Mediante su fuerza, el viento arrastra partículas sueltas a lo largo del terreno, ocasionando impactos y desgaste en rocas y otros materiales del suelo (He et al., 2023).

La intensidad de la erosión eólica está determinada por diversos factores, entre ellos la velocidad del viento, la presencia de material suelto, la cobertura vegetal y la topografía del terreno en la zona afectada (Pierre et al., 2023).

El levantamiento de suelo puede tener efectos significativos, como la degradación del suelo, la disminución de la calidad del aire en áreas afectadas y el aumento de enfermedades respiratorias en los seres humanos. Además, este proceso también puede resultar en la pérdida de nutrientes esenciales del suelo, como carbono, nitrógeno y fósforo (Du et al., 2022), lo que reduce la fertilidad del suelo agrícola. , lo que se traduce en una menor fertilidad del suelo agrícola (Zou et al., 2018).

El incremento del calentamiento global, la disminución de las precipitaciones, la reducción de la vegetación y el aumento de la sequía en determinadas regiones, junto con la disminución de la humedad del suelo y la resistencia del suelo a la erosión eólica, representan una amenaza significativa para la sostenibilidad del ecosistema en desarrollo (J. Li et al., 2023).

La práctica de actividades agrícolas puede contribuir al aumento de la erosión eólica, al mismo tiempo que sufre sus consecuencias (Gholizadeh et al., 2021). Esto tiene un impacto directo en el rendimiento de los cultivos, ya que las plantas pueden resultar dañadas debido a la abrasión, el enterramiento y la deposición de polvo en las hojas. Estos efectos limitan la disponibilidad de radiación solar necesaria para la fotosíntesis. Además, la erosión causada por el viento puede afectar la fertilidad del suelo indirectamente debido a la pérdida de la capa superior del suelo que almacena nutrientes (Bouet et al., 2023).

La erosión eólica puede ocasionar impactos negativos importantes, como la pérdida de suelo fértil, la degradación del paisaje, como se aprecia en la Figura 7, la contaminación del aire debido a las partículas de polvo y afectar la calidad de vida de las personas. Para contrarrestar este proceso, se pueden implementar medidas de

conservación del suelo, como la revegetación, la construcción de barreras y la gestión adecuada de la vegetación.

Figura 7

Degradación del paisaje por erosión eólica



Nota. Recuperado de (Ropero Portillo, 2017).

Control de la erosión

Las acciones irresponsables del ser humano en cuanto al mal manejo de los suelos tienen consecuencias negativas en este recurso, resultando en la pérdida de su fertilidad, la degradación y desertificación del mismo. Estas consecuencias impactan directamente en la disminución y deterioro de los recursos hídricos, la erosión del suelo y un cambio hacia condiciones climáticas más secas (Cortés Lombana, 2004).

A nivel global, se han implementado diversas estrategias y medidas de restauración para combatir la erosión del suelo. Estas incluyen acciones tanto en laderas, como la forestación, la labranza de conservación y la construcción de terrazas, así como medidas aplicadas en canales, como la construcción de presas de retención, la instalación de diques y estructuras de protección de las orillas. Estas medidas tienen

como objetivo prevenir y controlar la erosión, promoviendo la conservación del suelo y la protección de los recursos naturales (Sun & Wu, 2022a).

Control de la erosión en laderas

En vista de la problemática ambiental expuesta, es fundamental llevar a cabo acciones para recuperar la cobertura vegetal del suelo y aplicar medidas de control y mitigación de la erosión. Estas medidas deben basarse en enfoques lo más naturales posible, evitando inducir nuevos impactos ambientales negativos.

La revegetalización ha demostrado ser una técnica efectiva para el manejo de la erosión, ya que aumenta la capacidad para absorber agua del suelo y disminuye la escorrentía superficial. La presencia de vegetación proporciona una protección física al suelo, protegiéndolo del impacto directo de la lluvia y la escorrentía. Además, la vegetación actúa como una barrera que ralentiza la velocidad del agua al aumentar la resistencia hidráulica del terreno. Esto resulta en una disminución de la capacidad erosiva del agua y, por lo tanto, en una reducción de la erosión (Wen & Zhen, 2020).

En ciertos países de Sudamérica, se está observando una tendencia hacia métodos de control de la erosión menos agresivos con el medio ambiente, como se observa en la Figura 8. Una propuesta consiste en el uso de materiales naturales, como mantas o mallas orgánicas y biorrollos o fajinas orgánicas, fabricados principalmente a partir de fibras, muchas de las cuales son de origen y aprovechamiento forestal. Estos materiales, combinados con procesos de fertilización del suelo y revegetalización, ofrecen soluciones ambientales al problema de la erosión del suelo (Díaz Mendoza, 2010).

Figura 8

Geosintéticos para el control de la erosión



Nota. Recuperado de (GEOMATRIX, 2017).

Dado que Asia es uno de los principales productores agrícolas a nivel mundial, es de vital importancia comprender cómo mitigar la erosión del suelo en las áreas agrícolas de la región.

Estudios han concluido que el uso de cultivos de cobertura, técnicas de laboreo y acolchado son métodos recomendados y preferidos para ser aplicados en áreas agrícolas con el fin de mitigar la erosión del suelo. Estas prácticas han demostrado ser efectivas en la reducción de la tasa de pérdida de suelo.

El acolchado es una técnica que implica la incorporación de residuos vegetales en el suelo. Esta práctica tiene como objetivo reducir la erosión y la pérdida de suelo al incrementar el contenido de materia orgánica y disminuir la escorrentía superficial.

La implementación de cultivos de cobertura favorecerá una mayor eficiencia en la absorción del agua por parte del suelo, ya que mejora su capacidad de retención e infiltración. Además, la presencia de una cubierta vegetal, como las leguminosas, no solo reduce la erosión del suelo mediante la infiltración y la disminución de la escorrentía superficial, sino que también enriquece los nutrientes del suelo, indispensables para el desarrollo de los cultivos, dado que las leguminosas son ricas en contenido de nitrógeno (Pan et al., 2017).

Control de la erosión en cuencas

Durante las últimas décadas, se han implementado medidas clave para combatir la erosión en cuencas hidrográficas, tales como estructuras de caída en la parte superior, diques de contención en el lecho del río y la instalación de barreras para la conservación del suelo y el agua a lo largo de cuenca.

Las pequeñas cuencas hidrográficas son unidades esenciales en la planificación y construcción de presas de retención. Por lo tanto, es de suma importancia realizar una estimación precisa y una evaluación adecuada de las tasas de erosión del suelo y la deposición de sedimentos en estas cuencas. Esto es clave para el diseño de medidas de conservación del suelo y del agua, así como para implementar una gestión regional integral (Wei et al., 2022).

De todas las medidas de conservación del suelo disponibles, la construcción de diques de contención a lo largo de arroyos y canales se destaca como uno de los métodos más efectivos y ampliamente empleados para combatir la erosión del suelo y atrapar sedimentos (Abbasi et al., 2019).

Diques de contención

Por lo general, se describen como estructuras transversales que se construyen a lo largo del lecho de los arroyos con el propósito de regular el flujo de agua y controlar el transporte de sedimentos (Lucas-Borja et al., 2019). Estas estructuras de canal permanentes o temporales se construyeron utilizando diversos materiales, como piedras, tierras, troncos de madera, como se aprecia en la Figura 9, sacos de arena, gaviones, roca suelta, mampostería u hormigón colocada a través del canal de flujo (Borja et al., 2018). Su historia de construcción se remonta aproximadamente a hace 100 años (Robichaud et al., 2019). Se han construido numerosos diques de contención en todo el mundo, especialmente en regiones propensas a la erosión, como China, España, Estados Unidos, Italia y Etiopía (Sun & Wu, 2022b).

Figura 9

Dique de poste de pino ubicado en la cuenca poniente del poblado de Sierras de Bellavista, Chile



Nota. Recuperado de (Navarro et al., 2001).

La construcción de diques de contención es una práctica ampliamente empleada en la gestión de cuencas hidrográficas degradadas. Se ha utilizado a nivel mundial para diversos fines, como el control de inundaciones, la mejora del abastecimiento de agua, el desarrollo de tierras agrícolas y la restauración de cuencas hidrográficas, entre otros (Lucas-Borja & Antonio-Zema, 2023).

Los diques de contención son estructuras construidas en canales para capturar los sedimentos que se encuentran aguas arriba. Generalmente, se forma un pequeño embalse detrás de la presa de contención, donde los sedimentos se acumulan gradualmente. Estos sedimentos atrapados forman una acumulación detrás del dique, lo que resulta en una disminución de la pendiente del cauce, disminución de la velocidad de los flujos cargados de sedimentos y la reducción de la carga de sedimentos aguas abajo, controlando así las inundaciones y estabilizando las laderas erosionadas (Galicia et al., 2019).

Se han implementado diques de contención de sedimentos con el propósito de crear áreas de cultivo al atrapar los sedimentos, como se aprecia en la Figura 10. Estas estructuras han demostrado ser la medida más efectiva para controlar la erosión en las mesetas, ya que no solo capturan los sedimentos, sino que también controlan la formación de barrancos y reducen la energía potencial de erosión (Z. Y. Chen et al., 2019).

Figura 10

Acumulación de sedimentos por la implementación de diques



Nota. En estas imágenes se aprecia la acumulación de sedimentos después de una temporada de lluvias en una cuenca ubicada en Chile. Recuperado de (Navarro et al., 2001).

Los sedimentos acumulados por las presas de contención tienen el potencial de servir como almacenamiento de carbono, contribuyendo así a la mitigación del cambio climático. Estos sedimentos forman áreas planas y fértiles adecuadas para la agricultura, con abundancia de nutrientes y agua, lo que favorece el crecimiento de la vegetación y brinda soporte al ganado. Además de sus funciones principales, los diques de contención también desempeñan un papel en la purificación del agua, la recarga de los acuíferos, la reducción de daños por inundaciones y la disminución de la carga de nutrientes, como el nitrógeno y el fósforo, en la escorrentía hacia las masas de agua (Yao et al., 2022).

La productividad de las tierras agrícolas generadas a través de la construcción de presas de contención es significativamente mayor, aproximadamente de 8 a 10 veces, en comparación con las tierras agrícolas en pendiente (F. X. Wang et al., 2007).

Además de sus funciones principales, como la captura de sedimentos y la creación de tierras de cultivo, los diques de contención también desempeñan un papel importante en la reconstrucción del historial de erosión a largo plazo de cuencas pequeñas y no monitoreadas. Los sedimentos retenidos en las presas de control brindan una evidencia directa de los sedimentos generados en la cuenca aguas arriba desde la construcción del dique, lo que permite estimar las tasas de erosión del suelo y el rendimiento de sedimentos de la cuenca (Alfonso-Torreño et al., 2019).

Sistema hidrológico

Se puede conceptualizar un ciclo hidrológico como un sistema cuyos principales componentes son precipitación, evaporación, escorrentía y otras etapas. Este sistema ocupa un volumen en el espacio, delimitado por una frontera, donde recibe agua y otras entradas, lleva a cabo procesos internos y genera salidas en forma de vapor hacia la atmósfera y caudales líquidos en el río principal. La cuenca, en este contexto, puede considerarse como un operador de agua (Vásquez, 2016).

Es fundamental entender las interacciones que se producen entre sus componentes. Por ejemplo, la deforestación indiscriminada en la zona alta de la cuenca puede resultar en inundaciones durante la temporada de lluvias en la parte baja. Por tanto, es necesario reconocer los procesos hidrológicos en acción y los mecanismos físicos presentes en dicha cuenca.

Los procesos hidrológicos que se observan en el ciclo hidrológico de una cuenca se caracterizan por varios aspectos distintivos:

- Se consideran no lineales debido a sus variaciones complejas tanto en el espacio como en el tiempo.

- Son no estacionarios, lo que significa que están sujetos a periodicidades y tendencias cambiantes.
- Muestran variabilidad espacial debido a las características variables del suelo, el uso de la tierra y el clima a lo largo de la cuenca.
- También exhiben variabilidad temporal en todas las escalas, como horas, días, meses, entre otras.

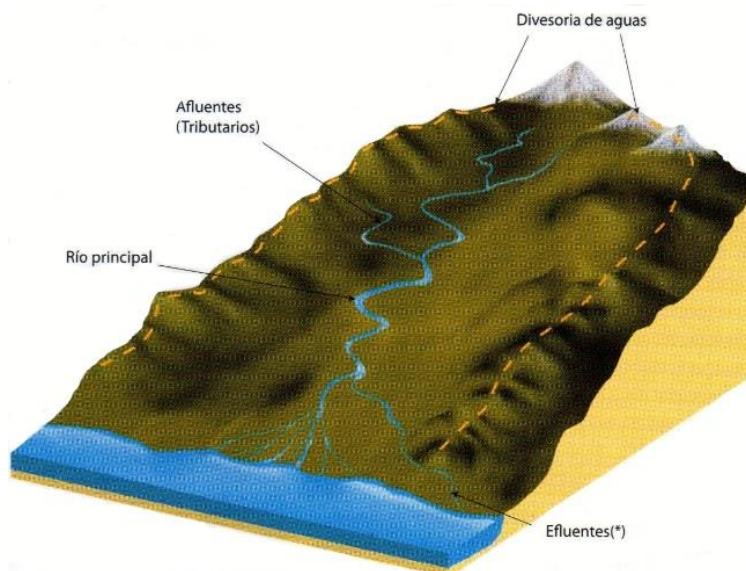
(Cabrera, 2012).

Cuenca hidrográfica

El término "Cuenca Hidrográfica" se refiere al área o superficie del terreno que contribuye con su escorrentía hacia un único punto de salida o desagüe (Huatatoca & Chanaluisa, 2019).

Figura 11

Esquema de una cuenca Hidrográfica



Nota. Recuperado de (Bordino, 2021).

La escorrentía se refiere al flujo de agua que se desplaza por la superficie terrestre después de una precipitación pluvial u otra fuente de agua, como el deshielo. Este flujo

ocurre en dirección a áreas de menor elevación debido a la influencia de la gravedad. La escorrentía superficial se genera cuando el agua no logra infiltrarse en el suelo y permanece en la superficie, mientras que la escorrentía subsuperficial se produce cuando el agua se infiltra en el suelo y fluye a través de él (Vásconez et al., 2019).

En las cuencas estacionales, el caudal de agua se ve directamente afectado por las diferentes estaciones del año, específicamente el invierno y el verano. Durante el invierno, la cuenca experimenta un aumento significativo en la cantidad de agua, lo que a menudo resulta en inundaciones en las áreas circundantes. Por otro lado, durante el verano, el caudal disminuye considerablemente (Ibáñez Asensio et al., 2011).

Cantidad de agua

La estimación de caudales sirve para monitorear la cantidad de agua que circula por un punto concreto en un intervalo de tiempo particular. Este procedimiento ayuda al análisis de cómo el recurso hídrico se comporta a lo largo del tiempo y posibilita establecer la disponibilidad de agua en una región particular (Paul & Meyer, 2008).

Los cursos de agua en zonas urbanas se destacan por transportar una mayor cantidad de agua en situaciones de lluvia, en contraste con regiones rurales. Esto se debe al crecimiento urbano, ya que ha desarrollado la impermeabilización de suelos, influyendo en la cantidad de agua que se desplaza en la superficie hacia los conductos de drenaje (Paul & Meyer, 2008).

Caudal

El caudal es una forma de cuantificar la cantidad de agua que se desplaza a lo largo de un cauce de agua natural, y su magnitud está determinada por el tamaño de la cuenca hidrográfica. El tipo de suelo presente en la cuenca tiene un impacto en la cantidad de agua que se infiltra y se percola, así como en la cantidad y calidad de las aguas subterráneas de la cuenca (Vásconez et al., 2019).

Los organismos que residen en un ecosistema acuático experimentan cambios en su calidad de vida debido a la variación del flujo de agua en términos de tiempo y espacio, así como las dimensiones de la profundidad y velocidad de la corriente. También, las concentraciones de las propiedades físicas y químicas del agua son influenciadas por el caudal. Por lo tanto, el estudio de la cantidad de agua es esencial para comprender su condición y calidad (*Monitoreo de Cantidad de Agua – Aguas Urbanas*, 2018).

Calidad del agua

Desde tiempos remotos, los ríos han sido una valiosa fuente de recursos, al proporcionar agua necesaria para la supervivencia humana y fomentar el desarrollo al incrementar la fertilidad de la tierra para la agricultura, así como facilitar la comunicación entre las personas. No obstante, la calidad del agua de los ríos se ha visto deteriorada, principalmente debido a su utilización como reservorio para zonas densamente pobladas, parques industriales, actividades agrícolas y descargas de desechos fluviales. Con el crecimiento de la industrialización, la urbanización y el incremento constante de la población, el ciclo hidrológico ha experimentado alteraciones y la calidad del agua se ha visto afectada negativamente (Liu et al., 2023).

El agua de los ríos desempeña un papel vital tanto en las actividades agrícolas como en la ecología de la cuenca (Gençer & Başaran, 2023). Además, el uso del suelo en dicha cuenca tiene un impacto significativo en la variación de la calidad del agua de los ríos (H. Wang et al., 2023).

Los ecosistemas fluviales enfrentan amenazas derivadas del cambio climático, como el aumento de las temperaturas, la aridez y la salinidad, así como el incremento de las extracciones de agua. Estas amenazas también afectan el bienestar humano, dado que las personas y los ríos están interconectados, especialmente en regiones con escasez de agua.

La salud ecológica de los ríos, que incluye la calidad del agua, los factores que la afectan y el estado del ecosistema fluvial, así como el bienestar humano, tienden a disminuir a medida que se avanza desde aguas arriba hasta aguas abajo del río (Kaczmarek et al., 2023).

La composición química del agua está determinada por una combinación de factores geológicos, meteorológicos, topográficos, hidrológicos y biológicos. Sin embargo, las influencias antropogénicas, como el vertido de residuos industriales y agrícolas, así como las actividades humanas en general, pueden tener un impacto significativo en la química del agua y comprometer sus propiedades para diversos usos (Kazi et al., 2009).

Variables para evaluar la calidad del agua

Para evaluar las variables de calidad de agua, se utilizó el Acuerdo Ministerial 97a , que es una norma técnica ambiental para la prevención y control de la contaminación ambiental, esta norma debe ser aplicada de manera obligatoria en todo el territorio ecuatoriano, en caso de que estos valores no se encuentren definidos en la norma se utiliza la guía emitida por la Organización Mundial de la Salud (OMS) que contiene los parámetros de la calidad del agua potable.

Para evaluar la calidad del agua se analizan los siguientes parámetros:

Temperatura

La temperatura es un parámetro importante y una característica organoléptica que contribuye a evaluar la calidad del agua. La temperatura del agua puede variar desde fría hasta caliente, y su percepción puede influir en la aceptabilidad y el uso del agua (DIGESA, 2018).

El agua posee una capacidad extraordinaria para retener calor, lo que significa que una vez que un río se ha calentado, tarda mucho tiempo en volver a su estado original. El calentamiento del agua de los ríos puede tener varias causas, tanto de origen natural como antropogénico. Entre las causas naturales se encuentran la geotermia, las

variaciones estacionales de la temperatura ambiente, la exposición al sol y la disminución de la escorrentía. Por otro lado, el calentamiento del agua también puede ser resultado de actividades humanas directas, como la descarga de efluentes con temperaturas diferentes a las del cuerpo receptor o la liberación de calor durante la oxidación de los contaminantes vertidos. Indirectamente, el represamiento de las aguas y la deforestación en la zona de drenaje también pueden contribuir al calentamiento del agua de los ríos (Percebon et al., 2005).

La temperatura influye en los procesos químicos, físicos y biológicos del agua, por ende, tiene un impacto directo en su calidad. Además, la temperatura del agua también puede tener efectos significativos en la vida acuática, ya que muchos organismos acuáticos son sensibles a los cambios de temperatura y su metabolismo, reproducción y comportamiento pueden verse afectados. (Díaz García & González Pérez, 2022).

Conductividad eléctrica (CE)

El agua tiene la capacidad de trasladar corriente eléctrica, este comportamiento se mide a través del parámetro de conductividad eléctrica. Esta capacidad está estrechamente vinculada a la concentración y tipo de sales disueltas en el agua. Estas sales pueden tener impactos significativos en el rendimiento de los cultivos y en las propiedades del suelo, como el pH, la conductividad eléctrica y la disponibilidad de nutrientes, entre otros aspectos (Aumassanne & Fontanella, 2015).

Un factor que influye en la solubilidad de las sales y por lo tanto también en el valor de conductividad eléctrica en el agua es la temperatura (Solís-Castro et al., 2018).

Según el Acuerdo Ministerial 97a, la conductividad eléctrica apta para la calidad de agua de riego con un grado de restricción ligero-moderado es del rango de 700 microsiemens (μS) a 3000 microsiemens (μS), lo que significa que el rango para un cuerpo de agua dulce es de menor restricción.

Potencial hidrógeno (pH)

El potencial de hidrógeno es la medida utilizada para evaluar el nivel de acidez o alcalinidad de una sustancia o solución, también conocido como pH. Se utiliza una escala numérica que va desde 0 hasta 14 para representar los diferentes niveles de pH. Se considera neutro cuando el valor de pH es 7, los valores menores significan agua con mayor acidez y los valores que se pasan 7 indican alcalinidad en el agua (Meléndez Reyes, 2017).

El pH es un parámetro indispensable para evaluar la calidad del agua, debido a que muchos nutrientes y la toxicidad de ciertos compuestos en el agua están influenciados por este valor. Cuando el agua es demasiado ácida, puede disolver metales presentes en las tuberías de conducción, como plomo, cobre y zinc. Estos metales, al ser ingeridos, pueden tener efectos adversos en la salud humana. Un rango aceptable de pH en el agua potable para garantizar la seguridad es de 6.5 a 9, según La Organización Mundial de la Salud (OMS). Asimismo, en el ámbito de la agricultura y el riego, el pH aceptable según el Acuerdo Ministerial 97a se encuentra en el rango de 6 a 9. Mantener el pH dentro de estos rangos es fundamental para asegurar la calidad del agua y proteger la salud de las personas (Pérez-López, 2016).

Nutrientes

Los nutrientes desempeñan un papel esencial en los ecosistemas acuáticos al proporcionar alimento a los organismos, ser fundamentales para la fotosíntesis, proceso mediante el cual las plantas y las algas convierten la energía solar en materia orgánica, influir en la composición y estructura de las comunidades biológicas acuáticas. Un suministro adecuado de nutrientes contribuye al equilibrio ecológico saludable de estos ecosistemas. No obstante, es fundamental tener en cuenta que un exceso de nutrientes, particularmente de nitrógeno y fósforo, puede dar lugar a problemas como la eutrofización. Este fenómeno se caracteriza por un crecimiento excesivo de algas y plantas acuáticas, agotamiento de oxígeno y deterioro de la calidad del agua. Por lo tanto,

es necesario mantener un equilibrio adecuado en la disponibilidad de nutrientes para preservar la salud y el funcionamiento óptimo de los ecosistemas acuáticos (Ríos et al., 2021).

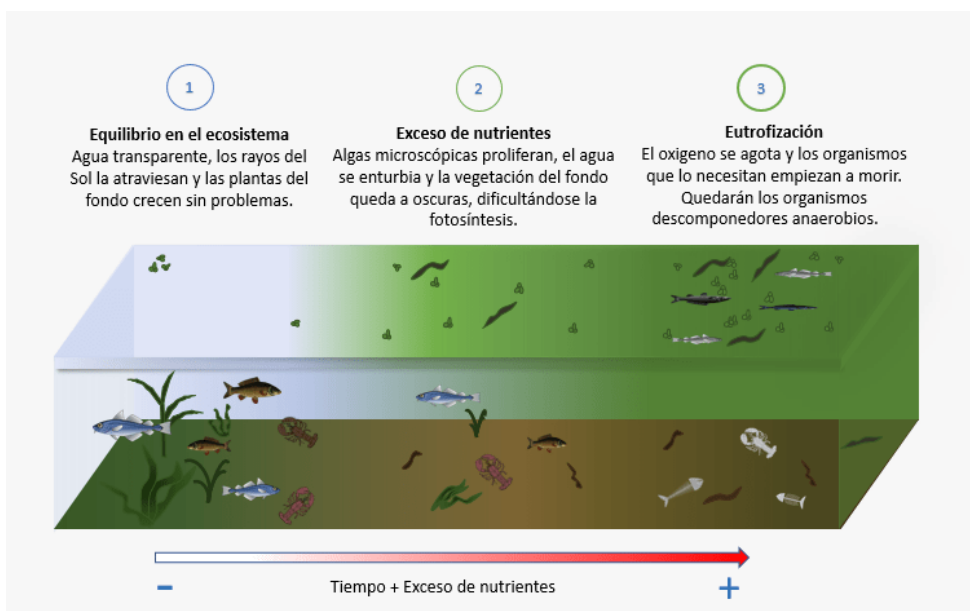
Nitratos. Los nitratos pueden surgir como resultado de la descomposición de materia orgánica y desechos de plantas y animales. Asimismo, pueden ser introducidos en los ríos a través de la lixiviación del nitrógeno presente en el suelo, particularmente en zonas agrícolas donde se utilizan fertilizantes ricos en nitrógeno (Rotiroti et al., 2023).

La contaminación causada por nitratos, resultado de actividades humanas, es un desafío global que genera efectos adversos en los sistemas acuáticos, tanto en aguas superficiales como subterráneas, particularmente en las cuencas hidrográficas. Las concentraciones elevadas de nitratos a menudo están relacionadas con el uso de estiércol animal como fertilizante orgánico en la agricultura (Awaleh et al., 2022), la descarga de aguas residuales sin tratamiento adecuado y la escorrentía de áreas urbanas, que contribuyen a niveles elevados de nitratos en el agua de los ríos.

La presencia de altas concentraciones de nitratos en el agua de los ríos puede tener efectos adversos para la calidad del agua y la vida acuática. Los nitratos en exceso pueden estimular el crecimiento excesivo de algas y plantas acuáticas, lo que conduce a la eutrofización y a la disminución del oxígeno disuelto en el agua, como se aprecia en la Figura 12. Esto puede afectar negativamente a los organismos acuáticos, incluyendo peces y otros organismos sensibles (Paredes et al., 2020).

Figura 12

Eutrofización en el agua



Nota. Recuperado de (Pardo, 2018).

Asimismo, las concentraciones elevadas de nitratos en el agua pueden plantear un riesgo para la salud humana. Los bebés y las mujeres embarazadas son especialmente susceptibles a los efectos adversos de los niveles altos de nitratos en el agua potable (Jensen et al., 2023).

La vigilancia de los nitratos es fundamental, ya que unas concentraciones excesivas en los recursos hídricos pueden afectar a la calidad de las cosechas y también provocar varios trastornos en la salud humana. Por ello, diferentes países han impuesto normas sobre nitratos en el agua dulce y de riego (Balacco et al., 2023).

En Ecuador, no se establece el límite máximo permisible de nitratos en cuerpos de agua dulce, sin embargo, a nivel internacional, la Organización Mundial de la Salud (OMS) establece un límite máximo admisible de nitratos en el agua potable de 50 mg L^{-1} . Es importante destacar que los límites pueden variar en función del uso previsto del agua. Por ejemplo, los límites para agua potable pueden ser más estrictos que los establecidos para aguas superficiales o de riego agrícola (World Health Organization, 2011).

Fosfatos. El ion fosfato (PO_4^{-3}) puede encontrarse en forma de partículas o fragmentos dispersos en solución, así como incorporado en los cuerpos de organismos acuáticos, como se aprecia en la Figura 13, en las aguas superficiales pueden dividirse en dos categorías: fósforo externo y fósforo interno. El fósforo externo se refiere a aquel que proviene de fuentes externas, como el vertido de aguas residuales y la escorrentía de los campos agrícolas. Estas actividades humanas pueden introducir altas cantidades de fósforo en las aguas superficiales. Por otro lado, el fósforo interno se refiere al fósforo liberado por los sedimentos en el cuerpo de agua. Estos sedimentos acumulan fósforo a lo largo del tiempo debido a cargas históricas y lo liberan de nuevo al agua, contribuyendo a la carga total de fósforo en el sistema (Xia et al., 2023).

El exceso de fósforo en los ecosistemas acuáticos conduce a la eutrofización, un proceso que representa una serie de peligros para los ecosistemas acuáticos. La eutrofización puede resultar en la reducción de la funcionalidad y biodiversidad de los ecosistemas acuáticos, así como en el deterioro de la calidad del agua (Schoumans et al., 2014). Además, las floraciones de algas nocivas asociadas a la eutrofización pueden producir toxinas dañinas para los animales y los seres humanos, ver Figura 13 (Ding et al., 2022).

Figura 13

Proliferación de algas por presencia excesiva de fósforo en ríos



Nota. Recuperado de (Europa Press, 2016).

El límite permitido del parámetro de fosfatos no está definido en ninguna normativa ecuatoriana, por el que se establecen los Criterios Ecológicos de Calidad de Aguas CE-CCA-001/89, donde se hace mención que los fosfatos, no deben superar los $0,05 \text{ mg L}^{-1}$ en lagos o afluentes, ni los $0,025 \text{ mg L}^{-1}$ con el propósito de evitar el crecimiento de organismos biológicos no deseados y regular el proceso de eutrofización acelerada.

Sulfatos en el agua.

El sulfato es un ion con fórmula química $(\text{SO}_4)^{-2}$ y es ampliamente encontrado en la naturaleza. Se encuentra presente en la mayoría de las aguas naturales debido a la presencia de minerales o rocas que contienen sulfatos (X. Li et al., 2015). Aunque los sulfatos no se consideran nutrientes esenciales en el agua, ya que no participan en los procesos metabólicos de muchos organismos, sí pueden servir como una fuente de azufre, que es un elemento esencial para el crecimiento de las plantas. La concentración de sulfatos en el agua varía, generalmente se encuentra en el rango de varias centenas de miligramos por litro.

El sulfato presente en los cuerpos de agua puede tener tanto origen natural, como la precipitación atmosférica, como origen antropogénico. Entre las fuentes antropogénicas

se incluyen las aguas residuales domésticas e industriales contaminadas, así como el drenaje de minas que contienen sulfatos. Cuando estos minerales se exponen al agua o al aire, pueden liberar sulfatos al medio ambiente, incluyendo las cuencas hidrográficas (Jiang et al., 2022).

Los sulfatos pueden aparecer en las cuencas hidrográficas por varios factores:

El sulfato presente en el agua de lluvia y en el agua superficial muestra una correlación con las emisiones de dióxido de azufre producidas por la actividad humana, principalmente provenientes de motores que utilizan diésel como combustible y de fábricas industriales. Estas emisiones reaccionan con el oxígeno y forman sulfatos, los cuales luego se precipitan en forma de lluvia. Este fenómeno es conocido como lluvia ácida (Xu et al., 2023).

Sulfatos derivados de fertilizantes, ya que son una fuente de nutrientes para las plantas (Xu et al., 2023).

Sulfatos en terrenos volcánicos, algunos estudios consideran que la oxidación de minerales y gases hidrotermales portadores de azufre son posibles fuentes importantes de sulfatos en terrenos volcánicos. Las erupciones volcánicas también liberan gran cantidad de dióxido de azufre y otros gases sulfurados a la atmósfera (Moore & Szykiewicz, 2023).

La presencia de sulfato en ciertas áreas está principalmente influenciada por la concentración de sulfato de hierro que se encuentra en el suelo o en lechos rocosos de los ríos, como se aprecia en la Figura 14. El sulfato de hierro es común en ambientes que son ricos en hierro y azufre, como depósitos minerales y áreas volcánicas. Además, se utiliza como fertilizante en la agricultura (Bolaños-Alfaro et al., 2017).

