



UNIVERSIDAD REGIONAL AMAZÓNICA IKIAM

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y AGUA

CARRERA DE GEOCIENCIAS

“Caracterización geoquímica de sedimentos en el área central del brazo izquierdo del río Jatunyacu en la comunidad de Yutzupino”

Proyecto de investigación previo a la obtención del Título de:

INGENIERO

AUTOR: ALEX ROLANDO BONILLA VALLES

TUTOR: PhD. OSWALDO JOSÉ GUZMAN GUTIERREZ

Napo-Ecuador

2023

Unidad de Titulación
Carrera Geociencias

Declaración de derecho de autor, autenticidad y responsabilidad

Tena, 31 de julio de 2023

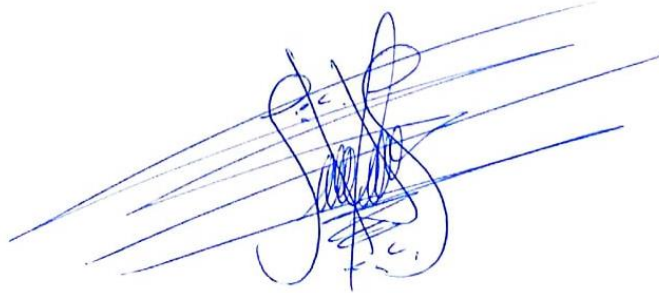
De mi consideración:

Yo, Alex Rolando Bonilla Valles con documento de identidad 150063019-7, declaro que los resultados obtenidos en la investigación que presento en este documento final, previo a la obtención del título Ingeniero en Geociencias son absolutamente inéditos, originales, auténticos y personales.

En virtud de lo cual, el contenido, criterios, opiniones, resultados, análisis, interpretaciones, conclusiones, recomendaciones y todos los demás aspectos vertidos en el presente documento son de mi autoría y de mi absoluta responsabilidad.

Por la favorable atención a la presente, suscribo de usted,

Atentamente,



Alex Rolando Bonilla Valles

150063019-7

Unidad de Titulación
Carrera Geociencias

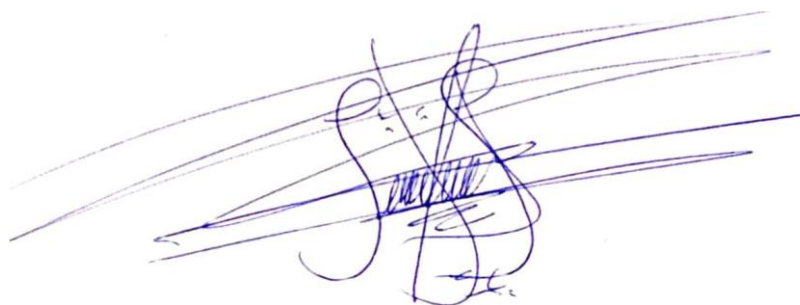
AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Yo, Alex Rolando Bonilla Valles, con documento de identidad NO 150063019.7, en calidad de autor/a y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación: "Caracterización geoquímica de sedimentos en el área central del brazo izquierdo del río Jatunyacu en la comunidad de Yutzupino", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS

CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN, reconozco a favor de la Universidad Regional Amazónica Ikiam una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Así mismo autorizo a la Universidad Regional Amazónica Ikiam para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el Repositorio Institucional de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Tena, 31 de julio de 2023



Alex Rolando Bonilla Valles
150063019-7

Unidad de Titulación

Carrera: Geociencias

Certificado de dirección de trabajo de titulación

Certifico que el trabajo de titulación: "Caracterización geoquímica de sedimentos en el área central del brazo izquierdo del río Jatunyacu en la comunidad de Yutzupino" en la modalidad de: Artículo, fue realizado por Alex Rolando Bonilla Valles, bajo mi dirección.

El mismo ha sido revisado en su totalidad y analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto, cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad Regional Amazónica Ikiam, para su entrega y defensa.

Tena, 31 de julio de 2023



Oswaldo José Guzmán Gutiérrez

1759458613

DEDICATORIA

A mis padres por darme la dicha de existir, a mis abuelos que me dieron la guía en mis primeros pasos, a mis tíos que cada uno a su manera me enseñaron lo bueno de la vida, a compañeros de la vida que cada uno aportó con un granito de enseñanza, a todos los profesores en los diferentes niveles de enseñanza, tuvieron la paciencia de responder mis dudas y a veces fueron más que un profesor, un verdadero ser humano que supieron escucharme y aconsejarme.

CONTENIDO

Declaración de derecho de autor, autenticidad y responsabilidad.....	ii
AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL.....	iii
Certificado de dirección de trabajo de titulación.....	iv
DEDICATORIA	v
ÍNDICE DE TABLAS.....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	viii
ACRÓNIMOS.....	ix
RESUMEN	
ABSTRACT	
INTRODUCCIÓN	1
METODOLOGÍA	5
Diseño de muestreo	5
Recolección de muestras compuestas	5
Preparación de las muestras y análisis de laboratorio	5
Procesamiento y análisis de datos.....	6
Parámetros evaluadores de la composición química del sedimento.....	6
RESULTADOS	11
ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	14
Concentraciones vs AM_097-A y CCME.....	14
Indicadores de calidad de sedimento.....	16
Comparación con la guía de calidad de sedimento (SQG).....	18
CONCLUSIONES	20
RECOMENDACIONES.....	20
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	21

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla No. 1 Parámetros evaluadores de la composición química del sedimento.....	8
Tabla No. 2 Coordenadas geográficas y parámetros fisicoquímicos	11
Tabla No. 3 Concentraciones (ppm) de los metales de interés.	13
Tabla No. 4 Concentraciones de la línea de fondo.	15
Tabla No. 5 Cuantificación de los indicadores de calidad del suelo.....	17
Tabla No. 6 Cuantificación del riesgo ecológico en todas las muestras.	18
Tabla No. 7 Comparación de las concentraciones frente a PEL y TEC de los SQG.....	19

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura No. 1	Localización de la zona de estudio.....	4
Figura No. 2	Concentración de los elementos mayoritarios.....	12
Figura No. 3	Concentración de los elementos traza en todas las muestras.....	12
Figura No. 4	Comparación de los metales pesados vs AC_097-A y la CCME.	16

ACRÓNIMOS

Fluorescencia de rayos X	:	FRX
Metros sobre el nivel del mar	:	m s.n.m.
Estándares de Calidad Ambiental	:	ECA
Acuerdo ministerial 097-A	:	AC_097-A
Consejo canadiense de ministros de medio ambiente	:	CCME
Conductividad eléctrica	:	CE
Metales pesados	:	MP
Guía de calidad del suelo	:	SQG

RESUMEN

Se realizó la caracterización geoquímica de sedimentos ubicado en el brazo izquierdo del río Jatunyacu en el cantón Tena entre las coordenadas: latitud $-01,05528^{\circ}$ $-01,06249^{\circ}$ y longitud $-77,81048^{\circ}$ $-77,81455^{\circ}$. Se aplicó el método del cuarteo para la recolección de trece muestras compuestas de sedimentos. Por medio de la técnica de fluorescencia de rayos X y el sistema de determinación de Hg DMA-80 con el método 7473 de la EPA se adquirieron los datos cuantitativos de las muestras de sedimento. Mediante la aplicación de estadística descriptiva se analizaron las concentraciones de los elementos químicos. Se enfocaron en los metales pesados: Pb, Cu, Cr, Zn, As y Hg, se compararon sus concentraciones con la norma ecuatoriana del acuerdo ministerial 097-A para suelos y la norma del consejo canadiense de ministros de medio ambiente para sedimentos. Los resultados relevantes mostraron que: Cr, Cu y Zn superaron la normativa ecuatoriana en todas las muestras, de igual manera Cu y As excedieron los límites de la normativa canadiense. La guía de calidad de sedimento arrojó que las concentraciones de efecto probable para Cr y As, se esperan efectos adversos con frecuencia en la zona de estudio. Adicionalmente, la comparación con la composición química de una muestra de la roca fuente pareciera sugerir que las concentraciones tienen un alto componente natural. Sin embargo, se requiere análisis más exhaustivos para concluir en este aspecto.

