

Hydrochemical Characterization of Water in Santa Rosa Community, Southern Ecuador.

Cindy Goyburo, Ing¹, Karla Villamar, Ing¹, Michelle Villalta, Ing¹, Juan Andrés Cedeño, Tomas Vitvar, PhD¹, Priscila Valverde-Armas, PhD¹ and Samantha Jiménez-Oyola, PhD¹

¹Escuela Superior Politécnica del Litoral, ESPOL, Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra, Campus Gustavo Galindo km 30.5 vía Perimetral, P.O. Box 09-01-5863, Guayaquil, Ecuador, cgoyburo@espol.edu.ec, karmavil@espol.edu.ec, micdevil@espol.edu.ec, juancede@espol.edu.ec, tvitvar@espol.edu.ec, priesval@espol.edu.ec, sjimenez@espol.edu.ec

Abstract– This study aims to evaluate the quality of surface water, groundwater and tap water through the analysis of physicochemical parameters and hydrochemical composition. For this purpose, surface water, tap water and groundwater samples were collected. The sampling was carried out in the dry season (November 2022). Physicochemical parameters included pH, electrical conductivity, temperature, and total dissolved solids, and the major ions included HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- , NO_3^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ and K^+ . The results indicated acid conditions in 25% of the surface water samples, mainly in mining environments. Surface waters are dominantly of HCO_3^- - SO_4^{2-} - Ca^{2+} type, while the prevailing facies of tap waters are of HCO_3^- - Ca^{2+} . The dominant ions in groundwater samples are Cl^- - Na^+ - K^+ . The spatial distribution of the major ions showed a higher amount of SO_4^{2-} in the mining areas and two streams Los Gringos and El Panteon, while the dominant ion along the Santa Rosa River course was HCO_3^- . The high Cl^- contents in groundwater in the Santa Rosa urban zone may be related to anthropogenic pollution. These results evidence the need to implement monitoring and control strategies of the human in the Santa Rosa city to guarantee the quality of the water and therefore the safety of its consumers within the Santa Rosa cantony.

Keywords– major ions, water resources, groundwater, drinking water, anthropogenic contamination.

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).

ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).

DO NOT REMOVE

Caracterización Hidroquímica del Agua en el Cantón Santa Rosa, Sur de Ecuador

Cindy Goyburo, Ing¹, Karla Villamar-Marazita, Ing¹, Michelle Villalta, Ing¹, Juan Andrés Cedeño, Tomas Vitvar, PhD¹, Priscila Valverde-Armas, PhD¹ and Samantha Jiménez-Oyola, PhD¹

¹Escuela Superior Politécnica del Litoral, ESPOL, Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra, Campus Gustavo Galindo km 30.5 vía Perimetral, P.O. Box 09-01-5863, Guayaquil, Ecuador, cgoyburo@espol.edu.ec, karmavil@espol.edu.ec, micdevil@espol.edu.ec, juancede@espol.edu.ec, tvitvar@espol.edu.ec, priesval@espol.edu.ec, sjjimenez@espol.edu.ec

Resumen– Este estudio tiene como objetivo evaluar la calidad del agua superficial, subterránea y de consumo, mediante el análisis de parámetros fisicoquímicos y composición hidroquímica. Para este propósito, se recolectaron muestras de agua superficial, agua de grifo y agua subterránea. El muestreo se realizó en época seca (noviembre de 2022). Se analizaron parámetros fisicoquímicos como pH, conductividad eléctrica, temperatura y sólidos totales disueltos. Además, se analizó la concentración de iones mayoritarios HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- , NO_3^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ y K^+ . Los resultados indicaron condiciones de acidez en el 25% de las muestras de agua superficial, principalmente en los entornos mineros. Las muestras de agua superficial son principalmente de tipo HCO_3^- - SO_4^{2-} - Ca^{2+} , mientras que las aguas de grifo son de tipo HCO_3^- - Ca^{2+} . Por otro lado, en las aguas subterráneas predominan los iones Cl^- - Na^+ - K^+ . La distribución espacial de los iones mayoritarios mostró una mayor cantidad de SO_4^{2-} en las áreas mineras, quebradas Los Gringos y El Panteón, mientras que a lo largo del río Santa Rosa el ion predominante fue el HCO_3^- . El agua subterránea presenta contenidos altos de Cl^- en la zona urbana de Santa Rosa, lo que puede estar relacionado con contaminación antropogénica. Estos resultados evidencian la necesidad de implementar estrategias de monitoreo y control de las actividades antropogénicas que se realizan en el cantón Santa Rosa, de cara a garantizar la calidad del agua en el área de estudio y por ende la seguridad de sus consumidores.