Figura 14

Presencia de sulfato de hierro en un arroyo



Nota. Recuperado de (Mengr, 2020).

Los niveles excesivos de sulfato en el agua son una amenaza para el medio ambiente y para la salud humana, si el cuerpo absorbe demasiado sulfato, puede causar diarrea, deshidratación y trastornos gastrointestinales (Zhao et al., 2023), es por eso que existen normas con límites máximos permisibles de diferentes parámetros, es decir, la concentración máxima que se admite en el agua de acuerdo a su uso.

En Ecuador, dichos parámetros se encuentran en el Acuerdo Ministerial 97a, donde indica que el límite máximo permisible de sulfatos en cuerpos de agua dulce es de 1000 mg L^{-1} , de igual manera si esta agua se quisiera utilizar para fines agrícolas o de riego el límite es de 250 mg L^{-1} .

La baja concentración de sulfatos en los ríos generalmente no representa un problema para la mayoría de los ecosistemas acuáticos, ya que se encuentran en cantidades limitadas que son tolerables para la mayoría de los organismos acuáticos. Sin embargo, algunos ecosistemas dependen de los sulfatos, puesto que ciertas bacterias y microorganismos utilizan los sulfatos como fuente de energía y parte de su metabolismo. Algunas plantas acuáticas pueden requerir sulfatos para su desarrollo, y la falta de ellos puede limitar su proceso de fotosíntesis (Aguilera Rodríguez et al., 2010).

Sólidos en suspensión (SST) y sólidos totales disueltos (SDT)

Las aguas en estado natural retienen materia que no se sedimenta, esta materia puede estar suspendida o disuelta.

Los sólidos en suspensión son transportados por el movimiento del agua a través de los procesos de arrastre y soporte. Los sólidos diminutos, no se depositan rápidamente y son catalogadas como sólidos no sedimentables, mientras que los sólidos más grandes tienden a sedimentarse en su mayoría. La mayor parte de los sólidos en suspensión están formados por componentes inorgánicos. Durante el proceso de descomposición de algas, plantas y animales, se liberan pequeñas partículas orgánicas que entran en la columna de agua como sólidos en suspensión. Cuanto mayor sea la cantidad de sólidos en el agua, mayor será su turbidez. La existencia de estos materiales sólidos suspendidos puede originarse por la erosión del suelo, la agitación de los sedimentos en el lecho acuático o la proliferación de algas (IDEAM, 2007).

En relación con la calidad del agua, altos niveles de Sólidos en Suspensión Totales (SST) pueden tener efectos negativos. Estos sólidos pueden reducir la cantidad de oxígeno disuelto en el agua de manera natural y aumentar la temperatura del agua. Esta combinación puede ser perjudicial para los organismos acuáticos, como peces pequeños, que pueden no sobrevivir en tales condiciones. Además, los SST pueden obstruir la entrada de luz solar al agua, lo cual afecta a las plantas acuáticas y disminuye aún más el contenido de oxígeno disponible (Murillo et al., 2009).

El Acuerdo Ministerial 97a, indica que el límite máximo permisible de SST en cuerpos de agua dulce es de 130 mg L^{-1} .

Los sólidos disueltos (SDT) consisten en una combinación de materia orgánica e inorgánica que, por separado, no son visibles, no sedimentan y pueden causar una variedad de problemas relacionados con el olor, el sabor, el color y la salud del agua.

Los sólidos totales disueltos representan la cantidad de materia presente en una muestra de agua que tiene un tamaño menor a 2 micrones (2 millonesésimas de un

metro) y que no puede ser removida mediante un filtro convencional. El TDS consiste fundamentalmente en la acumulación de todos los minerales, metales y sales que están en solución en el agua. Esta medida es un factor de relevancia para evaluar la calidad del agua (Northern Plains & Mountains, 2015).

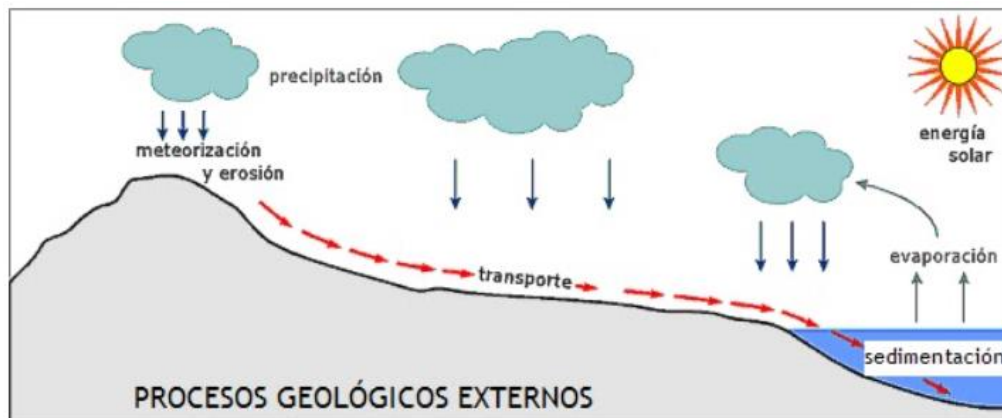
El Acuerdo Ministerial 97a, no indica el límite máximo permisible de SDT en cuerpos de agua dulce, sin embargo, menciona que un rango aceptable para la calidad de agua para uso agrícola y de riego es de 450-2000 ppm.

Sedimentos en las cuencas

El sedimento es un material sólido que se desplaza debido a fuerzas naturales y se acumula en la superficie terrestre, como se aprecia en la Figura 15. Estas fuerzas naturales incluyen el viento, las variaciones de temperatura, las precipitaciones, la circulación de aguas superficiales o subterráneas, los movimientos de masas de agua en entornos marinos o lacustres, las acciones de agentes químicos y las actividades de organismos vivos. La sedimentación también se produce en áreas con terrenos escarpados y montañosos, y puede observarse como resultado de actividades humanas culturales (Tan et al., 2023), este movimiento de los sedimentos es conocido como erosión (F. Wang & Ding, 2023), tienen la capacidad de mantener su estabilidad a lo largo de extensos periodos de tiempo, incluso millones de años, hasta que se consolidan y se transforman en rocas (Zhang et al., 2023).

Figura 15

Proceso de sedimentación



Nota. Recuperado de (IES Parque Goya, 2018).

Los sedimentos transportados a lo largo de las cuencas se originan por la erosión de las laderas y en los procesos de erosión que ocurren en la red de drenaje de las cuencas. Estos materiales, provenientes tanto de la erosión dentro de los propios cauces como de las laderas adyacentes, se desplazan principalmente mediante el arrastre, un proceso conocido como transporte de fondo (IROUME, 2003).

La mayor parte de los sedimentos se componen de minerales que se originan a partir de la erosión de la roca madre y de componentes orgánicos generados durante los procesos de formación del suelo, incluyendo la actividad biológica y microbiológica que involucra producción y descomposición.

Los sedimentos son primordiales para el ciclo de los elementos en los cauces, ya que son responsables del transporte de una proporción considerable de nutrientes y contaminantes (Urgilez Montero, 2016).

Calidad de los sedimentos

La evaluación de la calidad de los sedimentos es fundamental debido a su capacidad de transportar y contener contaminantes y nutrientes, lo que puede tener consecuencias significativas tanto para los ecosistemas acuáticos como para la salud humana.

Variables para evaluar la calidad del sedimento

Potencial hidrógeno (pH)

El pH, también conocido como "reacción del suelo", es un parámetro que determina el grado de acidez o alcalinidad de un suelo cuando se encuentra en contacto con el agua. Este indicador refleja el ambiente químico que se forma en la solución del suelo y tiene un impacto significativo en las reacciones químicas y biológicas que ocurren en él (Victoria Cremona & Soledad Enriquez, 2020).

En entornos naturales, el pH del suelo tiene una gran influencia en las propiedades y procesos físicos, químicos y biológicos del suelo. El pH del suelo afecta de manera significativa el crecimiento de las plantas y el rendimiento de la biomasa (Neina, 2019).

Conductividad eléctrica (CE)

La conductividad eléctrica del suelo se utiliza como una forma indirecta de medir la concentración de sales presentes en el suelo. Es importante destacar que el suelo naturalmente contiene sales disueltas, por lo que la conductividad eléctrica puede ser baja, pero nunca llega a ser nula. Las sales en el suelo son beneficiosas para los organismos que las consumen disueltas en el agua, ya que proporcionan nutrientes esenciales. Sin embargo, un exceso de sales puede tener efectos negativos tanto en el crecimiento de las plantas como en la actividad de los microorganismos del suelo (Victoria Cremona & Soledad Enriquez, 2020).

Densidad

La densidad aparente hace referencia a la cantidad de masa de sólidos presente en una unidad de volumen total de suelo, considerando tanto el volumen ocupado por los sólidos como los espacios porosos (Carrera Villacrés, 2011).

La densidad de partículas, también conocida como densidad real, se refiere al peso de una unidad de volumen de los sólidos presentes en el suelo, sin tomar en cuenta los poros. Para determinarla, se realiza la medición del peso seco de una muestra de

suelo y se obtiene el volumen ocupado por los sólidos de esa muestra. El volumen se determina mediante el uso de un dispositivo llamado picnómetro, utilizando el principio de Arquímedes, que consiste en medir el volumen de líquido desplazado por los sólidos al ser sumergidos en él.

El valor de la densidad de partículas del suelo varía dependiendo del tipo de minerales presentes en el suelo y la cantidad de materia orgánica que contiene. La presencia de materia orgánica tiene un impacto significativo en la densidad de las partículas del suelo debido a que su peso es mucho menor en comparación con el de los minerales. Por lo tanto, la cantidad de materia orgánica presente en un suelo influye en gran medida en su densidad de partículas (Buckman & Brady N.C., 1977).

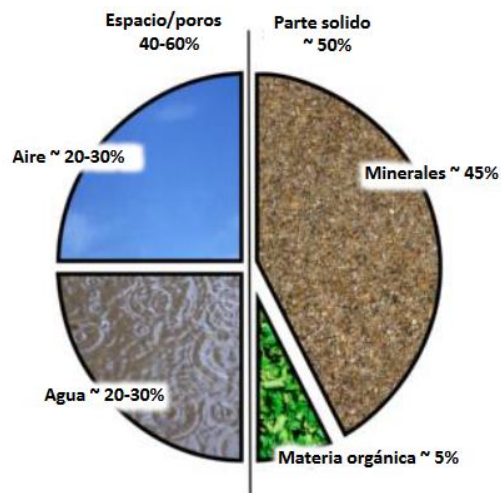
La densidad de la mayoría de los suelos suele ser muy parecida. En general, presentan una densidad real promedio de alrededor de $2,65 \text{ g cm}^{-3}$ (Plaster, 2004).

Materia orgánica

La materia orgánica que se encuentra en el suelo se forma a partir de residuos animales o vegetales, mismos que se descomponen gracias a la actividad de los microorganismos presentes en el suelo. Normalmente, el contenido de materia orgánica en el suelo se encuentra en un rango del 3 al 5 %, como se aprecia en la Figura 16. La materia orgánica desempeña un papel fundamental en la formación de agregados o gránulos de partículas minerales del suelo, lo que contribuye a su estructura. También, la materia orgánica contribuye con nutrientes vitales al suelo, entre ellos se encuentra el nitrógeno, el azufre y el fósforo. También juega un papel importante en la retención del agua en el suelo y sirve como fuente de alimento para los microorganismos presentes en el suelo (Carrión Granja, 2019).

Figura 16

Composición de un suelo común



Nota. Recuperado de (Fonte, 2013).

Los sustratos de origen volcánico tienen una presencia mínima o incluso nula de materia orgánica, lo que resulta en bajos contenidos de nitrógeno y fósforo. Esta falta de nutrientes limita el crecimiento y la productividad de los cultivos en estos sustratos (Carrión Granja, 2019).

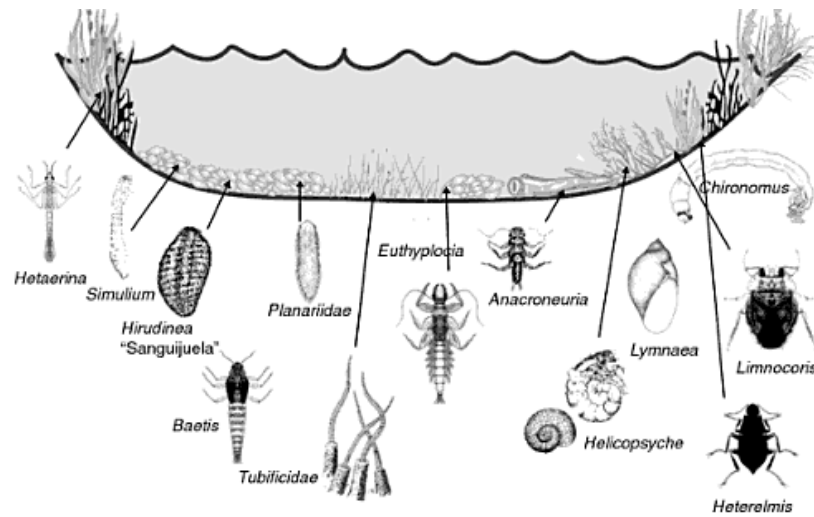
Calidad biológica

La calidad biológica de un cuerpo de agua es óptima cuando sus condiciones naturales facilitan el desarrollo de comunidades de organismos propias del entorno, una mayor biodiversidad representa una alta calidad del agua (Josefina Sánchez Herrera et al., 2018).

En los ríos, arroyos y otras corrientes de agua, podemos encontrar diversas comunidades biológicas, entre las cuales se destacan los macroinvertebrados. Estos son animales que pueden ser observados a simple vista y presentan un tamaño promedio que varía de 0.4 a 1.0 mm. Los macroinvertebrados son considerados por muchos investigadores como los mejores bioindicadores de la calidad del agua. Su presencia, abundancia y diversidad proporcionan información valiosa sobre las condiciones ambientales y la salud del ecosistema acuático (Hanson et al., 2010).

Figura 17

Macroinvertebrados presentes en el corte transversal de un río



Nota. Recuperado de (Hanson et al., 2010).

Los macroinvertebrados acuáticos desempeñan un papel vital en los ecosistemas fluviales al consumir la materia orgánica producida por organismos fotosintéticos como algas y briófitos, así como la materia orgánica proveniente del ecosistema terrestre, especialmente de los bosques ribereños. Estos macroinvertebrados actúan como intermediarios al transferir esta materia orgánica a los grandes vertebrados del ecosistema, que dependen de ellos como principal fuente de alimento (Ladrera et al., 2013).

Capítulo III

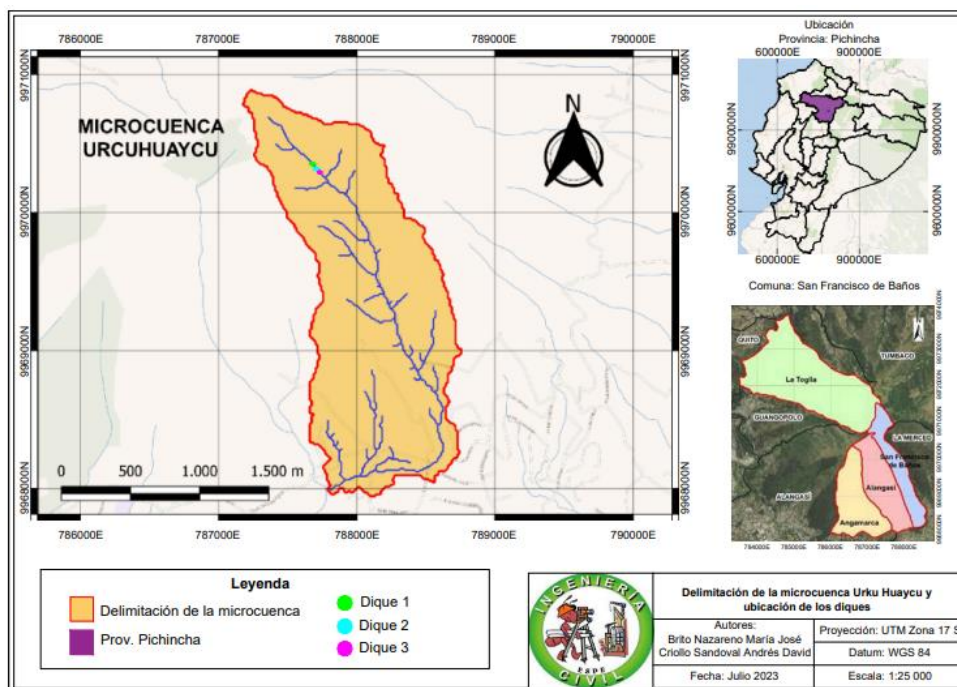
Metodología

Descripción del área de estudio

El área de estudio corresponde a la quebrada Urku Huayku, ubicada al sur del volcán Ilaló, en el Valle de los Chillos, pertenece a la comunidad conocida como “Comuna San Francisco de Baños”. Sus coordenadas UTM son: 787789,744 – 9967995,403; 787292,841 – 9970760,506, en la zona 17S, como se indica en la Figura 18. Esta quebrada tiene una longitud del cauce principal de 4,085 km y un área de 2,497 km², su cota máxima es 3186,867 msnm y su cota mínima 2522,478 msnm, los tres diques se encuentran instalados en la parte alta de la quebrada.

Figura 18

Delimitación de la microcuenca Urku Huayku



Nota. Coordenadas de microcuenca Urku Huayku y de los diques instalados.

Metodología del proyecto

La metodología que se usó para este proyecto es cuantitativa, ya que se utilizó la

estadística para el análisis de los datos, estos datos cuantitativos implican la medición de parámetros físicos en sitio (H. C. Hou et al., 2023).

Toma de muestras de agua y sedimentos

Se realizaron visitas técnicas semanales a la quebrada Urku Huayku, para la recolección de muestras de agua de cada dique en botellas de plástico de 500-700 ml, mismas que se enjuagaron con el agua recolectada y tres muestras de 500 g de sedimento en cada dique, en profundidades alta, media y baja, de igual manera, toma de medidas, áreas, caudal y profundidades de cada zona donde están instalados los diques, así como también se realizó su mantenimiento. Para el muestreo de agua y suelos se siguieron las recomendaciones de (Carrera Villacrés, 2011) y (Lizcano et al., 2017). Además, también se realizó el mantenimiento de los diques, a pesar de que no presentaban ningún problema estructural, se limpió la zona de la vegetación arrastrada por el cauce de la microcuenca.

Metodología para el análisis del agua

Posterior a la recolección de datos, las muestras de agua de cada dique se analizaron semanalmente en el laboratorio de medio ambiente del campus matriz de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, los parámetros analizados en cada muestra para determinar la calidad del agua fueron: Sulfatos, Fosfatos, Nitratos, Sólidos en suspensión, Sólidos totales disueltos, PH y conductividad eléctrica, comparando los resultados con los límites permisibles del Acuerdo Ministerial No. 097a, que es la reforma del texto Unificado de Legislación Ambiental Secundario (TULAS) del Ecuador, Libro VI, y la guía para la calidad del agua de consumo humano de la Organización Mundial de la Salud (OMS).

Análisis de sulfatos, fosfatos, nitratos y sólidos en suspensión

La concentración de Sulfatos, Fosfatos, Nitratos y Sólidos en suspensión se analizaron con el espectrofotómetro Hach 5000, este equipo proporciona los resultados

de concentración en unidades directas (Manual de operación del espectrofotometro, 2018), para empezar, se disolvió un sobre de reactivo en polvo marca Hach en las muestras de agua de cada dique, para la determinación de sulfato el reactivo (SulfaVer) con rango de medición de 2 a 70 mg L⁻¹ de SO₄, para fosfato el reactivo (PhosVer) con rango de medición de 0 hasta 5 mg L⁻¹ PO₄, y para nitrato el reactivo (NitraVer) con un rango de medición 0.3-30.0 mg L⁻¹ NO₃⁻, después, se insertó cada muestra de agua en un tubo de ensayo, para pasar a la celda de reactivo y obtener el valor de la concentración.

Análisis de pH

El PH fue medido con el multímetro portátil HQ40D de Hach, su sonda intellical reconoce automáticamente el parámetro de los test.

Análisis de conductividad eléctrica (CE) y sólidos disueltos totales (SDT)

La conductividad eléctrica y los sólidos disueltos totales fueron medidos con el Medidor de TDS que nos proporciona la concentración de CE en microsiemens (µS) y los SDT en partes por millón (ppm).

Respecto a la conductividad eléctrica se tomó lectura del resultado del parámetro y se analizó de acuerdo a la Tabla 1.

Tabla 1

Clasificación de las aguas de acuerdo a la CE

| Clasificación | Tipo | CE µs cm⁻¹ | Observaciones |
|----------------------|-----------------------------|----------------------------------|---|
| C1 | Aguas de baja salinidad | <250 | Existe en condiciones normales de riego |
| C2 | Aguas de salinidad media | 250-750 | Necesita un moderado lavado |
| C3 | Aguas altamente salinas | 750-2250 | No utilizar en suelos sin drenaje |
| C4 | Aguas muy altamente salinas | >2250 | Debe lavarse |

Nota. Recuperado de (Carrera Villacrés, 2011).

Los materiales y procesos para el análisis de la calidad del agua, realizados en el laboratorio de Medio Ambiente se detallan en el Apéndice 1.

Metodología para el análisis de sedimentos

Las muestras de sedimentos se analizaron en el laboratorio de mecánica de suelo de la universidad, las técnicas para analizar suelos pueden variar desde procesos rápidos, económicos y que requieren una capacitación mínima, como el análisis visual y la medición del pH, hasta procesos bastante complejos (Hay et al., 2022).

Para el análisis, en la zona de cada dique instalado, se tomaron muestras de sedimentos en tres profundidades, alta, media y baja, esto permite un análisis más detallado y una comprensión más precisa de la composición de los sedimentos en diferentes niveles.

Algunos de los parámetros para evaluar los sedimentos serán examinados siguiendo las pautas de la Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000.

Análisis de pH y conductividad eléctrica

Se realizó el método propuesto en el libro “Ciencia del Suelo” (Carrera Villacrés, 2022), la relación suelo-agua: 1:2.5, para determinar sus propiedades físicas: pH y conductividad eléctrica (CE), donde se pesaron 10 gramos de muestra para depositar en un envase plástico de 50 ml, tras añadir 25 ml de agua destilada, se agito la pasta y se dejó sedimentar por 24 horas, finalmente se tomó lectura de los parámetros requeridos y se analizó de acuerdo a la Tabla 2 y Tabla 3, respectivamente, este método se aplicó en tres muestras tomadas en el periodo inicial, medio y final de muestreo, es decir en el mes de abril, junio y julio.

Tabla 2

Clasificación del suelo, de acuerdo a su pH

| Clasificación | pH |
|----------------------|-----------|
| Fuertemente ácido | <5 |

| Clasificación | pH |
|-----------------------|-----------|
| Moderadamente ácido | 5.1-6.5 |
| Neutro | 6.6-7.3 |
| Medianamente alcalino | 7.4-8.5 |
| Fuertemente alcalino | >8.5 |

Nota. Recuperado de (NOM-021, 2002).

Tabla 3

Clasificación del suelo, de acuerdo a su CE

| CE ds m⁻¹ a 25°C | Efectos |
|------------------------------------|---------------------------------------|
| <1 | Efectos despreciables de la salinidad |
| 1.1-2.0 | Muy ligeramente salino |
| 2.1-4.0 | Moderadamente salino |
| 4.1-8.0 | Suelo salino |
| 8.1-16.0 | Fuertemente salino |
| >16.0 | Muy fuertemente salino |

Nota. Recuperado de (NOM-021, 2002).

Análisis de la densidad del sedimento

Para identificar el tipo de suelo de la zona de estudio se determinó la densidad aparente de una muestra aleatoria del suelo en profundidad alta, media y baja, de acuerdo al método propuesto por (Carrera Villacrés, 2011), donde indica que se deben pesar 50 g de suelo seco y tamizado, para después colocarlo en una probeta, y golpearlo en una mesa por 30 veces, para leer el volumen final (V) que ocupa el suelo, (Densidad aparente = 50/V), finalmente se lo clasificó de acuerdo a la Tabla 4.

Tabla 4

Clasificación del suelo, de acuerdo a la densidad aparente

| Tipos de suelo | DA g cm⁻³ |
|------------------------|-----------------------------|
| Orgánicos y volcánicos | Menor de 1.00 |
| Minerales | |
| Arcillosos | 1.0 – 1.19 |

| Tipos de suelo | DA $g\ cm^{-3}$ |
|-----------------------|-----------------------------------|
| Francosos | 1.20 – 1.32 |
| Arenosos | Mayor a 1.32 |

Nota. Recuperado de (NOM-021, 2002).

En el laboratorio se analizó la densidad real de las partículas del suelo utilizando el método gravimétrico del picnómetro con base en la norma *ASTM D 854*. Donde primero se debe secar al aire libre las muestras de sedimentos, para tomar los diferentes pesos que se requieren para el cálculo de la densidad, este método se aplicó en tres muestras tomadas en el periodo inicial, medio y final de muestreo, es decir en el mes de abril, junio y julio. El procedimiento está detallado en el Apéndice 2.

Análisis de la materia orgánica

El primer método visual, por lo tanto, cualitativo aplicado fue la cromatografía en papel, este permite ver sobre un papel filtro la presencia y la relación entre materia orgánica, minerales y microorganismos, el cromatograma enseña la interacción de factores físicos, químicos y biológicos entre ellos y con el medio, lo que nos permite determinar el grado de calidad que tiene el suelo (Heifer International, 2014) Este método fue realizado tres veces, durante todo el periodo de muestreo, en el mes de abril, junio y julio y fue comparado con el método fijo de calcinación.

Para realizar el laboratorio de cromatografía se utilizó: papel de filtro, solventes adecuados, una pipeta y un soporte para el papel de filtro, una vez secas las muestras, se empezó con la extracción de los compuestos presentes en los sedimentos, realizando una extracción líquido-líquido con el uso de un solvente orgánico, se filtró la solución obtenida para eliminar las partículas sólidas y obtener solo una muestra líquida, misma que se coloca en un recipiente cerrado que contenga el solvente adecuado y que sea capaz de migrar a través del papel filtro, para visualizar los resultados se examinaron las bandas separadas en la placa y se registró la posición y tamaño de cada uno, para

comparar las características de las bandas obtenidas, con las de los estándares conocidos, y así, determinar la presencia y concentración de compuestos específicos presentes en las muestras de sedimentos. Los materiales y procesos detallados para este ensayo se encuentran en el Apéndice 3.

El segundo método para la cuantificar la materia orgánica en el suelo, fue la técnica de calcinación, siguiendo el procedimiento propuesto por Schulte & Hopkins en 1996, en el cual se colocan los crisoles por 12 horas en un horno eléctrico a una temperatura de 105°C para retirar la humedad remanente, después se enfriaron y se obtuvo el peso inicial con la ayuda de una balanza analítica digital, se añaden 10g de la muestra completamente seca y se vuelve a pesar. Luego, se introdujo en la mufla para calcinación por dos horas a una temperatura de 360°C, nuevamente se enfriaron y se obtuvo su peso, la materia orgánica contenida en la muestra de sedimento se calcula restando los pesos obtenidos al inicio y final de haber realizado el ensayo (Izquierdo Bautista & Arévalo Hernández, 2021)). Este método fue aplicado a las tres muestras de cada dique en profundidad alta, media y baja y se analizó de acuerdo a la Tabla 5. La práctica de laboratorio para detallar los materiales y procesos utilizados, se encuentran en el Apéndice 4.

Tabla 5

Clasificación del suelo, de acuerdo a la materia orgánica

| Clase | Materia orgánica % | |
|----------|--------------------|----------------------|
| | Suelos volcánicos | Suelos no volcánicos |
| Muy bajo | <4.0 | <0.5 |
| Bajo | 4.1-6.0 | 0.6-1.5 |
| Medio | 6.1-10.9 | 1.6-3.5 |
| Alto | 11.0-16.0 | 3.6-6.0 |
| Muy alto | >16.1 | >6.0 |

Nota. Recuperado de (NOM-021, 2002).

Metodología para la medición y cálculo del caudal

El método elegido para el cálculo del caudal de la quebrada Urku Huayku fue el método volumétrico, ya que es apto y práctico cuando se trata de mediciones de pequeños caudales, consiste en hacer llegar el caudal a un depósito de volumen conocido, tomando el tiempo de llenado de dicho depósito, utilizando la fórmula:

$$Q = \frac{V}{T}$$

Donde:

Q = caudal ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)

V = volumen (m^3)

T = tiempo (segundos)

(Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático, 2017).

Análisis de la calidad biológica

El análisis de macroinvertebrados de la quebrada Urku Huayku se realizó con la ayuda de los estudiantes de la Universidad Regional Amazónica IKIAM, los cuales se guiaron de la siguiente metodología:

Los macroinvertebrados son obtenidos mediante la Autorización de Investigación Científica N° 001-017 IC-FAU-DNB/MA. Se emplea una red Surber como área de recolección, con una abertura de malla de $250 \mu\text{m}$. En cada estación, se recopila una muestra combinada compuesta por nueve submuestras, que en total abarcan un área de 1 m^2 (Ramírez, 2010). El procedimiento de recopilación implica situar una red en el lecho del agua, en contra de la corriente. Mientras esta red se encuentra en su lugar, se limpian los objetos que aportan diversidad (como troncos, piedras y hojarasca) que se encuentran dentro de su marco, y se revuelve la capa superior del sustrato hasta una profundidad de 5 cm, ver Figura 19. De esta manera, se garantiza la extracción de los individuos y se les atrapa en la red (Romero Cárdenas & Zúñiga Acuario, 2017).

Figura 19

Recopilación de muestras con red Surber



Fig. 5. Red tipo Surber. Foto M. Springer.

Nota. Recuperado de (Ramírez, 2010).

En el laboratorio, con la asistencia de un estereoscopio, los macroinvertebrados recolectados se deben separar, identificar y contabilizar. (Domínguez & Fernández, 2009).

Índices Biológicos

Expresan en un dato numérico las características de todas las especies presentes en una zona, según su grado de resistencia o sensibilidad frente a la contaminación (N. Prat et al., 2020).

Biological Monitoring Working Party. El índice BMWP fue originalmente desarrollado para ríos europeos, pero su aplicación se extendió a múltiples países alrededor del mundo, incluyendo Inglaterra, Colombia, Chile y la Península Ibérica (Roldán-Pérez, 2016).

Para aplicar este índice, es necesario clasificar los macroinvertebrados a nivel de familia, siguiendo las indicaciones proporcionadas en el Apéndice 7, donde se asigna un valor correspondiente a cada organismo según su nivel de tolerancia a la contaminación. Las familias altamente susceptibles obtienen una calificación de 10, mientras que a las

más resistentes se les asigna una puntuación de 1. Por lo tanto, cuanto mayor sea la capacidad de resistir la contaminación, menor será la puntuación BMWP otorgada.

(Varnosfaderany et al., 2010) Al final del proceso, se suman los valores de todas las familias identificadas y se determina el resultado de acuerdo a la Figura 20.

Andean Biological Party. El índice ABI es una adaptación del BMWP-R específicamente diseñada para ríos ubicados en altitudes superiores a los 2000 metros sobre el nivel del mar en las regiones altoandinas de Ecuador y Perú (Acosta Rivas, 2009).