Palabras clave: Geoquímica, sedimentos, metales pesados, contaminación.

ABSTRACT.

A geochemical characterization of sediments located in the left arm of the Jatunyacu river in the Tena canton was carried out between the coordinates: latitude -01.05528° - 01.06249° and longitude -77.81048° - -77.81455° . The quartering method was applied to collect thirteen samples composed of sediments. Quantitative data of the sediment samples were acquired by means of the X-ray fluorescence technique. Through the application of descriptive statistics, the concentrations of the chemical elements were analyzed. They focused on the heavy metals Pb, Cu, Cr, Zn, As, Hg and their concentrations were compared with the Ecuadorian standard of ministerial agreement 097-A for soils and the Canadian Council of Environment Ministers standard for sediments. The relevant results showed that: Cr, Cu and Zn exceeded the Ecuadorian regulations in all the samples, likewise Cu and As exceeded the limits of the Canadian regulations. The sediment quality guideline showed that the probable effect concentrations for Cr and As, adverse effects are frequently expected in the study area. Additionally, the comparison with the chemical composition of a sample of the source rock seems to suggest that the concentrations have a high natural component. However, more exhaustive analyzes are required to conclude in this regard.

Keywords: Geochemistry, sediments, heavy metals, contamination.

INTRODUCCIÓN

La geoquímica es una disciplina científica que combina la geología y la química para estudiar la composición química de la tierra (White, 1997), el término “geoquímica” fue usado por primera vez por el químico suizo Schönbein en 1838 (Carvalho, 1989; Molina, 2021; White, 1997). La tierra es un sistema dinámico que se caracteriza por su capacidad de transformación, desplazamiento y cambio en su composición mediante una variedad de procesos como: fusión, cristalización, erosión, disolución, precipitación, vaporización y descomposición radioactiva (White, 1997), mediante la química podemos entender la tierra y su funcionamiento (Molina, 2021; White, 1997).

El actual conocimiento y teorías de formación de la tierra y el sistema solar proceden de la investigación geoquímica de los meteoritos (Carvalho, 1989; Molina, 2021; White, 1997), además, podemos cuantificar la escala de tiempo geológico, el reconocimiento de las plumas del manto, las temperaturas y presiones de formación de algunas rocas metamórficas, cuando se formó la atmosfera de la tierra y cómo ha evolucionado, el grado de concentración de metales pesados en agua, suelo y sedimentos, etc. (Carvalho, 1989; Molina, 2021; White, 1997).

La geoquímica está ligada a las ciencias medioambientales y sus problemas: lluvia ácida, el agujero de ozono, el efecto invernadero, el calentamiento global, la polución de la tierra y el suelo, etc (Carvalho, 1989; Oyarzun et al., 2010) . Por otra parte, la geoquímica ambiental estudia los efectos de los procesos químicos de carácter natural o antrópico (introducidos por el hombre) sobre el medio ambiente (Carvalho, 1989; Davutluoglu et al., 2011; Oyarzun et al., 2010).

La mayoría de objetos en nuestro alrededor proviene del procesamiento y transformación de minerales de la corteza (Gutiérrez, 2014). La minería es una de las actividades económicas más importantes a nivel mundial (Gutiérrez, 2014), ocasionan efectos ambientales producto de los residuos mineros que contaminan los cuerpos de agua y suelo (Gutiérrez, 2014).

Ecuador está conformado por cuatro regiones, tres ubicadas en la zona continental, sus regiones son diferentes geomorfológicamente y manifiestan ambientes geológicos heterogéneos (Baldock, 1982). La zona Andina o Sierra se eleva hasta los 4000 m s.n.m.

con varios volcanes que se encuentran entre 5000 m s.n.m. a 6000 m s.n.m. está dividida entre la cordillera Oriental o Real y la cordillera Occidental por el callejón interandino y otras cuencas intermontanas discontinuas (Baldock, 1982). Hacia el Este está el Oriente caracterizado por relieves que fluctúan entre 1000 m s.n.m. y 2000 m s.n.m. en la zona subandina y con alturas inferiores de 200 m s.n.m. a 800 m s.n.m. en la planicie amazónica superior, la zona subandina, está localizada en el flanco oriental de los Andes y es considerada un cinturón corrido y plegado, corresponde a una zona de transición entre rocas metamórficas de la cordillera Real, rocas sedimentarias de la cuenca Oriente e intrusiones del vulcanismo de la unidad Misahuallí y el batolito de Abitagua (Baby et al., 2013; Gutiérrez et al., 2019; Gramal et al., 2021; Vallejo et al., 2021, como se citó en (Carranco et al., 2022).

El batolito de Abitagua está ubicado en el segmento central de la cordillera Real es un monzogranito biotítico de grano grueso y color rosado con dimensiones ~120 km de largo y ~15 km de ancho, la mayoría de contactos aparecen como fallas que instruyen a los volcánicos jurásicos de la unidad Misahuallí (Litherland et al., como se citó en (Cedeño, 2017)), está cortado por una serie de cuerpos intrusivos tipo cupulas y diques de composición diorítica de textura porfírica, con fenocristales de plagioclasa ± hornblenda ± actinolita ± clinopiroxeno ± epidota ± clorita (Carranco et al., 2022), estos intrusivos son además cortados por diques de 30 cm a 5 m, de tonalitas de textura aplítica con plagioclasa ± cuarzo ± microclina ± hornblenda ± biotita (Carranco et al., 2022).

Ecuador está conformado por nueve zonas mineras entre diferentes provincias, cantones y parroquias. La provincia de Napo está situada en la zona dos (Ministerio del Ambiente, 2020), actualmente existen 250 concesiones mineras concedidas (Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales no Renovables, 2020). La zona 2 se localiza en el sector Centro-Norte del país y se caracteriza por actividades de procesamiento de minería aluvial y en menor medida minería primaria (Ministerio del Ambiente, 2020). En el mes de noviembre del año 2021 hasta finales del mes de febrero del año 2022 se realizó la explotación de minería aluvial en el brazo izquierdo del río Jatunyacu en la comunidad de Yutzupino (El Comercio, 2022; Sierra, 2019), provocando un daño de ~61 ha.

La contaminación de los cauces de los ríos es un efecto directo e inmediato que resulta de la minería aluvial no regularizada (Ministerio del Ambiente, 2020), puede ocasionar daños a la salud por altas concentraciones de metales pesados derivados del proceso de extracción (Ministerio del Ambiente, 2020).

En la provincia de Napo viven ~22786 personas (INEC, 2011), distribuidas en: Yutzupino, Puerto Napo, Puerto Misahuallí, Ahuano, Chonta Punta, etc. Los asentamientos humanos están repartidos entre los ríos Jutzupino y Napo. Por lo tanto, es necesario conocer las concentraciones de metales pesados generados después de la explotación aluvial en la comunidad de Yutzupino, debido al alto grado de toxicidad que puede generar los metales pesados a los seres vivos (Varol, 2011; Yang et al., 2021).

De acuerdo a los estándares de calidad ambiental (ECA), un estudio de identificación, permite conocer la existencia de contaminación del suelo a través de la obtención de muestras representativas (muestra compuesta constituida por un conjunto de cinco muestras simples) con el fin de establecer si el suelo supera o no los umbrales establecidos por cada país (ECA, 2014).

Se empleó la técnica de fluorescencia de rayos x (FRX), para determinar concentraciones de elementos químicos en diversos tipos de muestras solidas (sedimento) (Anjosun et al., 2000; María & Valentinuzzi, 2008; Sutherland, 2000). El análisis de las muestras mediante FRX se lleva a cabo en diversas áreas de la investigación: biología, medicina, control ambiental, geología, entre otras (Valentinuzzi, 2008), este método analítico tiene la ventaja de requerir la preparación de muestras menos complejas y no ser destructivo en la mayoría de las aplicaciones (Anjosun et al., 2000; Valentinuzzi, 2008).