Palabras clave– iones mayoritarios, recursos hídricos, agua subterránea, agua potable, contaminación antropogénica.

I. INTRODUCCIÓN

La conservación de los recursos de agua dulce es uno de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) del Programa de las Naciones Unidas (PNUD), que establece la importancia de asegurar la disponibilidad y la gestión sostenible de fuentes de agua limpia para todos [1]. Sin embargo, en muchas partes del mundo, principalmente en los países en vías de desarrollo, las fuentes de abastecimiento de agua están contaminadas [2], [3].

En Ecuador, el 40% de la población rural no posee acceso al agua para consumo humano, a pesar de ser uno de los países latinoamericanos con mayor cantidad de agua dulce por habitante. Además, el 90% de las aguas residuales no son tratadas correctamente. Por lo tanto, más del 50% de las fuentes de agua no tienen una calidad óptima para el consumo [4].

Las actividades antropogénicas han influido directamente en la alteración de la calidad del agua. Debido a las malas prácticas ambientales, muchos efluentes con alta carga contaminante son descargados directamente a ríos y quebradas, causando la degradación del ecosistema y afectando a los usuarios de los ríos o acuíferos [5], [6].

En Ecuador existen varios estudios que informan sobre el deterioro de la calidad de los recursos hídricos, principalmente en áreas con actividades extractivas [7]–[9]. Así mismo, la calidad del agua potable en muchas ciudades ha sido ampliamente cuestionada debido a la contaminación de las fuentes de abastecimiento o a los deficientes procesos de tratamiento [10]–[12].

El cantón Santa Rosa se localiza en la provincia de El Oro, sur de Ecuador. La microcuenca del Río Santa Rosa es uno de los principales recursos hídricos del cantón. El Río Santa Rosa es la principal fuente de abastecimiento de la planta de tratamiento de agua “Los Jardines”, que abastece de agua a aproximadamente el 85% de la población santarroseña. Sin embargo, la calidad del agua ha sido afectada debido a las actividades mineras ilegales que se sitúan en la parte alta del Río Santa Rosa, y a la inadecuada gestión de los residuos y efluentes provenientes de diversas industrias (avícola, ganadera, porcina, etc.) [13], [14]. El drenaje ácido de mina y las descargas ilegales de los efluentes y residuos mineros en la parte alta del Río Santa Rosa, han provocado un gran impacto visual, daños ambientales y conflictos sociales en la comunidad [13].

Además del recurso hídrico superficial, en Santa Rosa existen pozos privados que son utilizados para diferentes actividades como fábricas de hielo o lavadoras de vehículos. Existe carencia de información referente a un inventario de los pozos, así como de las actividades de monitoreo y control para la protección del recurso hídrico subterráneo. En ese contexto, este estudio tiene como objetivo evaluar la calidad del agua superficial, subterránea y de consumo del cantón Santa Rosa, mediante el análisis de parámetros fisicoquímicos y composición hidroquímica. Esta información constituye una línea base para futuras investigaciones relacionadas con la protección de los recursos hídricos del cantón Santa Rosa.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Área de estudio

El cantón Santa Rosa se localiza en la provincia de El Oro, sur de Ecuador. Tiene un área de 889 km² (Fig. 1). La zona tiene un clima cálido – tropical. La temperatura varía entre 21 °C y 32 °C y la precipitación varía entre 1 mm como media mínima mensual (época seca: mayo - diciembre) y 120 mm como media máxima mensual (época lluviosa: enero - abril) [15].