Su proceso de aplicación sigue siendo el mismo: se otorgan diversos puntajes a las familias de macroinvertebrados en un lugar determinado, con el propósito de calcular un único valor definitivo que refleje la salud general del ecosistema, siguiendo el esquema ilustrado en la Figura 20 (Moreno, 2001).

Figura 20

Niveles de tolerancia BMWP y ABI

| Calidad | BMWP/Col | ABI | Significado | Color |
|-------------|----------|-------|----------------------------------|----------|
| Buena | 100 | 96 | Aguas muy limpias a limpias | Azul |
| Aceptable | 61-100 | 56-96 | Aguas ligeramente contaminadas | Verde |
| Dudosa | 36-60 | 35-58 | Aguas moderadamente contaminadas | Amarillo |
| Crítica | 16-35 | 14-34 | Aguas muy contaminadas | Naranja |
| Muy Crítica | 16 | 14 | Aguas fuertemente contaminadas | Rojo |

Nota. Recuperado de (Acosta Rivas, 2009).

Índices de Diversidad

La diversidad analiza la interacción entre la cantidad de especies presentes y su abundancia dentro de una comunidad. Para calcularla, se utilizan índices de diversidad

mediante el software estadístico Past. El fundamento teórico y la ecuación en es que se apoya este índice se encuentra explicado en detalle de la Figura 21.

Figura 21

Índice de diversidad Shannon

| | | |
|----------------|---|---|
| Shannon | $H' = \sum_{i=1}^S \left(\frac{n_i}{N} \right) \ln \left(\frac{n_i}{N} \right)$ | <p>Representa el promedio de incertidumbre en predecir, en una muestra, a qué especie pertenecería un individuo que se escoge aleatoriamente. Toma valores que por lo general varían entre 1 y 4.5. Un valor de 3 podría considerarse "diverso"</p> |
|----------------|---|---|

Nota. Recuperado de (Lorea et al., 2008).

Metodología para el procesamiento de datos

Después de haber conformado la base de datos con los resultados obtenidos por los ensayos en el laboratorio de la calidad y cantidad de agua y sedimentos de la microcuenca Urku Huayku, se realizó una serie temporal en el software RStudio para reflejar el funcionamiento de los diques y se compararon con los datos históricos, recopilados de años anteriores.

El objetivo del análisis de series temporales es ver y comprender estas dependencias de los datos del pasado y utilizarlos con el propósito de predecir valores futuros, al tener una base de datos más extensa que ofrezca información de manera más eficaz (Dettling, 2020).

El software R es un lenguaje de código abierto para realizar análisis estadísticos (Alkarkhi & Alqaraghuli, 2020). La ventaja de utilizar este software es que es de acceso libre y ofrece varios paquetes para el análisis de datos (Fernandes de Sousa et al., 2020).

Las bases de datos de series temporales se están convirtiendo en

omnipresentes, surgiendo con frecuencia en una amplia variedad de disciplinas (López-Oriona & Vilar, 2023). A diferencia del análisis básico de datos, en el que se debe suponer que los datos se distribuyen de forma idéntica e independiente, las series temporales están correlacionadas en serie, son registros de procesos que varían a lo largo del tiempo.

Series temporales

Una serie de tiempo se compone de N datos que están dispuestos en orden cronológico uniforme, referentes a una característica única o a múltiples características de una unidad observada en diversos instantes (Mauricio, 2007).

Componentes de una serie de tiempo

Tendencia. Es el componente en un periodo largo que representa el crecimiento o declinación de la serie (Murillos, 2003).

Estacional. Serie de tiempo con un patrón de cambio (Murillos, 2003).

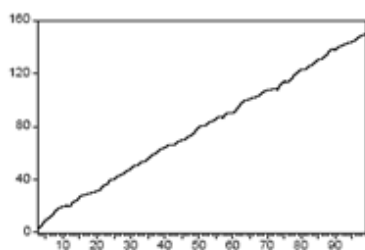
Ciclo. Se refiere a una fluctuación de la serie, los datos tienden a repetirse (Murillos, 2003).

Análisis de una serie temporal

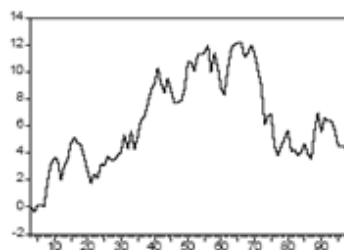
Previo al análisis de cualquier serie temporal, es necesario realizar una representación gráfica y una observación minuciosa de su patrón evolutivo, con el fin de estudiar el comportamiento de la serie temporal, como se observa en la Figura 22 (Viñals, 2002).

Figura 22

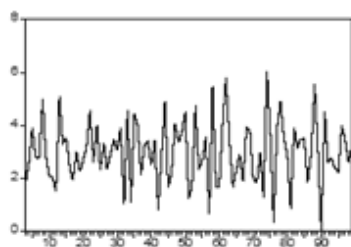
Representación gráfica de una serie temporal



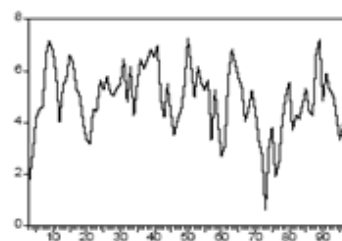
Serie no estacionaria en media



Serie no estacionaria en media y varianza



Serie estacionaria en media y varianza



Serie estacionaria en media pero no en varianza

Nota. Recuperado de (Parra, 2019).

Estacionariedad de una serie temporal

Se considera que un proceso es estacionario de manera rigurosa si todas las variables aleatorias que constituyen dicho proceso poseen la misma distribución, sin importar el momento temporal en el que ocurre este proceso.

Dado que la estabilidad en los datos no siempre se presenta, se ha establecido un concepto menos estricto conocido como estacionariedad en sentido débil o de segundo orden. Esta condición se verifica cuando la media del proceso es constante o no depende del tiempo, y la varianza es finita y constante.

Una serie temporal que exhiba una tendencia marcada hacia el crecimiento experimentará un aumento constante en su media a lo largo del tiempo. En consecuencia, es probable que el proceso estocástico que generó dicha serie no sea estacionario en términos de media. Del mismo modo, una serie temporal que muestre

fluctuaciones con amplitudes irregulares a lo largo del tiempo probablemente no se originará de un proceso estocástico estacionario en términos de varianza. La diferencia entre ambos tipos de series se visualiza claramente en la Figura 22 (Parra, 2019).

Las series temporales no estacionarias muestran algunas tendencias en su desarrollo a lo largo del tiempo, lo que implica que no exhiben una inclinación hacia algún valor constante en el transcurso temporal (Mauricio, 2007).

Ocuparemos series temporales para el análisis del funcionamiento de los diques colocados en la microcuenca y analizar el efecto que causa en los sedimentos y en el agua que pasa por este tramo del volcán Ilaló. Este control de datos se tomó semanalmente por un lapso de 16 semanas teniendo así datos históricos para el análisis estadístico.

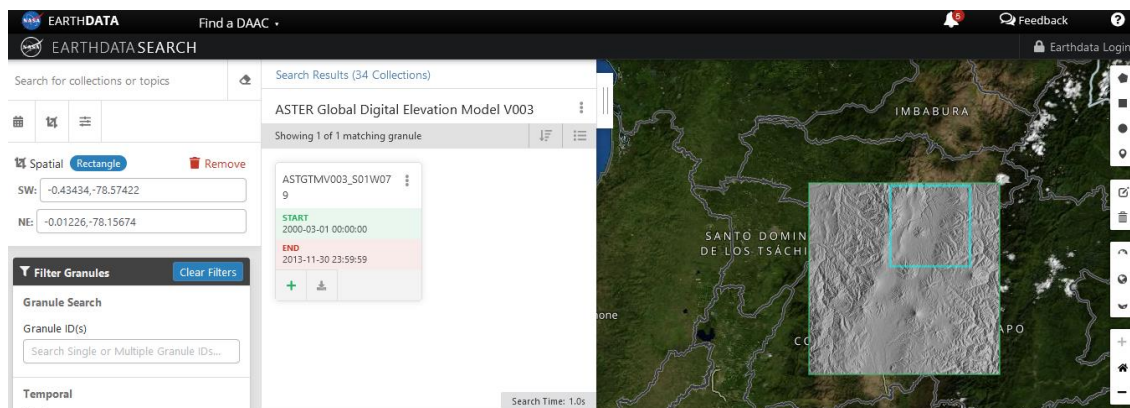
Metodología para la determinación de la zona de instalación de nuevos diques

El software QGIS proporciona parámetros generales de la microcuenca Urku Huayku, se generó la cuenca a partir del raster obtenido en la página de la NASA (earthdata.nasa.gov) como se observa en la Figura 23. También se procedió a realizar el histograma de frecuencias altimétricas, que muestra el porcentaje de área comprendido entre los diferentes niveles, según intervalos de alturas (Zhicay Lombaida, 2020).

El análisis de frecuencia altimétrica se emplea para caracterizar las frecuencias de distintos niveles de altitud en una secuencia vertical. Esto abarca la altitud de ubicaciones específicas, los puntos más elevados en una malla de muestreo cuadrada, las alturas de cumbres, así como las altitudes de zonas planas o depresiones como mesetas, crestas y valles (Carmona Arteaga, 2021).

Figura 23

Página de la NASA para obtener el raster de la zona de estudio



Nota. Recuperado de earthdata.nasa.gov.

Para la colocación de más diques de caña guadua fue necesario conocer el perfil de la quebrada ya que estas estructuras deberían construirse en las zonas de mayor pendiente para frenar las velocidades críticas de agua y así prevenir las erosiones, y en las zonas donde hay más presencia de corrientes tributarias ya que allí se concentra la mayor cantidad de agua. Los diques ayudarán a controlar dichos flujos de agua.

Para realizar el cálculo de la pendiente, se empleó la fórmula:

$$\% \text{ Pendiente} = \frac{\text{Cota inicial} - \text{Cota final (msnm)}}{\text{longitud horizontal (m)}} * 100$$

QGIS es el software geoespacial gratuito y de código abierto más popular del mundo (Park et al., 2023), pertenece a la Open-Source Geospatial Foundation (OSGeo) (Rosas-Chavoya et al., 2022), nos permite visualizar, editar y analizar datos georreferenciados. Este software de Sistema de Información Geográfica (SIG), está compuesto por herramientas que nos permiten manipular la información geográfica y, en consecuencia, crear mapas que ayudan a comprender y organizar mejor los datos geoespaciales (Duarte et al., 2021).

Se simuló el terreno de la cuenca de la quebrada de Urku Huayku evidenciando los puntos estratégicos en donde se puede colocar nuevos diques para que cumplan la misma función de los ya existentes y contrarrestar de mejor manera la erosión de este sector.

Capítulo IV

Resultados y discusión

La microcuenca Urku Huayku se encuentra en el volcán Ilaló, se tomaron muestras de agua y sedimento durante 16 semanas entre los meses de abril y julio del 2023, para determinar la calidad y cantidad de agua y sedimentos, así como también la calidad biológica, generados tras la instalación de tres diques de caña guadua en el año 2021.

Se establecieron variables para determinar los parámetros de cantidad y calidad, estas fueron analizadas en los laboratorios de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.

Tipo de suelo de la microcuenca Urku Huayku

Según el mapa geológico del Ecuador, que se encuentra en el Apéndice 5, el volcán Ilaló pertenece al periodo cuaternario, a la época del holoceno, debido a su ubicación en la región Sierra, la leyenda estratigráfica nos indica que esta zona está compuesta de estrato volcanes constituidos por flujos de lava dasíticas a andesíticas y piroclastos, es decir que es un suelo volcánico.

Volumen de sedimentos generado en los diques

Los diques de contención se caracterizan por capturar los sedimentos que se encuentran aguas arriba, por lo general se forma un embalse detrás del dique donde se acumulan los sedimentos gradualmente (Galicía et al., 2019).

En la Figura 24, se aprecia la acumulación de sedimento que hubo desde la instalación en el año 2021 hasta el año 2023.

Figura 24

Acumulación de sedimentos



2021



2023

Vista aguas arriba



2021



2023

Vista aguas abajo

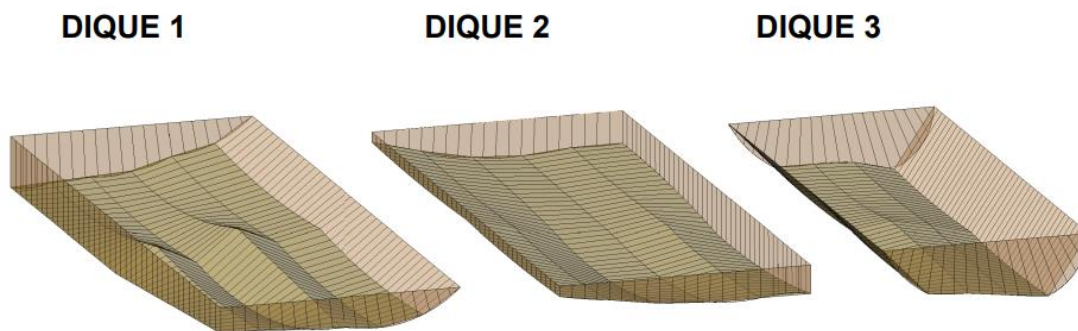
Nota. Diferencia del año 2021 al 2023 de la acumulación de sedimentos en los diques, las fotos del año 2021 se recuperaron de: (Hurtado Bolaños et al., 2021) y las fotos del 2023 son de autoría propia.

Desde la instalación de los diques en el año 2021 hasta la actualidad en 2023, se ha estimado que el dique 1, situado en la cota más alta, ha acumulado alrededor de 6.19 m³ de sedimento. El dique 2 ha registrado una acumulación de aproximadamente 5.8 m³, mientras que en el dique 3, ubicado en la zona más baja, se ha acumulado alrededor de 4.88 m³ de sedimento.

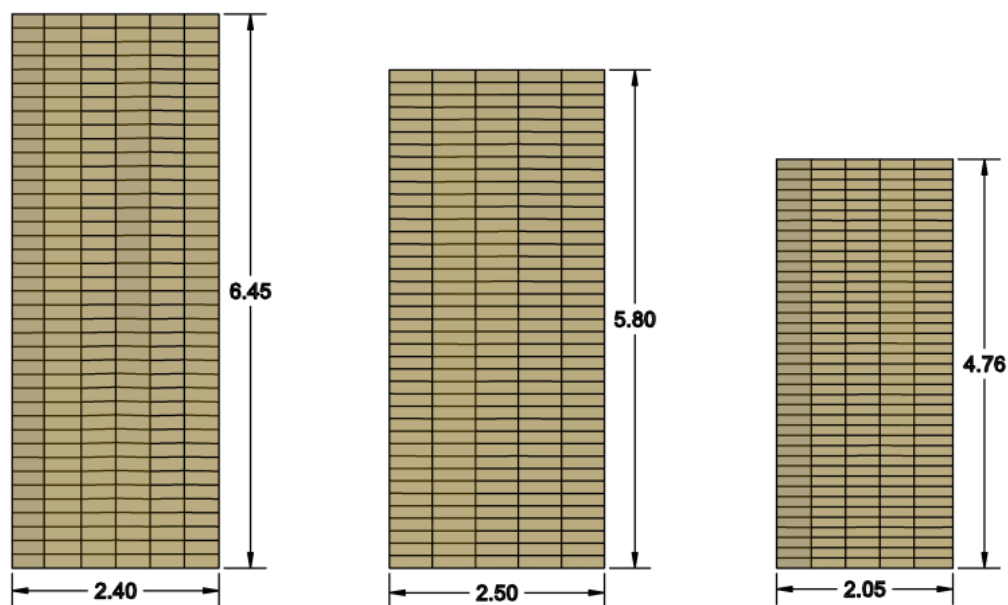
En la Figura 25, se aprecia un esquema del volumen de sedimentos acumulado en los diques en el año 2023.

Figura 25

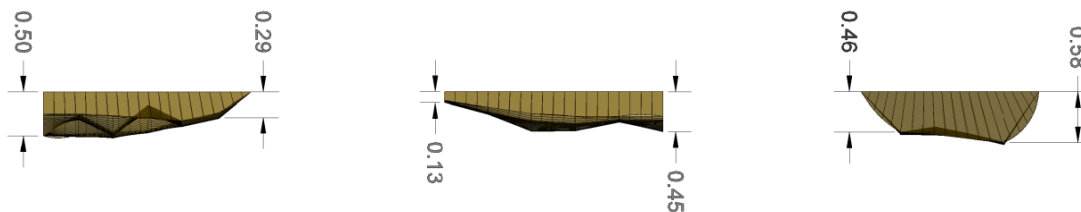
Volumen de sedimentos en los diques de la microcuenca Urku Huayku



Vista 3D de la acumulación de sedimento detrás de los diques



Vista en planta de la acumulación de sedimento detrás de los diques



Vista en corte de la acumulación de sedimento detrás de los diques

Nota. Los gráficos fueron realizados en AutoCAD 3D.

Parámetro hidrológico: precipitación

La información sobre la precipitación es relevante en la evaluación de la calidad y cantidad tanto del agua como de los sedimentos, ya que las precipitaciones afectan directamente a la microcuenca (Cárdenas Novillo, 2020).

Las precipitaciones generan escorrentía, la cual arrastra sedimentos, transporta contaminantes y nutrientes, teniendo un efecto en la calidad del agua. Además, estas lluvias pueden afectar la disponibilidad de agua en la microcuenca (Quinteros Carabalí et al., 2019).

Los datos sobre las precipitaciones mensuales fueron proporcionados por el INAMHI y provienen de la estación meteorológica M003 Izobamba, la cual se ubica en las proximidades de la zona de estudio y se mantiene en operación.

En el Apéndice 6 se presentan las precipitaciones mensuales desde el año 2000 hasta el año 2022. Durante el periodo de análisis de muestras, que abarca desde abril hasta julio, se observa que el mes de abril registra la mayor cantidad de precipitaciones.

Los datos de precipitación diaria se adquirieron a partir de un archivo histórico de pronósticos meteorológicos disponibles en línea. Sin embargo, debido a que estos registros son generales para Quito, carecen de la precisión necesaria para reflejar con exactitud las condiciones específicas de la zona de investigación.

Calidad del agua de la quebrada Urku Huayku

Para obtener la calidad del agua, se realizó el análisis correspondiente en cada una de las 16 muestras obtenidas de cada semana, obteniendo los siguientes resultados para los diferentes parámetros.

Temperatura

La temperatura oscilaba entre los 19 a 21 C° en las diferentes muestras tomadas al momento de analizarlas en laboratorio. Es fundamental reconocer que este factor influye en todos los parámetros estudiados, puesto a que tiene un efecto en los procesos

físicos y químicos (Díaz García & González Pérez, 2022). Siendo una constante física, esta también ejerce influencia sobre varios fenómenos que ocurren en el agua, lo que a su vez repercute en las reacciones biológicas, las cuales se dan en una temperatura óptima (Rodríguez Zamora., 2009).

Potencial hidrógeno (pH)

La escala del pH se encuentra enumerada del 0 al 14 siendo el valor 0 una sustancia totalmente acida y por otro lado el 14 se considera un básico, la parte central se la conoce como neutral y exactamente se encuentra en el valor 7. La OMS considera un rango normal del agua entre 6,5 a 9. Las aguas que tengan un valor menor al 6,5 indican que el agua puede ser corrosiva por el transporte de metales, al contrario, si es mayor al 9 se considera un agua alcalina (Northern Plains & Mountains, 2015).

De los 16 resultados obtenidos de pH y detallados en la Tabla 6, el Dique 1 se promedió en 7,05, en la zona del Dique 2 el promedio fue de 7,08 y por último en el Dique 3 se presencié un pH promedio de 6,86. El agua ubicada en la zona de los tres diques se caracteriza por ser un líquido neutro con valores cercanos a 7 en la escala de pH. Este parámetro también se ve influenciado por las precipitaciones. Al realizar análisis semanales, se nota una variación en relación a las lluvias presentes en la región. Sin embargo, en ningún caso los resultados registraron valores inferiores a 6.5 ni superiores a 9. Por consiguiente, se concluye que el agua mantiene condiciones óptimas en términos de pH, asegurando así su equilibrio hidrógeno (Hurtado Bolaños et al., 2021).

. Comparando con los datos históricos que se tiene registrado, sigue manteniendo un pH similar, ya que en el año 2021 se promediaba un pH de 7,25.

Tabla 6

pH de las muestras de agua de la microcuenca Urku Huayku

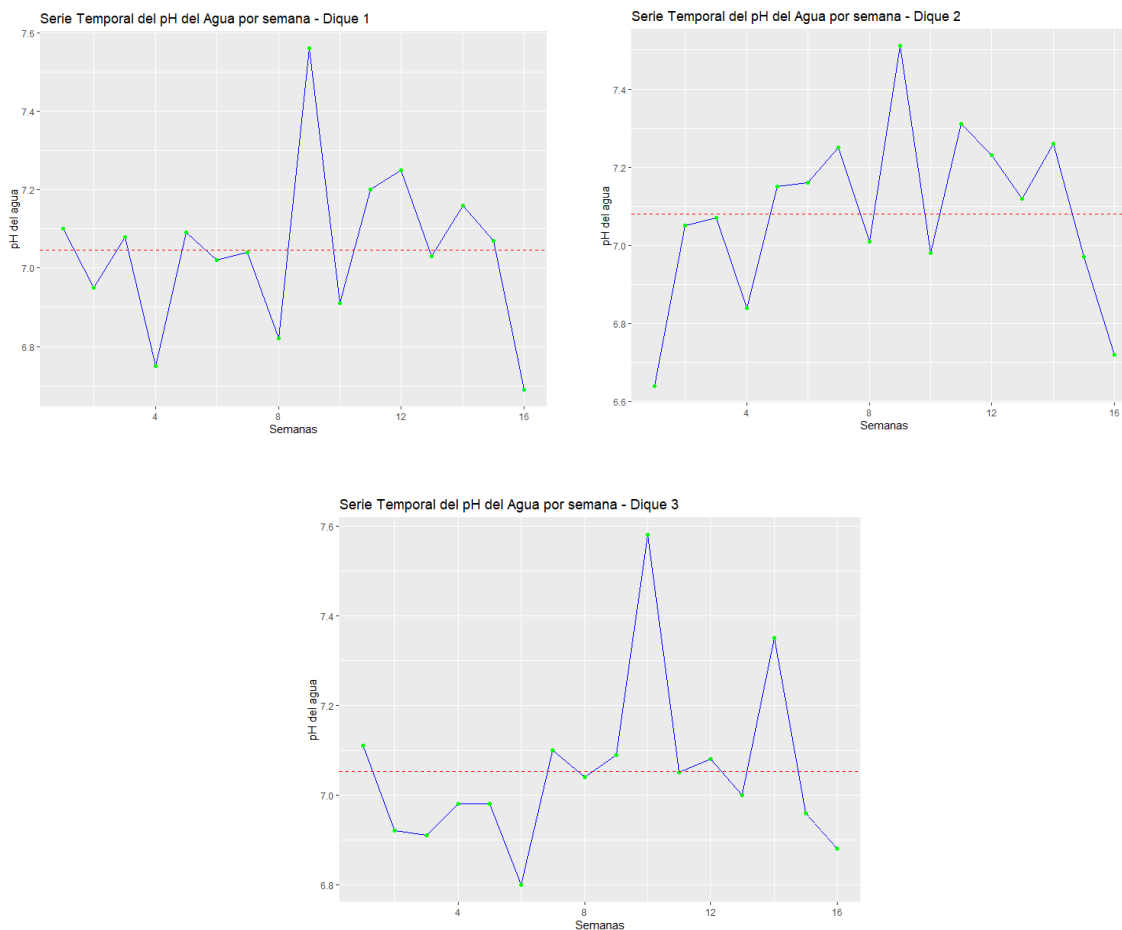
| N° de Muestra Semana | PRECIPITACIÓN [MM] | pH | | |
|----------------------|--------------------|-----------|-----------|-----------|
| | | DIQUE N°1 | DIQUE N°2 | DIQUE N°3 |
| 1 | 8 | 7.1 | 6.64 | 7.11 |
| 2 | 18.5 | 6.95 | 7.05 | 6.92 |
| 3 | 19 | 7.08 | 7.07 | 6.91 |
| 4 | 10.4 | 6.75 | 6.84 | 6.98 |
| 5 | 11.6 | 7.09 | 7.15 | 6.98 |
| 6 | 12.2 | 7.02 | 7.16 | 6.8 |
| 7 | 9.1 | 7.04 | 7.25 | 7.1 |
| 8 | 8.5 | 6.82 | 7.01 | 7.04 |
| 9 | 6.5 | 7.56 | 7.51 | 7.09 |
| 10 | 6.2 | 6.91 | 6.98 | 7.58 |
| 11 | 4.3 | 7.2 | 7.31 | 7.05 |
| 12 | 4.4 | 7.25 | 7.23 | 7.08 |
| 13 | 5.5 | 7.03 | 7.12 | 7 |
| 14 | 6.8 | 7.16 | 7.26 | 7.35 |
| 15 | 4 | 7.07 | 6.97 | 6.96 |
| 16 | 8 | 6.69 | 6.72 | 6.88 |

Nota: En la tabla se aprecia el pH de la muestra de agua de cada dique.

En la Figura 26, se visualiza la serie temporal del pH en las muestras de agua tomadas de los diferentes diques.

Figura 26

Serie temporal del pH en las muestras de agua de cada dique



Nota. Gráficos de series temporales realizados en RStudio.

Para llevar a cabo el análisis de las series temporales, es fundamental tener en cuenta que las series que se relacionan con la precipitación muestran una tendencia estacionaria en función del tiempo (González Sanclemente, 2021). En la ubicación de nuestro proyecto podemos definir que puede variar y tener tendencia descendente o creciente dependiendo la época del año que es la que determina con qué frecuencia se dan las precipitaciones.

Al examinar los gráficos que representan las series temporales de cada uno de los diques, se pudo observar una similitud entre las tres. Se identifica que estas series son estacionarias en términos de media, aunque no en términos de varianza. Este fenómeno se explica por el impacto de las precipitaciones en la microcuenca. Durante

los meses de abril y mayo, se registraron mayores cantidades de precipitación, lo que redujo el pH del agua debido al arrastre de elementos. En contraste, los meses de junio y julio evidenciaron un aumento en los valores del pH, ya que se caracterizaron por la ausencia de precipitaciones. Esta variación en las condiciones pluviales es la razón por la cual la varianza no muestra una estabilidad temporal constante.

En términos de media, se observa una estabilidad en los valores debido a que nunca se alejaron significativamente de un valor medio establecido. Para el Dique 1, el promedio del pH se mantuvo en 7.05, mientras que para el Dique 2 el promedio fue de 7.08. Finalmente, en el Dique 3, se registró un promedio de pH de 6.86.

Conductividad eléctrica (CE)

La capacidad para conducir corriente eléctrica es un parámetro importante que se ve afectado por la temperatura, por eso existe algo de variedad en los resultados de los ensayos, se obtuvo un resultado de promedio 128,17 $\mu\text{S}/\text{cm}$ para el Dique 1, el Dique 2 promedió 126,66 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y el último Dique tuvo un valor promedio de 123,81 $\mu\text{S}/\text{cm}$ teniendo una clasificación C1 siendo aguas de baja salinidad según la Clasificación de las aguas con base en la conductividad eléctrica que se aprecia en la Tabla 1.

Esta propiedad se sigue manteniendo parecida a los datos históricos obtenidos en el año 2021 que fue promediado en 120 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Hurtado Bolaños et al., 2021).

Al analizar los valores por cada semana se puso notar que la conductividad eléctrica está condicionada por las precipitaciones variando así los resultados obtenidos cada semana (C. I. Rodriguez et al., 2010), como se observa en la Tabla 7.

Tabla 7

CE de las muestras de agua de la microcuenca Urku Huayku

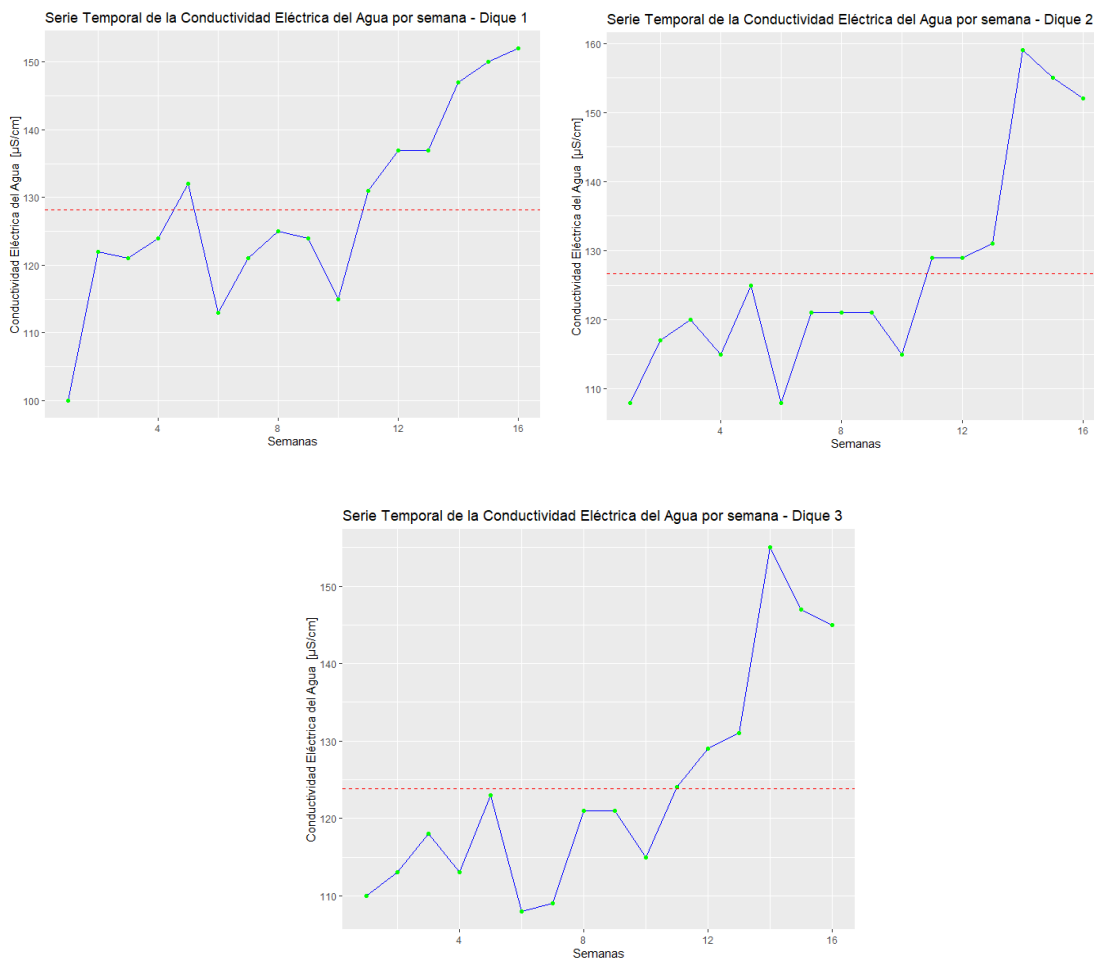
| CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA [$\mu\text{S cm}^{-1}$] | | | | |
|---|--------------------|-----------|-----------|-----------|
| N° de Muestra Semana | PRECIPITACIÓN [MM] | DIQUE N°1 | DIQUE N°2 | DIQUE N°3 |
| 1 | 8 | 100 | 108 | 110 |
| 2 | 18.5 | 122 | 117 | 113 |
| 3 | 19 | 121 | 120 | 118 |
| 4 | 10.4 | 124 | 115 | 113 |
| 5 | 11.6 | 132 | 125 | 123 |
| 6 | 12.2 | 113 | 108 | 108 |
| 7 | 9.1 | 121 | 121 | 109 |
| 8 | 8.5 | 125 | 121 | 121 |
| 9 | 6.5 | 124 | 121 | 121 |
| 10 | 6.2 | 115 | 115 | 115 |
| 11 | 4.3 | 131 | 129 | 124 |
| 12 | 4.4 | 137 | 129 | 129 |
| 13 | 5.5 | 137 | 131 | 131 |
| 14 | 6.8 | 147 | 159 | 155 |
| 15 | 4 | 150 | 155 | 147 |
| 16 | 8 | 152 | 152 | 147 |

Nota: En la tabla se aprecia la CE de la muestra de agua de cada dique.