Estudios previos de acceso público, realizados en las cercanías han detectado valores de Cd por encima de PEL, concentraciones de metales: Cu, Fe, Pb, Al y Mg, por encima de los límites permisibles del acuerdo ministerial 097-A de Ecuador (Capparelli et al., 2020, 2021), en los ríos: Anzu, Jatunyacu y Napo.

El objetivo de este estudio es caracterizar geoquímicamente los sedimentos del brazo izquierdo del río Jatunyacu correspondiente a la latitud: $-01,05528^{\circ}$ $-01,06249^{\circ}$ y longitud: $-77,81048^{\circ}$ $-77,81455^{\circ}$ (Figura 1), en la comunidad de Yutzupino con énfasis en la concentración de metales pesados: Pb, Cu, Cr, As, Hg y Zn. Además, se calcularon cuatro parámetros para evaluar la composición geoquímica del sedimento: factor de contaminación, índice de carga de contaminación, factor de enriquecimiento, índice de geoacumulación. Adicionalmente se calculó el riesgo ecológico que representan las concentraciones en la zona de estudio.

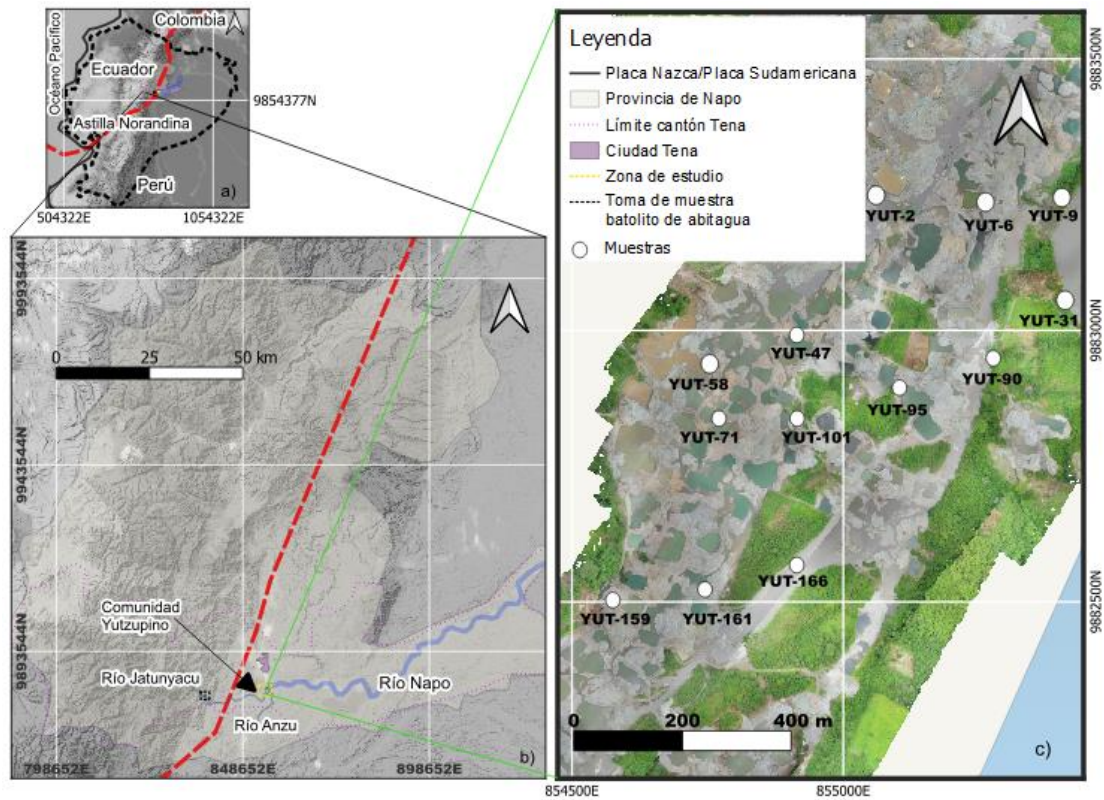


Figura No. 1 Localización de la zona de estudio. a) Marco geodinámico de Ecuador. b) Mapa de relieve de Napo. c) Ubicación de las 13 muestras recolectadas en la comunidad de Yutzupino.

Realizado por: Alex Bonilla

METODOLOGÍA

La presente investigación comprende los sedimentos del río Jatunyacu en la comunidad de Yutzupino, perteneciente al cantón Tena, provincia de Napo. El área de interés abarca 28 ha, encontrándose a una altitud promedio de 440 m s.n.m. (Figura 1). El estudio se desarrolló en cuatro etapas: 1) Diseño de muestreo. 2) Recolección de muestras compuestas. 3) Preparación de las muestras y análisis de laboratorio. 4) Procesamiento y análisis de datos.

Diseño de muestreo

De acuerdo a la ECA una zona de altitud similar, ayuda a desarrollar un mallado regular con líneas paralelas y perpendiculares equidistantes, generando una simetría en todas las celdas, el tamaño de la celda depende del detalle requerido, entre más pequeña la celda la muestra tiene mejor representatividad (ECA, 2014), para nuestro caso se desarrolló celdas de 50 m por 50 m.

Recolección de muestras compuestas

El acuerdo ministerial 097-A recomienda 1 muestra compuesta/100 ha (Ministerio del ambiente, 2015) y la ECA recomienda 40 muestras simples/30 ha (ECA, 2014). Para nuestro estudio se recolectaron trece muestras compuestas conformadas por cinco muestras simples. Se tomaron las muestras con la utilización de un GPS GARMIN 64s, y se utilizó materiales plásticos: pala (realizar las calicatas de 40 cm*40 cm*40 cm), balde (transporte de cinco muestras simples), bandeja (partición de muestras) y fundas (500g/muestra compuesta). Se homogeneizaron las cinco muestras simples y se aplicó el método de cuarteo en campo para tener 500 g de muestra compuesta.

Preparación de las muestras y análisis de laboratorio

Se calculó el pH y la conductividad eléctrica bajo la norma Colombiana NTC 5264 (Icontec Internacional, 2008), en el Laboratorio Nacional de Referencia del Agua de la Universidad Regional Amazónica Ikiám con los equipos METTLER TOLEDO para el pH, y la sonda multiparamétrica HO14d para la conductividad eléctrica.

En el Laboratorio de Geociencias se prepararon las muestras de suelo con el siguiente protocolo: se secaron 200g de cada muestra a 60 °C/48 h. Posteriormente, se empleó un juego de tamices de 3 piezas N° 10, 35 y 120, para obtener una muestra con una medida < 150 µm recomendada por FOREGS, este tamaño de sedimento permite una mejor lectura de las concentraciones en un análisis químico en suelos y sedimentos (Guagliardi, 2012).

Se disparó tres veces el equipo de fluorescencia de rayos X (S1 TITAN, TRACER 5 y CTX) para la caracterización geoquímica, el equipo detecta concentraciones a partir de 1 ppm (Nano Análisis, 2021). Se enviaron 7 muestras al laboratorio CORE LAB de ciencias ambientales de la Universidad San Francisco de Quito, para la caracterización del Hg, utilizando un analizador directo DMA-80 evo – Milestone con la aplicación del método 7473 de la EPA.

Procesamiento y análisis de datos

Se utilizó estadística descriptiva para la conformidad de las concentraciones de los elementos químicos detectados con el instrumento de FRX.

Parámetros evaluadores de la composición química del sedimento.

Se calculó la línea de fondo para observar la calidad de los sedimentos en la zona de estudio (Tabla 1). La línea de fondo expresa las condiciones ambientales imperantes, antes de cualquier perturbación. Es decir, son las condiciones que predominan en ausencia de actividades antropogénicas, sólo con los procesos naturales (Ministerio del ambiente, 2015).

Para determinar los valores de fondo se puede hallar de dos formas empíricas y estadísticas. Las técnicas empíricas siguen los siguientes enfoques: empleo de concentraciones teóricas globales, empleo de concentraciones de un lugar prístino o del mismo ecosistema y la toma de muestras por perfiles (Cabrera, 2018). Los métodos estadísticos consisten en identificar subpoblaciones de datos dentro de un conjunto de datos. Es decir, identificar datos pre antrópicos y contaminados, estableciendo un umbral para su separación (Birch, 2017).

