Revista RENPYS "Recursos Naturales Producción y Sostenibilidad"
ISSN 2953-6561

https://doi.org/10.61236/renpys.v4i2.1117

Publicación Semestral. Vol. 4, No. 2, julio-diciembre 2025, Ecuador (p. 11-23). Edición continua

Modelación hidrogeoquímica del transporte de metales pesados ríos andinos del Ecuador

Anahi Milena Mangui Andrade[1]*, María Fernanda Mendoza Quishpe[1], José Luis Agreda Oña[1]

[1]Universidad Técnica de Cotopaxi, Facultad de CAREN, Ingeniería Ambiental, Latacunga, Cotopaxi, Ecuador

***Dirección para correspondencia:** anahi.mangui9892@utc.edu.ec

Fecha de Recepción: 10-02-2025 Fecha de Aceptación: 10-04-2025 Fecha de Publicación: 10-07-2025

Resumen

La presencia de metales pesados en el ambiente constituye actualmente una de las problemáticas más críticas a nivel mundial. Este estudio tuvo como finalidad simular el comportamiento del Arsénico (As), Plomo (Pb) y Cromo (Cr) en suelos de la parroquia Guaytacama, ubicada en Latacunga, Ecuador, mediante herramientas de modelación numérica. Se realizaron muestreos sistemáticos en diferentes zonas del área de estudio, durante dos épocas climáticas contrastantes, recolectando muestras de agua del río Pumacunchi y de suelo a distintas profundidades, a fin de caracterizar propiedades como pH, conductividad, textura y concentración de metales. Las muestras se analizaron conforme a protocolos técnicos (NTE INEN 2169:2013 - ISO 18400:2018) lo que permitió comprender la interacción entre suelo y agua en la movilidad de contaminantes. La modelación del transporte fue desarrollada con el software GeoStudio, utilizando sus módulos CTRAN/W y SEEP/W, donde se incorporaron variables como la conductividad hidráulica del suelo, densidad seca, difusión y contenido de agua en su volumen total. Los hallazgos revelaron niveles elevados de As, especialmente en la zona alta del área de estudio, superando el límite normativo de 12 mg/kg y alcanzando hasta 46.84 mg/kg, mientras que las concentraciones de Pb y Cr se mantuvieron por debajo de los valores permitidos. La mayor retención del As se asoció con la textura arenosa, la pendiente del terreno y una escasa cobertura vegetal, que favorece su acumulación superficial sin llegar al nivel freático. Estos hallazgos permitieron identificar patrones de transporte y acumulación de metales pesados en los suelos andinos del Ecuador, evidenciando un riesgo ambiental focalizado debido a las concentraciones elevadas de As; y a su vez, destacan la necesidad de implementar estrategias integradas de monitoreo y manejo del suelo, adaptadas a las condiciones geo ambientales locales para reducir la contaminación y proteger la salud ambiental y agrícola.

Palabras claves: Arsénico, dispersión, simulación, suelos agrícolas, transporte de contaminantes.

Hydrogeochemical modelling of heavy metal transport in Andean rivers of Ecuador

Abstract

The presence of heavy metals in the environment currently constitutes one of the most critical global issues. This research aimed to simulate the behavior of Arsenic (As), Lead (Pb), and Chromium (Cr) in soils of the Guaytacama parish, located in Latacunga, Ecuador, using numerical modeling tools. Systematic sampling was conducted across different zones of the study area during two contrasting climatic seasons, collecting water samples from the Pumacunchi river and soil samples at various depths to characterize properties such as pH, conductivity, texture, and metal concentration. Samples were analyzed following technical protocols (NTE INEN 2169:2013 -

Ds Orcid:
Anahi Milena Mangui Andrade: https://orcid.org/0009-0004-7284-9529
María Fernanda Mendoza Quishpe: https://orcid.org/0009-0007-4207-1092
José Luis Agreda Oña: https://orcid.org/0009-0005-5858-869X

Artículo científico: Modelación hidrogeoquímica del transporte de metales pesados ríos andinos del Ecuador

ISO 18400:2018), allowing for a better understanding of soil-water interactions in contaminant mobility. Transport modeling was carried out using GeoStudio software, specifically its CTRAN/W and SEEP/W modules, incorporating variables such as soil hydraulic conductivity, dry bulk density, diffusion, and total water content. The findings revealed elevated levels of As, particularly in the upper zone of the study area, exceeding the regulatory limit of 12 mg/kg and reaching up to 46.84 mg/kg. Nevertheless, Pb and Cr concentrations remained below permitted thresholds. The highest retention of As was associated with sandy texture, terrain slope, and limited vegetation cover, which favors surface contaminant accumulation without reaching the groundwater level. These insights enabled the identification of transport and accumulation patterns of heavy metals in the Andean soils of Ecuador, highlighting a localized environmental risk due to high As concentrations. The study also emphasizes the need to implement integrated monitoring and soil management strategies tailored to local geoenvironmental conditions to reduce contamination and protect environmental and agricultural health.

Keywords: Arsenic, dispersion, simulation, agricultural soils, contaminant transport

1. INTRODUCCIÓN

La contaminación del ambiente por metales pesados se ha convertido en uno de los problemas más complejos a nivel global. Pabón et al. (2020), definieron a los metales pesados como metales químicos de alta densidad, con masa y peso atómico superior a 20 g/mol, además los consideraron como elementos tóxicos en concentraciones bajas.

En este sentido, la actividad agrícola genera un impacto ambiental significativo a través de sus procesos productivos, y en contraste a esto, esta actividad es de vital importancia para el desarrollo del Ecuador en los distintos ámbitos socioeconómicos, su rol no se limita únicamente al sostenimiento de la soberanía alimentaria, sino que además contribuye significativamente en la economía, a través de los tributos que las empresas constituidas en esta rama aportan al erario nacional (De Jesús, Eras Agila et al., 2021). Es así que, la contaminación del suelo por metales pesados en zonas agrícolas se debe a diversas fuentes, entre las más comunes están: los desechos industriales y contaminación de afluentes (Hernández-Caricio et al., 2022). Sin embargo, el uso de fertilizantes y pesticidas dentro de la producción agrícola es la principal causa contaminación que adicionalmente es un tema poco investigado en el contexto de la Provincia de Cotopaxi, ya que existen algunas parroquias rurales que generan actividad económica a través del cultivo extensivo de brócoli, flores, papas y ganadería y no se ha logrado obtener datos de estudios que presenten incidencias a la degradación ambiental del biotopo conexo a estas actividades, tal es el caso del sector de Guaytacama, una zona rural movida por el agro y monocultivo, en donde se delimitó el área de estudio de la investigación (Calle & Vicente, 2024). La contaminación del suelo con metales pesados tiene un impacto significativo que influye en la fertilidad, producción de cultivos y daños a las plantas (Sharma et al., 2020), lo que implica impactos negativos a los recursos naturales, los alimentos y salud a través de la cadena trófica y la bioacumulación (Munive et al., 2020). Esta situación ha generado una creciente preocupación y ha impulsado la necesidad urgente de tomar conciencia sobre sus impactos, y así motivar a la realización de investigaciones que generen insumos para establecer medidas de mitigación de los contaminantes (Palacios Anzules & Moreno Castro, 2022). Con el fin de aportar conocimiento sobre el transporte de contaminantes, en específico sobre los metales pesados en medios porosos como lo es el suelo se planteó determinar la presencia de Arsénico (As), Plomo (Pb) y Cromo (Cr) como contaminantes del tipo de metales pesados (Mendoza et al., 2021). Mediante un muestreo sistemático al azar, se obtuvieron datos para caracterizar el sustrato del área de estudio, evaluando su textura y parámetros fisicoquímicos. Entre los parámetros analizados se incluyeron la porosidad y el caudal de lavado, los cuales fueron fundamentales para la posterior simulación del proceso de transporte de contaminantes a lo largo del tiempo (Alva & Aguilar, 2021). Los fenómenos de transporte en el suelo son clave para comprender el movimiento de fluidos y partículas en medios porosos, incluyen procesos físicos y químicos que regulan el movimiento de agua, solutos y gases. La advección y la difusión molecular son fenómenos esenciales en el transporte de contaminantes que, se encuentran gobernados por la Ley de Darcy y gradientes de concentración. Interacciones como adsorción y desorción afectan la movilidad de contaminantes y nutrientes, cruciales para la remediación ambiental (Castelán et al., 2021).