En la Figura 27, se visualiza la serie temporal de la CE en las muestras de agua tomadas de los diferentes diques.

Figura 27

Serie temporal de la CE en las muestras de agua de cada dique



Nota. Gráficos de series temporales realizados en RStudio.

La conductividad eléctrica resultante a lo largo del tiempo de muestreo presenta variaciones, diversas investigaciones demuestran que la CE se reduce en función al crecimiento del caudal el mismo que es afectado por precipitaciones y por la temperatura (Aumassanne & Fontanella, 2015).

Al analizar la Figura 27, que representa las series temporales de conductividad eléctrica (CE), se logró corroborar la afirmación previa. Se constató que las tres gráficas exhiben un patrón de comportamiento idéntico. En los primeros meses, caracterizados por mayores precipitaciones y caudales, los valores de conductividad eléctrica resultan menores. Por contraste, durante los períodos de escasez de lluvias en la microcuenca, se observa un

incremento en estos valores en los tres diques, llegando a niveles máximos que oscilan entre 150 a 160 [$\mu\text{S cm}^{-1}$]. Es importante resaltar que la conductividad eléctrica está vinculada con diversos efectos en las propiedades del suelo, incluyendo el pH, los nutrientes y la propia conductividad eléctrica, entre otros factores (Aumassanne & Fontanella, 2015).

Nutrientes: Nitratos

Al analizar los nitratos presentes en el agua de la microcuenca, datos que se encuentran en la Tabla 8, se pudo observar que tiene niveles bajos ya que promedia un valor de $2,5 \text{ mg L}^{-1}$. Se debe tener en cuenta que la OMS establece que el agua en estado natural tiene contenido de nitratos en aproximadamente 10 mg L^{-1} y el máximo contenido de nitratos que está permitido que contenga el agua potable es de 50 mg L^{-1} (Vitoria et al., 2015). Lo que significa que la microcuenca tiene un bajo contenido de nitratos en su agua.

Tabla 8

Nitratos de las muestras de agua de la microcuenca Urku Huayku

| N° de Muestra Semana | PRECIPITACIÓN [MM] | NITRATO (NO ₃) [mg L^{-1}] | | |
|----------------------|--------------------|---|-----------|-----------|
| | | DIQUE N°1 | DIQUE N°2 | DIQUE N°3 |
| 1 | 8 | 1.3 | 1.4 | 1.3 |
| 2 | 18.5 | 1.6 | 2.2 | 1.7 |
| 3 | 19 | 2.5 | 1.7 | 1.9 |
| 4 | 10.4 | 3.2 | 3.4 | 3.3 |
| 5 | 11.6 | 1.8 | 2 | 1.5 |
| 6 | 12.2 | 2.3 | 2.6 | 3.1 |
| 7 | 9.1 | 2.9 | 2.8 | 3.3 |

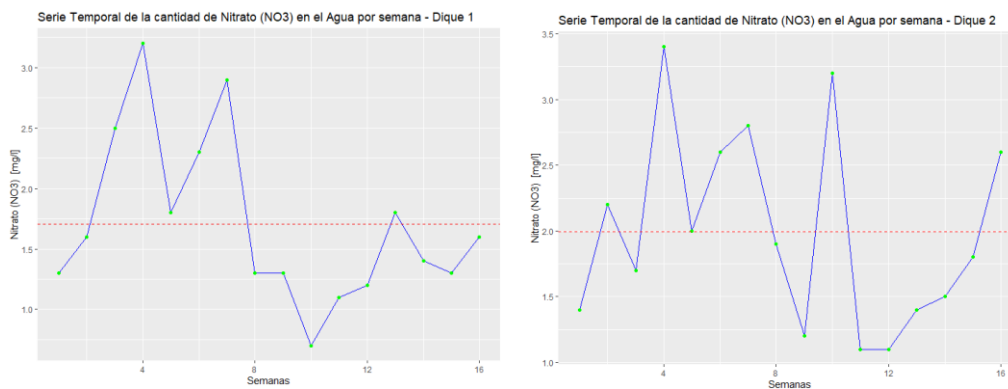
| N° de Muestra Semana | NITRATO (NO ₃) [mg L ⁻¹] | | | |
|----------------------|--|-----------|-----------|-----------|
| | PRECIPITACIÓN [MM] | DIQUE N°1 | DIQUE N°2 | DIQUE N°3 |
| 8 | 8.5 | 1.3 | 1.9 | 1.4 |
| 9 | 6.5 | 1.3 | 1.2 | 1.9 |
| 10 | 6.2 | 0.7 | 3.2 | 1.5 |
| 11 | 4.3 | 1.1 | 1.1 | 2.7 |
| 12 | 4.4 | 1.2 | 1.1 | 2.9 |
| 13 | 5.5 | 1.8 | 1.4 | 1.9 |
| 14 | 6.8 | 1.4 | 1.5 | 1.4 |
| 15 | 4 | 1.3 | 1.8 | 1.9 |
| 16 | 8 | 1.6 | 2.6 | 2 |

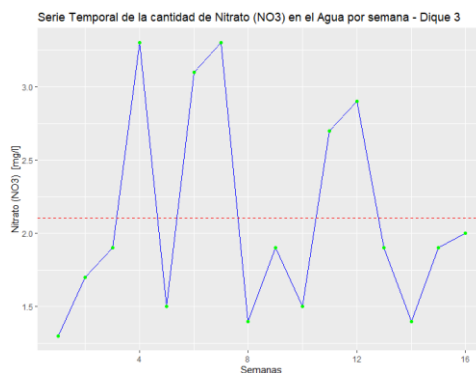
Nota: En la tabla se aprecian los nitratos de la muestra de agua de cada dique.

En la Figura 28, se visualiza la serie temporal de los nitratos en las muestras de agua tomadas de los diferentes diques.

Figura 28

Serie temporal de los nitratos en las muestras de agua de cada dique





Nota. Gráficos de series temporales realizados en RStudio.

En las gráficas de nitratos se observó que en el dique 1 los resultados varían al comparar con los otros dos diques, dado a que esta gráfica representa una serie estacionara en media, pero no en varianza porque en las primeras semanas los valores son más altos que la media y en las últimas semanas estos valores son menores, en los siguientes dos diques estos valores dan gráficas que al analizarlas se pueden definir como series estacionarias en media y varianza.

Se realizó una evaluación en los tres diques, y se determinó que los picos máximos de concentración no exceden el límite permisible establecido por la Organización Mundial de la Salud (OMS) para la calidad del agua, el cual es de 10 mg L⁻¹. En los diques, los valores máximos registrados se encontraron en el rango de 3 a 3.5 mg L⁻¹, lo que indica niveles bajos de concentración y, en consecuencia, resultados dentro de los parámetros aceptables (Pacheco Ávila et al., 2004).

Nutrientes: Fosfatos

El valor recomendable al analizar fosfatos se estable en los Criterios Ecológicos de Calidad del Aguas CE-CCA-001/89, donde se menciona que el valor resultante debe ser menor a 0.05 mg L⁻¹ en afluentes, en los estudios realizados, estos valores son mayores al establecido, como se aprecia en la Tabla 9, resultó un promedio de 3,5 mg L⁻¹, siendo estos valores superiores, se puede dar como consecuencia la existencia de

algas las cuales tienden a consumir el oxígeno del medio acuático y provocan problemas en la fauna y flora, ya que permite el desarrollo de especies biológicas indeseables y acelera el proceso de eutrofización (UPO, 2004).

Tabla 9

Fosfatos de las muestras de agua de la microcuenca Urku Huayku

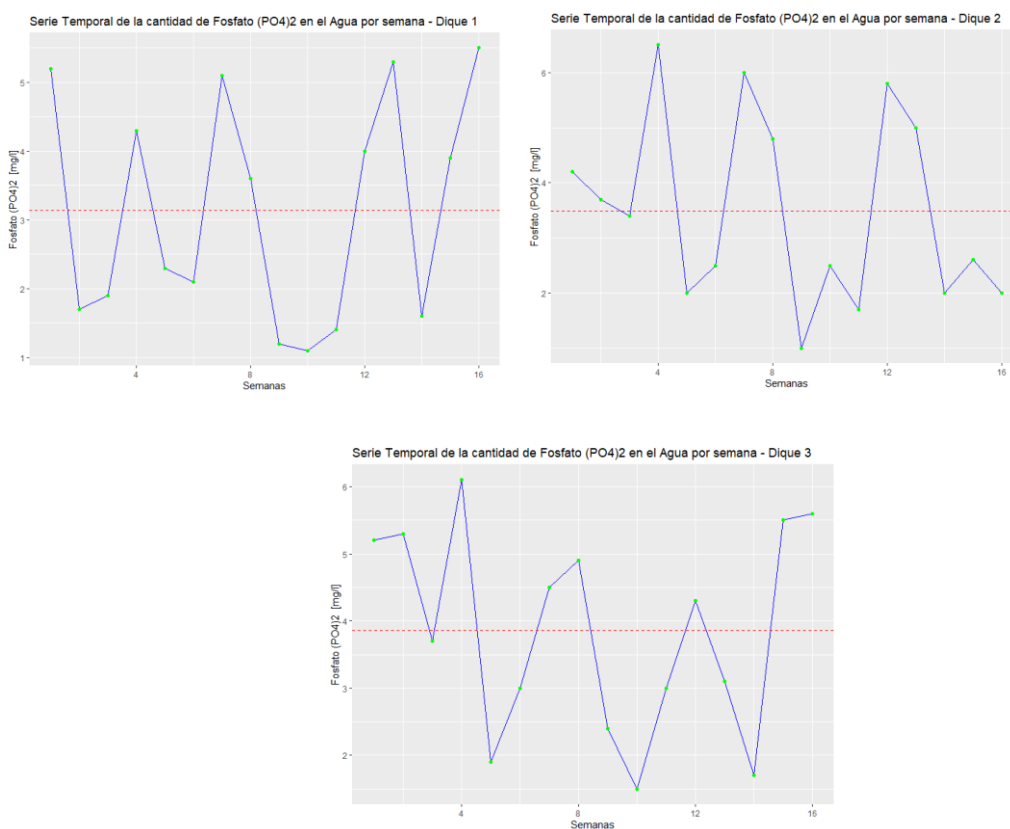
| N° de Muestra Semana | FOSFATO (PO ₄) ₂ [mg L ⁻¹] | | | |
|----------------------|---|-----------|-----------|-----------|
| | PRECIPITACIÓN [MM] | DIQUE N°1 | DIQUE N°2 | DIQUE N°3 |
| 1 | 8 | 5.2 | 4.2 | 5.2 |
| 2 | 18.5 | 1.7 | 3.7 | 5.3 |
| 3 | 19 | 1.9 | 3.4 | 3.7 |
| 4 | 10.4 | 4.3 | 6.5 | 6.1 |
| 5 | 11.6 | 2.3 | 2 | 1.9 |
| 6 | 12.2 | 2.1 | 2.5 | 3 |
| 7 | 9.1 | 5.1 | 6 | 4.5 |
| 8 | 8.5 | 3.6 | 4.8 | 4.9 |
| 9 | 6.5 | 1.2 | 1 | 2.4 |
| 10 | 6.2 | 1.1 | 2.5 | 1.5 |
| 11 | 4.3 | 1.4 | 1.7 | 3 |
| 12 | 4.4 | 4 | 5.8 | 4.3 |
| 13 | 5.5 | 5.3 | 5 | 3.1 |
| 14 | 6.8 | 1.6 | 2 | 1.7 |
| 15 | 4 | 3.9 | 2.6 | 5.5 |
| 16 | 8 | 5.5 | 2 | 5.6 |

Nota: En la tabla se aprecian los fosfatos de la muestra de agua de cada dique.

En la Figura 29, se visualiza la serie temporal de los fosfatos en las muestras de agua tomadas de los diferentes diques.

Figura 29

Serie temporal de los fosfatos en las muestras de agua de cada dique



Nota. Gráficos de series temporales realizados en RStudio.

La Figura 29 ilustra que, en el análisis de fosfatos, los tres diques presentan similitudes. Estas series temporales exhiben estacionariedad tanto en términos de media como de varianza. Esto se debe a que muestran una tendencia ascendente y descendente en una misma dirección, manteniendo un patrón continuo de variación alrededor de la media en la gráfica.

En cuanto a los resultados obtenidos en estos diques, se evidencia que superan los límites máximos establecidos, fijados en 0.05 mg L-1. Esta situación se atribuye a la

presencia de actividades ganaderas y agrícolas en la zona, que contribuyen a estos niveles elevados de fosfatos (Maza Lmea, 2017).

Sulfatos

En Ecuador, el parámetro de sulfatos se encuentra en el Acuerdo Ministerial 97a, donde indica que el límite máximo permisibles en cuerpos de agua dulce es de 1000 mg/l, de igual manera si esta agua se quisiera utilizar para fines agrícolas o de riego el límite es de 250 mg/l.

Los resultados, después del análisis en el laboratorio fueron muy bajos, se promedia 3 mg L⁻¹. La baja concentración de sulfatos en los ríos generalmente no representa un problema para la mayoría de los ecosistemas acuáticos, ya que se encuentran en cantidades limitadas que son tolerables para la mayoría de los organismos acuáticos (Aguilera Rodríguez et al., 2010), Sin embargo, algunos ecosistemas dependen de los sulfatos, ya que ciertas bacterias y microorganismos utilizan los sulfatos como fuente de energía y parte de su metabolismo. Algunas plantas acuáticas pueden requerir sulfatos para su desarrollo, y la falta de ellos puede limitar su proceso de fotosíntesis.

Tabla 10

Sulfatos de las muestras de agua de la microcuenca Urku Huayku

| N° de Muestra Semana | SULFATO (SO ₄) ₂ [mg L ⁻¹] | | | |
|----------------------|---|-----------|-----------|-----------|
| | PRECIPITACIÓN [MM] | DIQUE N°1 | DIQUE N°2 | DIQUE N°3 |
| 1 | 8 | 2 | 4 | 2 |
| 2 | 18.5 | 1 | 0 | 3 |
| 3 | 19 | 0 | 1 | 2 |
| 4 | 10.4 | 0 | 0 | 0 |

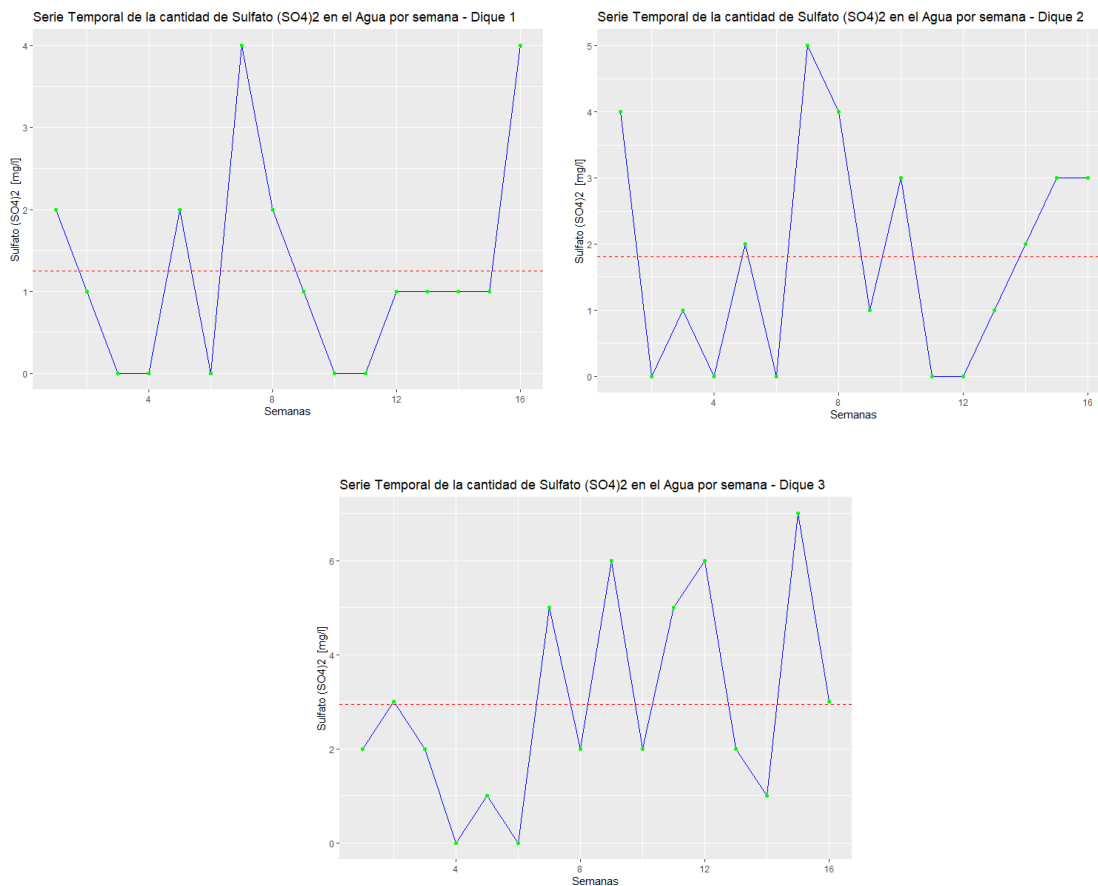
| N° de Muestra Semana | SULFATO (SO ₄) ₂ [mg L ⁻¹] | | | |
|----------------------|---|-----------|-----------|-----------|
| | PRECIPITACIÓN [MM] | DIQUE N°1 | DIQUE N°2 | DIQUE N°3 |
| 5 | 11.6 | 2 | 2 | 1 |
| 6 | 12.2 | 0 | 0 | 0 |
| 7 | 9.1 | 4 | 5 | 5 |
| 8 | 8.5 | 2 | 4 | 2 |
| 9 | 6.5 | 1 | 1 | 6 |
| 10 | 6.2 | 0 | 3 | 2 |
| 11 | 4.3 | 0 | 0 | 5 |
| 12 | 4.4 | 1 | 0 | 6 |
| 13 | 5.5 | 1 | 1 | 2 |
| 14 | 6.8 | 1 | 2 | 1 |
| 15 | 4 | 1 | 3 | 7 |
| 16 | 8 | 4 | 3 | 3 |

Nota: En la tabla se aprecian los sulfatos de la muestra de agua de cada dique.

En la Figura 30, se visualiza la serie temporal de los sulfatos en las muestras de agua tomadas de los diferentes diques.

Figura 30

Serie temporal de los sulfatos en las muestras de agua de cada dique



Nota. Gráficos de series temporales realizados en RStudio.

Del mismo modo que en el análisis de la concentración de fosfatos, se observaron similitudes en las gráficas para la presencia de sulfatos. Ambas series temporales se caracterizan por ser estacionarias tanto en términos de media como de varianza. Esto se refleja gráficamente mediante valores que oscilan en torno a una media constante, y, además, la variabilidad se mantiene constante a lo largo del tiempo (Villavicencio, 2020).

Al analizar los picos máximos en las 3 graficas se evidencia que son muy bajos con respecto a los límites permisibles siendo de 6 y 5 mg L⁻¹ correspondientemente. Debemos recordar que son sales inorgánicas que se pueden obtener en el agua por procesos naturales o por lo que es la actividad humana. Es mejor contar con valores debajo de lo permitido ya que, al tener cantidades excesivas de sulfatos en el agua

puede resultar perjudicial para la flora y fauna (Montero García, 2023).

Sólidos en suspensión (SST)

A partir de los datos contenidos en la Tabla 11 referentes a los sólidos suspendidos totales, se pudo establecer que estos valores se encuentran dentro de un rango permitido, de acuerdo con el establecido en el Acuerdo Ministerial 97a. Dicho acuerdo establece un límite de 130 mg L^{-1} para las aguas dulces. No obstante, en algunos registros del dique 3, se excede dicho límite. Estos resultados sobrepasaron los límites debido a factores como la presencia de actividad humana en los diques superiores, así como a las modificaciones físicas experimentadas por el dique 3 durante las 16 semanas de estudio, incluyendo deslizamientos de suelo y caída de árboles. Estos eventos influyeron en la acumulación de materia suspendida que no puede disolverse en un volumen específico de agua (Maza Lmea, 2017).

Tabla 11

SST de las muestras de agua de la microcuenca Urku Huayku

| N° de Muestra Semana | SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES [mg L^{-1}] | | | |
|----------------------|--|-----------|-----------|-----------|
| | PRECIPITACIÓN [MM] | DIQUE N°1 | DIQUE N°2 | DIQUE N°3 |
| 1 | 8 | 18 | 54 | 103 |
| 2 | 18.5 | 28 | 15 | 54 |
| 3 | 19 | 23 | 27 | 33 |
| 4 | 10.4 | 31 | 123 | 44 |
| 5 | 11.6 | 37 | 37 | 26 |
| 6 | 12.2 | 0 | 20 | 120 |
| 7 | 9.1 | 33 | 27 | 35 |
| 8 | 8.5 | 2 | 0 | 22 |

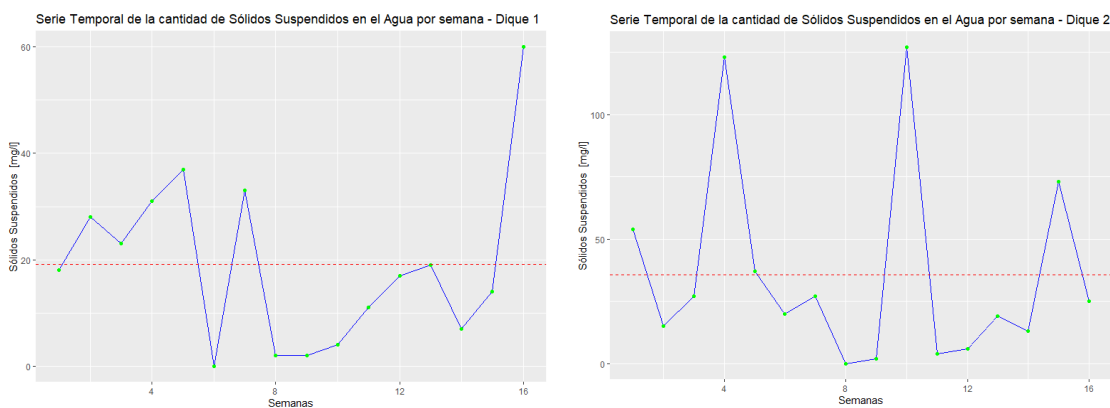
| SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES [mg L ⁻¹] | | | | |
|---|--------------------|-----------|-----------|-----------|
| N° de Muestra Semana | PRECIPITACIÓN [MM] | DIQUE N°1 | DIQUE N°2 | DIQUE N°3 |
| 9 | 6.5 | 2 | 2 | 175 |
| 10 | 6.2 | 4 | 127 | 64 |
| 11 | 4.3 | 11 | 4 | 199 |
| 12 | 4.4 | 17 | 6 | 166 |
| 13 | 5.5 | 19 | 19 | 130 |
| 14 | 6.8 | 7 | 13 | 11 |
| 15 | 4 | 14 | 73 | 178 |
| 16 | 8 | 60 | 25 | 16 |

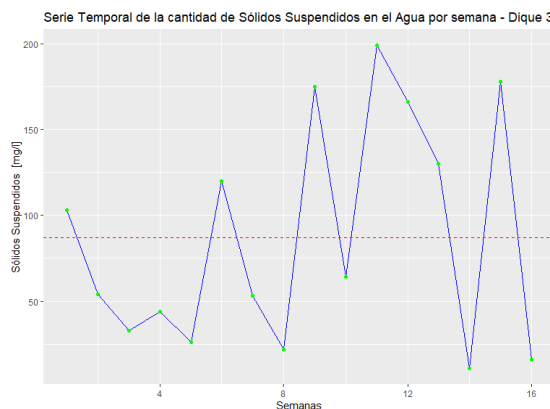
Nota: En la tabla se aprecian los SST de la muestra de agua de cada dique.

En la Figura 31, se visualiza la serie temporal de los SST en las muestras de agua tomadas de los diferentes diques.

Figura 31

Serie temporal de los SST en las muestras de agua de cada dique





Nota. Gráficos de series temporales realizados en RStudio.

En la Figura 31 se observa una diversidad de gráficas, con cada dique mostrando un tipo diferente de serie temporal. En particular, el dique 1 se presenta como una serie estacionaria con una media constante, pero con varianza en aumento. Esto se traduce en un inicio con una media estable y una varianza en aumento, aunque al avanzar las semanas, el último dato experimenta un aumento significativo.

Por otro lado, tanto el dique 2 como el dique 3 son ejemplos de series temporales estacionarias tanto en términos de media como de varianza. Esta situación se debe a que sus datos oscilan alrededor de una media constante y con una varianza uniforme. Sin embargo, entre estos dos diques, el dique 3 exhibe una particularidad. Inicialmente, sus valores comienzan en niveles más bajos. Esto se atribuye a que antes de la semana 5, este dique no tenía un árbol que obstruyera el flujo del agua antes de ingresar a su sección. La caída de este árbol en la semana 5 generó un aumento en los sólidos suspendidos totales (SST). Asimismo, se observan valores más elevados en la gráfica del dique 3 en comparación con los otros dos diques. Esto se debe al proceso de recolección de muestras, ya que para obtener muestras del dique 3 se necesitaba atravesar la sección de la microcuenca ubicada en la parte superior del dique. Esto propició la elevación de algunos sólidos que no pueden disolverse en el volumen de agua, lo que resultó en un incremento en los valores medidos en las muestras de

laboratorio.

Sólidos totales disueltos (SDT)

En la Tabla 12 se muestran los resultados de los SDT en las muestras de agua de la microcuenca Urku Huayku.

Tabla 12

SDT de las muestras de agua de la microcuenca Urku Huayku

| N° de Muestra Semana | SÓLIDOS TOTALES DISUELTOS [ppm] | | | |
|----------------------------|---------------------------------|-----------|-----------|-----------|
| | PRECIPITACIÓN [MM] | DIQUE N°1 | DIQUE N°2 | DIQUE N°3 |
| 1 | 8 | 75 | 54 | 52 |
| 2 | 18.5 | 55 | 53 | 55 |
| 3 | 19 | 66 | 52 | 57 |
| 4 | 10.4 | 50 | 50 | 50 |
| 5 | 11.6 | 64 | 62 | 59 |
| 6 | 12.2 | 56 | 54 | 54 |
| 7 | 9.1 | 60 | 51 | 54 |
| 8 | 8.5 | 64 | 60 | 60 |
| 9 | 6.5 | 62 | 60 | 60 |
| 10 | 6.2 | 57 | 57 | 57 |
| 11 | 4.3 | 64 | 64 | 62 |
| 12 | 4.4 | 68 | 64 | 64 |
| 13 | 5.5 | 68 | 65 | 65 |
| 14 | 6.8 | 74 | 79 | 77 |
| 15 | 4 | 74 | 70 | 70 |

| N° de Muestra Semana | SÓLIDOS TOTALES DISUELTOS [ppm] | | | |
|----------------------------|---------------------------------|-----------|-----------|-----------|
| | PRECIPITACIÓN [MM] | DIQUE N°1 | DIQUE N°2 | DIQUE N°3 |
| 16 | 8 | 76 | 75 | 72 |

Nota: En la tabla se aprecian los SDT de la muestra de agua de cada dique.

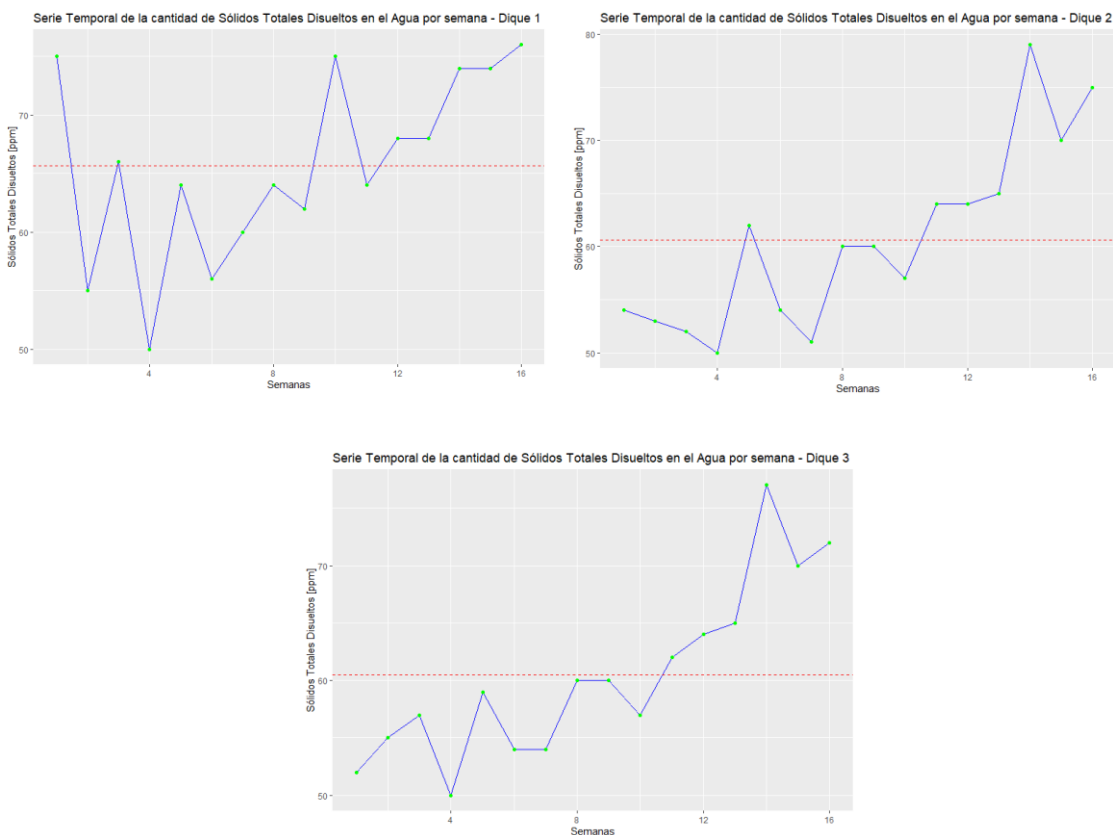
En el transcurso de las 16 semanas que se analizaron, se pudo observar una variación en los resultados de sólidos totales disueltos en el agua de los distintos diques, con una tendencia general al aumento. En relación a los valores históricos conocidos, que presentan un promedio de 96 ppm, los resultados actuales son más elevados. Esto sugiere que, a largo plazo, los valores de sólidos totales disueltos tienden a experimentar fluctuaciones ascendentes y descendentes, pero en todos los casos, se mantienen por debajo de los límites establecidos por el Acuerdo Ministerial 97^a, que indica un rango aceptable de 450 a 1000 ppm.