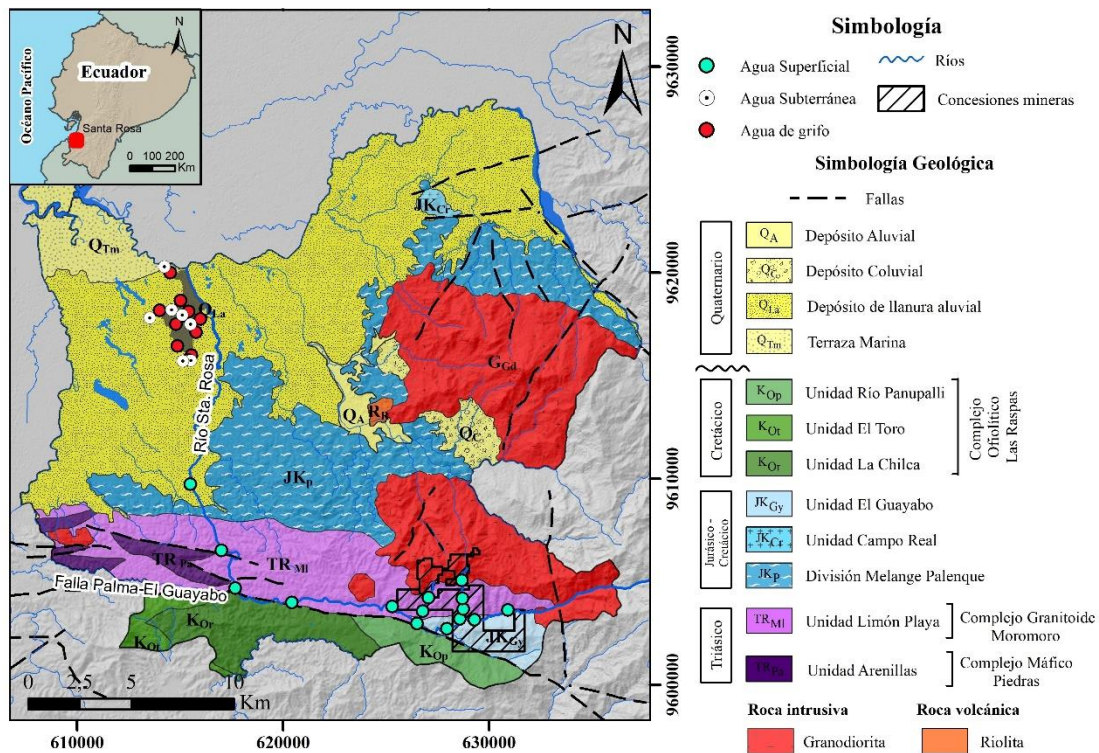


Fig. 1 Zona de estudio y localización de sitios muestreados.

B. Geología e hidrogeología

En el área de estudio, las rocas más antiguas del Triásico son las rocas metamórficas del Complejo Granitoide Moromoro (Unidad Limón Playa) y las anfibolitas del Complejo Máfico Piedras (Unidad Arenillas). Se han reconocido rocas plutónicas de composición granodiorítica, en menor cantidad cuarzodioritas, granitos y filones de cuarzo [16]. La Unidad Limón Playa (Triásico tardío) está compuesta principalmente por gneises de composición cuarzo-feldespático y migmatitas [17][18]. La Unidad Arenillas está constituida por una secuencia de anfibolitas de grano fino a medio de textura nematoblástica, masiva a levemente foliada. La División Melange Palenque (Jurásico tardío - Cretácico temprano) está constituida por filitas esquistosas, pizarras, cuarcitas, esquistos cuarzo - feldespáticos, esquistos cuarzo sericíticos y esquistos cloríticos [18]. De la División Melange se discriminan la presencia de inclusiones tectónicas, las cuales se describen como las de Unidades Campo Real y El Guayabo [19].