La advección es un proceso fundamental en la dinámica de fluidos que explica el traslado de elementos como contaminantes y calor a través de un fluido en movimiento, su relevancia se debe a la transferencia de calor, la dispersión de contaminantes y diversos procesos ambientales y geofísicos (Duitama et al., 2023). Existen diversas maneras de entender como los metales pesados se dispersan en un lapso de tiempo dentro del suelo. La modelación es un proceso que implica la creación de una representación simplificada de un sistema o fenómeno del mundo real, utilizando herramientas matemáticas, computacionales o físicas (Ansaldo & Böhme, 2015). Mahmood Ajaj et al. (2023) mencionaron que un modelamiento permite identificar la dispersión significativa del contaminante dentro del área de estudio. Por consiguiente, la pluma de contaminación se caracteriza por la combinación de

diversos procesos de dispersión, siendo uno de los más importantes la difusión (Suk et al., 2022). Este fenómeno implica el movimiento de contaminantes desde áreas de mayor concentración hacia áreas de menor concentración, siguiendo un gradiente de concentración (Setiana Sri Wahyuni Sitepu, 2020).
En la actualidad, se observa una amplia aplicación de la modelización en las ciencias ambientales (Pietrzak, 2021). En esta investigación, se modeló el fenómeno de transporte de los contaminantes como lo son metales pesados utilizando el software GeoStudio, que es un conjunto de herramientas para el análisis numérico en geotecnia desarrollado por Seequent (Flores et al., 2022). La modelización de contaminantes se llevó a cabo con CTRAN/W, una herramienta que investiga la transferencia de contaminantes a través del suelo, así como la dispersión y el transporte de estos en suelos y agua (Vivekananda & Rao, 2023). Además, se utilizó la extensión SEEP/W de GeoStudio, que se especializa en el análisis del flujo de agua subterránea en materiales porosos (Yusof et al., 2025).

Dado que en Guaytacama parroquia rural de Latacunga, se llevan a cabo prácticas agrícolas que implican un uso intensivo de fertilizantes y pesticidas, es razonable suponer que estas actividades elevan la concentración de metales pesados en el suelo y promueven su desplazamiento (Velázquez et al., 2022). El uso de fertilizantes y pesticidas en la agricultura aumenta la presencia de metales pesados en el suelo y favorece su movilidad en la región agrícola de Guaytacama-Latacunga (Loyde et al., 2022). Esta hipótesis se fundamenta en la idea de que los insumos agrícolas pueden liberar metales pesados al entorno, perjudicando tanto la calidad del suelo como la de las aguas subterráneas.

2. METODOLOGÍA

2.1. Área de Estudio

La parroquia de Guaytacama, situada en el cantón Latacunga, provincia de Cotopaxi, cuenta con una población de 15.158 habitantes (INEC, 2022), Tiene una extensión de 26.66 km² y se encuentra a una altitud de 2922 a 2957 msnm. Limita al norte con las parroquias de Toacaso y Tanicuchí, al sur con Polalo y San Felipe, al este con el río Cutuchi, y al oeste con el cantón Saquisilí (Paredes Ponluisa, 2023). Dentro del área de estudio se identificó tres puntos de muestreo en la zona: alta (Z1), media (Z2) y baja (Z3) (Figura 1).

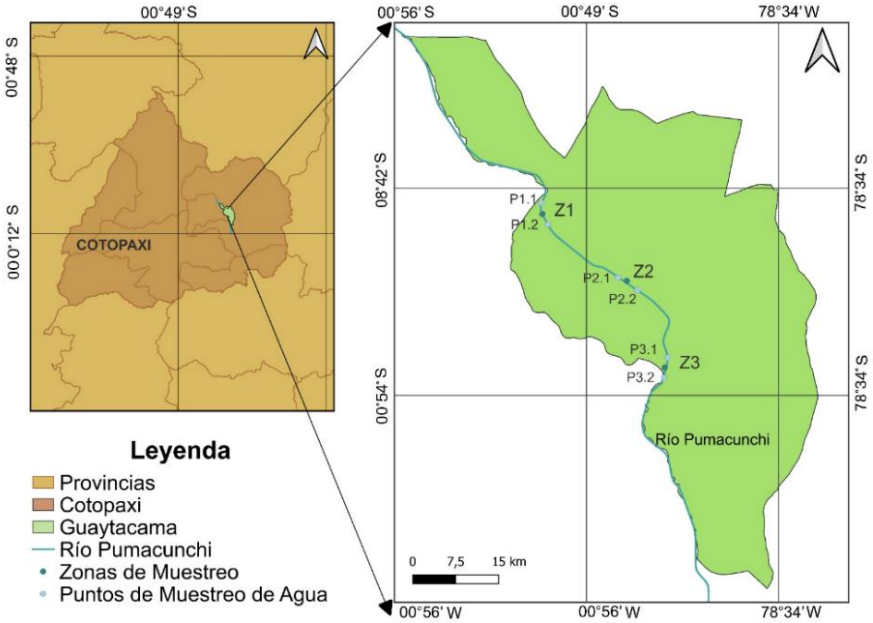

Figura 1. Río Punucanchi, distribución de las zonas y puntos de muestreo en el sector Guaytacama, Ecuador

2.2. Periodo de muestreo

El muestreo se realizó en 2 periodos contrastantes en sus condiciones climáticas. El primer muestreo se desarrolló a los 20 días del mes de octubre del 2024, donde las condiciones climáticas eran de baja precipitación. Por contrario, el segundo muestreo se llevó a cabo en el periodo de precipitación (20 de

diciembre de 2024). La diferencia en las condiciones entre ambos momentos permite evaluar el impacto de la lluvia en la concentración de metales pesados en el medio ambiente. Se determina que en situaciones de poca o ninguna precipitación, la concentración de metales pesados suele aumentar debido a la ausencia de procesos de dilución y transporte; pero, cuando hay precipitaciones, se nota una reducción en la concentración de estos elementos (Morgado et al., 2022). La duración total del estudio fue de 90 días, lo que permitió identificar con mayor claridad las fluctuaciones en la presencia de metales pesados en distintos escenarios climáticos.