Un estudio realizado por la Organización Mundial de la Salud (OMS) clasificaría estos valores en un nivel excelente, ya que su rango óptimo para agua potable sería de 0 a 300 ppm. Este análisis proporciona pautas recomendadas para asegurar la calidad del agua potable (Carbotecnia, 2021).

En la Figura 32, se visualiza la serie temporal de los SDT en las muestras de agua tomadas de los diferentes diques.

Figura 32

Serie temporal de los SDT en las muestras de agua de cada dique



Nota. Gráficos de series temporales realizados en RStudio.

Al analizar la Figura 32 de series temporales se puso observar que no tienen ninguna tendencia por lo cual se identificaron como series no estacionarias en media y varianza, porque su tendencia y variabilidad cambian al pasar del tiempo. Esto puede determinar tendencias a largo plazo puesto a que puede crecer o decrecer ya que no oscila alrededor de la media (Villavicencio, 2020).

En la Figura 32 se observa una tendencia de crecimiento a largo plazo, pero si se realiza una predicción se obtendrá que en un punto decrecerá de la misma manera en la que creció.

Cantidad de agua de la quebrada Urku Huayku

Los datos del caudal de la microcuenca que se observan en la Tabla 13 están totalmente relacionados con las precipitaciones que se dan en la ubicación, las primeras

semanas analizadas fueron en el mes de abril y mayo del 2023 en las cuales la precipitación fue mayor y por ende existió un aumento en el caudal de la microcuenca, en el mes de junio y julio existió una disminución en las precipitaciones de igual manera ocurrió con el caudal.

Comparando con los datos históricos, en el año 2021 se obtuvo un valor promedio de 4.43 L sg⁻¹ y durante el periodo de muestreo en el año 2023 el valor promedio analizados in-situ de las 16 semanas fue de 5.79 L sg⁻¹. El aumento del caudal en la microcuenca fue considerable, comprobando un buen funcionamiento de los diques en el tema de aumento de la cantidad de agua.

Tabla 13

Caudal de la microcuenca Urku Huayku

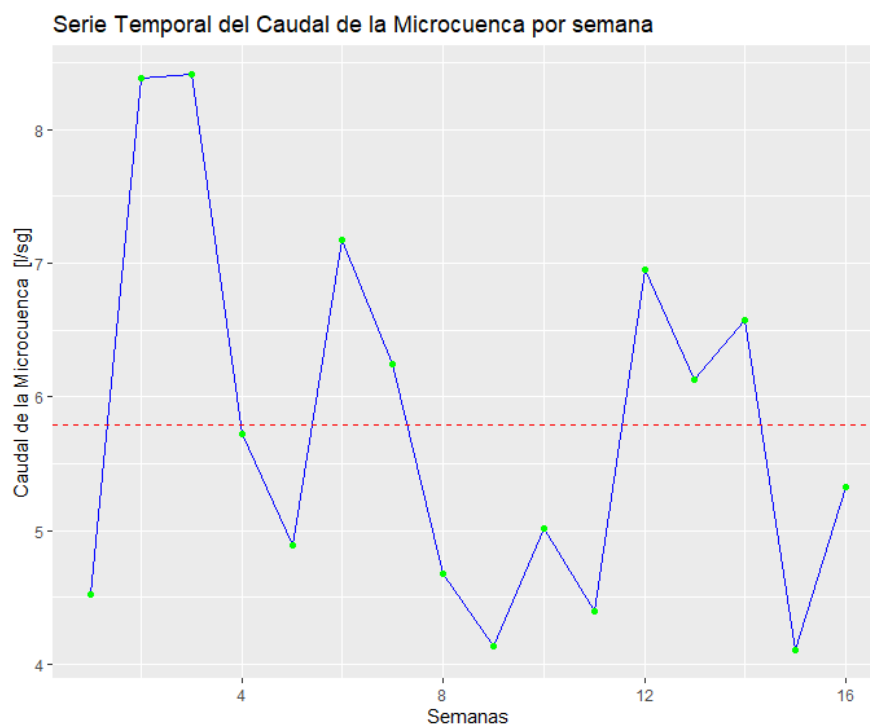
| N° DE MUESTRA SEMANA | Caudal [L sg ⁻¹] | |
|-------------------------|------------------------------|-------------|
| | Precipitación [mm] | Microcuenca |
| 1 | 8 | 4.52 |
| 2 | 18.5 | 8.38 |
| 3 | 19 | 8.41 |
| 4 | 10.4 | 5.72 |
| 5 | 11.6 | 4.89 |
| 6 | 12.2 | 7.17 |
| 7 | 9.1 | 6.25 |
| 8 | 8.5 | 4.68 |
| 9 | 6.5 | 4.14 |
| 10 | 6.2 | 5.02 |
| 11 | 4.3 | 4.40 |
| 12 | 4.4 | 6.95 |
| 13 | 5.5 | 6.13 |
| 14 | 6.8 | 6.57 |
| 15 | 4 | 4.11 |
| 16 | 8 | 5.33 |

Nota: En la tabla se aprecia el pH de la muestra alta, media y baja de cada dique.

La Figura 33 representa a una serie estacionaria en media y decreciente en varianza, este resultado se da porque en los primeros dos meses se tuvo un mayor valor de precipitaciones, al contrario que los últimos dos meses estudiados por ende su varianza decrece y es proporcionalmente directo a la precipitación, dando como resultado una serie estacionaria en media.

Figura 33

Serie temporal del caudal de la microcuenca Urku Huayku



Nota. Gráfico de serie temporal realizada en RStudio.

Calidad de los sedimentos de la quebrada Urku Huayku

Tras el análisis de las variables para determinar la calidad de los sedimentos de la quebrada Urku Huayku, se obtuvieron los siguientes resultados.

Potencial hidrógeno (pH) y Conductividad eléctrica (CE)

Estos parámetros se analizaron mediante el método de relación sedimento-agua

destilada 1:2.5. Se realizó la interpretación de los resultados de acuerdo a la Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000.

Después de realizar el análisis del pH de los sedimentos, se obtuvieron los resultados que se aprecian en la Tabla 14:

Tabla 14

pH de las muestras de sedimento de la microcuenca Urku Huayku

| Periodo de muestreo | pH | | | | | | | | |
|---------------------|---------|-------|------|---------|-------|------|---------|-------|------|
| | Dique 1 | | | Dique 2 | | | Dique 3 | | |
| | Alta | Media | Baja | Alta | Media | Baja | Alta | Media | Baja |
| Inicio (Abril) | 6.3 | 5.8 | 5.8 | 5.9 | 5.9 | 5.6 | 6.1 | 5.9 | 5.7 |
| Medio (Junio) | 6.6 | 6.0 | 5.9 | 5.8 | 5.2 | 5.1 | 6.3 | 6.1 | 6.1 |
| Final (Julio) | 6.0 | 5.7 | 5.5 | 6.0 | 5.7 | 5.4 | 6.6 | 6.4 | 6.0 |

Nota: En la tabla se aprecia el pH de la muestra alta, media y baja de cada dique.

El pH de los sedimentos es una medida para expresar el nivel de acidez o alcalinidad, los resultados obtenidos se encontraron en el rango 5.1-6.5 y en promedio 5.9, a partir de esto, se lo clasifica según las categorías que se encuentran en la NORMA Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000 como un pH moderadamente ácido.

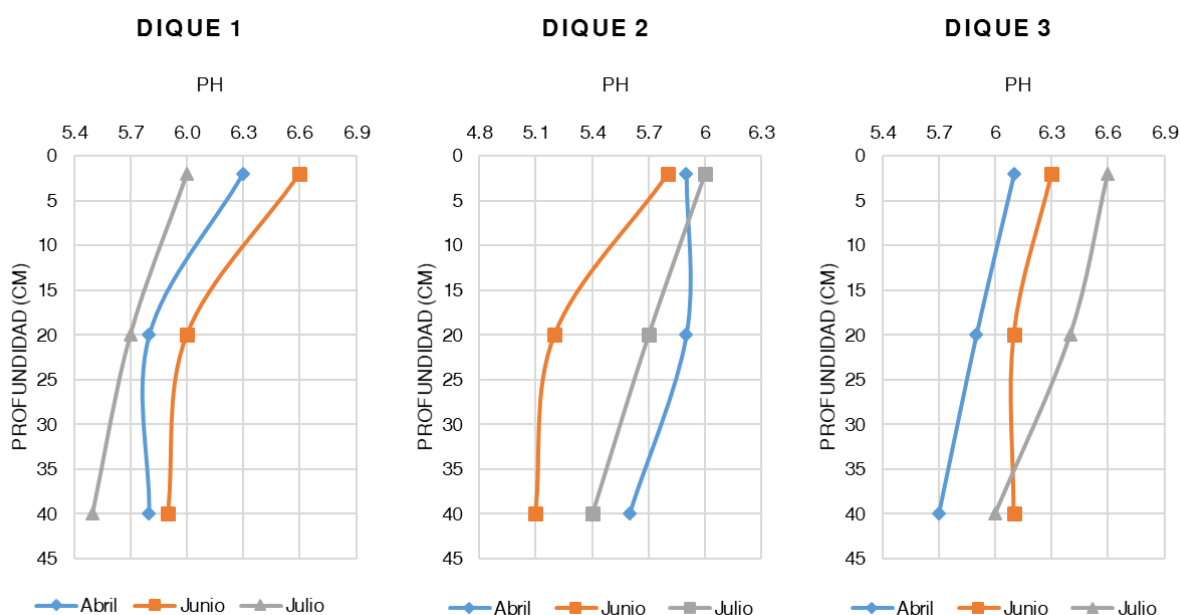
El pH es un indicador químico que influye en la interacción suelo-planta, también hace referencia a la calidad de agua, así como los nutrientes para las plantas y los microorganismos. En suelos con un pH neutral o ligeramente alcalino, la población de microorganismos es mayor y más activa (Soriano Soto, 2020), el sedimento de la quebrada Urku Huayku al presentar moderada acidez es menos propenso a una población activa de microorganismos, sin embargo, hay especies que se adaptan a este ambiente (Ibáñez, 2007), la mayoría de plantas y vegetales tienen un buen desarrollo en suelos moderadamente ácidos (Kluepfel & Lippert, 2016), como lo menciona (Carrera Villacrés et al., 2014), se consideran favorables los valores de pH que se encuentren en el rango entre 6.0 y 7.5 para la agricultura (Ibarra Castillo et al., 2009), los que se

encuentren por debajo pueden corregirse mediante el uso de la cal o compuestos de azufre.

En la Figura 34, se visualiza la distribución de pH para relación 1:2.5 en las nueve muestras de sedimento tomadas de los diferentes diques en tres profundidades:

Figura 34

Relación de pH y profundidad de una muestra



Nota. Gráficos de líneas realizados en Excel.

Como se observa en la Figura 34, la mayoría de muestras tomadas de la parte alta tiene un pH de 5.8-6.6, es decir, es menos ácido en la superficie. Algunos de los factores causantes de la variación del pH son los minerales presentes en el suelo, la descomposición de la materia orgánica y la dinámica de nutrientes. Su condición de acidez se da con mayor frecuencia en áreas con elevados niveles de precipitación. (Ibáñez, 2007).

El agua que atraviesa por el suelo, arrastra nutrientes esenciales como el calcio y el magnesio. A cambio, se incorporan al suelo elementos ácidos como el aluminio y el hierro. Debido a este proceso, los suelos en regiones con altos niveles de precipitación

tienden a ser más ácidos que aquellos en áreas con clima seco. La utilización de fertilizantes que contienen compuestos de amonio o urea aceleran la acidificación del suelo. Además, la descomposición de la materia orgánica también contribuye al aumento de la acidez (Kluepfel & Lippert, 2016).

Otro motivo de su moderada acidez es por la presencia de sulfato de hierro, como se aprecia en la Figura 35. El pH de este compuesto tiene valores inferiores a 7 y al mezclarse con el suelo lo acidifica.

Figura 35

Presencia de sulfato de hierro en la microcuenca



Nota. Fotografía de autoría propia.

En la tabla 15, se aprecian los resultados obtenidos de Conductividad Eléctrica:

Tabla 15

CE de las muestras de sedimento de la microcuenca Urku Huayku

| Periodo de muestreo | CE ($\mu\text{s cm}^{-1}$) | | | | | | | | |
|---------------------|------------------------------|-------|------|---------|-------|------|---------|-------|------|
| | Dique 1 | | | Dique 2 | | | Dique 3 | | |
| | Alta | Media | Baja | Alta | Media | Baja | Alta | Media | Baja |
| Inicio (Abril) | 100 | 80 | 80 | 130 | 90 | 80 | 170 | 140 | 100 |
| Medio (Junio) | 60 | 110 | 110 | 110 | 100 | 70 | 70 | 80 | 40 |
| Final (Julio) | 150 | 100 | 70 | 100 | 70 | 50 | 60 | 80 | 60 |

Nota: En la tabla se aprecia la CE de la muestra alta, media y baja de cada dique.

La conductividad eléctrica (CE) es la capacidad de un material para transportar corriente eléctrica y está vinculada a la cantidad de sales disueltas en el agua presente en el suelo, se ve afectada por diversos factores del suelo, tales como la humedad, nivel de porosidad, textura y contenido de materia orgánica (Carrera Villacrés et al., 2014).

Todos los resultados obtenidos en la Tabla son menores a $1000 \mu S cm^{-1}$ y presentan un promedio de $91 \mu S cm^{-1}$, a partir de esto, se lo interpreta según las categorías que se encuentran en la NORMA Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000 como unos sedimentos con efectos despreciables de salinidad.

En el estudio realizado por (Bozkurt et al., 2009) se destaca que la conductividad eléctrica presenta la mayor correlación con el contenido de humedad, dado que en el suelo, la fase líquida es la que conduce la electricidad, (Cicore et al., 2015) seguida por la cantidad de arcilla presente.

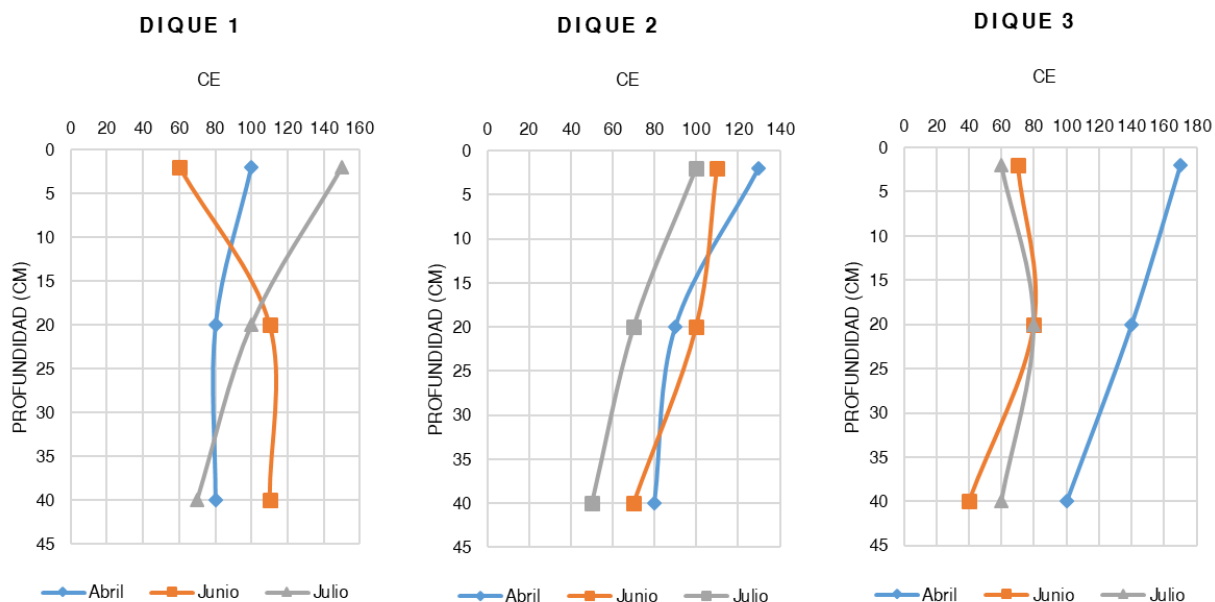
Los suelos con partículas finas y poros pequeños retienen agua con mayor fuerza y durante periodos más prolongados, esto resulta en una mejor capacidad de conducción eléctrica (Rhoades et al., 1989). En contraste con los suelos que contienen una proporción más alta de partículas de arena (Farahani & Flynn, 2007), como es el caso de los sedimentos de la microcuenca en la zona de estudio.

De acuerdo con (Freeland, 1989) los suelos que presentan bajo contenido de materia orgánica tienen una alta resistencia eléctrica, es decir, baja conductividad eléctrica.

En la Figura 36, se observa la distribución de CE para relación 1:2.5 en las nueve muestras de sedimento tomadas de los diferentes diques en tres profundidades:

Figura 36

Relación de CE ($\mu S cm^{-1}$) y la profundidad de una muestra



Nota. Gráficos de líneas realizados en Excel.

Como se aprecia en la Figura 36, la CE en la capa superior es variable ya que está expuesta al arrastre o erosión por factores climáticos, y las capas: media y baja presentan más estabilidad, también se observa que la mayor profundidad es la que tiene menor CE, esto se debe al bajo contenido de materia orgánica.

Los resultados de la conductividad eléctrica indican que hay una relación entre la conductividad eléctrica y el nivel de erosión del suelo. La introducción de obras de bioingeniería conduce a una disminución de la conductividad eléctrica del suelo. Conforme el sedimento se restaura por la aplicación de diques, su conductividad eléctrica tiende a disminuir (Romero et al., 2009).

Densidad

Densidad aparente. La densidad aparente es una propiedad que está vinculada a las técnicas de gestión tanto del suelo como del agua y puede cambiar rápidamente debido al cultivo, la erosión o el sobrepastoreo (Salamanca Jiménez & Sadeghian Khalajabadi, 2005).

Los resultados de densidad aparente de los sedimentos de la microcuenca Urku

Huayku se muestran en la Tabla 16, y su interpretación se realizó de acuerdo a las Normas Oficiales Mexicanas NOM-021-RECNAT-2000, con la cual, se determinó que el tipo de sedimento es mayormente franco, este tipo de sedimento está compuesto principalmente de arena, limo y una menor cantidad de arcilla, es blando, se desmenuza fácilmente, es bastante suave y ligeramente plástico (Hossne García, 2014).

Tabla 16

Densidad aparente

| Profundidad de muestra | Densidad aparente ($g\ cm^{-3}$) |
|-------------------------------|--|
| Alta | 1.21 |
| Media | 1.25 |
| Baja | 1.31 |

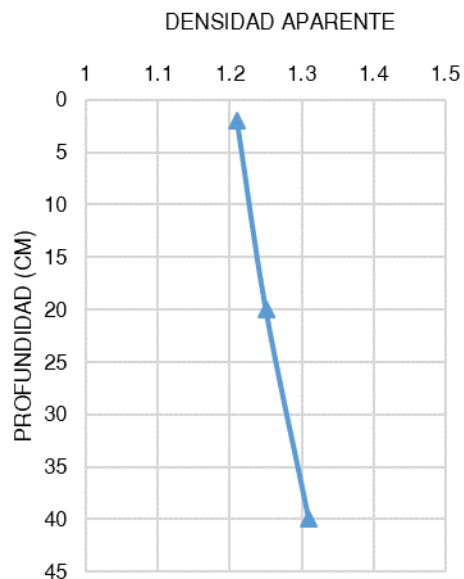
Nota: En la tabla se aprecia la densidad aparente realizada en una muestra alta, media y baja.

Los valores de densidad aparente se ven afectados tanto por las partículas sólidas como por los espacios porosos, que a su vez se encuentran mayormente determinados por la cantidad de materia orgánica en el sedimento. Conforme la materia orgánica y los poros se incrementan, la densidad aparente tiende a disminuir. En suelos con textura fina, la densidad aparente usualmente se encuentra en el rango de 1 a 1,2 $g\ cm^{-3}$, en contraste con suelos arenosos donde suele ser mayor, variando entre 1,2 y 1,6 $g\ cm^{-3}$ (Ojeda-Quintana et al., 2017)

En la Figura 37 se observa la relación de densidad aparente y profundidad de una muestra de sedimento de la microcuenca.

Figura 37

Relación de densidad aparente ($g\ cm^{-3}$) y profundidad de una muestra



Nota. Gráfico de líneas realizado en Excel.

Como se aprecia en la Figura 37, la densidad aparente aumenta en relación con la profundidad del suelo, esto se debe a la menor presencia de materia orgánica, por lo tanto, a una menor formación de agregados (Ojeda-Quintana et al., 2017) y mayor compactación, lo que potencialmente puede afectar la capacidad de retener humedad (Muscolo et al., 2014).

Densidad real. Casi siempre la densidad de un suelo es muy estable y no se altera con los procedimientos que se realizan en su tratamiento (Ingaramo et al., 2007).

Los resultados de densidad real de los sedimentos de la microcuenca Urku Huayku se muestran en la Tabla 17.

Tabla 17

Densidad real

| Densidad real ($g\ cm^{-3}$) | | | | | | | | | |
|--------------------------------|---------|-------|------|---------|-------|------|---------|-------|------|
| Periodo de muestreo | Dique 1 | | | Dique 2 | | | Dique 3 | | |
| | Alta | Media | Baja | Alta | Media | Baja | Alta | Media | Baja |
| Inicio (Abril) | 2.17 | 2.32 | 2.35 | 2.25 | 2.32 | 2.32 | 2.16 | 2.26 | 2.30 |
| Medio (Junio) | 2.50 | 2.16 | 2.22 | 2.55 | 2.07 | 2.20 | 2.32 | 1.84 | 1.98 |

| Densidad real ($g\ cm^{-3}$) | | | | | | | | | |
|--------------------------------|---------|-------|------|---------|-------|------|---------|-------|------|
| Periodo de muestreo | Dique 1 | | | Dique 2 | | | Dique 3 | | |
| | Alta | Media | Baja | Alta | Media | Baja | Alta | Media | Baja |
| Final (Julio) | 2.35 | 2.08 | 2.12 | 2.15 | 2.29 | 2.34 | 2.37 | 2.56 | 2.35 |

Nota: En la tabla se aprecia la densidad real realizada en muestra alta, media y baja, de cada dique.

Las densidades de los distintos minerales constituyentes del suelo suelen ser bastante similares. En términos generales, la mayoría de los suelos presentan una densidad real promedio cercana a $2,65\ g\ cm^{-3}$ (Rubio Gutiérrez, 2010).

Como se puede apreciar en la Tabla 17, los resultados obtenidos para la densidad real son inferiores al valor reconocido en la literatura (aproximadamente $2,65\ g\ cm^{-3}$), lo cual podría estar vinculado con la presencia limitada de material orgánico. Si se llevaran a cabo aportes considerables y constantes de materia orgánica, es posible que la densidad real disminuyera aún más, pero esta reducción no sería considerable (Escobar Perea et al., 2021).

La densidad también depende de la compactación de los sedimentos, una adecuada compactación aumenta la densidad, es decir que mejora su estabilidad, es por eso que las muestras tomadas en la parte más baja tienen mayor densidad debido a su compactación (Narváez-Espinoza et al., 2017), además un sedimento compactado es más resistente a la erosión ya que las partículas están más cohesionadas y menos propensas a arrastres por el agua o el viento (Blanco-Supélveda, 2009).

En la Figura 38 se aprecia la compactación de los sedimentos, en la imagen de la izquierda se observa el hundimiento de la persona de la foto, mientras que en la imagen de la derecha se observa como ya se pueden parar sobre los sedimentos sin que estos se hundan.

Figura 38

Compactación de los sedimentos

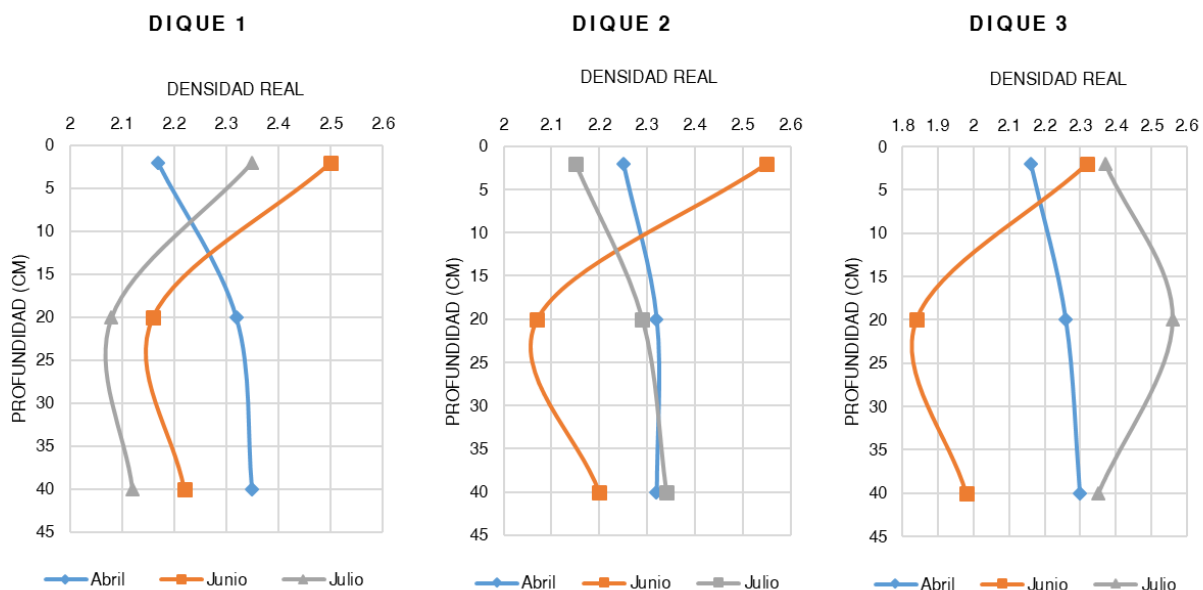


Nota. Fotografía de autoría propia.

En la Figura 39 se observa la relación de densidad real y la profundidad de la muestra tomada de sedimentos, donde se aprecia que la densidad aumenta mientras más profunda sea la muestra, al igual que en la densidad aparente, sin embargo algunas muestras superficiales no cumplen esta premisa ya que en esta zona la variación de la densidad están influenciados por factores climáticos como la precipitación y el viento, que tienden a arrastrar la capa superior de los sedimento junto con la materia orgánica, la cual desempeña un papel esencial en la determinación del valor de densidad.

Figura 39

Relación de densidad real (g cm^{-3}) y profundidad de una muestra



Nota. Gráficos de líneas realizados en Excel.

A diferencia de la densidad real, que es más estable, la densidad aparente tiene mayor variación debido a su característica de contracción y expansión (Ingaramo et al., 2007).

Materia orgánica

La materia orgánica consiste en los restos de plantas y animales que se han integrado en el suelo, generalmente representando entre el 0.1% y el 10% de su peso total (Carrera Villacrés et al., 2014). El contenido de materia orgánica permite estimar la presencia de nitrógeno, fósforo y azufre generados por la descomposición de restos orgánicos en el suelo (Molina, 2019).

(Mtambanengwe et al., 2020) Afirman que los niveles de materia orgánica en el suelo están vinculados a la disponibilidad de los microorganismos que intervienen en su proceso de descomposición y (Lado et al., 2004), sostienen que a medida que la cantidad de materia orgánica aumenta, también se promueve la fortaleza de los agregados y su capacidad para resistir los efectos erosivos del agua.

En general, los suelos de origen volcánico en la región de Centroamérica

muestran un contenido de materia orgánica que oscila entre el 2% y el 4%. Este valor tiende a incrementarse en respuesta a las precipitaciones y a la elevación sobre el nivel del mar (Blasco Lamenca, 2000).

Para obtener el contenido orgánico de las muestras de sedimentos de la microcuenca Urku Huayku se aplicaron dos métodos, uno cualitativo y uno cuantitativo.

Método cualitativo: Cromatografía. El objetivo de la cromatografía fue separar los componentes de una mezcla para identificarlos y determinar las cantidades de dichos componentes que permiten un análisis de la vida del suelo de manera cualitativa y sencilla a través de sus formas, colores e interrelaciones (R. Rodríguez, 2018).

Los elementos constituyentes de la muestra se segregaron mediante el proceso de retención, el cual involucró el tiempo en el que la solución del suelo permaneció en reposo con el hidróxido de sodio. Durante este procedimiento, los componentes presentes en el suelo se disolvieron para su posterior análisis. Paralelamente, tuvo lugar la etapa de desplazamiento, en la cual la solución del suelo avanzó a través del papel filtro.

Una vez terminada la fase de desplazamiento, empezó el proceso de secado de los cromatogramas y después de su exposición gradual a la luz se obtuvieron los revelados para su interpretación que se aprecia en las Tablas 18, 19 y 20.

Tabla 18




Cromatogramas del mes de abril

| Mes: | | Abril | |
|---------------|------|--------------|------|
| Dique: | | 1 | |
| Profundidad | Alta | Media | Baja |




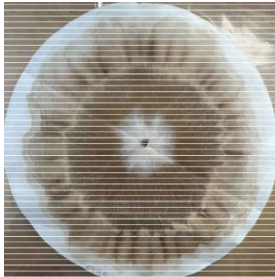

Dique:

2

| Profundidad | Alta | Media | Baja |
|--------------|---|--|---|
| Cromatograma |  |  |  |

Dique:

3

| Profundidad | Alta | Media | Baja |
|--------------|---|--|---|
| Cromatograma |  |  |  |

Nota: En la tabla se aprecian los cromatogramas del mes de abril.

En el mes de abril se distinguen colores, tamaños y formas similares en la mayoría de cromatogramas, tomando una muestra de referencia para su análisis, ver Figura 40, se deduce que:

La zona central 1, también llamada zona de aireación u oxigenación refleja los microorganismos del suelo, encargados de descomponer la materia orgánica y dar fertilidad al suelo. Un color crema o blanco es el indicador de un buen suelo (Abad Santana, 2014), en los resultados se aprecia un color crema evidenciando la presencia

de oxígeno que permite la vida de los microorganismos, esto se debe a que el mes de abril presentó mayor precipitación y el agua permite una mayor proliferación de microorganismos (Restrepo Rivera & Pinheiro, 2011).

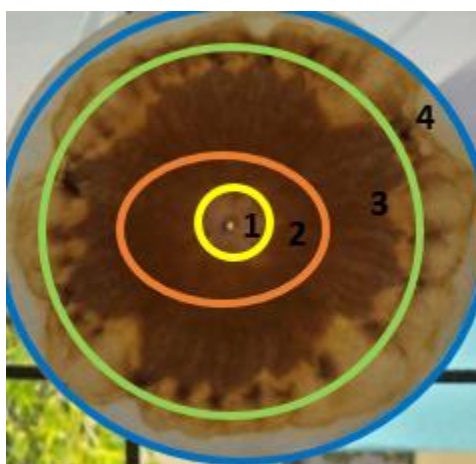
En la zona interna 2 o zona mineral se concentra la mayoría de reacciones minerales, presenta una coloración oscura que indica que el suelo se encuentra compactado y erosionado, además está integrada con la zona 3 ya que casi no se distingue la separación debido a la poca presencia de materia orgánica (Restrepo Rivera & Pinheiro, 2011).

La zona proteica o de materia orgánica 3 también presenta un color oscuro, lo que significa que su contenido de MO es bajo, esto se puede deber a la aplicación de fertilizantes químicos (Restrepo Rivera & Pinheiro, 2011).

La zona enzimática o nutricional 4 presenta terminación en forma de granos de maíz sin presencia de nubecillas, que es la terminación ideal, esto representa poca actividad microbiológica. Esta característica es muy común en suelos de textura franco arenosa (Medina Saavedra et al., 2018).