La Unidad Campo Real está formada por cuerpos alargados y lentes discontinuos que incluyen harzburgitas y gabros serpentinizados, mientras que la Unidad El Guayabo está compuesta por intercalaciones de esquistos verdes entre esquistos pelíticos de grano medio a fino.

Como parte del Complejo Ofiolítico Raspas, la Unidad La Chilca está conformada por rocas metamórficas de alta presión. Está constituida por esquistos pelíticos, esquistos azules y eclogitas [20][18]. De acuerdo con J. Aspden et al. [18], la Unidad El Toro forma un bloque tectónico lenticular que

engloba a la Unidad La Chilca, limitado al norte por la falla La Palma, constituido litológicamente por harzburgitas serpentinizadas y serpentinas de textura esquistosa. La Unidad Río Panupali es interpretada como la parte externa del Complejo Ofiolítico Raspas. Su litología comprende esquistos verdes progradados masivos y foliados de facies de alta presión.

Dentro de los depósitos superficiales, los depósitos coluviales están conformados por grandes depósitos de bloques, gravas y cantos de granodioritas, andesitas, metagranodioritas, esquistos y filitas. Los depósitos aluviales están constituidos por gravas, arenas, limos y arcillas no consolidados, cantos de esquistos pelíticos, anfibolitas y gneises. Los depósitos de llanura aluvial se observan al noroeste de Santa Rosa, comprende el cordón litoral y las barreras de arena que se originan en el límite costanero por acción del mar, depositados desde la línea de costa. Las terrazas Marinas se localizan en la zona de influencia directa del océano Pacífico (actual) y están dispuestas en varios niveles de arenas y limos sobre la línea de costa [19].

C. Toma de muestras y análisis de laboratorio.

Se recolectaron muestras de aguas superficiales (n = 16), aguas de grifo (n = 11) y aguas subterráneas (n = 7) en la estación seca (noviembre de 2022). La Fig. 1 muestra la ubicación de los sitios de muestreo. Las muestras de agua superficial fueron tomadas en el Río Santa Rosa, que es la principal fuente de abastecimiento de agua del cantón. Además, se tomaron muestras de agua en las quebradas Los Gringos y El

Panteón, afluentes del Río Santa Rosa. Estas últimas corrientes de agua se encuentran en las inmediaciones de un área de extracción de oro; ambas quebradas han sido identificadas como altamente contaminadas [21][14].

Las muestras de agua de grifo se tomaron en residencias seleccionadas al azar. Las muestras de aguas subterráneas se tomaron en siete pozos privados que se encuentran en el núcleo poblado y que son utilizados para abastecimiento de agua en lavadores de vehículos y fábricas de hielo. Los pozos muestreados tienen profundidades que oscilan entre 86 y 150 m. El nivel freático varía entre 26-32 m (época seca) y 6-10 m (época lluviosa). Para la toma de muestras de agua se empleó las bombas instaladas en los pozos.

Los parámetros fisicoquímicos del agua como potencial de hidrógeno (pH), temperatura (T), conductividad eléctrica (EC) y sólidos disueltos totales (TDS) se midieron in situ con un medidor portátil HACH, HQ40D (Hach Company, Loveland CO, USA). Las muestras de agua se refrigeraron y conservaron hasta su análisis en el Laboratorio de Sanitarias de la ESPOL.