2.3. Muestreo de Agua

Para el muestreo de agua, se seleccionó 2 puntos de muestreo por cada zona distribuidos estratégicamente a lo largo del Río Pumacunchi (Figura 1), con el fin de asegurar la representatividad y accesibilidad, de acuerdo con las pautas establecidas por Calcina et al. (2022). Se empleó la metodología descrita por Enamorado et al. (2022)., que se basa en un muestreo compuesto, cada muestra fue recolectada en botellas de 1L previamente esterilizadas para preservar sus propiedades fisicoquímicas, etiquetándolas con códigos, fecha y hora del muestreo. Las muestras se conservaron en contenedores isotérmicos durante su transporte siguiendo protocolos establecidos en la norma técnica ecuatoriana NTE INEN 2169:2013 (Maurat et al., 2024). Posteriormente, las muestras fueron evaluadas en el Laboratorio de Química Ambiental de la Universidad Central del Ecuador para establecer las concentraciones de metales pesados, mientras que en la Universidad Técnica de Cotopaxi se analizaron aspectos como: pH, conductividad eléctrica y textura del suelo.

2.4. Obtención de muestras de suelo

La metodología de recolección de muestras se fundamentó en un muestreo sistemático al azar. Se estableció un punto de inicio aleatorio, a partir del cual las muestras fueron extraídas en intervalos regulares de 3 metros, asegurando una distribución homogénea y representativa del suelo (Vizcaíno et al., 2023). Se recolectaron un total de 36 muestras de suelo, distribuidas en 3 zonas de muestreo. En el primer periodo de evaluación se recolecto 3 muestras de suelo (riveras) del río por cada lado para un total de 6 muestras por cada punto y 18 en todas las zonas, la cual se obtuvo en mes de octubre (Figura 1). De la misma manera se realizó para el periodo 2 con presencia de lluvias. Las profundidades del muestreo fueron a los 0.30 y 0.60 m (Acevedo et al., 2021), profundidades donde se acumulan con mayor frecuencia estos metales (Castro et al., 2023). El muestreo consideró 500 gr de cada muestra, depositados en bolsas etiquetadas según la normativa ISO 18400:2018 (Pérez, 2021).

En el laboratorio, las muestras se sometieron a secado en estufa a 65 °C durante 24 horas; una vez secas, se tamizaron (No. 10) para eliminar grumos y residuos orgánicos, obteniendo una muestra homogénea adecuada para análisis posteriores (Rosales et al., 2021).

2.5. Determinación de pH

Para el análisis de pH en suelos se aplicó el enfoque establecido por Zambrano et al. (2025)., en el que menciona que el pH se mide con precisión mediante un multiparámetro, que detecta variaciones en el potencial eléctrico entre un electrodo sensible al ion hidrógeno (H^+) y uno de referencia. Este proceso requiere preparar una suspensión de suelo con agua destilada, en contacto con el electrodo de vidrio del dispositivo. Para el análisis de pH se prepararon muestras de suelo de 10 gr con 25 ml de agua destilada, se agitaron mecánicamente por 5 min y se dejaron reposar durante 1 h. Posteriormente, se homogenizaron por 30 s y se midieron los niveles de pH con un multiparámetro, registrando los resultados para su análisis (Figueroa & Neaman, 2023).

2.6. Determinación de Conductividad Eléctrica

Para realizar el análisis de conductividad eléctrica primero se prepararon las muestras, se pesaron 50 gr de suelo y se combinaron con 50-60 ml de agua destilada, logrando una mezcla homogénea mediante agitación manual.

Las muestras se mantuvieron en reposo durante 24 h para estabilizar sus propiedades fisicoquímicas. Posteriormente, se empleó un sistema de filtración al vacío compuesto por embudos Büchner y matraces Erlenmeyer, en el cual el filtrado fue recolectado en tubos de ensayo N° 9820 (Merani et al., 2022).

Finalmente, se realizó la medición de la conductividad eléctrica en donde se aplicó el enfoque establecido por Saldivar et al. (2024)., en el cual se señala que la medición se hizo con ayuda de un conductímetro digital HANNA, previamente calibrado con soluciones buffer, se realizó la medición en cada una de las muestras y se registró el resultado en milisiemens por centímetro (mS/cm).

2.7. Determinación de textura

Para la caracterización granulométrica del suelo, se pesaron 200 g y se sometieron a tamizado secuencial con tamices de N°10 a N°270 mediante agitación mecánica por 15-20 min. Luego se pesó las masas retenidas en cada tamiz para calcular la distribución granulométrica del suelo con ayuda de una balanza analítica (Acosta et al., 2023).

Mediante el tamizado se facilita la separación y medición de partículas más grandes, como grava y

distintas fracciones de arena, utilizando tamices con aberturas estándar. Las partículas que atraviesan el tamiz número 200 (0.075 mm) corresponden a la fracción más fina, formada por limo y arcilla. Luego, cada fracción, ya sea retenida en los tamices o pasada por el tamiz más fino, se pesa con exactitud.

La textura del suelo se determina por el porcentaje de su componente (PC) en peso de la arena, limo y arcilla (Gutiérrez, 2023); el cálculo de PC se realiza aplicando la fórmula correspondiente, detallada a continuación:

$$PC = \frac{Peso\ de\ la\ fracción\ (g)}{Peso\ total\ de\ la\ muestra\ (g)} \times 100 \qquad (1)$$

2.8. Modelamiento del transporte de contaminantes

El agua tiene un papel fundamental en la dispersión de contaminantes en el suelo, afectada por aspectos como la dirección del flujo, el gradiente, la velocidad del agua, las variaciones estacionales y las características químicas del agua. Las variaciones en la concentración de contaminantes son el resultado de su movimiento a través del medio poroso, incluso sin flujo (Rangel et al., 2022).

La cantidad de contaminantes dispersos depende del grado de saturación del agua y su volumen en el medio. Se emplean procesos de adsorción y sedimentación para atrapar metales pesados, cuya presencia en el agua es consecuencia de actividades industriales, agrícolas o urbanas, y su concentración en el suelo varía de acuerdo con la granulometría, la composición química, las propiedades físicas y el contenido de materia orgánica del suelo (Munar & Méndez, 2021).

Para llevar a cabo la simulación de contaminantes se empleó parámetros clave como la conductividad hidráulica saturada, densidad seca, el coeficiente de difusión y el contenido volumétrico del agua. Para representar el modelamiento de la pluma de contaminación, se utilizaron las siguientes expresiones matemáticas.

2.8.1. Coeficiente de difusión

Es una medida en el análisis del transporte de contaminantes en medios porosos. Se determina a partir de la concentración obtenida en muestras de suelo, permite evaluar cómo se dispersan y movilizan los metales pesados en el sistema.