Para la línea de fondo de nuestro estudio se eligió el método empírico a partir de las muestras de roca madre del granito de Abitagua (lugar prístino) ubicado a 700 m río arriba del complejo turístico Laguna Azul en el río Jatunyacu, se empleó el mortero de ágata para convertirle en suelo y realizar el mismo procesamiento descrito con anterioridad.

Tabla No. 1 Parámetros evaluadores de la composición química del sedimento.

Índices individuales.					
Índice	Definición	Ecuación	Variables	Rangos y significado	Referencia
Factor de contaminación (PI)	Permite conocer que metal pesado representa una mayor amenaza para el suelo.	$PI = \frac{C_n}{GB}$	C _n : Concentración del metal de la muestra. GB: Concentración del metal de línea de fondo.	<1 ; Baja contaminación 1<PI<3 ; Contaminación moderada. 3<PI<5 ; Contaminación considerable. PI>6 ; Alta contaminación.	(Kowalska et al., 2018; Marín-Leal et al., 2022; Varol, 2011)
Factor de enriquecimiento (FE)	Permite tener una medida del posible impacto de la actividad antropogénica en la contaminación de metales pesados en el suelo	$FE = \frac{\left(\frac{C_n}{LV}\right)_{\text{muestra}}}{\left(\frac{C_m}{LV}\right)_{\text{Línea de fondo}}}$	C _n : Concentración del metal de la muestra. C _m : Concentración del metal de línea de fondo. LV: Metal de control muestra/Línea de fondo (se utilizó el Al para este índice).	<2 ; Deficiencia de enriquecimiento. 2-5 ; Enriquecimiento moderado. 5-20 ; Enriquecimiento significativo. 20-40 ; Enriquecimiento muy alto. >40 ; Enriquecimiento extremadamente alto.	(Kowalska et al., 2018; Pérez, 2021; Varol, 2011)
Índices compuestos					
Índice de carga de contaminación (PLI)	Es utilizado para evaluar el nivel de contaminación por metales pesados.	$PLI = \sqrt[n]{PI_1 * PI_2 * PI_3 \dots PI_n}$	n: Número de metales analizados. PI: Valor calculado del factor de contaminación.	<1 ; No existe contaminación. >1 ; Existe contaminación.	(Tomlinson et al., 1980; Varol, 2011)
Índice de geoacumulación (I _{geo})	Muestra en una escala cualitativa el grado de contaminación de metales en sedimentos comparando valores obtenidos y valores de fondo.	$I_{geo} = \log_2\left(\frac{C_n}{1.5B_n}\right)$	C _n : Concentración del metal de la muestra. B _n : Concentración del metal de la línea de fondo.	<0 ; No contaminado. 0-1 ; No contaminado a moderadamente contaminado. 1-2 ; Moderadamente contaminado.	(Varol, 2011)

			1.5: Coeficiente de correlación de los efectos litosféricos.	2-3; De moderado a fuertemente contaminado. 3-4; De fuertemente contaminado a extremadamente contaminado. >5; Extremadamente contaminado.	
Riesgo ecológico (RI)	Es un índice aplicable para la evaluación del grado de riesgo ecológico causado por las concentraciones de metales pesados en el agua, el aire y el suelo	$RI = \sum_{i=1}^n E_r^i$ $E_r^i = T_r^i * PI$	n: Número de metales pesados. E_r^i : Único índice de factor de riesgo ecológico. T_r^i : Coeficiente de respuesta a la toxicidad de un metal individual (esta establecido por el autor)	<150; Baja toxicidad. 150<RI<300; Moderada toxicidad. 300<RI<600; Considerable toxicidad. >600; Muy alta toxicidad.	(Hakanson, 1979)

Realizado por: Alex Bonilla

Se compararon las concentraciones de los metales: Zn, Cr, Cu, Pb, As y Hg, con el AM_097-A y CCME, se eligieron estas normativas por las siguientes razones. En el AC_097-A unifica las normas de calidad ambiental del recurso suelo (Ministerio del ambiente, 2015) para todo el Ecuador, pero en esta normativa no contempla estándares para los niveles de contaminación en sedimentos. Por este motivo, se emplea como referencia las guías del consejo canadiense de ministros de medio ambiente (CCME), siendo el principal foro intergubernamental dirigido por ministros para la acción colectiva sobre cuestiones ambientales de interés nacional e internacional (CCME, 2020).

RESULTADOS

De acuerdo al AM_097-A para los criterios de calidad del suelo los valores de pH de 6 a 8 y para la conductividad eléctrica de 200 uS/cm, los resultados obtenidos para pH y conductividad se detalla en la tabla 2, los valores que sobrepasan el AM_097-A para la CE se resaltaron.

Tabla No. 2 Coordenadas geográficas y parámetros fisicoquímicos

ID	Lat	Lon	pH	CE (uS/cm)
YUT-90	-1.05862	-77.81081	7.08	333
YUT-159	-1.06193	-77.81494	7.34	186.9
YUT-71	-1.58060	-77.81362	7.6	264
YUT-9	-1.05510	-77.80785	7.36	97.5
YUT-101	-1.05896	-77.81181	7.17	284
YUT-58	-1.05760	-77.81326	7.19	335
YUT-2	-1.05528	-77.81048	7.65	102.9
YUT-31	-1.05611	-77.80796	7.35	43.1
YUT-161	-1.06199	-77.81397	7.75	138.6
YUT-95	-1.05792	-77.80883	7.64	208.7
YUT-47	-1.05716	-77.81202	7.34	225
YUT-166	-1.06153	-77.81215	7.45	119.4
YUT-6	-1.05552	-77.80848	7.37	233

Realizado por: Alex Bonilla

Por medio del análisis por espectroscopía de fluorescencia de rayos X, se identificaron 28 elementos químicos divididos en dos categorías elementos mayoritarios >1000 ppm que representan ~99,52% de todas las muestras (Figura 2). El segundo grupo los elementos trazas <1000 ppm y representa ~0,48% de todas las muestras (Figura 3).

Se ordenaron los elementos mayoritarios de mayor a menor concentración: Si>Al>Fe>Ca>K>Mg>Ti>Mn (Figura 2) en cada una de las diferentes muestras.

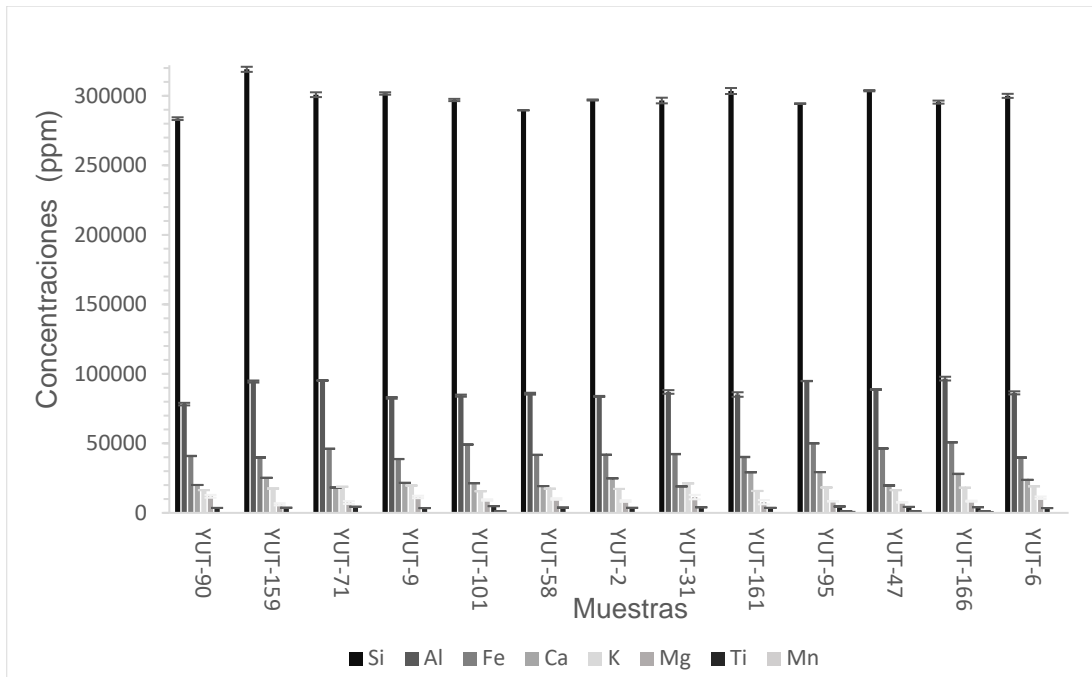


Figura No. 2 Concentración de los elementos mayoritarios de todas las muestras.
Realizado por: Alex Bonilla

Para los elementos traza se seleccionaron los metales de interés en este estudio y se representa en la figura 3.