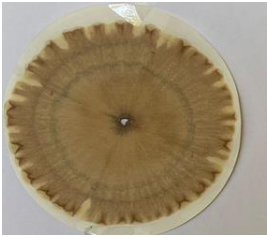



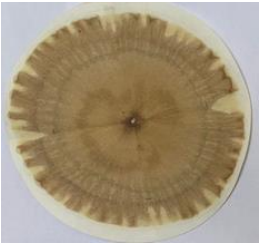

Figura 40

Diferenciación de zonas en el cromatograma










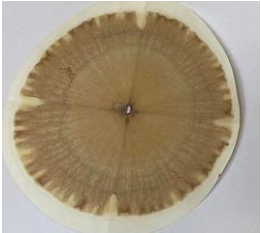

Nota. En esta imagen se distinguen las zonas del cromatograma. Fotografía de autoría propia.

Tabla 19*Cromatogramas del mes de junio*

| Mes: | Junio | | |
|---------------|---|--|---|
| Dique: | 1 | | |
| Profundidad | Alta | Media | Baja |
| Cromatograma |  |  |  |
| Dique: | 2 | | |
| Profundidad | Alta | Media | Baja |
| Cromatograma |  |  |  |
| Dique: | 3 | | |
| Profundidad | Alta | Media | Baja |
| Cromatograma |  |  |  |

Nota: En la tabla se aprecian los cromatogramas del mes de junio.

Tabla 20*Cromatogramas del mes de julio*

| Mes: | Julio | | |
|---------------|---|--|---|
| Dique: | 1 | | |
| Profundidad | Alta | Media | Baja |
| Cromatograma |  |  |  |
| Dique: | 2 | | |
| Profundidad | Alta | Media | Baja |
| Cromatograma |  |  |  |
| Dique: | 3 | | |
| Profundidad | Alta | Media | Baja |
| Cromatograma |  |  |  |

Nota: En la tabla se aprecian los cromatogramas del mes de julio.

En el mes junio y julio se distinguen colores, tamaños y formas similares en todos los cromatogramas, el tamaño de las zonas en la parte alta depende de la precipitación ya que tiende a arrastrar material del suelo, tomando una muestra de referencia para su análisis, ver Figura 41, se deduce que:

La zona central 1, también llamada zona de oxigenación refleja los microorganismos del suelo, encargados de descomponer la materia orgánica y dar fertilidad al suelo no se manifiesta, ya que un color crema es el indicador de un buen suelo (Abad Santana, 2014) y en los resultado se aprecia un color muy oscuro evidenciando la ausencia de oxígeno que no permite la vida de los microorganismos, esto se debe a la exposición directa a los rayos del sol, por no contar con una capa vegetal (Restrepo Rivera & Pinheiro, 2011).

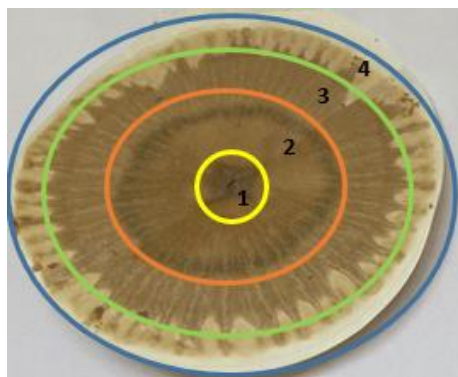
En la zona interna 2 o zona mineral se concentra la mayoría de reacciones minerales, presenta una coloración oscura que indica que el suelo se encuentra compactado y erosionado (Restrepo Rivera & Pinheiro, 2011).

La zona proteica o de materia orgánica 3 también presenta un color oscuro, lo que significa que su contenido de MO es bajo, esto se puede deber a la aplicación de fertilizantes químicos (Restrepo Rivera & Pinheiro, 2011).

La zona enzimática o nutricional 4 presenta terminación en forma de dientes sin presencia de nubecillas, esto representa poca actividad microbiológica. Esta característica es muy común en suelos de textura franco arenosa (Medina Saavedra et al., 2018).

Figura 41

Diferenciación de zonas en el cromatograma



Nota. En esta imagen se distinguen las zonas del cromatograma. Fotografía de autoría propia.

En base a la interpretación de análisis cromatográficos que se muestra en la Figura 42, se deduce que los resultados de los cromatogramas pertenecen a suelos con aplicaciones de químicos, que contienen abonos orgánicos muy ricos en nitrógenos o fertilizantes a base de urea (Altamirano et al., 2020).

Figura 42

Posibles resultados de cromatografía en papel



Nota. Recuperada de (Altamirano et al., 2020).

La aplicación de productos químicos en la producción agrícola elimina los microorganismos presentes en el suelo. Al eliminar estos componentes de la microbiología, se interfiere con el proceso de descomposición de la materia orgánica, lo que a su vez impide la generación de minerales en el suelo. Estos productos gradualmente deterioran la salud del suelo, provocando una mayor dependencia de insumos externos. Con ello, se reduce la capacidad del suelo para producir y reciclar sus propios nutrientes (R. Rodríguez, 2018). En base a los resultados se demuestra que cuando hay mayor precipitación, también hay más proliferación de microorganismos en los sedimentos.

Método cuantitativo: Calcinación. La técnica de calcinación estima la cantidad de materia orgánica al medir la reducción de peso en una muestra de suelo después de someterse a temperaturas elevadas. Este método es rápido y con costos relativamente

bajos (Marinez et al., 2018). A pesar de ser un método eficaz, algunos expertos debaten su validez ya que piensan que en estas condiciones los suelos están expuestos a factores que pueden alterar sus resultados (La Manna et al., 2007). Los factores de temperatura y el tiempo de calcinación deben ser lo suficientemente altos para eliminar la mayor cantidad de materia orgánica mientras se minimizan las pérdidas de otros componentes del suelo (BALL, 1964). (Schulte & Hopkins, 2015) Afirman que las temperaturas que exceden los 500 °C pueden dar resultados exagerados e imprecisos debido a la liberación de CO₂ de los carbonatos.

Se ha comprobado la existencia de conexiones significativas entre la proporción de partículas finas de limo y arcilla y la cantidad de carbono orgánico en los suelos (Galantini et al., 2004). Estos resultados insinúan que los suelos que poseen proporciones menores de arcilla podrían requerir temperaturas de calcinación más moderadas (Konen et al., 2002). Este parámetro de bajo contenido de arcillas corresponde a los sedimentos de la microcuenca de estudio, por ello su calcinación fue realizada con una temperatura de 360°.

En la Tabla 21. Se muestran los resultados del porcentaje de materia orgánica de cada dique, tomados de una muestra mensual para comparar la variación en relación a la profundidad.

Tabla 21

Porcentaje de materia orgánica por calcinación

| Periodo de muestreo | Calcinación (MO%) | | | | | | | | |
|---------------------------|-------------------|-------|------|-----------|-------|------|-----------|-------|------|
| | Dique n°1 | | | Dique n°2 | | | Dique n°3 | | |
| | M. | M. | M. | M. | M. | M. | M. | M. | M. |
| Inicio (Abril) | ALTA | MEDIA | BAJA | ALTA | MEDIA | BAJA | ALTA | MEDIA | BAJA |
| Medio | 1.6 % | 4.6% | 4.1% | 4.2% | 5.0% | 2.6% | 2.6% | 3.1% | 2.5% |
| | 1.9% | 4.6% | 4.4% | 1.5% | 3.3% | 3.0% | 1.7% | 3.3% | 3.2% |

| Calcinación (MO%) | | | | | | | | | |
|---------------------------|------------|-------------|------------|------------|-------------|------------|------------|-------------|------------|
| Periodo de muestreo | Dique n°1 | | | Dique n°2 | | | Dique n°3 | | |
| | M. ALTA | M. MEDIA | M. BAJA | M. ALTA | M. MEDIA | M. BAJA | M. ALTA | M. MEDIA | M. BAJA |
| (Junio) | | | | | | | | | |
| Final | 2.6% | 4.7% | 4.0% | 4.8% | 2.7% | 2.7% | 1.1% | 2.8% | 2.9% |
| (Julio) | | | | | | | | | |

Nota: En la tabla se aprecian los porcentajes de materia orgánica de cada dique.

Como se aprecia en la Tabla 21 los resultados tienen un rango de 1 a 5%, después de realizar la interpretación de los resultados de acuerdo a las Normas Oficiales Mexicanas NOM-021-RECNAT-2000 se demostró que la materia orgánica de los sedimentos es baja al ser un suelo volcánico.

En el año 2021, estudiantes de dicho periodo tomaron una muestra del suelo de la microcuenca Urku Huayku y al analizarla se obtuvo el porcentaje promedio de materia orgánica, que fue 0,2 % (Hurtado Bolaños et al., 2021), esto evidencia la poca cantidad que se encuentra en los suelos volcánicos, debido a su estructura, aun así se demuestra el aumento significativo de la materia orgánica ya que los sedimentos aparte de suelo volcánico también se conforman de un tipo de suelo franco, además se detectó la existencia de excrementos de animales en las cercanías de la microcuenca, como se muestra en la Figura 43. Este material constituye una fuente abundante de materia orgánica (Tortosa, 2014).

Figura 43

Presencia de excremento en las cercanías de la microcuenca

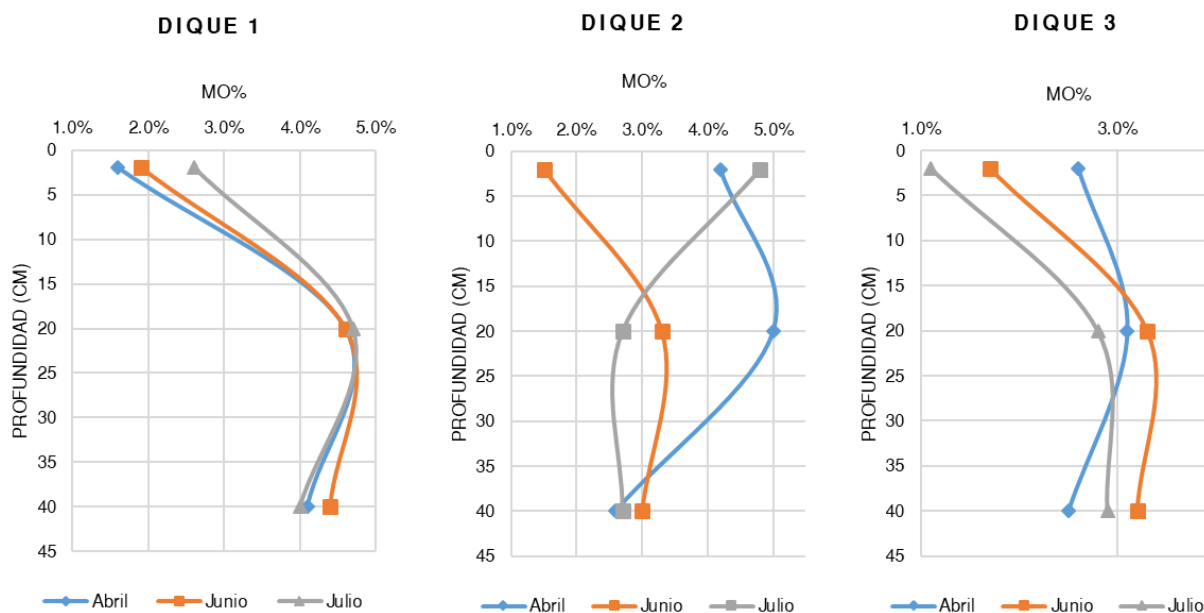


Nota. Fotografía de autoría propia.

En la Figura 44 se observa la relación de materia orgánica y la profundidad de la muestra tomada de sedimentos de cada dique.

Figura 44

Relación de materia orgánica y la profundidad de la muestra



Nota. Gráficos de líneas realizados en Excel.

Como se aprecia en la Figura 44, la muestra más alta de cada dique exhibe una mayor variabilidad, la cual se atribuye a la erosión causada por la acción del agua. Las gotas de agua impactan y desintegran los materiales orgánicos presentes, originando la

dispersión de partículas. Estas partículas desprendidas son arrastradas por la superficie del agua (escorrentía). Como resultado de la intensidad de la lluvia y de la susceptibilidad del suelo a la erosión, se rompe el equilibrio natural del terreno y se produce la pérdida de la capa superficial (Colotti Bizzarri, 1999).

Las muestras intermedias y bajas muestran una escasa variabilidad debido a la mínima disparidad de profundidad entre ellas. En estas áreas, los componentes orgánicos son más estables, ya que no existe arrastre. En cuanto a la profundidad se aprecia que generalmente las muestras bajas presentan menor porcentaje de materia orgánica en comparación con las muestras a alturas intermedias, ya que el porcentaje total de materia orgánica disminuye conforme aumenta la profundidad, lo cual puede describirse como una disminución sistemática del contenido de carbono orgánico (Fassbender, 1982). El carbono orgánico del suelo constituye el componente principal de la materia orgánica, lo que a menudo conlleva a una confusión o uso intercambiable de ambos términos (García-Navarro et al., 2016).

Calidad biológica

Se puede determinar la calidad del agua a través de índices biológicos, que evalúan la contaminación en los ecosistemas acuáticos, es por eso que los estudiantes de la universidad IKIAM realizaron el muestreo y análisis del agua de la microcuenca Urku Huaycu antes y después de la colocación de diques, para observar el comportamiento e influencia de los diques sobre la calidad biológica del agua.

En los muestreos realizados antes de la colocación de diques se encontró un total de 81 individuos pertenecientes a 2 clases (malacostraca e insecta), 6 familias (Hyallelidae, Elmidae, Philosciidae, Tipulidae, Hydropsychidae y Chironomidae), distribuidos en 5 órdenes (Amphipoda, Coleoptera, Isopoda, Diptera, Trichoptera), los órdenes Amphipoda y Díptera fueron los más abundantes en los sitios de muestreo. Con el índice Shannon se identificó la biodiversidad presente en la zona según la familia de

macroinvertebrados.

Como se observa en la Tabla 22, la zona alta tuvo mayor presencia de familias de macroinvertebrados con índice Shannon 0.8759, que la zona baja con 0.7354, es decir que presenta mayor diversidad. Las familias con mayor abundancia fueron Hyallellidae y Chyromiidae, que se detallan en el Apéndice 8. Mediante el índice ABI y BMWP, se evidencio que la calidad del agua era crítica en las muestras de ambas zonas, ya que se colocan dentro del rango de aguas contaminadas, por ende, se puede decir que el ecosistema en el lugar de estudio se encontraba deteriorado y alterado.

Tabla 22

Resultados de muestreo antes de la colocación de diques

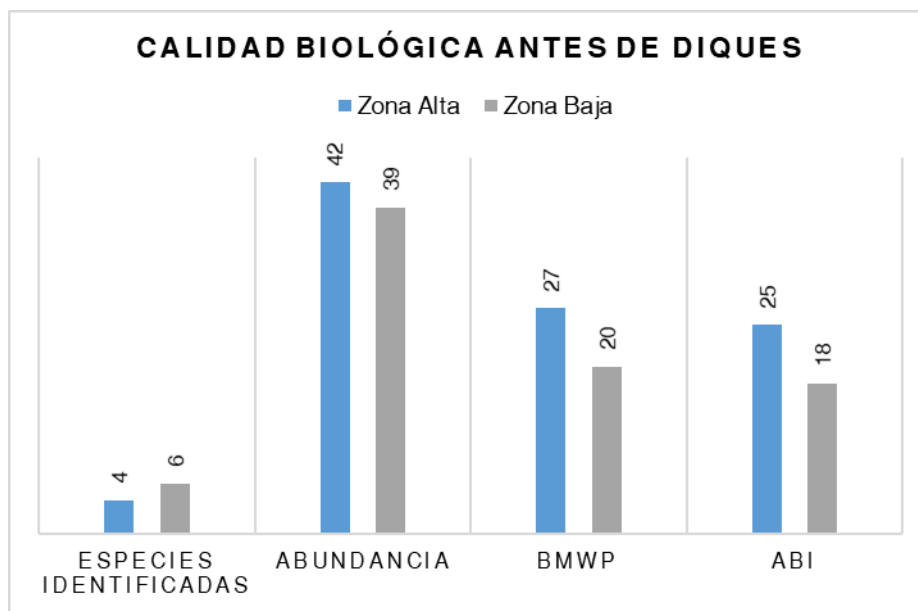
| Muestreo | Zona Alta | Zona Baja |
|------------------------|------------------|------------------|
| Especies identificadas | 4 | 6 |
| Abundancia | 42 | 39 |
| Índice de diversidad | 0.8759 | 0.7354 |
| BMWP | 27 | 20 |
| ABI | 25 | 18 |

Nota: En la tabla se aprecia la diversidad de macroinvertebrados antes de la colocación de los diques. Estos datos fueron proporcionados por estudiantes de la Universidad IKIAM.

En la Figura 45 se observan los resultados de la Tabla 22 de manera cualitativa.

Figura 45

Calidad biológica antes de la colocación de diques



Nota. Gráficos de barras realizados en Excel.

En los muestreos que se realizaron después de la colocación de los diques de caña guadua se encontró un total de 369 individuos pertenecientes a 5 clases (insecta, malacostraca, gastropoda, oligochaeta y crustacea), 9 familias (Hyallellidae, Elmidae, Philosciidae, Planorbidae, Tubificidae, Tipulidae, Hydropsychidae, Libellulidae y Chironomidae), distribuidos en 7 órdenes (Amphipoda, Basommatopera, Odonata, Coleoptera, Isopoda, Diptera, Trichoptera), los órdenes más abundantes en los sitios de muestreo siguen siendo Amphipoda y Díptera.

En la Tabla 23 se observa que el dique 3 ubicado en la zona baja tiene mayor puntaje de familias de macroinvertebrados con índice Shannon 1.3, supera al dique 2 con 1.24 y al dique 1 con 0.48, es decir que el dique 3 presenta mayor diversidad, esto se debe a la corriente del cauce y factores climáticos como el viento y la lluvia que altera el caudal el día de muestreo. Las familias con mayor abundancia fueron Hyallellidae y Chironomidae. Mediante el índice ABI y BMWP, se evidencio que la calidad del agua sigue siendo Crítica en las muestras de los tres diques, aunque su biodiversidad haya aumentado significativamente.

Tabla 23

Resultados de muestreo después de la colocación de diques

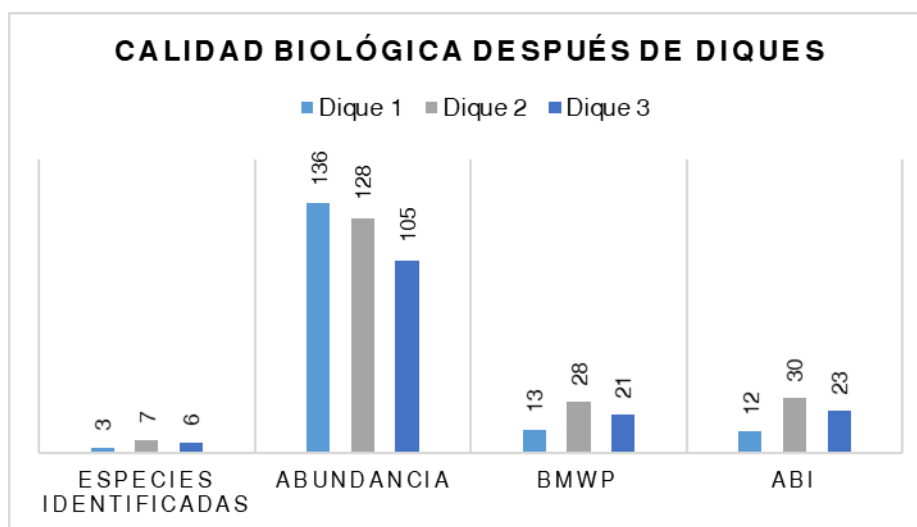
| Muestreo | Dique 1 | Dique 2 | Dique 3 |
|------------------------|---------|---------|---------|
| Especies identificadas | 3 | 7 | 6 |
| Abundancia | 136 | 128 | 105 |
| Índice de diversidad | 0.4837 | 1.241 | 1.3 |
| BMWP | 13 | 28 | 21 |
| ABI | 12 | 30 | 23 |

Nota: En la tabla se aprecia la diversidad de macroinvertebrados después de la colocación de los diques. Estos datos fueron proporcionados por estudiantes de la Universidad IKIAM.

En la Figura 46 se observan los resultados de la Tabla 23 de manera cualitativa.

Figura 46

Calidad biológica después de la colocación de diques



Nota. Gráficos de barras realizados en Excel.

La mala calidad del agua en los sitios de muestreo se relaciona con fuentes de contaminación, que debido a su ubicación puede ser producto de la escorrentía superficial con carga de contaminantes de origen agrícola (Romero Cárdenas & Zúñiga Acuario, 2017), la adecuación de terrenos para la ganadería y la deforestación (González G. et al., 2012), cuando estas alteraciones antrópicas ocurren en los

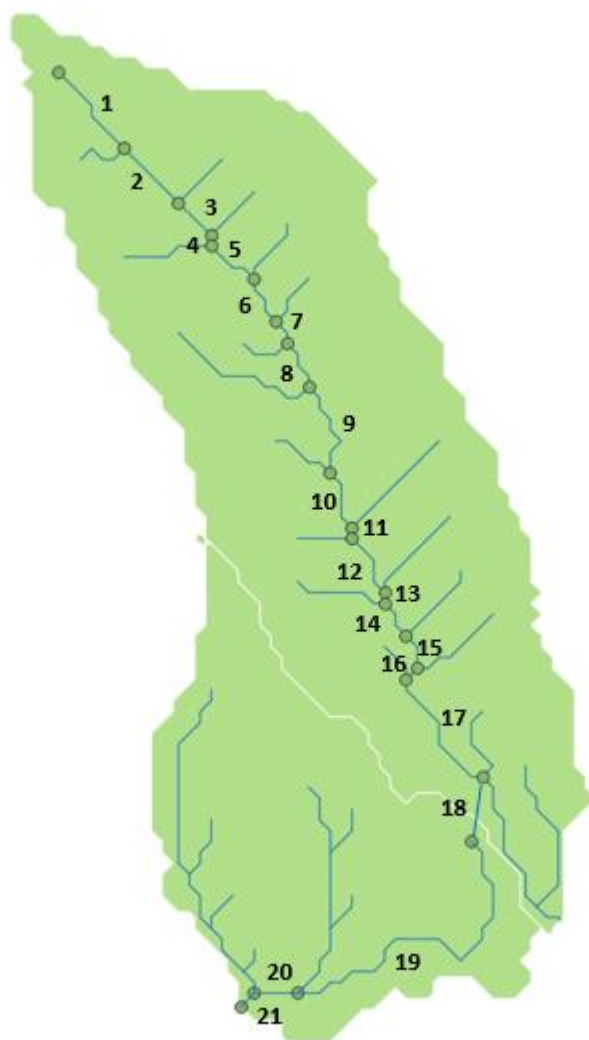
ecosistemas acuáticos, los organismos que habitan en ellos suelen experimentar una disminución en su diversidad y composición. Esto se debe a que, en su mayoría, carecen de mecanismos efectivos para adaptarse a este tipo de cambios (Rader et al., 2008), sin embargo, se observa que después de la instalación de los diques los individuos identificados crecieron de 81 a 369, es decir que se obtuvo un aumento porcentual de 355.6%. Por lo que se espera que con el tiempo sigan apareciendo nuevas familias de macroinvertebrados de mayor puntaje y por ende el índice de calidad del agua mejore y así se llegue a evidenciar que el ecosistema se está recuperando.

Determinación de la zona de instalación de nuevos diques

Después de realizar el modelamiento de la microcuenca Urku Huayku utilizando el software de código abierto QGIS, se procedió a segmentarla en tramos, como se muestra en la Figura 47. Se identificaron las cotas y distancias horizontales de cada tramo con el fin de calcular el porcentaje de pendiente, cuyos valores se presentan en la Tabla 24. Además, se generó un histograma de frecuencias altimétricas, el cual está representado en la Figura 48, para demostrar el porcentaje de área comprendido entre los distintos niveles, según los intervalos de altura.

Figura 47

Tramos de la microcuenca Urku Huayku



Nota. El modelado de la microcuenca fue realizado en el software QGIS.

Tabla 24

Porcentaje de la pendiente de cada tramo de la microcuenca Urku Huayku

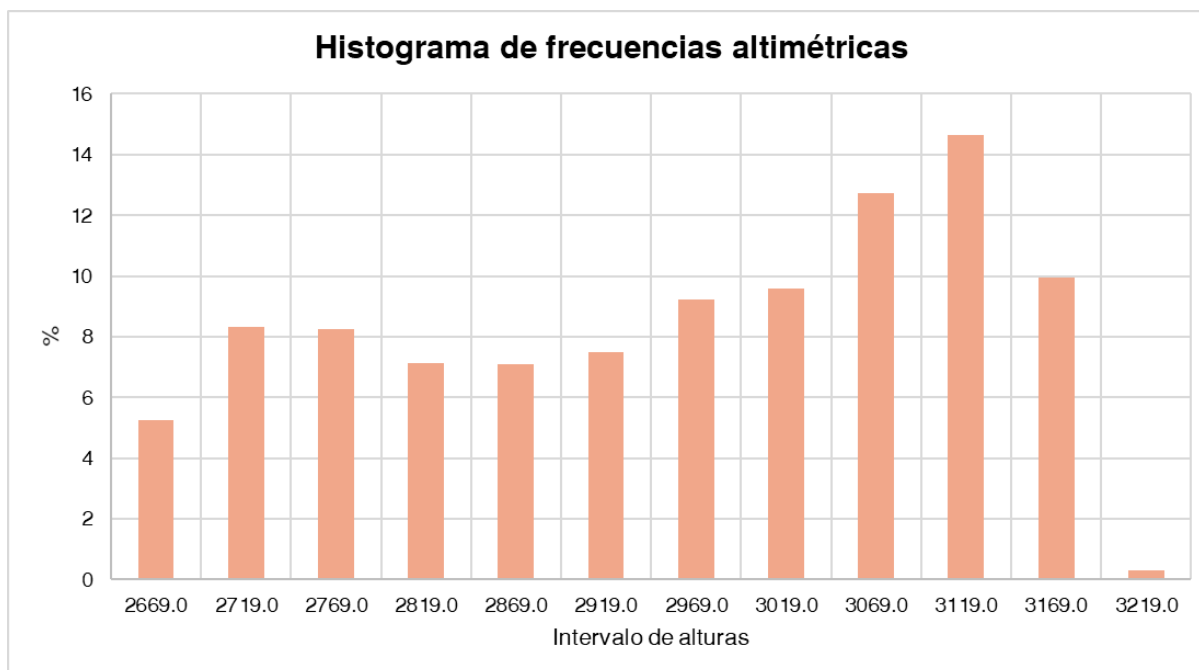
| Tramo | Cota inicial (msnm) | Cota final (msnm) | Long horizontal (m) | Pendiente % |
|-------|---------------------|-------------------|---------------------|-------------|
| 1 | 3128 | 3065 | 292 | 22% |
| 2 | 3065 | 3032 | 218 | 15% |
| 3 | 3032 | 3017 | 131 | 11% |
| 4 | 3017 | 3014 | 31 | 10% |
| 5 | 3014 | 2994 | 162 | 12% |
| 6 | 2994 | 2959 | 149 | 23% |

| Tramo | Cota inicial (msnm) | Cota final (msnm) | Long horizontal (m) | Pendiente % |
|-------|---------------------|-------------------|---------------------|-------------|
| 7 | 2959 | 2938 | 74 | 28% |
| 8 | 2938 | 2892 | 149 | 31% |
| 9 | 2892 | 2807 | 297 | 29% |
| 10 | 2807 | 2776 | 179 | 17% |
| 11 | 2776 | 2772 | 31 | 13% |
| 12 | 2772 | 2737 | 198 | 18% |
| 13 | 2737 | 2729 | 31 | 26% |
| 14 | 2729 | 2722 | 118 | 6% |
| 15 | 2722 | 2705 | 105 | 16% |
| 16 | 2705 | 2702 | 44 | 7% |
| 17 | 2702 | 2660 | 385 | 11% |
| 18 | 2660 | 2649 | 149 | 7% |
| 19 | 2649 | 2554 | 973 | 10% |
| 20 | 2554 | 2549 | 124 | 4% |
| 21 | 2549 | 2547 | 54 | 4% |

Nota. En la tabla se encuentra en cálculo de la pendiente de cada tramo.

Figura 48

Histograma de frecuencias altimétricas de la microcuenca Urku Huayku



Nota. El histograma de frecuencias altimétricas fue realizado en Excel.

Como se puede observar en la Tabla 24, los tramos 7, 8, 9 y 13 presentan las pendientes más pronunciadas, con valores del 28%, 31%, 29% y 26% respectivamente.

En la Tabla 25 se indican las coordenadas de la cota inicial de cada tramo.

Los diques de retención son estructuras para capturar los sedimentos que se encuentran aguas arriba. Estos sedimentos atrapados forman una acumulación detrás del dique, lo que resulta en una disminución de la pendiente del cauce, como lo explican en sus estudios.

Tabla 25

Porcentaje de la pendiente de cada tramo de la microcuenca Urku Huayku

| Tramo | Cota inicial | Cota final | Coordenadas UTM 17S | |
|-------|--------------|------------|---------------------|-----------|
| | | | Este | Norte |
| 7 | 2959 | 2938 | 787963,6 | 9970015,6 |
| 8 | 2938 | 2892 | 787963,6 | 9969904,9 |
| 9 | 2892 | 2807 | 788075,0 | 9969794,3 |
| 13 | 2737 | 2729 | 788297,6 | 9969241,0 |

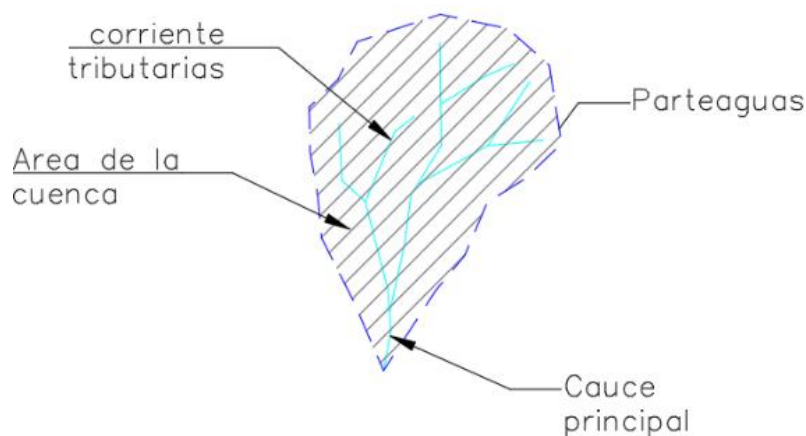
Nota. En la tabla se encuentra en cálculo de la pendiente de cada tramo.

En las áreas de mayor pendiente, el flujo de agua tiende a ser más rápido y energético, lo que incrementa la posibilidad de ocurrencia de erosiones, inundaciones y deslizamientos de tierra. Al instalar los diques en estas zonas, se logrará atenuar la velocidad de los flujos, controlando así las inundaciones y estabilizando las laderas erosionadas (Conesa García, 2004).

La ubicación estratégica de los diques de retención en áreas con mayor presencia de corrientes tributarias, ver Figura 49, también controlara la velocidad del agua, que suele transportar mayor cantidad de sedimentos debido a la escorrentía que desemboca en la microcuenca (Vásconez et al., 2019). Estas estructuras permitirán que el agua se ralentice, lo que facilita la sedimentación y previene la erosión excesiva (Díaz Romero, 2008) .