Se puede representar en gráficos facilitando la modelación y predicción de la contaminación en estudios ambientales (Primera & Bohórquez, 2020), la fórmula que se aplica es la siguiente:

$$Deff = \frac{\theta \cdot \Delta c}{L^2/T} \qquad (2)$$

donde:

θ = Porosidad

L = Distancia

T = Tiempo

Δc = Diferencia de Concentración

2.8.2. Densidad Seca

La densidad seca (ρ_d) mide la masa de suelo seco por unidad de volumen y es clave en la dispersión de contaminantes. Permite simular la migración de metales pesados considerando factores hidrodinámicos y geoquímicos, ayudando a predecir su extensión y concentración en el suelo Guevara & Canaza, (2023).

$$\rho_d = \frac{m_s}{V_t} \qquad (3)$$

donde:

ρ_d = Densidad Seca

m_s = Masa de las partículas sólidas

V_t = Volumen total del suelo

2.8.3. Ley de Darcy

La Ley de Darcy (q) describe el flujo de agua a través de medios porosos y es clave para entender la dispersión de contaminantes en el suelo (Vega et al., 2024). Su ecuación general se expresa como:

$$q = -\frac{k}{\mu}\nabla\rho \qquad (4)$$

donde:

q = *Caudal Instantáneo*

k = *Permeabilidad*

μ = *Viscosidad dinámica del fluido*

$\nabla\rho$ = *Bajada de presión*

2.8.4. Ley de Fick

La Ley de Fick se emplea para representar la dispersión de contaminantes en medios porosos. Esta ley facilita el cálculo de la tasa de difusión de contaminantes en el agua subterránea, estableciendo una relación entre el flujo de masa y el gradiente de concentración (Cachay et al., 2022), su ecuación es:

$$F = -D\frac{dC}{dx} \qquad (5)$$

donde:

$F =$ Flujo de partículas

$D =$ Coeficiente de difusión

$C =$ Concentración

$x =$ Posición en el espacio

2.8.5. Advección y dispersión

La ecuación de advección-dispersión describe cómo una sustancia, como un contaminante o una partícula, se transporta y se dispersa en un medio. Según (Chamorro & López, 2016)., la ecuación que representa a la advección y dispersión es:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u\frac{\partial c}{\partial x} = D\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - \lambda C \qquad (6)$$

donde:

u = Velocidad

$t =$ Tiempo

$x =$ Coordenada espacial

$D =$ Coeficiente de dispersión

$\lambda =$ Constante de degradación

2.8.6. Difusión Molecular

La difusión molecular es el movimiento de moléculas desde zonas de alta concentración a baja, impulsado por gradientes y energía térmica (Ortega, 2024).

Es esencial en el transporte de nutrientes y la dispersión de contaminantes, y se describe mediante la Ley de Fick.

$$\theta_c = \frac{2b\theta_s}{1+2b} \qquad (7)$$

donde:

$\theta_s =$ Contenido de agua [L^3/L^3]

2.9. Perfiles de Simulación

En la Figura 2, se presenta los perfiles de cada una de las zonas de estudio (Z1, Z2 y Z3). En las gráficas se permite visualizar la morfología del terreno a lo largo de cada sección.

Cada perfil muestra la parte superficial del terreno (sombreado azul), el perfil del Río Pumacunchi (excavación), los niveles freáticos (línea rosada).

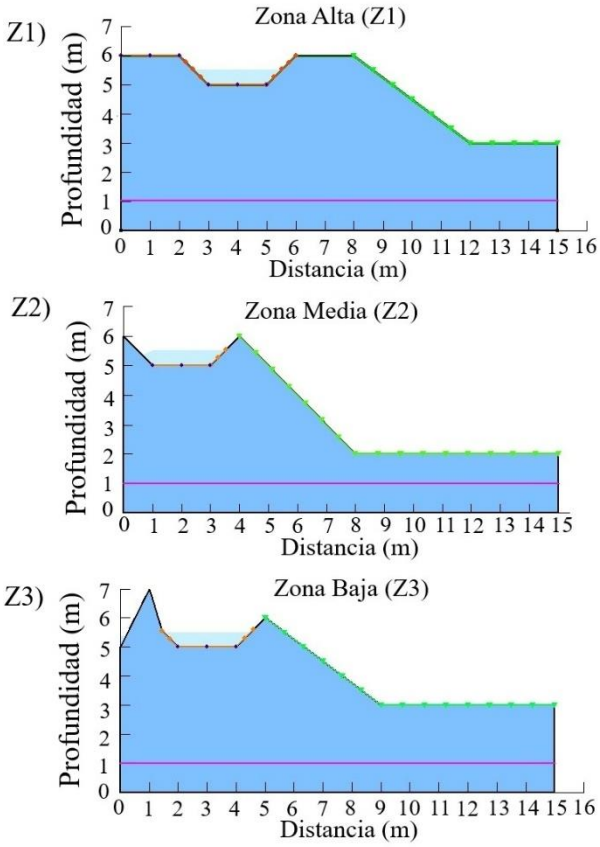

Figura 2. Perfiles para el modelamiento por zonas

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se realizó el modelamiento para diferentes zonas en el área de estudio en distancias comprendidas de 1000 m a 2000 m, en un periodo de 90 d comprendido entre el mes de octubre, como concentraciones iniciales y diciembre como concentraciones finales.

3.1. Concentraciones de contaminantes

En la Figura 3, se encuentran las concentraciones iniciales y concentraciones finales, de cada uno de los metales pesados enfocados en la Z1, Z2 y Z3 donde se encuentran los parámetros físicos químicos de mayor interés. Se obtuvieron concentraciones de As, siendo los valores mayores al límite máximo permisible según

el Acuerdo N°97/A que es 12 mg de As por kg de suelo. Sin embargo, para el Pb y Cr, los valores reflejados son menores que el límite máximo permisible, para de 19 mg/kg y 54 mg/kg respectivamente. Los resultados obtenidos respecto a las concentraciones de As en las muestras de suelo evidencian una marcada variabilidad espacial entre las Z1, Z2 y Z3 de la parroquia Guaytacama. En la Z1, los valores iniciales de As oscilaron entre 6.10 y 17.43 mg/kg, mientras que las concentraciones finales mostraron un aumento considerable, alcanzando un valor máximo de 46.84 mg/kg, muy por encima del límite máximo permisible (12 mg/kg). En la Z2, los valores iniciales variaron entre 5.09 y 14.54 mg/kg, con concentraciones finales que llegaron hasta 41.95 mg/kg. En contraste, la Z3 presentó valores iniciales de entre 3.07 y 16.74 mg/kg, con valores finales notablemente más bajos, alcanzando un máximo de 19.76 mg/kg. Por otro lado, las concentraciones del Cr en relación a la Z1, Z2 y Z3 no varían ya que sus concentraciones permanecen en rangos <9 mg/kg, por consiguiente, el Pb en las Z1, Z2 y Z3, su valor parte de valores < 0.5 mg/kg a < 5 mg/kg. En conjunto los metales pesados reflejan un comportamiento diferencial del As en función de la ubicación geográfica y características del suelo.

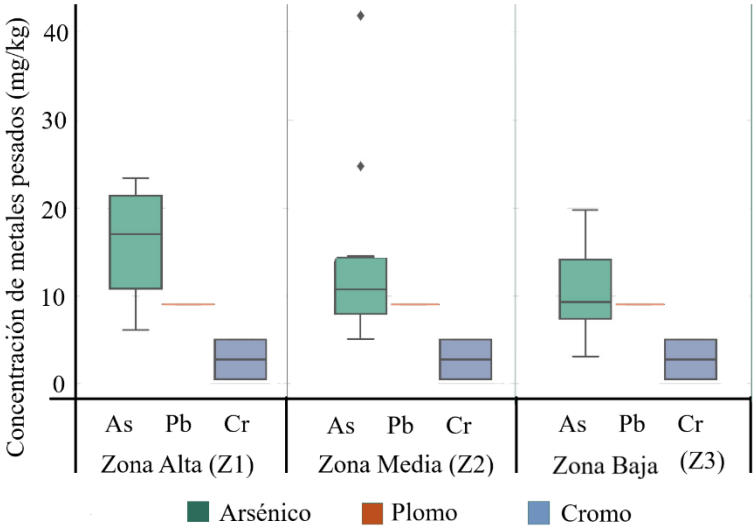

Figura 3. Concentraciones iniciales y finales de: As, Pb y Cr en la zona alta, media y baja

La mayoría de datos en relación al As, sobrepasan al valor permisible en Ecuador; sin embargo, para la investigación de Oña et al. (2024) los valores de As son superiores a 98 mg/kg, esto sucede por las constantes precipitación que se presentan en la región de estudio. Por otro lado, en el estudio realizado por Álvarez et al. (2023) en Perú, los valores van desde 2.0 mg/kg a 5 kg/mg debido a las temperaturas que oscilan de 17.5 y 3.0 °C. De la misma manera el estudio de Jaramillo & Hidalgo (2024) evidenció valores < 0.5 mg/kg.