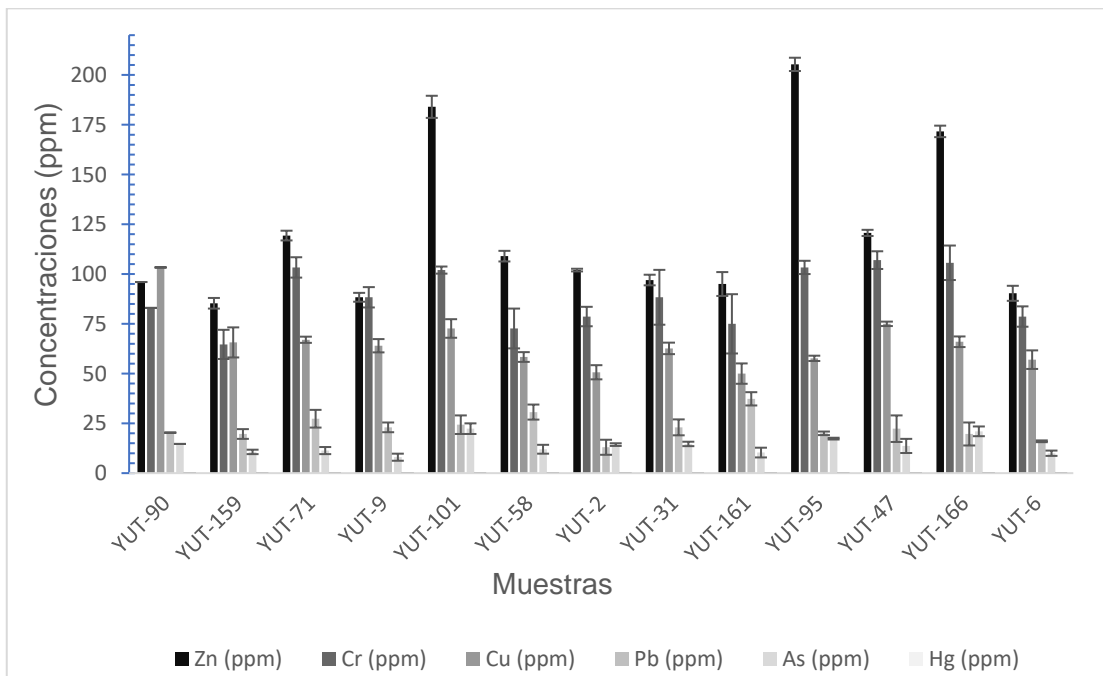


Figura No. 3 Concentración de los elementos traza en todas las muestras.
Realizado por: Alex Bonilla

Con el uso de la mediana se calcularon las concentraciones de los metales pesados de interés descritos en la tabla 3.

Tabla No. 3 Concentraciones (ppm) de los metales de interés.

ID	Zn (ppm)	Cr (ppm)	Cu (ppm)	Pb (ppm)	As (ppm)	Hg (ppm) \$
YUT-90	96.00	83.00	103.33	20.33	14.67	0.02
YUT-159	85.33	64.67	65.67	19.67	10.67	0.02
YUT-71	119.33	103.33	67.00	27.33	11.33	0.02
YUT-9	88.33	88.33	64.00	23.00	8.00	0.01
YUT-101	184.00	102.00	72.67	24.33	22.33	0.00
YUT-58	109.00	72.67	58.33	30.67	12.00	0.00
YUT-2	102.00	78.67	50.67	13.00	14.33	0.02
YUT-31	97.00	88.33	62.67	23.00	14.67	0.02
YUT-161	95.00	75.00	50.00	37.33	10.33	0.00
YUT-95	205.33	103.33	57.67	20.00	17.33	0.04
YUT-47	120.67	107.00	75.00	22.33	13.67	0.00
YUT-166	171.67	105.67	66.00	19.67	21.00	0.00
YUT-6	90.33	78.67	57.00	16.00	10.00	0.00

\$: Las concentraciones de Hg son las cuantificadas en el método directo de DMA-80, en el laboratorio CORE LAB de ciencias ambientales de la Universidad San Francisco de Quito.

Realizado por: Alex Bonilla

ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Concentraciones vs AM_097-A y CCME

Los metales pesados en altas concentraciones pueden causar amenazas a la vida acuática y terrestre, porque originan serios problemas a la salud humana y animal (Castro-González et al., 2019; Pérez et al., 2015; Londoño et al., 2016), las concentraciones de los metales Zn, Cr, Cu, Pb, As y Hg, se compararon con los límites permisibles del AC_097-A y normativa CCME.

Como se observa en la figura 4, los metales: Cr, Cu y Zn superaron los límites del AM_097-A en todas las muestras; a diferencia del As y Pb que sobrepasaron en 7 y 11 muestras respectivamente. Similares resultados tenemos al contrastar con la norma CCME donde los valores de Cu y As superaron los valores establecidos en todas las muestras; y en menor proporción Pb y Zn (Figura 4).

A nivel mundial, los pórfidos cupríferos más relevantes están ligados con arcos magmáticos desarrollados en márgenes convergentes de tipo andino (Baby et al., 2004; Rascón-Heimpel et al., 2012), comúnmente estos depósitos alcanzan grandes volúmenes de mineral, caracterizados por menas de sulfuros hipogénicos de cobre y otros metales asociados, particularmente el molibdeno, los cuales están claramente asociados a la inyección de intrusivos relativamente pequeños, caracterizados por una textura predominantemente porfídica (Acosta, 2006; Rascón-Heimpel et al., 2012).

Un estudio reciente revela la posibilidad de relacionar los eventos esenciales en la formación de depósitos tipo pórfido en el batolito de Abitagua (Chalco, 2023), este tipo de pórfido puede estar relacionado con metales: As, Zn, Hg, Ba, S, Pb, entre otros (Craw & Howell, 2014; Unda, 2020). A consecuencia de lo anterior es probable evidenciar altas concentraciones de los metales antes descritos en el punto donde aflora el pórfido. El As está relacionado con depósitos metálicos de Cu, Ag, Zn, Hg, U, Sn, Pb, Mo, W, Ni, Co, PGE y Au (Craw & Howell, 2014; Greiner, 1991).

Las bajas concentraciones de As (Tabla 3) encontradas en el estudio indican la posibilidad que el Au tiene un proceso de liberación natural, característico del tipo de Au

aluvial que se forma con el paso del tiempo cuando un río ha pasado previamente por un área rica en este mineral (Greiner, 1991).

El poder erosivo del agua elimina la roca circundante por su baja densidad respecto al Au, y se deposita en un área determinada en el transcurso del cauce de un río (Greiner, 1991). Este suceso explica en una parte porque las concentraciones de As son bajas, pero superan el límite permisible en todas las muestras de la norma CCME (Figura 4). Sin embargo, las concentraciones no son altas en relación a otras minas ubicadas en Azuay, El Oro, Morona Santiago entre otras a nivel local o internacional donde el Au se encuentra en betas y sus metales ganga como el As tienen altas concentraciones (Acosta, 2006; Greiner, 1991; Zhao et al., 2019).

Tabla No. 4 Concentraciones de la línea de fondo.