Figura 49

Partes de una cuenca hidrográfica



Nota. Recuperado de (Caruanambo Cortéz, 2018).

Es por eso que los diques deben ser colocados en las zonas de pendientes más pronunciadas y con mayor presencia de corrientes tributarias, ya que ayudaran a estabilizar el terreno y a proteger las áreas de los impactos negativos de la escorrentía y las precipitaciones intensas.

Socialización de los resultados a la Comuna San Francisco de Baños

En el mes de agosto se llevó a cabo la socialización del proyecto, dando a conocer los resultados del funcionamiento de los diques ubicados dentro de la comuna “San Francisco de Baños” a todas las personas que viven dentro de la misma. Se explicó de manera comprensiva los efectos positivos que tienen los diques en la microcuenca Urku Huayku.

Esta socialización se la realizó de manera presencial con las personas de la comunidad como se aprecia en el Apéndice 11.

Capítulo V

Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

En la actualidad, el volcán Ilaló presenta un claro deterioro de sus laderas y zonas hídricas a causa de la rápida urbanización, deforestación, prácticas agrícolas inapropiadas, y principalmente, la erosión del suelo. Esta erosión es impulsada por condiciones climáticas como las precipitaciones y el viento. Estos fenómenos potencian el afloramiento de cangahua, un tipo de suelo volcánico caracterizado por su baja fertilidad.

La implementación de diques de contención es un método efectivo para la recuperación del suelo y el agua de una cuenca hidrográfica degradada, ya que controlan el proceso erosivo e interceptan sedimentos que estabilizan las laderas erosionadas. Además, esta intervención resulta en la disminución de la pendiente y en la regulación del flujo del agua.

Los sedimentos acumulados detrás del dique sirven como almacenamiento de carbono, contribuyendo a la mitigación del cambio climático. Además, crean áreas de mayor riqueza en nutrientes, mejorando la calidad del agua, y también generan superficies planas debido a la compactación de sedimentos, que son más resistentes a la erosión ya que las partículas están más cohesionadas y menos propensas al arrastre por viento o por agua. Desde la instalación de los diques en el año 2021 hasta la actualidad en 2023, se ha estimado que el dique 1 ha acumulado alrededor de 6.19 m^3 de sedimento. El dique 2 aproximadamente 5.8 m^3 y el dique 3, alrededor de 4.88 m^3 .

Las muestras de agua analizadas, presentaron en promedio un pH de 7.059, lo que indica que esta agua que recorre la microcuenca es neutra. El valor promedio de la conductividad eléctrica es $126.23 \mu\text{s cm}^{-1}$ lo que significa que es un agua de baja salinidad. El caudal promedio que se obtuvo en el análisis de 16 semanas desde abril

hasta julio del 2023 es de 5.79 L sg-1 siendo este mayor al ya registrado en el 2021 al momento de realizar la instalación de los diques. Se concluyó que el pH, la conductividad eléctrica y el caudal están relacionados con las precipitaciones dadas en este lapso de tiempo. El análisis de nitrato, sulfatos y sólidos totales disueltos están dentro de los límites permisibles y más bajos, los diques en estos parámetros trabajan de manera eficiente, algo similar a lo que pasa con los sólidos totales suspendidos excluyendo al dique 3 que tiene algunos picos superiores a lo permitido, pero esto es provocado por el movimiento que se da en las aguas al momento de ir por la toma de muestras, lo que provoca un levantamiento de residuos que no se disuelven en el volumen del agua. Por otro lado, los fosfatos son el único parámetro que está por encima de los límites permitidos.

Las muestras de sedimentos analizadas, presentaron en promedio un pH de 5.9, lo que indica que estos sedimentos son moderadamente ácidos. El valor promedio de la conductividad eléctrica es $91 \mu\text{s cm}^{-1}$ lo que significa que tiene efectos despreciables de salinidad. La densidad aparente determinó que el sedimento es mayormente de tipo franco, ya que está compuesto principalmente por arena, limo y una cantidad menor de arcilla. El promedio de la densidad real es 2.26 g cm^{-3} , lo cual se aproxima a la densidad típica de la mayoría de suelos. Las muestras de mayor profundidad presentan mayores valores de densidad, debido a la compactación del sedimento. En cuanto a la materia orgánica, el promedio es de 3.2% que a pesar de ser baja, refleja el impacto positivo de los diques, ya que antes de su instalación en el año 2021 el porcentaje de materia orgánica era de 0.2%.

El análisis de la calidad biológica indicó que en el año 2021 se identificaron 81 individuos, mientras que en el 2023 esta cifra ascendió a 369, lo que representa un aumento porcentual del 355.6%. A pesar del aumento sustancial en la biodiversidad, los indicadores subrayan que la calidad del agua sigue siendo crítica. Por lo que se espera

que con el tiempo sigan apareciendo nuevas familias de macroinvertebrados y la calidad del agua mejore, para evidenciar que el ecosistema se está recuperando.

Se ha comprobado que la cantidad y calidad tanto del agua como de los sedimentos, así como la calidad biológica, han experimentado mejoras tras la implementación de los diques. Aunque la calidad aún no puede calificarse como óptima, se observa que, con el paso del tiempo, las propiedades que influyen en la calidad están experimentando un aumento significativo. La zona óptima para la instalación de nuevos diques está comprendida entre las cotas 2959 a 2807 y 2737 a 2729, ya que en estas áreas la pendiente es más pronunciada y tiene mayor concentración de corrientes tributarias.

Los diques de contención de caña guadua demuestran que son estructuras efectivas, económicas y ecológicas que sirven para controlar la erosión del suelo y preservar los recursos hídricos.

La socialización de los resultados a la Comuna San Francisco de Baños por parte de los integrantes del proyecto de integración curricular, se realizó con éxito, junto al tutor de tesis, el presidente de la comuna y un grupo de comuneros. Además, dio lugar a nuevas propuestas para futuros proyectos de integración.

Recomendaciones

Se recomienda establecer un método de monitoreo continuo a largo plazo para evaluar los cambios en la calidad y cantidad de agua y sedimentos en la microcuenca. Esto permitirá comprender las tendencias a lo largo del tiempo y determinar si hay efectos a largo plazo de la instalación de los diques.

La construcción de más diques en la microcuenca Urcu Huaycu y en las demás quebradas del volcán Ilaló y del Ecuador, ya que además de ser una propuesta económica y ecológica, permite la conservación y restauración de los recursos hídricos.

Realizar un estudio detallado de la erosión de las microcuencas antes y después

de la instalación de los diques. Esto podría implicar la medición de tasas de erosión del suelo, evaluación de la vegetación en las áreas afectadas y análisis de los sedimentos transportados, para tener una evaluación más precisa de los beneficios de los diques para controlar la erosión.

Utilizar modelos hidrológicos para simular los efectos de los diques en el flujo de agua y la distribución de sedimentos en la microcuenca. Esto podría ayudar a prever los posibles cambios a largo plazo y a identificar áreas que podrían verse más afectadas.

Se recomienda a la comunidad proteger el cauce de la microcuenca Urku Huaycu para no afectar la calidad del agua, sedimentos y calidad biológica, con la construcción de cerramientos, puentes que atraviesen la microcuenca, bebederos para el ganado en lugares adecuados.

Fomentar prácticas agrícolas sostenibles, como la aplicación de técnicas de cultivo de conservación y la reducción del uso de fertilizantes químicos y pesticidas que pueden afectar la calidad del sedimento, e incentivar el uso de abonos orgánicos, como compost y estiércol, para enriquecer el suelo con materia orgánica y mejorar su estructura.

Se recomienda el mantenimiento constante, al menos dos veces al año, de los diques, para no comprometer su funcionamiento, ya que por factores ambientales se pueden ver afectados.

Es aconsejable llevar a cabo sesiones de socialización antes de desarrollar cualquier proyecto en una comunidad. Estas sesiones permitirán presentar a la comunidad los beneficios del proyecto, ya que sin un conocimiento previo, el acceso a la zona de estudio se vuelve complicado.

Bibliografía

- Abad Santana, F. J. (2014). "EVALUACIÓN CUALITATIVA MEDIANTE CROMATOGRAFÍA, DE LA FERTILIDAD DE CINCO SUELOS CON DIFERENTES MANEJOS ORGÁNICOS Y CONVENCIONALES."
- Abbasi, N. A., Xu, X., Lucas-Borja, M. E., Dang, W., & Liu, B. (2019). The use of check dams in watershed management projects: Examples from around the world. *Science of The Total Environment*, 676, 683–691. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2019.04.249>
- Acosta Rivas, C. R. (2009). *Estudio de la cuenca altoandina del río cañete (perú): distribución altitudinal de la comunidad de macroinvertebrados bentónicos y caracterización hidroquímica de sus cabeceras cársticas.*
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=254655&info=resumen&idioma=SPA>
- Aguilera Rodríguez, C., Silva, P., & Reyes, M. (2010). Determinación de sulfato por el método turbidimétrico en aguas y aguas residuales. Validación del método. *Revista Cubana de Química*, 3, 39–44. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=443543720007>
- Alfonso-Torreño, A., Gómez-Gutiérrez, Á., Schnabel, S., Lavado Contador, J. F., de Sanjosé Blasco, J. J., & Sánchez Fernández, M. (2019). sUAS, SfM-MVS photogrammetry and a topographic algorithm method to quantify the volume of sediments retained in check-dams. *Science of The Total Environment*, 678, 369–382.
<https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2019.04.332>
- Alkarkhi, A. F. M., & Alqaraghuli, W. A. A. (2020). R Statistical Software. *Applied Statistics for Environmental Science with R*, 11–27. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818622-0.00002-2>
- Altamirano, P., Arias, L., Carrera, L., Teneda, A., & Vallejo, A. (2020). *INTRODUCCIÓN A LA CROMATOGRAFÍA DE SUELOS.*
- Arcentales-Ríos, R., Carrión-Méndez, A., Cipriani-Ávila, I., Acosta, S., Capparelli, M., Moulatlet,

- G. M., & Pinos-Vélez, V. (2022). Assessment of metals, emerging contaminants, and physicochemical characteristics in the drinking water and wastewater of Cuenca, Ecuador. *Journal of Trace Elements and Minerals*, 2, 100030.
<https://doi.org/10.1016/J.JTEMIN.2022.100030>
- Ares, M. G., & Varni, M. (2016). *¿Qué es la erosión hídrica y cómo la estudiamos en el IHLLA? | UNICEN*. <https://www.unicen.edu.ar/content/%C2%BFqu%C3%A9-es-la-erosi%C3%B3n-h%C3%ADdrica-y-c%C3%B3mo-la-estudiamos-en-el-ihlla>
- Arias-Muñoz, P., Saz, M. A., & Escolano, S. (2023). *Estimación de la erosión del suelo mediante el modelo RUSLE. Caso de estudio: cuenca media alta del río Mira en los Andes de Ecuador*. <https://doi.org/10.14198/INGEO.22390>
- Aumassanne, C., & Fontanella, D. (2015). *VARIACIONES EN LA CONDUCTIVIDAD ELCTRICA DEL AGUA PARARIEGO EN LA CUENCA DEL RÍO COLORADO, ARGENTINA*.
- Awaleh, M. O., Boschetti, T., Adaneh, A. E., Chirdon, M. A., Ahmed, M. M., Dabar, O. A., Soubaneh, Y. D., Egueh, N. M., Kawalieh, A. D., Kadieh, I. H., & Chaheire, M. (2022). Origin of nitrate and sulfate sources in volcano-sedimentary aquifers of the East Africa Rift System: An example of the Ali-Sabieh groundwater (Republic of Djibouti). *Science of The Total Environment*, 804, 150072. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2021.150072>
- Balacco, G., Fiorese, G. D., & Alfio, M. R. (2023). Assessment of groundwater nitrate pollution using the Indicator Kriging approach. *Groundwater for Sustainable Development*, 21, 100920. <https://doi.org/10.1016/J.GSD.2023.100920>
- Blanco-Supélveda, R. (2009). *La relación entre la densidad aparente y la resistencia mecánica como indicadores de la compactación del suelo*.
https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952009000300002
- Blasco Lamenca, M. (2000). *SUELOS AGRICOLAS VOLCANICOS DE AMERICA CENTRAL*.
- Bolaños-Alfaro, J. D., Cordero-Castro, G., & Segura-Araya, G. (2017). *Determination of nitrites*,

nitrites, sulfates and phosphates in drinking water as indicators of contamination caused by human activities, in two cantons of Alajuela, province of Costa Rica.

<https://doi.org/10.18845/tm.v30i4.3408>

Bordino, J. (2021). *Cuencas hidrográficas: qué son, tipos e importancia.*

<https://www.ecologiaverde.com/cuencas-hidrograficas-que-son-tipos-e-importancia-3334.html>

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., Ballabio, C., Yang, J. E., Robinson, D. A., & Panagos, P. (2022). GloSEM: High-resolution global estimates of present and future soil displacement in croplands by water erosion. *Scientific Data* 2022 9:1, 9(1), 1–9. <https://doi.org/10.1038/s41597-022-01489-x>

Bouet, C., Labiadh, M. T., Pierre, C., Sekrafi, S., des Tureaux, T. H., Ltifi, M., Bergametti, G., Marticorena, B., Abdourhamane Touré, A., & Rajot, J. L. (2023). What drives wind erosion in cropped areas? A case study in southern Tunisia. *CATENA*, 223, 106964. <https://doi.org/10.1016/J.CATENA.2023.106964>

Bozkurt, A., Kurtulus, C., & Endes, H. (2009). Measurements of apparent electrical conductivity and water content using a resistivity meter. *International Journal of Physical Sciences*, 4(12), 784–795. <http://www.academicjournals.org/ijps>

Breure, A. M., Lijzen, J. P. A., & Maring, L. (2018). Soil and land management in a circular economy. *Science of The Total Environment*, 624, 1125–1130. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2017.12.137>

Brown, D., Aragón, J., & Guerrero, V. (2017). *Recuperación de suelo de cangahua para el cultivo de tomate.*

Buckman, H. O., & Brady N.C. (1977). *Naturaleza y propiedades de los suelos.*

Cabrera, J. (2012). *Modelos Hidrológicos.*

- Caiminagua, M. (2020). *RECONOCIMIENTO GEOLÓGICO Y GEOQUÍMICO DEL PROSPECTO GEOTÉRMICO ILALÓ, CIUDAD DE QUITO, PROVINCIA DE PICHINCHA.*
- Camila Antonella Hinojosa Jara. (2019). *Modelo de Erosión para Cuencas Hidrográficas del Ecuador.*
- Carbotecnia. (2021). *Significado de los sólidos disueltos totales en agua (TDS).*
<https://www.carbotecnia.info/aprendizaje/quimica-del-agua/solidos-disueltos-totales-tds/>
- Cárdenas Novillo, P. A. (2020). *Evaluación de la calidad del agua en la microcuenca hidrográfica del río tutanangoza mediante análisis fisicoquímicos, microbiológicos y la aplicación del ICA-NSF.*
- Carmona Arteaga, A. (2021). *Análisis de frecuencia altimétrica en una cuenca usando Goolge Earth Engine.* <https://es.linkedin.com/pulse/an%C3%A1lisis-de-frecuencia-altim%C3%A9trica-en-una-cuenca-abel-carmona-arteaga>
- Carrera Villacrés, D. V. (2011). *SALINIDAD EN SUELOS Y AGUAS SUPERFICIALES Y SUBTERRÁNEAS DE LA CUENCA EVAPORTÍCA DE RÍO VERDE-MATEHUALA, SAN LUIS POTOSÍ.*
- Carrera Villacrés, D. V. (2022). *Ciencia del suelo Caracterización y conservación en Ecuador.*
www.repositorio.espe.edu.ec.
- Carrera Villacrés, D. V., Guevara García, P. V., & Gualichicomín Juiña, G. N. (2014). *Caracterización físico-química desde el punto de vista agrícola de los suelos en la zona de riego del proyecto multipropósito Chone.*
- Carrera-Villacrés, D. V., Quinteros-Carabalí, J. A., Gómez, A. J., Solano, E. M., Llumiquinga, G. E., & Burgos, C. A. (2019). Dynamic model for the management of water resource and water aptitude for irrigation of the Togllahuayco gorge in the Guangopolo micro-basin. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 344(1), 012029.
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/344/1/012029>
- Carrión Granja, B. D. (2019). *Evaluación del efecto de microorganismos en las propiedades*

físicas y químicas de suelos cangahua.

Caruanambo Cortéz, V. R. (2018). *DETERMINACION DE LAS ZONAS DE INUNDACIÓN DE LA CUENCA BAJA DEL RÍO ENCAÑADA, TRAMO VIVERO MUNICIPAL DEL DISTRITO LA ENCAÑADA HASTA EL KM 2+000 AGUAS ABAJO.*

Chen, W., Nover, D., He, B., Yuan, H., Ding, K., Yang, J., & Chen, S. (2018). Analyzing inundation extent in small reservoirs: A combined use of topography, bathymetry and a 3D dam model. *Measurement*, 118, 202–213.

<https://doi.org/10.1016/J.MEASUREMENT.2018.01.042>

Chen, Z. Y., Ping, Z. Y., Wang, N. X., Yu, S., & Chen, S. J. (2019). An approach to quick and easy evaluation of the dam breach flood. *Science China Technological Sciences*, 62(10), 1773–1782. <https://doi.org/10.1007/S11431-018-9367-4/METRICS>

Chuenchum, P., Xu, M., & Tang, W. (2020). Estimation of soil erosion and sediment yield in the lancang-mekong river using the modified revised universal soil loss equation and GIS techniques. *Water (Switzerland)*, 12(1). <https://doi.org/10.3390/w12010135>

Chuquimarca Lala, X. P., & Toaza Vinueza, S. M. (2012). *Elaboración de un proyecto de turismo en ruta: “Travesía cultural y natural por el volcán Ilalo”, en la parroquia de Alangasí, del cantón Quito, provincia de Pichincha.*

Cicore, P. L., Sánchez, H. R., Peralta, N. R., Aparicio, V., Castro, F. M., & Costa, J. L. (2015). *Utilización de la conductividad eléctrica aparente y la elevación para delimitar ambientes edáficos en suelos ganaderos.*

Colotti Bizzarri, E. (1999). *LA EROSIVIDAD: CUALIDAD DE LA LLUVIA POCO CONOCIDA.*

Conesa García, C. (2004). *LOS DIQUES DE RETENCIÓN EN CUENCAS DE RÉGIMEN TORRENCIAL: DISEÑO, TIPOS Y FUNCIONES.*

Cornejo, R. (1983). *Los Volcánicos Ilaló. Quito: Escuela Politécnica Nacional, Estudio Geotérmico en el Valle de los Chillos INE-EPN II Fase.*

Cortés Lombana, A. (2004). *Suelos Colombianos: una Mirada desde la academia.*

- Costa E Silva, D. D., Chaves, H. M. L., Curi, W. F., Baracuh, J. G. V., & Cunha, T. P. S. (2020). Application of the watershed sustainability index in the Piranhas-Açu watershed. *Water Policy*, 22(4). <https://doi.org/10.2166/wp.2020.011>
- Costales, A. (2006). *Ilaló, la montaña luminosa*.
- Cotler, H., Corona, J. A., & Galeana-Pizaña, J. M. (2020). Erosión de suelos y carencia alimentaria en México: una primera aproximación. *Investigaciones Geográficas*, 101. <https://doi.org/10.14350/RIG.59976>
- Dai, W., Zeng, Y., Jing, T., Wang, Z., Zong, R., Ni, L., & Fang, N. (2023). Estimation of rainfall erosivity on the Chinese Loess Plateau: A new combination of the ERA5 dataset and machine learning. *Journal of Hydrology*, 624, 129892. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2023.129892>
- Delgado, D., Sadaoui, M., Ludwig, W., & Méndez, W. (2022). Spatio-temporal assessment of rainfall erosivity in Ecuador based on RUSLE using satellite-based high frequency GPM-IMERG precipitation data. *CATENA*, 219, 106597. <https://doi.org/10.1016/J.CATENA.2022.106597>
- Dettling, M. (2020). *Applied Time Series Analysis*.
- Díaz García, S., & González Pérez, J. (2022). La importancia de la temperatura del agua en las redes de abastecimiento. *Ingeniería Del Agua*, 26(2), 107–123. <https://doi.org/10.4995/IA.2022.17366>
- Díaz Mendoza, C. (2010). *Alternativas para el control de la erosión mediante el uso de coberturas convencionales, no convencionales y revegetalización*. http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0120-56092011000300009&script=sci_arttext#nota_2
- Díaz Romero, A. (2008). LOS DIQUES DE CORRECCIÓN HIDROLÓGICA COMO INSTRUMENTOS DE CUATIFICACIÓN DE LA EROSIÓN. *Nº*, 34, 83–99.
- DIGESA. (2018). *Parámetros Organolépticos*.

- Ding, W., Zhang, C., & Shang, S. (2022). The early assessment of harmful algal bloom risk in the East China Sea. *Marine Pollution Bulletin*, 178, 113567. <https://doi.org/10.1016/J.MARPOLBUL.2022.113567>
- Domínguez, E., & Fernández, H. R. (2009). *Macroinvertebrados bentónicos Sudamericanos. Sistemática y Biología*. https://www.researchgate.net/publication/260417584_Macroinvertebrados_bentonicos_Sudamericanos_Sistematica_y_Biologia
- Dong, L., Fu, S., Liu, B., & Yin, B. (2023). Comparison and quantitative assessment of two regional soil erosion survey approaches. *International Soil and Water Conservation Research*. <https://doi.org/10.1016/J.ISWCR.2023.04.004>
- Du, H., Liu, X., Jia, X., Li, S., & Fan, Y. (2022). Assessment of the effects of ecological restoration projects on soil wind erosion in northern China in the past two decades. *CATENA*, 215, 106360. <https://doi.org/10.1016/J.CATENA.2022.106360>
- Duarte, L., Queirós, C., & Teodoro, A. C. (2021). Comparative analysis of four QGIS plugins for web maps creation. *Granja*, 34(2), 8–25. <https://doi.org/10.17163/LGR.N34.2021.01>
- Echavarría-Cháirez, F. G., Medina-García, G., & Ruiz-Corral, J. A. (2020). Efecto en la erosión hídrica del suelo en pastizales y otros tipos de vegetación por cambios en el patrón de lluvias por el calentamiento global en Zacatecas, México. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 11, 63–74. <https://doi.org/10.22319/RMCP.V11S2.4694>
- El Comercio. (2019). *Quito: El volcán Ilaló convive entre tala y construcciones*.
- Escobar Perea, Y., Vargas Batis, B., Ramos García, Y. M., Rodríguez Suárez, E. J., Rodríguez Osoria, O., & Rodríguez Fonseca, R. (2021). *Propiedades físicas del suelo en cuatro fincas suburbanas de Santiago de Cuba*. 48(2), 74–78. <http://cagricola.uclv.edu.cu>
- Estrella, M., Yopez, H., & Jansen, A. (1983). *Geología Estructural del Cerro Ilaló y sus alrededores*.
- Etchevers, J. D., Cruz H, L., Mares A, J., & Zebrowski, C. (1992). *Fertilidad actual y potencial*

de los tepetates de la vertiente occidental de la Sierra Nevada (México).

- Europa Press. (2016). *Científicos instan a los gobiernos a regular el fósforo en los lagos para evitar la proliferación de algas.* <https://www.europapress.es/ciencia/cambio-climatico/noticia-cientificos-istan-gobiernos-regular-fosforo-lagos-evitar-proliferacion-algas-20160818163927.html>
- Farahani, H. J., & Flynn, R. L. (2007). Map Quality and Zone Delineation as affected by Width of Parallel Swaths of Mobile Agricultural Sensors. *Biosystems Engineering*, 96(2), 151–159. <https://doi.org/10.1016/J.BIOSYSTEMSENG.2006.10.010>
- Fassbender, H. W. (1982). *Química de suelos: con énfasis en suelos de América Latina - Hans W. Fassbender - Google Libros.* https://books.google.com.ec/books/about/Qu%C3%ADmica_de_suelos.html?id=UlutngEACAAJ&redir_esc=y
- Fernandes de Sousa, D., Rodrigues, S., Veras de Lima, H., & Torres Chagas, L. (2020). R software packages as a tool for evaluating soil physical and hydraulic properties. *Computers and Electronics in Agriculture*, 168, 105077. <https://doi.org/10.1016/J.COMPAG.2019.105077>
- Fonte, S. (2013). *Biología de Suelos: Un Recurso Esencial para la Agricultura Sostenible.*
- Freeland, R. S. (1989). Review of Soil Moisture Sensing Using Soil Electrical Conductivity. *Transactions of the ASAE*, 32(6), 2190–2194. <https://doi.org/10.13031/2013.31283>
- Galantini, J. A., Senesi, N., Brunetti, G., & Rossel, R. (2004). *Influence of texture on the nitrogen and sulphur status and organic matter quality and distribution in semiarid Pampean grassland soils.*
- Galicia, S., Navarro-Hevia, J., Martínez-Rodríguez, A., Mongil-Manso, J., & Santibáñez, J. (2019). ‘Green’, rammed earth check dams: A proposal to restore gullies under low rainfall erosivity and runoff conditions. *Science of The Total Environment*, 676, 584–594. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2019.04.189>

- Gamboa, M., Reyes, R., & Arrivillaga, J. (2008). *Macroinvertebrados bentónicos como bioindicadores de salud ambiental*.
http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1690-46482008000200001
- García-Navarro, J., Bautista-Vargas, M. E., Pérez-Bravo, S. G., & Carrillo-Loera, M. Á. (2016). *Determinación de la materia orgánica en sedimentos de lagunas costeras para la factibilidad del uso de una celda de combustible microbiana para generación de energía sostenible*. <https://es.scribd.com/document/635061212/Revista-Energia-Quimica-Fisica-V3-N7-3>
- Gençer, E., & Başaran, C. (2023). Water quality assessment and pollution of Akarçay River, Türkiye. *Kuwait Journal of Science*. <https://doi.org/10.1016/J.KJS.2023.07.003>
- GEOMATRIX. (2017). *Geosintéticos para control de erosión*.
<https://geomatrix.co/soluciones/geosinteticos-para-control-de-erosion/>
- Gholizadeh, H., Zoghipour, M. H., Torshizi, M., Nazari, M. R., & Moradkhani, N. (2021). Gone with the wind: Impact of soil-dust storms on farm income. *Ecological Economics*, 188, 107133. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLECON.2021.107133>
- González G., S. M., Ramírez, Y. P., Meza S., A. M., & Dias, L. G. (2012). *DIVERSIDAD DE MACROINVERTEBRADOS ACUÁTICOS Y CALIDAD DE AGUA DE QUEBRADAS ABASTECEDORAS DEL MUNICIPIO DE MANIZALES*.
- González Sanclemente, J. E. (2021). *ANÁLISIS DE SERIES TEMPORALES DE PRECIPITACIÓN MUNICIPIO DE QUIBDÓ, DEPARTAMENTO CHOCÓ-USANDO MODELADO SARIMA*.
- Han, Y., Zhao, W., Zhou, A., & Pereira, P. (2023). Water and wind erosion response to ecological restoration measures in China's drylands. *Geoderma*, 435, 116514.
<https://doi.org/10.1016/J.GEODERMA.2023.116514>
- Hanson, P., Springer, M., & Ramirez, A. (2010). Capítulo 1: Introducción a los grupos de macroinvertebrados acuáticos. *Revista de Biología Tropical*, 58, 3–37.

http://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0034-77442010000800001&lng=en&nrm=iso&tlng=es

Hay, J. G. P., Oxley, A. P. A., Wos-Oxley, M. L., Hayes, R., Pickles, T., Roberts, K., & Conlan, X. A. (2022). The cyclic nature of soil chemistry: Forensic analysis with the aid of ultra-high performance liquid chromatography. *Talanta Open*, 6, 100126.

<https://doi.org/10.1016/J.TALO.2022.100126>

He, J., Liu, Y., Liu, L., Yan, B., Li, L., Meng, H., Hang, L., Qi, Y., Wu, M., & Gao, Y. (2023).

Recent development on optimization of bio-cementation for soil stabilization and wind erosion control. *Biogeotechnics*, 100022. <https://doi.org/10.1016/J.BGTECH.2023.100022>

Heifer International. (2014). *Memoria del Taller de Cromatografía*.

Hinojosa, L., Guerrero Villegas, W., & Arias Muñoz, P. (2017). Exploring water security and water demand determinants in rural areas. The case of canton Cotacachi in Ecuador.

Water Resources and Rural Development, 10, 22–32.

<https://doi.org/10.1016/J.WRR.2018.09.001>

Hossne García, A. (2014). *Elastoplasticidad de un suelo franco arenoso de sabana*.

http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1315-01622014000200008

Hou, H. C., Zhang, D., & Lai, J. H. K. (2023). Qualitative and quantitative investigation into the indoor built environment of modular student housing: A multiple-room case study. *Energy and Buildings*, 280, 112734. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2022.112734>

Hou, S., Xu, M., & Qu, S. (2023). The “Gravity” for global virtual water flows: From quantity and quality perspectives. *Journal of Environmental Management*, 329, 116984.

<https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2022.116984>

Huatatoca, J., & Chanaluisa, W. (2019). *ANÁLISIS GEOMORFOLÓGICO DE LA SUBCUENCA DEL RIO PAMBAY PARA DETERMINAR LAS ZONAS VULNERABLES A INUNDACIONES MEDIANTE EL MODELAMIENTO HIDROLÓGICO*.

Hurtado Bolaños, W. D., Jiménez Alvarez, P. D., Carrera Villacrés, V. D., & Guerrón Varela, E.