3.2. Parámetros para la simulación del transporte de contaminantes

En la Tabla 1, se detalla los principales parámetros empleados en la simulación de los contaminantes. Entre estos se destaca conductividad hidráulica saturada, el valor representado determina la velocidad a la que los contaminantes avanzan a través del suelo, este valor indica un medio con flujo lento, el cual es ideal para la acumulación de metales pesados. La densidad seca, el valor determina la capacidad de retención del contaminante representativo para la simulación. Coeficiente de difusión, los valores miden como se dispersan los contaminantes en el agua dentro del suelo, estos rangos abarcan la movilidad justa de un contaminante. El contenido volumétrico del agua, representa la disponibilidad de agua para transportar contaminantes, estos valores en un suelo franco arenoso reflejan condiciones realistas.

Tabla 1. Parámetros de los metales pesados

Parámetro	Valor
Conductividad Hidráulica Saturada	4. 36e-7 m/s
Densidad Seca	1623 kg/ m^3
Coeficiente de difusión	(10^{-6} -10^{-9}) g/m^3
Contenido volumétrico del agua	(0.15 a 0.35)
Textura	(60-75%) Franco arenoso

El valor de la conductividad hidráulica saturada (tabla 1), se difiere con los valores reportados por Vidales Barriguete, (2019) en suelo más compactos, dichos estudios presentan valores más altos. Las muestras recolectadas para el desarrollo de la simulación son de suelos agrícolas, que nos arrojó una densidad seca de comprendidos de 10^{-8} g/m^3, que son relativamente similares a los coeficientes de difusión que se presentan en la Tabla 1. Los valores del contenido volumétrico son similares a Vera Muñoz. (2021), quienes consideran que los valores volumétricos siempre partirán desde 0.20 en adelante.

3.3. Transporte de contaminantes

El modelamiento se realizó mediante la herramienta CTRAN/W, este simula el transporte del contaminante en el suelo, considerando el rango de tiempo (90 d). En la Figura 4, se presenta las simulaciones de los metales 1623 kg/m^3 , con relación a Ferreira et al. (2022) que su valor es 2307 kg/m^3, ya que son suelos para construcción. En la investigación de Rollán & Bachmeier. (2014) presenta coeficientes de difusión de valores

pesados (As, Cr y Pb), para cada una de las zonas (Z1, Z2, Z3). En la Z1, el As muestra una concentración máxima de 46.8 mg/kg (color rojo) que representa la transmisión del contaminante desde la superficie hacia el interior del suelo, llegando a una concentración mínima de 5.5 mg/kg (color amarillo) que se presenta a 1 m desde la superficie y se expande hasta los 4.5 m desde los puntos de muestreo; sin afectar el nivel freático que se encuentra a los 5 m de profundidad del suelo (línea rosa). Las concentraciones se muestran para el rango de los 90 d respectivamente. Estos valores que se representan, son similares a los valores que reportados por Calcina et al.(2022) (10- 42 mg/kg).

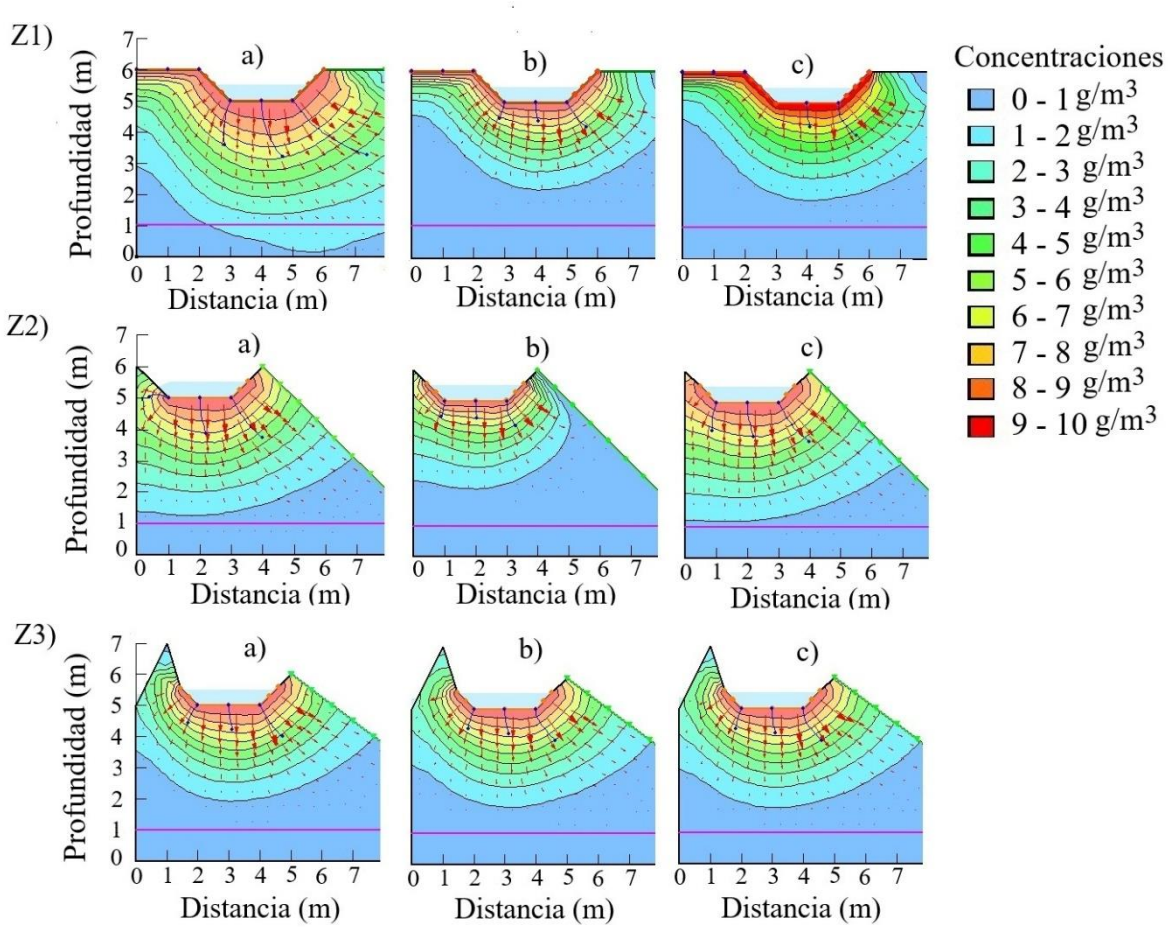

Figura 4. Concentración simulada de metales pesados en la zona alta media y baja

Para la concentración del Cr, su valor de partida fue de 9 mg/kg (color rojo) que representa la transmisión del contaminante desde la superficie hacia el interior del suelo, llegando a una concentración mínima de 5 mg/kg (color amarillo) y se expande hasta los 3.5 m desde los puntos de muestreo. Por otro lado, el Pb presenta una concentración máxima fue 5 mg/kg (color rojo) que representa la transmisión del contaminante desde la superficie hacia el interior del suelo, llegando a una concentración mínima de 0.5 mg/kg (color amarillo). Esta tendencia sugiere una posible acumulación del contaminante As en la zona, posiblemente debido a procesos de escorrentía superficial o a una mayor retención del suelo generado por lluvias que

sobrepasan la tasa de infiltración de este (Hu et al., 2023).