Concentraciones de la línea de fondo (ppm)					
Hg	Cr	Cu	Zn	As	Pb
0	45.5	23	19	5	4

Realizado por: Alex Bonilla

En la línea de fondo caracterizada se tiene 0 ppm de Hg como se observa en la tabla 4, cabe aclarar que los valores son determinados por FRX y posiblemente el margen de error del instrumento no detectó las concentraciones de la roca madre. Los valores encontrados de Hg en la zona de estudio (Tabla 3), pudiera sugerir que se empleó Hg en procesos de amalgamación a pesar de estar prohibido desde el 2010. El Hg se dispersa en un radio de 1 m en relación a la fuente de emisión (Carrillo & Astudillo, 2011).

Una de las posibilidades de no tener mejores resultados sobre las concentraciones de Hg, está relacionada con el tiempo de toma de las muestras. Debido a que, se realizó cinco meses posteriores al cierre de operaciones mineras la adquisición de las muestras, lo cual dificultó identificar los puntos donde probablemente se realizaba la depuración del Au.

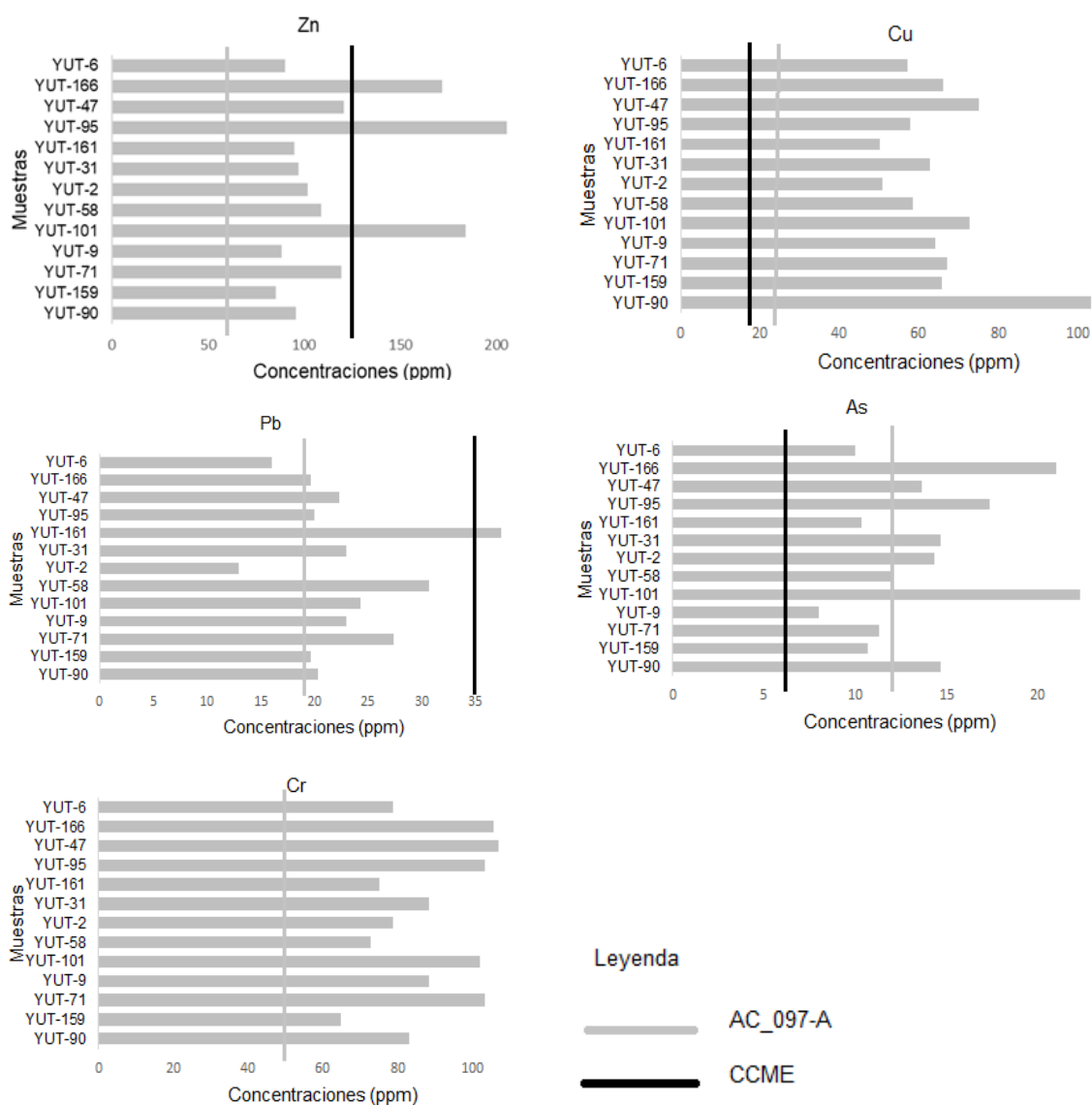


Figura No. 4 Comparación de los metales pesados vs AC_097-A y la CCME.
Realizado por: Alex Bonilla

Indicadores de calidad de sedimento

La distribución geoquímica en sedimentos dependerá de factores: ambiente geológico, patrones de dispersión, propiedades mecánicas de los clastos, relieve y en menor proporción a factores físico-químicos pH y CE (Rivera et al., 2007; Vargas, 2008). La dispersión secundaria generada por agentes superficiales es variable para cada elemento y se relaciona con la distribución alrededor de un depósito (Rivera et al., 2007). Las concentraciones de los metales están relacionadas con el aumento del pH, esto limita la disponibilidad y movilidad de los mismos a un pH básico (Castro-González et al., 2019), como ocurre en nuestra zona de estudio (Tabla 2).

A causa de la minería se puede producir problemas de salud. Existe una preocupación legítima en todo el mundo sobre el nivel de contaminación que pueden generar los metales pesados porque no son degradables. (Águila et al., 2005).

Para comprender el alcance de la polución, existen indicadores que miden diferentes categorías de contaminación y comprenden su fuente natural o antrópico (Londoño et al., 2016; Quevedo & Meneses, 2014), en la tabla 5 se detallan los indicadores agrupados por metal pesado calculado. Sin embargo, en nuestro estudio se desconoce la biodisponibilidad y la verdadera toxicidad de esta carga de los metales pueden representar en cada una de las muestras analizadas.

Tabla No. 5 Cuantificación de los indicadores de calidad del suelo.

ID		YUT-90	YUT-159	YUT-71	YUT-9	YUT-101	YUT-58	YUT-2	YUT-31	YUT-161	YUT-95	YUT-47	YUT-166	YUT-6
Cr	PI	1.8	1.4	2.3	1.9	2.2	1.6	1.7	1.9	1.7	2.3	2.4	2.3	1.7
	FE	2.2	1.4	2.3	2.2	2.5	1.8	2.0	2.1	1.8	2.3	2.5	2.3	1.9
	Igeo	0.3	-0.1	0.6	0.4	0.6	0.1	0.2	0.4	0.1	0.6	0.6	0.6	0.2
Cu	PI	4.5	2.9	2.9	2.8	3.2	2.5	2.2	2.7	2.2	2.5	3.3	2.9	2.5
	FE	5.5	2.9	2.9	3.2	3.6	2.8	2.5	3.0	2.4	2.5	3.5	2.8	2.7
	Igeo	1.6	0.9	1.0	0.9	1.1	0.8	0.6	0.9	0.5	0.7	1.1	0.9	0.7
Zn	PI	5.1	4.5	6.3	4.6	9.7	5.7	5.4	5.1	5.0	10.8	6.4	9.0	4.8
	FE	6.1	4.5	6.3	5.3	10.9	6.4	6.1	5.6	5.6	10.8	6.8	8.9	5.2
	Igeo	1.8	1.6	2.1	1.6	2.7	1.9	1.8	1.8	1.7	2.8	2.1	2.6	1.7
Pb	PI	5.1	4.9	6.8	5.8	6.1	7.7	3.3	5.8	9.3	5.0	5.6	4.9	4.0
	FE	6.2	5.0	6.8	6.6	6.9	8.5	3.7	6.3	10.4	5.0	6.0	4.8	4.4
	Igeo	1.8	1.7	2.2	1.9	2.0	2.4	1.1	1.9	2.6	1.7	1.9	1.7	1.4
As	PI	2.9	2.1	2.3	1.6	4.5	2.4	2.9	2.9	2.1	3.5	2.7	4.2	2.0
	FE	3.6	2.1	2.3	1.8	5.0	2.7	3.3	3.2	2.3	3.5	2.9	4.1	2.2
	Igeo	0.97	0.51	0.60	0.09	1.57	0.68	0.93	0.97	0.46	1.21	0.87	1.49	0.42
Hg	PI	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	FE	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Igeo	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
PLI	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	

Realizado por: Alex Bonilla

Como resultados preliminares tenemos que el 58,6 % (46 muestras están por debajo $PI < 3$) expresan una contaminación moderada y el 41,1 % ($PI > 3$) una contaminación considerable para cada elemento. El resultado del PLI indica que no existe contaminación en toda la zona de estudio, este índice se puede contrastar con el I_{geo} que tiene un 55,1% del total de las muestras no contaminadas y un 44,9 % con una contaminación moderada.