- R. (2021). *Morfometría, Hidrología e Hidrometría de la cuenca Urcuwaycu y propuesta de recuperación*.
- Ibáñez Asensio, S., Moreno Ramón, H., & Gisbert Blanquer, J. M. I. (2011). *Morfología de las cuencas hidrográficas*.
- Ibáñez, J. J. (2007). *pH del Suelo*.
<https://www.madrimasd.org/blogs/universo/2007/04/02/62776>
- Ibarra Castillo, D., Ruiz Corral, J. A., González Eguiarte, D. R., Flores Garnica, J. G., & Díaz Padilla, G. (2009). Distribución espacial del pH de los suelos agrícolas de Zapopan, Jalisco, México. *Agricultura Técnica En México*, 35(3), 267–276.
http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0568-25172009000300003&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- IDEAM. (2007). *Sólidos Suspendidos Totales en Agua Secados a 103 - 105 °C*.
- IES Parque Goya. (2018). *PROCESOS GEOLÓGICOS EXTERNOS, SEDIMENTACIÓN Y ROCAS SEDIMENTARIAS*.
- Ingaramo, O. E., Paz Ferreiro, J., Mirás Avalos, J. M., & Vidal Vázquez, E. (2007).
Caracterización de las propiedades generales del suelo en una parcela experimental con distintos sistemas de laboreo.
- Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático. (2017). *Manual de Medición de Caudales*.
- IROUME, A. (2003). Transporte de sedimentos en una cuenca de montaña en la Cordillera de los Andes de la Novena Región de Chile. *Bosque (Valdivia)*, 24(1), 125–135.
<https://doi.org/10.4067/S0717-92002003000100010>
- Izquierdo Bautista, J., & Arévalo Hernández, J. J. (2021). Determinación del carbono orgánico por el método químico y por calcinación. *Ingeniería y Región*, 26, 20–28.
<https://doi.org/10.25054/22161325.2527>
- Jensen, A. S., Coffman, V. R., Schullehner, J., Trabjerg, B. B., Pedersen, C. B., Hansen, B.,

- Olsen, J., Pedersen, M., Stayner, L. T., & Sigsgaard, T. (2023). Prenatal exposure to tap water containing nitrate and the risk of small-for-gestational-age: A nationwide register-based study of Danish births, 1991–2015. *Environment International*, 174, 107883. <https://doi.org/10.1016/J.ENVINT.2023.107883>
- Jiang, C., Cheng, L., Li, C., & Zheng, L. (2022). A hydrochemical and multi-isotopic study of groundwater sulfate origin and contribution in the coal mining area. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 248, 114286. <https://doi.org/10.1016/J.ECOENV.2022.114286>
- Josefina Sánchez Herrera, M., Leonardo Medina, J., & URIEL GUILLIN RODRÍGUEZ JOSE ANTONIO GARCÍA NEGRON Asesor JORGE ENRIQUE ARENAS HERNÁNDEZ Subdirector, N. (2018). *ANÁLISIS DE LA CALIDAD BIOLÓGICA DE LAS FUENTES HÍDRICAS ESTUDIADAS PRESENTADO POR: GRUPO 2.1 COMUNIDADES HIDROBIOLÓGICAS*.
- Kaczmarek, N., Mahjoubi, I., Benlasri, M., Nothof, M., Schäfer, R. B., Frör, O., & Berger, E. (2023). Water quality, biological quality, and human well-being: Water salinity and scarcity in the Draa River basin, Morocco. *Ecological Indicators*, 148, 110050. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLIND.2023.110050>
- Kazi, T. G., Arain, M. B., Jamali, M. K., Jalbani, N., Afridi, H. I., Sarfraz, R. A., Baig, J. A., & Shah, A. Q. (2009). Assessment of water quality of polluted lake using multivariate statistical techniques: A case study. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 72(2), 301–309. <https://doi.org/10.1016/J.ECOENV.2008.02.024>
- Kluepfel, M., & Lippert, B. (2016). *Cambiando el pH del Suelo*. <https://hgic.clemson.edu/factsheet/cambiando-el-ph-del-suelo/>
- Konen, M. E., Jacobs, P. M., Lee Burras, C., Talaga, B. J., & Mason, J. A. (2002). Equations for Predicting Soil Organic Carbon Using Loss-on-Ignition for North Central U.S. Soils. *Soil Science Society of America Journal*, 66(6), 1878–1881. <https://doi.org/10.2136/SSSAJ2002.1878>

La Manna, L., Budba, C., Virginia, A., Davel, M., Puentes, C., & Irisarri, J. (2007).

COMPARACIÓN DE MÉTODOS ANALÍTICOS PARA LA DETERMINACIÓN DE MATERIA ORGÁNICA EN SUELOS DE LA REGIÓN ANDINO-PATAGÓNICA: EFECTOS DE LA VEGETACIÓN Y EL TIPO DE SUELO.

Lado, M., Paz, A., & Ben-Hur, M. (2004). Organic Matter and Aggregate Size Interactions in Infiltration, Seal Formation, and Soil Loss. *Soil Science Society of America Journal*, 68(3), 935–942. <https://doi.org/10.2136/SSSAJ2004.9350>

Ladrera, R., Rieradevall, M., & Prat, N. (2013). *MACROINVERTEBRADOS ACUÁTICOS COMO INDICADORES BIOLÓGICOS: UNA HERRAMIENTA DIDÁCTICA.*
<http://www.ehu.es/>

Lai, C., Chen, X., Wang, Z., Wu, X., Zhao, S., Wu, X., & Bai, W. (2016). Spatio-temporal variation in rainfall erosivity during 1960–2012 in the Pearl River Basin, China. *CATENA*, 137, 382–391. <https://doi.org/10.1016/J.CATENA.2015.10.008>

Li, J., Yuan, X., Su, Y., Qian, K., Liu, Y., Yan, W., Xu, S., Yang, X., Luo, G., & Ma, X. (2023). Trade-offs and synergistic relationships in wind erosion in Central Asia over the last 40 years: A Bayesian Network analysis. *Geoderma*, 437, 116597.
<https://doi.org/10.1016/J.GEODERMA.2023.116597>

Li, X., Gan, Y., Zhou, A., & Liu, Y. (2015). Relationship between water discharge and sulfate sources of the Yangtze River inferred from seasonal variations of sulfur and oxygen isotopic compositions. *Journal of Geochemical Exploration*, 153, 30–39.
<https://doi.org/10.1016/J.GEXPLO.2015.02.009>

Li, Y., Li, J., Are, K. S., Huang, Z., Yu, H., & Zhang, Q. (2019). Livestock grazing significantly accelerates soil erosion more than climate change in Qinghai-Tibet Plateau: Evidenced from ¹³⁷Cs and ²¹⁰Pbex measurements. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 285, 106643. <https://doi.org/10.1016/J.AGEE.2019.106643>

Liu, Z., Liu, L., Li, Y., & Li, X. (2023). Influence of urban green space landscape pattern on river

- water quality in a highly urbanized river network of Hangzhou city. *Journal of Hydrology*, 621, 129602. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2023.129602>
- Lizcano, R., Dillier, T., Viciado, O., Saavedra, D., Leidy, M., Cuellar, M., Rolando, E., Manuel, V., Moreno, F., Marco, P., & Flórez, F. (2017). *Muestreo de suelos, técnicas de laboratorio e interpretación de análisis de suelos*. <http://sena.edu.co/regionales-y-centros-de-formacion/zona-andina/Huila/Paginas/Huila.aspx>
- López, F. (1985). *Geología del Cuaternario entre el flanco este del Volcán Ilaó y el Sector El Tablón. Tesis de Grado*.
- López-Oriona, Á., & Vilar, J. A. (2023). Machine learning for multivariate time series with the R package mlmts. *Neurocomputing*, 537, 210–235. <https://doi.org/10.1016/J.NEUCOM.2023.02.048>
- López-Ruiz, S., Tortajada, C., & González-Gómez, F. (2020). Is the human right to water sufficiently protected in Spain? Affordability and governance concerns. *Utilities Policy*, 63, 101003. <https://doi.org/10.1016/J.JUP.2019.101003>
- Lorea, L., Brassiolo, M. M., & Gomez, C. (2008). *Abundancia y diversidad de lianas en un bosque del Chaco húmedo argentino*. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=48112952004>
- Luan, J., Miao, P., Tian, X., Li, X., Ma, N., Xu, Z., Wang, H., & Zhang, Y. (2022). Separating the impact of check dams on runoff from climate and vegetation changes. *Journal of Hydrology*, 614, 128565. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2022.128565>
- Lucas-Borja, M. E., & Antonio-Zema, D. (2023). Check dam uses for soil conservation and erosion control: a worldwide review. *EGU23*. <https://doi.org/10.5194/EGUSPHERE-EGU23-17109>
- Lucas-Borja, M. E., Piton, G., Nichols, M., Castillo, C., Yang, Y., & Zema, D. A. (2019). The use of check dams for soil restoration at watershed level: A century of history and perspectives. *Science of The Total Environment*, 692, 37–38. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2019.07.248>

Manual de operación del espectrofotómetro. (2018). *INSTRUCCIONES DE OPERACIÓN DEL ESPECTROFOTÓMETRO BIOMATE TM 3 THERMO SPECTRONIC*.

Marinez, J. M., Duval, M. E., Lopez, F. M., Iglesias, J. O., & Galantinu, J. A. (2018). *Ajustes en la estimación de carbono orgánico por el método de calcinación en molisoles del sudoeste bonaerense*. <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/66765>

Matthews, F., Panagos, P., & Verstraeten, G. (2022). Simulating event-scale rainfall erosivity across European climatic regions. *CATENA*, 213, 106157. <https://doi.org/10.1016/J.CATENA.2022.106157>

Mauricio, J. A. (2007). *Introducción al Análisis de Series Temporales*.

Maza Lmea, J. A. (2017). *CUANTIFICACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE IONES DE FOSFATO EN DOS CUENCAS ANDINAS ALTAS DEL SUR DEL ECUADOR*.

Medina Saavedra, T., Arroyo Figueroa, G., & Peña Caballero, V. (2018). Cromatografía de Pfaiffer en el análisis de suelos de sistemas productivos. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 9(3), 665–673. <https://doi.org/10.29312/REMEXCA.V9I3.1223>

Meléndez Reyes, D. (2017). *Vista de pH: qué es, cómo se mide y otros datos interesantes*. <https://leka.uaslp.mx/index.php/universitarios-potosinos/article/view/213/152>

Mengr, J. (2020). *El Sulfato De Hierro Contenido En Esta Agua Está Haciendo Que El Arroyo Sea Anaranjado*. <https://www.istockphoto.com/es/foto/el-sulfato-de-hierro-contenido-en-esta-agua-est%C3%A1-haciendo-que-el-arroyo-sea-anaranjado-gm1196791965-341502817>

Molina, E. (2019). *ANÁLISIS DE SUELOS Y SU INTERPRETACIÓN*. www.aminogrowinternacional.com

Monitoreo de cantidad de agua – Aguas Urbanas. (2018).

<http://www.aguasurbanas.ei.udelar.edu.uy/index.php/2018/11/11/monitoreo-de-cantidad-de-agua/>

- Montero García, J. A. (2023). *EVALUACIÓN DE LOS NIVELES DE SULFATPS EN MUESTRAS DE AGUAS NATURALES PROVENIENTES DE ASTURIAS.*
- Moore, R. D., & Szykiewicz, A. (2023). Aqueous sulfate contributions in terrestrial basaltic catchments: Implications for understanding sulfate sources and transport in Meridiani Planum, Mars. *Icarus*, 391, 115342. <https://doi.org/10.1016/J.ICARUS.2022.115342>
- Moreno, C. E. (2001). *Métodos para medir la biodiversidad.* <http://entomologia.rediris.es/sea>
- Mtambanengwe, F., Mapfumo, P., & Kirchmann, H. (2020). *Decomposition of Organic Matter in Soil as Influenced by Texture and Pore Size Distribution.*
- Murillo, R. S., León, S., Saravia, A. Y., & Sánchez, C. D. M. (2009). Determinación de la concentración de sólidos suspendidos totales (SST) y metales pesados en la cuenca del Río Morote, Nicoya, Guanacaste. *Uniciencia*, 23(1–2), 59–64. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=475949668005>
- Murillos, J. (2003). *ESTUDIO DEL PRONÓSTICO DE LA DEMANDA DE ENERGIA ELECTRICA, UTILIZANDO MODELOS DE SERIES DE TIEMPO.*
- Muscolo, A., Panuccio, M. R., Mallamaci, C., & Sidari, M. (2014). Biological indicators to assess short-term soil quality changes in forest ecosystems. *Ecological Indicators*, 45, 416–423. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLIND.2014.04.047>
- Narváez-Espinoza, M., Zambrano-Zambrano, W., Campoverde-Cajamarca, D., & Armijos-Sanchez, N. (2017). Estudio Comparativo del Grado de Compactación y Módulo de Elasticidad de Rellenos Estructurales. In *Conference Proceedings UTMACH* (Vol. 2). <http://investigacion.utmachala.edu.ec/proceedings/index.php/utmach/index>
<http://investigacion.utmachala.edu.ec/proceedings/index.php/utmach/index>
- Navarro, G. V., Lemus, M. V., Vásquez, R., & Bravo, R. (2001). *RECUPERACIÓN HIDROLÓGICA Y FORESTAL DE LA CUENCA PONIENTE DEL POBLADO DE SIERRAS DE BELLAVISTA.*
- Neina, D. (2019). *The Role of Soil pH in Plant Nutrition and Soil Remediation.*

<https://doi.org/10.1155/2019/5794869>

- Nirmal, L. A., & Jacob, S. (2022). The impact of COVID-19 in curbing the goals of ensuring sustainable development of life on land (SDG 15) and below water (SDG 14). *COVID-19 and the Sustainable Development Goals*, 285–303. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91307-2.00012-2>
- NOM-021. (2002). *NORMA Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000*.
- Northern Plains & Mountains. (2015). *Alcalinidad, pH, y Sólidos Disueltos Totales*.
- Ojeda-Quintana, L. J., Machado-Díaz, Y., Bernal-Carrazana, Y., Hernández-Vilches, M. E., Font-Vila, L., Hernández-Rodríguez, C., & Casanovas-Cosío, E. (2017). *Índice de calidad del suelo en la Empresa Pecuaria El Tablón (Cienfuegos, Cuba)*. https://www.redalyc.org/journal/2691/269158212002/html/#redalyc_269158212002_ref26
- Pacheco Ávila, J., Cabrera Sansores, A., & Pérez Ceballos, R. (2004). *Diagnóstico de la calidad del agua subterránea en los sistemas municipales de abastecimiento en el Estado de Yucatán, México*.
- Palacios Orejuela, I. F., Ushiña Huera, D. P., & Carrera Villacrés, D. V. (2018). Identificación de Cangahuas para su recuperación mediante estudio multicriterio y constatación in situ en comunas del volcán Ilaló. *Congreso de Ciencia y Tecnología ESPE*, 13(1). <https://doi.org/10.24133/cctespe.v13i1.649>
- Palacios Orejuela, I., Ushiña, D., & Carrera Villacrés, D. (2020). Técnicas SIG para recuperación de suelos cangahuosos, con fines de agricultura comunitaria en el ilaló. *Ciencia Del Suelo*, 38(2), 295–309. http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1850-20672020000200295&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- Pan, D., Song, Y., Dyck, M., Gao, X., Wu, P., & Zhao, X. (2017). Effect of plant cover type on soil water budget and tree photosynthesis in jujube orchards. *Agricultural Water Management*, 184, 135–144. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2017.01.009>

- Pardo, I. (2018). *Agua verde en lagos, ¿Qué la produce? -*
<https://lanaturalezaenunclic.com/agua-verde-en-lagos-que-la-produce/>
- Paredes, I., Otero, N., Soler, A., Green, A. J., & Soto, D. X. (2020). Agricultural and urban delivered nitrate pollution input to Mediterranean temporary freshwaters. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 294, 106859. <https://doi.org/10.1016/J.AGEE.2020.106859>
- Park, S., Jeong, J., Motter, E., Bailey, R. T., & Green, C. H. M. (2023). Introducing APEXMOD - A QGIS plugin for developing coupled surface-subsurface hydrologic modeling framework of APEX, MODFLOW, and RT3D-Salt. *Environmental Modelling & Software*, 165, 105723. <https://doi.org/10.1016/J.ENVSOF.2023.105723>
- Parra, F. (2019). *Estadística y Machine Learning con R*.
<https://bookdown.org/content/2274/portada.html>
- Paul, M. J., & Meyer, J. L. (2008). Streams in the urban landscape. *Urban Ecology: An International Perspective on the Interaction Between Humans and Nature*, 207–231. https://doi.org/10.1007/978-0-387-73412-5_12
- Percebon, C. M., Virmond, A., & da Rosa Filho, E. F. (2005). *DIAGNÓSTICO DA TEMPERATURA DAS ÁGUAS DOS PRINCIPAIS RIOS DE BLUMENAU*.
- Pérez-López, E. (2016). Control de calidad en aguas para consumo humano en la región occidental de Costa Rica. *Revista Tecnología En Marcha*, 29(3), 3–14. <https://doi.org/10.18845/TM.V29I3.2884>
- Pierre, C., Rajot, J. L., Faye, I., Dorego, G. S., Bouet, C., Marticorena, B., Bergametti, G., Ka, A., Amar, B., Tall, A., Diagne, N., & Feron, A. (2023). A contrasting seasonality of wind erosivity and wind erosion between Central and Western Sahel. *Aeolian Research*, 62, 100879. <https://doi.org/10.1016/J.AEOLIA.2023.100879>
- Plaster, E. J. (2004). *La ciencia del suelo y su manejo*.
- Podwojewski, P., & Germain, N. (2005). Short-term effects of management on the soil structure in a deep tilled hardened volcanic-ash soil (cangahua) in Ecuador. *European Journal of*

- Soil Science*, 56(1), 39–51. <https://doi.org/10.1111/J.1365-2389.2004.00638.X>
- Prat, C., Baez, A., Ascencio, E., & Marquez, A. (1997). *Erosión de una toba volcánica endurecida en proceso de rehabilitación*.
- Prat, N., Ríos, B., Acosta, R., & Rieradevall, M. (2020). *LOS MACROINVERTEBRADOS COMO INDICADORES DE CALIDAD DE LAS AGUAS*.
- Qin, X., Zhu, H., Ren, Y., Cao, Z., Wang, X., Zhao, Z., Yao, Y., Zhong, Z., Kong, W., Qiu, Q., Jia, H., & Wei, X. (2022). Erosion intensity and check dam size affect the horizontal and vertical distribution of soil particles, carbon and nitrogen: Evidence from China's Loess Plateau. *CATENA*, 217, 106451. <https://doi.org/10.1016/J.CATENA.2022.106451>
- Quinteros Carabalí, J., Gómez-García, J., Solano, M., Llumiquinga, G., Burgos, C., & Carrera-Villacrés, D. (2019). Evaluación de la calidad de agua para riego y aprovechamiento del recurso hídrico de la quebrada Togllahuayco. *Siembra*, 6(2), 046–057. <https://doi.org/10.29166/SIEMBRA.V6I2.1641>
- Quishpe, J. (2019). *Evaluación del efecto del agave azul (Agave americana sp. Andina) en la captura de agua y mejoramiento de la fertilidad en suelos volcánicos endurecidos (cangahuas)*.
- Rader, R. B., Voelz, N. J., & Ward, J. V. (2008). Post-Flood recovery of a macroinvertebrate community in a regulated River: Resilience of an anthropogenically altered ecosystem. *Restoration Ecology*, 16(1), 24–33. <https://doi.org/10.1111/J.1526-100X.2007.00258.X>
- Ramírez, A. (2010). Capítulo 2: Métodos de recolección. *Revista de Biología Tropical*, 58, 41–50. http://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0034-77442010000800002&lng=en&nrm=iso&tlng=es
- Rehman Khan, S. A., Ponce, P., Yu, Z., Golpîra, H., & Mathew, M. (2022). Environmental technology and wastewater treatment: Strategies to achieve environmental sustainability. *Chemosphere*, 286, 131532. <https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2021.131532>
- Restrepo Rivera, J., & Pinheiro, S. (2011). *Cromatografía Agricultura Orgánica*.

- Rhoades, J. D., Manteghi, N. A., Shouse, P. J., & Alves, W. J. (1989). Soil Electrical Conductivity and Soil Salinity: New Formulations and Calibrations. *Soil Science Society of America Journal*, 53(2), 433–439.
<https://doi.org/10.2136/SSSAJ1989.03615995005300020020X>
- Ríos, F., Abril, R., Carvajal, E., López Katherine, & Rodríguez, H. (2021). *Concentración de nitratos, fosfatos, tensoactivos y su relación con las precipitaciones en río Puyo*.
http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S1680-03382021000300003&script=sci_arttext&tlng=pt
- Robichaud, P. R., Storrar, K. A., & Wagenbrenner, J. W. (2019). Effectiveness of straw bale check dams at reducing post-fire sediment yields from steep ephemeral channels. *Science of The Total Environment*, 676, 721–731.
<https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2019.04.246>
- Rodriguez, C. I., Duque, C., Calvache, M. L., & López-Chicano, M. (2010). Causas de las variaciones de la conductividad eléctrica del agua subterránea en el acuífero Motril-Salobreña, España. *GEOGACETA*, 49, 107–110. www.geogaceta.com
- Rodriguez, R. (2018). *LA CROMATOGRFIA APLICADA A AL AGROECOLOGIA*.
- Rodríguez Zamora., J. (2009). Parámetros fisicoquímicos de dureza total en calcio y magnesio, pH, conductividad y temperatura del agua potable analizados en conjunto con las Asociaciones Administradoras del Acueducto, (ASADAS), de cada distrito de Grecia, cantón de Alajuela, noviembre. *Pensamiento Actual*, ISSN-e 2215-3586, ISSN 1409-0112, Vol. 9, Nº. 12-13, 2009 (Ejemplar Dedicado a: Revista Pensamiento Actual), Págs. 125-134, 9(12), 125–134.
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5897932&info=resumen&idioma=ENG>
- Roldán-Pérez, G. (2016). Los macroinvertebrados como bioindicadores de la calidad del agua: cuatro décadas de desarrollo en Colombia y Latinoamérica. *Revista de La Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, ISSN 0370-3908, Vol. 40, Nº. 155, 2016, Págs. 254-274, 40(155), 254–274.

- <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6378068&info=resumen&idioma=ENG>
- Romero Cárdenas, I. N., & Zúñiga Acuario, T. K. (2017). *EVALUACIÓN DE LA CALIDAD ECOLÓGICA DEL RÍO USHIMANA UTILIZANDO COMUNIDADES DE MACROINVERTEBRADOS COMO INDICADORES DE LA CALIDAD DEL AGUA.*
- Romero, M. P., Santamaría, D. M., & Zafra, C. A. (2009). *BIOINGENIERÍA Y SUELO: ABUNDANCIA MICROBIOLÓGICA, pH Y CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA BAJO TRES ESTRATOS DE EROSIÓN.*
- Ropero Portillo, S. (2017). *EROSIÓN EÓLICA: Definición, Tipos y Ejemplos.*
<https://www.ecologiaverde.com/erosion-eolica-definicion-tipos-y-ejemplos-2566.html>
- Rosas-Chavoya, M., Gallardo-Salazar, J. L., López-Serrano, P. M., Alcántara-Concepción, P. C., & León-Miranda, A. K. (2022). QGIS A CONSTANTLY GROWING FREE AND OPEN-SOURCE GEOSPATIAL SOFTWARE CONTRIBUTING TO SCIENTIFIC DEVELOPMENT. *Geographical Research Letters*, 48(1), 197–213. <https://doi.org/10.18172/CIG.5143>
- Rotiroti, M., Sacchi, E., Caschetto, M., Zanotti, C., Fumagalli, L., Biasibetti, M., Bonomi, T., & Leoni, B. (2023). Groundwater and surface water nitrate pollution in an intensively irrigated system: Sources, dynamics and adaptation to climate change. *Journal of Hydrology*, 623, 129868. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2023.129868>
- Rubio Gutiérrez, A. M. (2010). *LA DENSIDAD APARENTE EN SUELOS FORESTALES DEL PARQUE NATURAL LOS ALCORNOCALES.*
- Salamanca Jiménez, A., & Sadeghian Khalajabadi, S. (2005). *LA DENSIDAD APARENTE Y SU RELACIÓN CON OTRAS PROPIEDADES EN SUELOS DE LA ZONA CAFETERA COLOMBIANA.*
- Salazar, E. (1980). *Talleres Prehistóricos en los Altos Andes del Ecuador.*
- Schoumans, O. F., Chardon, W. J., Bechmann, M. E., Gascuel-Oudou, C., Hofman, G., Kronvang, B., Rubæk, G. H., Ulén, B., & Dorioz, J. M. (2014). Mitigation options to reduce phosphorus losses from the agricultural sector and improve surface water quality: A review.

Science of The Total Environment, 468–469, 1255–1266.

<https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2013.08.061>

Schulte, E. E., & Hopkins, B. G. (2015). Estimation of Soil Organic Matter by Weight Loss-On-Ignition. *Soil Organic Matter: Analysis and Interpretation*, 21–31.

<https://doi.org/10.2136/SSSASPECPUB46.C3>

Shmilovitz, Y., Marra, F., Wei, H., Argaman, E., Goodrich, D., Assouline, S., & Morin, E. (2023). Assessing the controlling factors on watershed soil erosion during intense rainstorm events using radar rainfall and process-based modeling. *CATENA*, 231, 107282.

<https://doi.org/10.1016/J.CATENA.2023.107282>

Solís-Castro, Y., Zúñiga-Zúñiga, L. A., & Mora-Alvarado, D. (2018). La conductividad como parámetro predictivo de la dureza del agua en pozos y nacientes de Costa Rica. *Revista Tecnología En Marcha*, 31(1), 35–46. <https://doi.org/10.18845/TM.V31I1.3495>

Soriano Soto, M. D. (2020). *pH del suelo*.

Sun, P., & Wu, Y. (2022a). Dynamic Modeling Framework of Sediment Trapped by Check-Dam Networks: A Case Study of a Typical Watershed on the Chinese Loess Plateau.

Engineering. <https://doi.org/10.1016/J.ENG.2021.12.015>

Sun, P., & Wu, Y. (2022b). Dynamic Modeling Framework of Sediment Trapped by Check-Dam Networks: A Case Study of a Typical Watershed on the Chinese Loess Plateau.

Engineering. <https://doi.org/10.1016/J.ENG.2021.12.015>

Tan, Y., Liu, H., & Lu, Y. (2023). Sediment yield in the Lower Jinsha River Basin, China: Controlling factors and spatiotemporal patterns. *CATENA*, 229, 107236.

<https://doi.org/10.1016/J.CATENA.2023.107236>

Taruchaín Arteaga, A. G. (2020). *Evaluación de la habilitación de cangahuas para la producción agrícola en San Miguel de Urcuquí*.

Tian, P., Zhu, Z., Yue, Q., He, Y., Zhang, Z., Hao, F., Guo, W., Chen, L., & Liu, M. (2021). Soil erosion assessment by RUSLE with improved P factor and its validation: Case study on

- mountainous and hilly areas of Hubei Province, China. *International Soil and Water Conservation Research*, 9(3), 433–444. <https://doi.org/10.1016/J.ISWCR.2021.04.007>
- Tortosa, G. (2014). *Uso del estiércol como fertilizante*.
<http://www.compostandociencia.com/2014/08/uso-estiercol-como-fertilizante/>
- Trujillo, G., & Zebrowski, C. (1998). *La cangahua y su rehabilitación*. In *III Simposio Internacional de Desarrollo Sustentable de Montaña: entendiendo las interfaces ecológicas para la gestión de los paisajes culturales en los Andes* .
- UPO. (2004). *Determinación de fosfatos en aguas por espectrofotometría*.
- Urgilez Montero, P. F. (2016). *Control de calidad de agua y análisis de sedimentos en la microcuenca del Río Tabacay*.
- Varnosfaderany, M. N., Ebrahimi, E., Mirghaffary, N., & Safyanian, A. (2010). Biological assessment of the Zayandeh Rud River, Iran, using benthic macroinvertebrates. *Limnologica - Ecology and Management of Inland Waters*, 40(3), 226–232.
<https://doi.org/10.1016/J.LIMNO.2009.10.002>
- Vásconez, M., Mancheno, A., Álvarez, C., Prehn, C., Cevallos, C., & Ortiz, L. (2019). *Cuencas Hidrográficas*.
- Vásquez, G. (2016). *INFLUENCIA DEL USO DE LA TIERRA EN LA RESPUESTA HIDROLÓGICA DE CUENCAS DE CABECERA EN LOS ANDES CENTRALES DE COLOMBIA*.
- Victoria Cremona, M., & Soledad Enriquez, A. (2020). *ALGUNAS PROPIEDADES DEL SUELO QUE CONDICIONAN SU COMPORTAMIENTO*.
- Villasanti, C., Roman, P., & Pantoja. (2013). *El manejo del suelo en la producción de hortalizas con buenas prácticas agrícolas* .
- Villavicencio, J. (2020). *Introducción a Series de Tiempo*.
- Viñals, M. (2002). *Series temporales* (Edicions UPC).
- Vitoria, I., Maraver, F., Sánchez-Valverde, F., & Armijo, F. (2015). Contenido en nitratos de

aguas de consumo público españolas. *Gaceta Sanitaria*, 29(3), 217–220.

<https://doi.org/10.1016/J.GACETA.2014.12.007>

Wang, F., & Ding, W. (2023). How did sediments disperse and accumulate in the oceanic basin, South China Sea. *Marine and Petroleum Geology*, 147, 105979.

<https://doi.org/10.1016/J.MARPETGEO.2022.105979>

Wang, F. X., Wang, Z. Y., & Lee, J. H. W. (2007). Acceleration of vegetation succession on eroded land by reforestation in a subtropical zone. *Ecological Engineering*, 31(4), 232–241.

<https://doi.org/10.1016/J.ECOLENG.2007.07.004>

Wang, H., Xiong, X., Wang, K., Li, X., Hu, H., Li, Q., Yin, H., & Wu, C. (2023). The effects of land use on water quality of alpine rivers: A case study in Qilian Mountain, China. *Science of The Total Environment*, 875, 162696.

<https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2023.162696>

Wei, Y., Jiao, J., & Li, Y. (2022). Evolution of historical sediment yield using check-dam systems as carriers: A case study in a restored agricultural catchment on the Loess Plateau, China.

CATENA, 210, 105877. <https://doi.org/10.1016/J.CATENA.2021.105877>

Wen, X., & Zhen, L. (2020). Soil erosion control practices in the Chinese Loess Plateau: A systematic review. *Environmental Development*, 34, 100493.

<https://doi.org/10.1016/J.ENVDEV.2019.100493>

World Health Organization. (2011). *Guías para la calidad del agua de consumo humano*.

<http://apps.who.int/>

Xia, L., van Dael, T., Bergen, B., & Smolders, E. (2023). Phosphorus immobilisation in sediment by using iron rich by-product as affected by water pH and sulphate concentrations. *Science of The Total Environment*, 864, 160820.

<https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2022.160820>

Xu, Y., Liu, W., Xu, B., & Xu, Z. (2023). Riverine sulfate sources and behaviors in arid environment, Northwest China: Constraints from sulfur and oxygen isotopes. *Journal of*

- Environmental Sciences*, 137, 716–731. <https://doi.org/10.1016/J.JES.2023.03.024>
- Yang, G., Sun, R., Jing, Y., Xiong, M., Li, J., & Chen, L. (2022). Global assessment of wind erosion based on a spatially distributed RWEQ model. *Progress in Physical Geography*, 46(1), 28–42. https://doi.org/10.1177/03091333211030608/ASSET/IMAGES/LARGE/10.1177_03091333211030608-FIG4.JPEG
- Yao, Y., Song, J., & Wei, X. (2022). The fate of carbon in check dam sediments. *Earth-Science Reviews*, 224, 103889. <https://doi.org/10.1016/J.EARSCIREV.2021.103889>
- Yin, F., & Xu, C. xin. (2020). Quantifying the Inter- and Intra-Annual Variations in Regional Water Consumption and Scarcity Incorporating Water Quantity and Quality. *Water Resources Management*, 34(8), 2313–2327. <https://doi.org/10.1007/S11269-020-02523-6>
- Zebrowsky, C. (1996). *El cultivo de la cangahua en el medio campesino tradicional en el Ecuador*.
- Zhang, S., Hu, X., Miao, W., & Xu, Z. (2023). Analysis of the sediment sources of flood driven erosion and deposition in the river channel of the Fu River Basin. *International Journal of Sediment Research*. <https://doi.org/10.1016/J.IJSRC.2023.04.004>
- Zhao, C., Chen, N., Liu, T., & Feng, C. (2023). Effects of adding different carbon sources on the microbial behavior of sulfate-reducing bacteria in sulfate-containing wastewater. *Journal of Cleaner Production*, 392, 136332. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2023.136332>
- Zhicay Lombaida, J. I. (2020). *CARACTERIZACIÓN MORFOMÉTRICA Y ESTUDIO HIDROLÓGICO DE LA MICROCUENCA DEL RÍO SAN FRANCISCO, CANTÓN GUALACEO*.
- Zou, X., Li, J., Cheng, H., Wang, J., Zhang, C., Kang, L., Liu, W., & Zhang, F. (2018). Spatial variation of topsoil features in soil wind erosion areas of northern China. *CATENA*, 167, 429–439. <https://doi.org/10.1016/J.CATENA.2018.05.022>