Para la Z2, el As presenta un máximo de concentración de 24.7 mg/kg (color rojo) que representa la transmisión del contaminante desde la superficie hacia el interior del suelo, llegando a una concentración mínima de 5.0 mg/kg (color amarillo) que se presenta a 1 m desde la superficie y se expande hasta los 3.5 m desde los puntos de muestreo; sin afectar el nivel freático que se encuentra a los 5 m de profundidad del suelo. A diferencia de Aruquipa Buitre et al. (2024), que presenta valores menores a 30 mg/kg como valor máximo y valores minoritarios superiores de 15 mg/kg, esto discrepa con los datos obtenidos por la baja actividad agrícola que se especifica en el investigación del autor. Con respecto al Cr, tiene la misma tendencia que a Z1, la concentración máxima es 9 mg/kg (color rojo) que representa la transmisión del contaminante desde la superficie hacia el interior, llegando a una concentración mínima de 5 mg/kg (color amarillo) que se presenta a 0.5 m desde la superficie. En el Pb, se sigue conservando los mismos valores, la concentración máxima es 5 (color rojo) que representa la transmisión del contaminante, llegando a una concentración mínima de 0.5 mg/kg (color amarillo). Las concentraciones se muestran para el rango de los 90 d respectivamente. Estos valores son similares con Munive et al. (2020), donde muestra valores de 1.2 mg/kg a 0.07 mg/kg. Aunque los niveles también superan los límites establecidos, la variabilidad de los datos sugiere una dinámica intermedia de movilidad del As, influenciada por las características texturales del suelo de un 75% de contenido de arena y la pendiente del terreno (Vijayakumar et al., 2023).

En la Z3, existe un comportamiento similar observado en las Z1 y Z2, la concentración máxima del As es de 19.7 mg/kg (color rojo) que representa la transmisión del contaminante, llegando a una concentración mínima de 5.5 mg/kg (color amarillo) que se presenta a 1 m desde la superficie y se expande hasta los 2.5 m desde los puntos de muestreo; sin afectar el nivel freático que se encuentra a los 5 m de profundidad del suelo. Estos valores coinciden en un 80% con los valores expuestos por Kanda et al. (2023), donde su valor máximo es de 30 mg/kg y su valor mínimo de 6 mg/kg. Para la concentración del Cr, se mantiene la dinámica de la Z1 y Z2, la concentración máxima es 9 mg/kg (color rojo) que representa la transmisión del contaminante, llegando a una concentración mínima de 4.6 mg/kg (color amarillo) que se presenta a 0.5 m desde la superficie. Por contrario, Perez Mora. (2021) redacta valores menores a < 5 mg/kg para concentraciones de cromo, esto se da por la variación del suelo al que se está estudiando. Con relación al metal pesado Pb, las concentraciones representadas, son consistentemente equivalentes en las tres zonas. La concentración máxima es 5 mg/kg (color rojo) que representa la transmisión del contaminante desde la superficie hacia el interior del suelo, llegando a una concentración mínima de 0.8 mg/kg (color amarillo). Este valor es similar al mostrado por Cóndor & Teresa, (2024), donde las concentraciones estudiadas oscilan entre 2 a 4.31 mg/kg de Pb, esto por tener el mismo suelo (franco arenoso). En esta última zona, se observó una reducción de las concentraciones finales con respecto a las iniciales (As), lo cual podría explicarse por procesos de lixiviación hacia capas más profundas o por una menor exposición a fuentes contaminantes directas.

4. CONCLUSIÓN

Los resultados evidencian concentraciones de Pb (5 mg/kg) y Cr (9 mg/kg) bajo el límite permisible de la normativa ecuatoriana. Por consiguiente, Cr en la zona 1 y 2 alcanza una mayor movilidad y acumulación, pero en la zona 3 su presencia es más controlada. Para el caso del Pb en la zona 1 y 3 tiene una distribución leve, pero en la zona 2 se detecta un foco de concentración en el centro norte. Sin embargo, esto no representa un riesgo significativo para la calidad del suelo. No obstante, se identificaron fuentes de contaminación derivadas de prácticas agrícolas, como el uso excesivo de agroquímicos y la disposición inadecuada de efluentes, que podrían alterar progresivamente el equilibrio del suelo.

Por contrario, el As presentó rangos de concentraciones elevadas (6.1 mg/kg – 17.43 mg/kg) y valores finales que ascendieron hasta 46.84 mg/kg, superando ampliamente el límite máximo (12 mg/kg). El As en la zona 1 presenta una alta concentración en la parte superior central y distribución descendente hacia los bordes, en la zona 2 se observa un patrón similar, pero con mayor dispersión lateral y en la zona 3 los niveles son más bajos, con una concentración reducida y focalizada. Este incremento, en la zona 1 y 2 implica una acumulación superficial por condiciones geomorfológicas y edáficas: elevada pendiente, textura franco arenoso, escasa cobertura vegetal y una tasa de escorrentía que sobrepasa la capacidad de infiltración del suelo. Estos factores promueven la acumulación del contaminante en la superficie y reduce la movilidad, limitando la llegada al nivel freático, durante el periodo de 90 días.

5. REFERENCIA

Acevedo, L., Chacon, H., Meneses, V., & Leyton, A. (2021). Cadmium accumulation and distribution in artichoke plants (Cynara scolymusL.) grown in two contaminated agricultural soils. *Manglar*, *18*(4), 443–447. https://doi.org/10.17268/manglar.2021.057

Acosta, D., Trujillo, A., & Luján, D. (2023). Granulometría del suelo en zonas de pendiente. Comparación de métodos de determinación. *Acta Agronómica*, *72*(1). https://revistas.unal.edu.co/index.php/acta_agronomica/article/view/107333

Alva, C., & Aguilar, G. (2021). Interacción entre la presa de relaves y el acuífero de la microcuenca del río Yuracyacu en la Región La Libertad del Perú. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, *5*(1), 706–733. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v5i1.272

Álvarez, R. A. M., Silva, J. K. A. C. D., Ribeiro, R. D. S., Tavares, I. D. N., & Guedes, Y. A. (2023). Determinación de la sorción en tres tipos de suelo y arena lavada, empleando diez dosis del Herbicida Saflufenacil. *Revista Recursos Naturales Producción y Sostenibilidad*, *2*(2). https://investigacion.utc.edu.ec/index.php/RENPYS/article/view/518

Ansaldo, S. M., & Böhme, L. F. G. (2015). Modelos conceptuales y físicos para el curso Historia de las Estructuras y la Construcción. *Aus*, *18*, 23–29. http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=281744668005

Aruquipa Buitre, R. E., Guzmán Alegría, L., & Ramos Ramos, O. E. (2024). Método para la determinación de arsénico en suelos agrícolas mediante espectrometría de absorción atómica con horno de grafito de fuente continua de alta resolución HR-CS-GFAAS. *ScIELO*. *41*(1). https://doi.org/10.34098/2078-3949.41.1.2

Cachay, R., Roldan, J., & Agreda, J. (2022). Modeling the distribution of a liquid contaminant using the diffusion equation in two dimensions. *Revista Ciencia y Tecnología*, *18*(4), 31–41. https://doi.org/10.17268/rev.cyt.2022.04.02