Por otra parte, el FE permite inferir el porcentaje de concentración de los metales de tipo natural o antrópico. Según los diversos estudios realizados por: Chen, del Águila Juárez, Sutherland, Zhang y Liu, indican que un $FE < 1.5$, posiblemente sea de manera natural

y si este valor es mayor, un cierto porcentaje de concentraciones puede derivarse de fuentes como la contaminación puntual y no puntual y la biota. Asimismo, con un $FE > 10$, es posible que la contaminación sea de carácter antrópico (del Águila Juárez et al., 2005), arrojando en este estudio un 3,8 % del total de las muestras.

Por todo lo expuesto se determinó el riesgo ecológico propuesto por Hakanson, cuya herramienta es utilizada para realizar un diagnóstico cuantitativo sobre la sensibilidad ambiental basado en el análisis de concentraciones de metales pesados en el sitio de estudio y su afectación al medio en que están presentes (Colón et al., 2020; Hakanson, 1979), como se observa en la tabla 6.

Tabla No. 6 Cuantificación del riesgo ecológico en todas las muestras.

	YUT-90	YUT-159	YUT-71	YUT-9	YUT-101	YUT-58	YUT-2	YUT-31	YUT-161	YUT-95	YUT-47	YUT-166	YUT-6
RI	67.27	53.06	65.70	54.90	77.73	66.06	47.72	61.48	69.08	66.22	64.62	69.53	47.51

Realizado por: Alex Bonilla

Los resultados obtenidos reflejan una baja toxicidad de los metales pesados. El análisis de los resultados también reveló otras incógnitas: ¿Cómo?, ¿Cuándo? y ¿Qué cantidades de concentraciones de los metales pesados en los sedimentos ingresaron al sistema hidrológico?

Es decir, se debe analizar la biodisponibilidad de estos metales en el ámbito geológico. En consecuencia, el RI no introduce el porcentaje de biodisponibilidad de cada metal en la aplicación de su ecuación. El cálculo de los parámetros evaluadores de calidad del suelo tienen en común la aplicación de una línea de fondo, la dificultad del relieve y la geología del lugar limitó la adquisición de las muestras para conformar una línea de fondo más representativa del granito de Abitagua.

Comparación con la guía de calidad de sedimento (SQG).

Las SQG son empleadas para evaluar la toxicidad potencial de las mezclas de elementos contaminantes en sedimentos (MacDonald et al., 2000). Se comparó la concentración de efecto umbral TEC, se refiere a las concentraciones que por debajo de estas no se esperan que ocurran efectos adversos. Y el nivel de efecto probable PEL, por encima de las mismas posiblemente se esperarían efectos adversos con frecuencia (Burton, 2002; MacDonald et al., 2000) (Tabla 7).

Tabla No. 7 Comparación de las concentraciones frente a PEL y TEC de los SQG.

ID	Zn (ppm)	Cr (ppm)	Cu (ppm)	Pb (ppm)	As (ppm)	Hg (ppm)
YUT-90	96.000	83.000	103.333	20.333	14.667	0.020
YUT-159	85.333	64.667	65.667	19.667	10.667	0.019
YUT-71	119.333	103.333	67.000	27.333	11.333	0.023
YUT-9	88.333	88.333	64.000	23.000	8.000	0.014
YUT-101	184.000	102.000	72.667	24.333	22.333	0.000
YUT-58	109.000	72.667	58.333	30.667	12.000	0.000
YUT-2	102.000	78.667	50.667	13.000	14.333	0.021
YUT-31	97.000	88.333	62.667	23.000	14.667	0.021
YUT-161	95.000	75.000	50.000	37.333	10.333	0.000
YUT-95	205.333	103.333	57.667	20.000	17.333	0.044
YUT-47	120.667	107.000	75.000	22.333	13.667	0.000
YUT-166	171.667	105.667	66.000	19.667	21.000	0.000
YUT-6	90.333	78.667	57.000	16.000	10.000	0.000
TEC	123.00	37.30	35.70	35.00	5.90	0.13
PEL	315.00	90.00	197.00	91.30	17.00	0.49

Realizado por: Alex Bonilla

CONCLUSIONES

El muestreo desarrollado permitió la detección de los metales pesados Zn, Pb, Cu, Cr, As y Hg, que son nocivos para los seres vivos en concentraciones altas. Los metales Cu, Cr y Zn sobrepasan la normativa ecuatoriana de igual manera los metales Cr y As exceden la normativa canadiense en todas las muestras analizadas. A su vez se esperan efectos adversos con frecuencia con los metales pesados Cr y As según el PEL.

RECOMENDACIONES

Determinar una línea de fondo regional y realizar una segunda fase del estudio para establecer si existe o no contaminación mediante un muestreo vertical que permite observar la migración a profundidad. Realizar estudios de biodisponibilidad y dispersión geoquímica de los metales pesados.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acosta, J. (2006). Características metalogénicas de los yacimientos asociados a los arcos magmáticos mesozoicos y cenozoicos del sur del Perú (Latitudes 16°-18°30').
- Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales no Renovables. (2020). Geoportal Catastro Minero.
- Águila Juárez, P., Lugo de la Fuente, J., & Vaca Paulín, R. (2005). Determinación de factores de enriquecimiento y geoacumulación de Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, y Zn en suelos de la cuenca alta del río Lerma.
- Anjosun M., López R., Asisc, J., Cesareo, R., & Barradas, C. (2000). Análisis cuantitativo de metales en suelo mediante fluorescencia de rayos X. ELSEIVER, B.
- Baby, P., Rivadeneira, M., & Barragán, R. (2004). La cuenca Oriente, geología y petróleo. IFEA.
- Baldock, J. (1982). Geología del Ecuador. 1–76.
- Birch, G. (2017). Determinación de las concentraciones de fondo de metales en sedimentos y enriquecimiento en ambientes marinos: una revisión crítica. En *Ciencia del Medio Ambiente Total* (Vol. 580, pp. 813–831). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.12.028>
- Burton, G. (2002). Criterios de calidad de sedimentos en uso en todo el mundo. En *limnología* (Vol. 3).
- Cabrera, J. (2018). Evaluación de la contaminación por metales pesados en sedimentos y suelos de la Reserva Biológica Limoncocha – Ecuador mediante índices de polución.
- Capparelli, M., Cabrera, M., Moulatlet, G., Pinos Vélez, V., Pérez González, A., Solis, O., Galarza, E., Alvear, D., Vasco, S., Guamangallo, J., Cevallos, M., Shiguango, Lady, & Ramos, M. (2021). Evaluación del grado de afectación de la actividad minera sobre los ecosistemas acuáticos en la provincia del Napo.
- Capparelli, M., Moulatlet, G., Abessa, D., Lucas-Solís, O., Rosero, B., Galarza, E., Tuba, D., Carpintero, N., Ochoa-Herrera, V., & Cipriani-Avila, I. (2020). Un enfoque integrador para identificar los impactos de múltiples fuentes de contaminación por metales en el piedemonte andino oriental de la Amazonía ecuatoriana. *Ciencia del Medio Ambiente Total*, 709. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136088>
- Carranco, F., Romero, C., Cerný, N., Pulupa, R., Carderón, E., Barona, D., Lozada, A., Calderón R., Castillo M., Cobos N., (2022). Petrografía y geoquímica del intrusivo de Guacamayos, Napo - Ecuador. *Ices*.
- Carrillo, G., & Astudillo, A. (2011). Evaluación de las emisiones de vapor mercurial en procesos de amalgamado artesanal: caso Cantón Ponce Enríquez, Provincia del Azuay. In *MASKANA* (Vol. 2, Issue 2).
- Carvalho, C. (1989). Geoquímica ambiental-conceptos, métodos y aplicaciones.
- Castro-González, N., Calderón-Sánchez, F., Moreno-Rojas, R., Tamariz-Flores, J., & Reyes-Cervantes, E. (2019a). Nivel de contaminación por metales pesados en aguas residuales y suelos de la subcuenca alto balsas en Tlaxcala y Puebla, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 35(2), 335–348. <https://doi.org/10.20937/RICA.2019.35.02.06>
- CCME, (2020). Consejo Canadiense de ministros de medio ambiente.
- Cedeño, K. (2017). Caracterización petrográfica y geoquímica de las unidades tres lagunas y Sabanilla en la cordillera Real entre los 3.5°S y 5°S.
- Chalco, D. (2023). Tomografía sísmica del batolito de Abitagua en la zona subandina del Ecuador.
- Colón Velásquez-López, P., López Sánchez, I., & Rivera Velásquez, F. (2020). Estimación del riesgo ecológico y a la salud humana del mercurio en una zona de manglar del estuario La Puntilla, provincia de El Oro, sur del Ecuador. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras* 49(1), 81–100.
- Craw, D., & Bowell, R. (2014). La caracterización del arsénico en residuos mineros. En *Arsénico: geoquímica ambiental, mineralogía y microbiología* (Vol. 79, pp. 473–505). De Gruyter. <https://doi.org/10.2138/rmg.2014.79.10>
- Davutluoglu, O., Seckin, G., Ersu, C., Yilmaz, T., & Sari, B. (2011). Contenido y distribución de metales pesados en sedimentos superficiales del río Seyhan, Turquía. *Revista de Gestión Ambiental*, 92(9), 2250–2259. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.04.013>
- ECA, (2014). Guía para Muestreo de Suelos.