Calcina, M., Calcina, L., Huaraya, F., Salas, A., & Tejada, K. (2022). Arsénico en aguas subterráneas de la cuenca del río Callacame y su impacto en suelos agrícolas en Desaguadero, Puno – Perú. *DYNA*, *89*(221), 178–184. https://doi.org/10.15446/dyna.v89n221.98319

Calle, M., & Vicente, S. (2024). Fertilizantes en la producción agrícola: un análisis de la percepción de uso. *Apuntes Del Cenes*, *43*(78), 201–226. https://doi.org/10.19053/uptc.01203053.v43.n78.2024.17532

Castelán, R., Rodríguez, A., Sampieri, A., Tamariz, J., Peña, R., & Silva, S. (2021). Movilidad de atrazina en dos tipos de suelo en el estado de Puebla. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, *12*(2), 291–304. https://doi.org/10.29312/remexca.v12i2.2425

Castro, N., Calderón, F., & Pérez, G. (2023). Análisis espacial de metales pesados en suelos agrícolas de la subcuenca Atoyac-Zahuapan y riesgos de salud pública. *Agricultura, Sociedad y Desarrollo*, *21*(1), 16. https://doi.org/10.22231/asyd.v21i1.1593

Cóndor, B., & Teresa, D. (2024). *Concentración de metales pesados en suelos agrícolas y Lepidium meyenii Walpers – Junìn y Carhuamayo* [Tesis Doctoral, Universidad Nacional del Centro de Perú] Dspace. https://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/12036

De Jesús, Eras Agila, R., Margot, L. B., Joel, C. P. C., Elizabeth, E. G., Rafael, V. F. A., Evelyn, V. G., & Verónica, V. J. L. (2021). El Sector Agropecuario en el Ecuador: análisis descriptivo del impacto en la sostenibilidad por el COVID-19. *South Florida Journal of Development*, *2*(3), 4105–4122. https://doi.org/10.46932/sfjdv2n3-024

Duitama, A., Mendoza, V., Montes, L., Gil, J., & Esquivel, R. (2023). Modelamiento de los niveles de contaminación en un tramo del río Sogamoso, mediante el acoplamiento de los métodos Lattice-Boltzmann y diferencias finitas. *Tecnura*, *27*(76), 78–95. https://doi.org/10.14483/22487638.18226

Enamorado, G., Tirado, J., & Marrugo, J. (2022). Metales pesados (Hg, As, Cd, Zn, Pb, Cu, Mn) en un trayecto del río Cauca impactado por la minería de oro. *Revista EIA*, *19*(37), 1–17. https://doi.org/https://doi.org/10.24050/reia.v19i37.1481

Ferreira, F. G. da S., Dias, L. V., Soares, S. M., & Castro, A. L. de. (2022). Influence of thermal curing in the physical and mechanical properties of ultra-high-performance concrete with glass powder. *Revista ALCONPAT*, *12*(2), Article 2. https://doi.org/10.21041/ra.v12i2.546

Figueroa, L., & Neaman, A. (2023). Salinos, pero ácidos: una extraña combinación en suelos del valle de Lluta en el norte de Chile. *Idesia (Arica)*, *41*(1), 133–137. https://doi.org/10.4067/S0718-34292023000100133

Flores, I., González, Y., & García, J. (2022). Estabilidad de taludes en presas de tierra considerando el ángulo de succión del suelo no saturado. *Ingeniería y Desarrollo*, *40*(01), 71–91. https://doi.org/10.14482/inde.40.01.620.123

Guevara, I., & Canaza, F. (2023). Estimación de la densidad seca de un relleno granular utilizando el penetrómetro dinámico de cono. *Gaceta Técnica*, *24*(2), 77–91. https://doi.org/10.51372/gacetatecnica242.6

Gutiérrez, W. (2023). Ensayo granulométrico de los suelos mediante el método del tamizado. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, *7*(2), 6908–6927. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i2.5834

Hernández-Caricio, C., Ramírez, V., Martínez, J., Quintero-Hernández, V., Baez, A., Munive, J. A., & Rosas-Murrieta, N. (2022). Los metales pesados en la historia de la humanidad, los efectos de la contaminación por metales pesados y los procesos biotecnológicos para su eliminación: el caso de Bacillus como bioherramienta para la recuperación de suelos. *Alianzas y Tendencias BUAP*, *7*(27), 1–68. https://doi.org/https://doi.org/10.5281/zenodo.7091407

Hu, S., Qiao, P., Yi, X., Lei, Y., Hu, H., Ye, J., & Wang, D. (2023). Selective Photocatalytic Reduction of CO2 to CO Mediated by Silver Single Atoms Anchored on Tubular Carbon Nitride. *Angewandte Chemie International Edition*, *62*(26), e202304585. https://doi.org/10.1002/anie.202304585

Jaramillo, R. J. L., & Hidalgo, E. P. C. (2024). Efectividad de la apitoxina como tratamiento complementario para el manejo del dolor en perros con enfermedades musculoesqueléticas. *ConcienciaDigital*, *7*(1.2). https://doi.org/10.33262/concienciadigital.v7i1.2.2932

Kanda, K., Nishimura, H., Koiso, T., Takemoto, K., Nakagoe, K., Yamada, T., Takahashi, M., Hanafusa, M., Kawahara, T., Yanagida, Y., Kuramochi, J., & Fujiwara, T. (2023). Applying negative ions and an electric field to countermeasure droplets/aerosol transmission without hindering communication. *Scientific Reports*, *13*(1), 13965. https://doi.org/10.1038/s41598-023-40303-5

Loyde, L., González, B., Cruz, A., & Loredo, R. (2022). Suelos agrícolas y metales pesados, una relación tóxica que se puede remediar. *EPISTEMUS*, *16*(33). https://doi.org/10.36790/epistemus.v16i33.228

Mahmood Ajaj, Q., Shafri, H. Z. M., Wayayok, A., & Firuz Ramli, M. (2023). Assessing the Impact of Kirkuk Cement Plant Emissions on Land cover by Modelling Gaussian Plume with Python and QGIS. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, *26*(1), 1–16. https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2022.12.001

Maurat, L., Astudillo, D., Patiño, C., Fernández, L., & Loja, K. (2024). Determination of the Water Quality of the Copueno River by Macroinvertebrate Analysis. *ESPOCH Congresses: The Ecuadorian Journal of S.T.E.A.M.*, *3*(2), 262–276. https://doi.org/10.18502/espoch.v4i1.15830

Mendoza, B., Torres, D., Merú, L., Gómez, C., Estanga, M., & García, Y. (2021). Concentración de metales pesados en suelos agrícolas bajo diferentes sistemas de labranza. *TecnoLógicas*, *24*(51), e1738. https://doi.org/10.22430/22565337.1738

Merani, V., Millan, G., Ferro, D., Larrieu, L., Bennardi, D., Polich, N., Juan, L., & Bongiorno, F. (2022). Comparación de metodologías de determinación de la conductividad eléctrica y concentración iónica en suelos de la provincia de Buenos Aires. *Ciencias Agronómicas*, *34*, 15. https://doi.org/10.35305/agro34.277

Morgado, A., Chacon, E., Arriojas, L., Paredes, L., & Machado, W. (2022). Biomasa aérea de Leucaena leucocephala [(Lam.) de Wit] y herbáceas acompañantes en la Cuenca Sur del lago de Maracaibo. *Archivos Latinoamericanos de Producción Animal*, *30*(4), 359–373. https://doi.org/10.53588/alpa.300408

Munar, A., & Méndez, N. (2021). Modelación hidrodinámica y de calidad del agua en un ecosistema estuarino urbano con incidencia maregráfica y vertimientos de aguas residuales. *Entramado*, *17*(1). https://doi.org/10.18041/1900-3803/entramado.1.7285

Munive, R., Gamarra, G., Munive, Y., Puertas, F., Valdiviezo, L., & Cabello, R. (2020). Lead and cadmium uptake by sunflower from contaminated soil and remediated with organic amendments in the form of compost and vermicompost. *Scientia Agropecuaria*, *11*(2), 177–186. https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2020.02.04

Oña, J. L. Á., Molina, D. S. C., Chuquimarca, Á. P. O., & Campaña, P. P. M. (2024). Análisis del diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales del campus Salache usando dinámica computacional de fluidos. *Revista Recursos*

Naturales Producción y Sostenibilidad, *3*(1). https://doi.org/10.61236/renpys.v3i1.627

Ortega, M. (2024). Flujo de agua subterránea y transporte en medios geológicos fracturados: una revisión. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, *41*(1), 103–129. https://doi.org/10.22201/cgeo.20072902e.2024.1.1772

Pabón, S. E., Benítez, R., Sarria, R. A., Gallo, J. A., Pabón, S. E., Benítez, R., Sarria, R. A., & Gallo, J. A. (2020). Contaminación del agua por metales pesados, métodos de análisis y tecnologías de remoción. Una revisión. *Entre Ciencia e Ingeniería*, *14*(27), 9–18.

Palacios Anzules, Í. del C., & Moreno Castro, D. W. (2022). Contaminación ambiental. *RECIMUNDO*, *6*(2), 93–103. https://doi.org/10.26820/recimundo/6.(2).abr.2022.93-103

Paredes Ponluisa, C. S. (2023). *Análisis de las correlaciones entre el CBR, DCP propiedades índice y mecánicas en suelos de las parroquias Guaytacama y Toacaso del cantón Latacunga, provincia de Cotopaxi*. . [Tesis de grado. Universidad Técnica de Ambato] Dspace. https://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/38166

Pérez, W. (2021). Evaluación del índice de geoacumulación de algunos metales pesados en suelos de cultivo de hortalizas en la ribera del río Bogotá. *Revista ION*, *34*(1). https://doi.org/10.18273/revion.v34n1-2021004

Pietrzak, D. (2021). Modeling migration of organic pollutants in groundwater — Review of available software. *Environmental Modelling & Software*, *144*, 105145. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2021.105145

Primera, J., & Bohórquez, H. (2020). Relación entre la difusividad efectiva y los parámetros estructurales de medios porosos no consolidados, bidimensionales. *Revista Tecnica De La Facultad De Ingenieria Universidad Del Zulia*, *ve2020*(2), 56–61. https://doi.org/10.22209/rt.ve202020n2a08

Rangel, F., Anaya, M., Iannacone, J., & Romero, L. (2022). Modelos de dispersión de contaminantes atmosféricos: Revisión sistemática. *Campus*, *27*(33), 21–42. https://doi.org/10.24265/campus.2022.v27n33.02

Rollán, A. A. del C., & Bachmeier, O. A. (2014). Compactación y retención hídrica en Haplustoles de la provincia de Córdoba (Argentina) bajo siembra directa. Congreso Internacional Comisión 3. https://www.scielo.org.ar/scielo.php?pid=S1668-298X2014000100001&script=sci_arttext

Rojas, T., & Maria, L. (2025). *Como la mezcla condiciona el crecimiento y el desarrollo del biofilm en un medio poroso* [Tesis de Maestría, Universidad Politécnica de Catalunya] Handle. https://upcommons.upc.edu/handle/2117/427622

Rosales, J., Centeno, L., Cajacuri, J., Breña, J., & Chávez, C. (2021). Identificación de Cadmio y Plomo en los cultivos de Cacao ubicados en la zona de Satipo - Junín. *TECNIA*, *31*(2), 83–89. https://doi.org/10.21754/tecnia.v21i2.1062

Saldivar, J., Rojas, Y., & Cruz, R. (2024). Análisis Geoquímico de conductividad eléctrica y pH del Valle de Cañete – Perú. *Revista de Investigación Cañetana*, *3*(1), 14–21. https://doi.org/10.60091/ric.2024.v3n1.02

Sharma, A., Kapoor, D., Wang, J., Shahzad, B., Kumar, V., Bali, A. S., Jasrotia, S., Zheng, B., Yuan, H., & Yan, D. (2020). Chromium Bioaccumulation and Its Impacts on Plants: An Overview. *Plants*, *9*(1), 100. https://doi.org/10.3390/plants9010100

Suk, H., Zheng, K., Liao, Z., Liang, C., Wang, S., & Chen, J. (2022). A new analytical model for transport of multiple contaminants considering remediation of both NAPL source and downgradient contaminant plume in groundwater. *Advances in Water Resources*, *167*, 104290. https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2022.104290

Vega, C., Larios, J., Reyes, J., Badillo, M., & Kuri, G. (2024). Análisis numérico de la infiltración de contaminantes en la cuenca del Río Tula. *Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías Del ICBI*, *12*, 213–220. https://doi.org/10.29057/icbi.v12iEspecial4.13332

Velázquez, L. D. J., Ortiz, I., Chávez, J., Pámanes, G., Carrillo, A., & Pereda, M. (2022). Influencia de la contaminación del agua y el suelo en el desarrollo agrícola nacional e internacional. *TIP Revista Especializada En Ciencias Químico-Biológicas*, *25*. https://doi.org/10.22201/fesz.23958723e.2022.482

Vidales Barriguete, M. A. (2019). *Caracterización fisicoquímica y aplicaciones de yeso con adición de residuo plástico de cables mediante criterios*

de economía circular [Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid] UPM. https://oa.upm.es/57437/

Vijayakumar, S., Chen, J., González Sánchez, Z. I., Tungare, K., Bhori, M., Durán-Lara, E. F., & Anbu, P. (2023). Moringa oleifera gum capped MgO nanoparticles: Synthesis, characterization, cyto- and ecotoxicity assessment. *International Journal of Biological Macromolecules*, 233, 123514. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.123514

Vivekananda, S., & Rao, C. H. (2023). Probabilistic stability analysis of narasimharaya sagar earthen dam by using geo-studio software. *E3S Web of Conferences*, *391*, 01039. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202339101039

Vizcaíno, P., Cedeño, R., & Maldonado, I. (2023). Metodología de la investigación científica: guía práctica. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, *7*(4), 9723–9762. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i4.7658

Yusof, M., Rashid, A., Lat, D., Khanan, M., Rahman, M., & Kassim, A. (2025). Slope stability assessment under the effect of antecedent rainfall-a case study at teluk bahang penang. *Jurnal Teknologi (Sciences & Engineering)*, *87*(2), 297–309. https://doi.org/10.11113/jurnalteknologi.v87.22527

Zambrano, F., Zamora, P., Macias, R., Intriago, H., & Zambrano, T. (2025). Evaluación de parámetros físicos del suelo para la siembra del híbrido OxG en la estación experimental latitud 0 del occidente del Ecuador. *LATAM Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades*, *6*(1). https://doi.org/10.56712/latam.v6i1.3343