- EL COMERCIO, (2022). Autoridades detectan graves daños provocados por minería ilegal en Yutzupino, Napo.
- Pérez, G., Maurice, C., Ochoa-Herrera, L., López, V., Egas, F., Lagane, D., Besson, F. & Zambrano, C. (2015). Determinación de elementos mayores en sedimentos provenientes de zonas afectadas por actividades petroleras en Ecuador (Vol. 7, Issue 2). <http://avances.usfq.edu.ec>
- Greiner, G. (1991). Características y distribución de los placeres auríferos de Chile.
- Gagliardi, I., Apollaro, C., Scarciglia, F., & Rosa, R. (2012). Influencia del tamaño de las partículas en la distribución geoquímica de los sedimentos fluviales en la cuenca del río Lese, sur de Italia. BASE.
- Gutiérrez, P. (2014). MANEJO DE RESIDUOS EN MINERÍA: la regulación como herramienta de desarrollo.
- Hakanson. (1979). Un índice de riesgo ecológico para el control de la contaminación acuática. un enfoque sedimentológico. En *Investigación del Agua* (Vol. 14).
- Icontec Internacional. (2008). Norma Colombiana NTC 5264. www.hannacolombia.com
- Kowalska, J., Mazurek, R., Gąsiorek, M., & Zaleski, T. (2018). Los índices de contaminación como herramientas útiles para la evaluación integral del grado de contaminación del suelo – Una revisión. En *Geoquímica Ambiental y Salud* (Vol. 40, Issue 6, pp. 2395–2420). Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/s10653-018-0106-z>
- Londoño Franco, L., Londoño Muñoz, P., & Muñoz García, F. (2016). LOS RIESGOS DE LOS METALES PESADOS EN LA SALUD HUMANA Y ANIMAL. *Biotechnología En El Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 14(2), 145. [https://doi.org/10.18684/bsaa\(14\)145-153](https://doi.org/10.18684/bsaa(14)145-153)
- MacDonald, D., Ingersoll, C., & Berger, T. (2000). Desarrollo y evaluación de pautas de calidad de sedimentos basadas en consenso para ecosistemas de agua dulce. *Archivos de Contaminación Ambiental y Toxicología*, 39(1), 20–31. <https://doi.org/10.1007/s002440010075>
- Valentinuzzi, M. (2008). Análisis por FRX: Implementación de Guías de Haces en txf análisis por fluorescencia de rayos x: implementación de guías de haces en reflexión total.
- Marín-Leal, J., Rojas-Romero, J., & Polo-Vallejo, A. (2022). Evaluación del riesgo ecológico por elementos potencialmente tóxicos en sedimentos costeros de un estuario tropical hipereutrófico. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 38, 335–349. <https://doi.org/10.20937/RICA.54504>
- Ministerio del Ambiente. (2020). LÍNEA DE BASE NACIONAL para la Minería Artesanal y en Pequeña.
- Ministerio del ambiente. (2015). Documento_Registro-Oficial-No-387-04-noviembre-2015_0-Anotaciones (3).
- Molina Berbey, R. (2021). Geoquímica. <https://about.jstor.org/terms>
- Nano Analytics, B. (2021). S1 Analizador FRX portátil TITAN para análisis elemental Innovación XRF portátil con integridad.
- Oyarzun, R., Higuera, P., & Cubas, P. (2010). Geoquímica Ambiental e Indicadores Geobotánicos Geoquímica y Mineralogía Ambiental.
- Pérez Mora, 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>
- Quevedo, J., & Meneses, L. (2014). Índice de geoacumulación y factor de enriquecimiento para plomo, cadmio y níquel en suelos agrícolas del área de San Alfonso en Machachi.
- Rascón-Heimpel, M., Valencia-Moreno, M., Ochoa-Landín, M., & Calmus, L. (2012). Geología y geoquímica del pórfido cuprífero Los Alisos, distrito minero de La Caridad (Vol. 29, Issue 2)
- Rivera, H., Chira, J., Zambrano, K., & Petersen, P. (2007). Dispersión secundaria de los metales pesados en sedimentos de los ríos Chillón, Rímac y Lurín Departamento de Lima. *Revista Del Instituto de Investigaciones FIGMMG*, 10, 19–25.
- Sierra V. (2019). Minería ilegal la peor devastación en la historia de la Amazonía. MONGABAY.
- Sutherland, R. (2000). Trazas de metales asociadas al sedimento del lecho en un arroyo urbano, Oahu, Hawái. En *Casos y soluciones Geología Ambiental* (Vol. 39, Número 6). Springer-Verlag.

- Tomlinson, D., Wilson, G., Harris, R., & Jeffrey, W. (1980). Problemas en la evaluación de los niveles de metales pesados en los estuarios y la formación de un índice de contaminación (Vol. 33).
- Unda, N. (2020). Aislamiento e identificación de bacterias nativas biodegradadoras de cianuro y arsénico presente en relaves mineros de oro.
- Vargas, L., Chira, J., & Chero, D. (2008). Caracterización de la distribución geoquímica del Hf, Nb, Ni, Zr y V en sedimentos activos de la cuenca Huaura-Lima.
- Varol, M. (2011). Evaluación de la contaminación por metales pesados en sedimentos del río Tigris (Turquía) mediante índices de contaminación y técnicas estadísticas multivariantes. *Diario de materiales peligrosos*, 195, 355–364.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.08.051>
- White, W. (1997). GEOQUÍMICA.
- Yang, H., Bong, M., Kang, T., Hwang S., & Na, E. (2021). Evaluación de metales pesados en sedimentos superficiales de la cuenca del río Seomjin, Corea del Sur, mediante análisis estadístico y geoquímico. *Quimiosfera*, 84.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131400>
- Zhao, Y., Liu, H., & Qin K. (2019). Discusión sobre el mecanismo de transporte de oro en el fluido de magma fundido en un depósito de pórfido de cobre: un estudio de caso del depósito de pórfido de oro (Cu) de Jinchang, provincia de Heilongjiang, China. *Revisiones de geología mineral*, 111. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.102968>