Para el análisis de HCO_3^- , Ca^{2+} y Mg^{2+} se utilizó el método volumétrico [22][23]. Para obtener la concentración de Ca^{2+} se utilizó el método HACH 8222 con un rango de 0 a 25000 mg/L como CaCO_3 , mediante la titulación con ácido etilendiaminotetraacético (EDTA). Para determinar la concentración de Mg^{2+} se realizó el cálculo por diferencia después de obtener el valor de la dureza total a través del método HACH 8226 con un proceso similar al de la dureza cálcica, con la diferencia de los reactivos utilizados. Para el análisis de Na^+ se utilizó el método de potenciometría, para lo cual se usó la sonda InterliCAL ISENA381 Sodium Internal Ion-Selective Electrode (ISE) conectada a la multiparamétrica portátil (HACH, HQ40D) [24]. Para el análisis de K^+ , SO_4^{2-} , Cl^- y NO_3^- se utilizó el equipo de espectrofotometría de luz visible (HACH, DR3900). Para todos los análisis se utilizaron las cubetas HACH 2495402 con un volumen de 10 mL. Se realizó el mismo procedimiento para los siguientes análisis de acuerdo a sus respectivos métodos: potasio (HACH 8049) [25], sulfatos (HACH 8051) [26], cloruros (HACH 8113) [27] y nitratos (HACH 8039) [28].

D. Análisis y procesamiento de información

Los datos fueron analizados estadísticamente utilizando el software Origin 2023 (OriginLab Company, Northampton MA, USA). Se utilizó estadística descriptiva para observar la tendencia del conjunto de datos. Se empleó el coeficiente de correlación de Spearman para evaluar las relaciones entre los parámetros analizados en cada tipo de agua. Se realizó diagramas hidroquímicos de Stiff y Piper con la finalidad de identificar el tipo de agua y relacionarla con la ubicación espacial. Para la elaboración de los diagramas hidroquímicos se utilizó el software Diagrammes 6.5 (R. Simler, Software "Diagrammes," Laboratoire d'Hydrologie d'Avignon, Université d'Avignon et pays du Vaucluse, France. <http://www.lha.univ-avignon.fr>). Donde también, se evaluó el índice de saturación para los minerales yeso y calcita. El

análisis espacial de los datos y la generación de mapas se realizó utilizando Sistemas de Información Geográfica, software ArcMap 10.8.2 (Esri Company, Redlands CA, USA).

III. RESULTADOS

A. Parámetros fisicoquímicos

La Fig. 2 muestra los resultados de los parámetros fisicoquímicos medidos en las muestras de agua. El pH del agua superficial varió entre 4.56 y 8.13, mostrando condiciones de acidez en el 25% de las muestras. Los valores más bajos de pH se encontraron en la quebrada Los Gringos, zona cercana a las áreas de actividad minera. Estos valores pueden deberse al potencial generador de drenaje ácido (DAM) de los materiales sulfurosos presentes en el área. De acuerdo con la normativa ecuatoriana el rango de pH para agua dulce es de 6.5 a 9 [29], por lo tanto, las muestras de la quebrada Los Gringos no cumplen con la normativa de calidad de agua. El agua con un pH inferior a 6.5 tiene más probabilidades de estar contaminada con elementos potencialmente tóxicos, lo que la hace insegura para el consumo [30]. El pH del agua de grifo varió entre 7.09 y 7.27, mientras que el pH del agua subterránea presentó valores entre 6.70 y 7.76; el pH en ambos tipos de agua se encuentra dentro de los límites máximos permisibles (LMP) establecidos por la normativa ecuatoriana para aguas de consumo doméstico [31].

Con respecto a la CE en las muestras de agua superficial, esta varió entre 50 y 350 $\mu\text{S}/\text{cm}$, estando por debajo del LMP de 800 $\mu\text{S}/\text{cm}$ para el consumo humano, según la normativa ecuatoriana. De igual manera, los valores de la CE en el agua de grifo se encontraron por debajo del LMP en un rango de 150 a 300 $\mu\text{S}/\text{cm}$. El agua superficial y el agua de grifo presentó características similares en cuanto a los valores de CE. Por el contrario, la CE en el agua subterránea alcanzó un valor máximo de 4620 $\mu\text{S}/\text{cm}$, incumpliendo el LMP para agua de consumo humano. El aumento de la CE en las muestras de agua subterránea puede estar relacionada con la presencia de minerales en disolución o con aportes de contaminantes producto de actividades antropogénicas.

Con respecto a los valores de TDS, estos tienen la misma tendencia que los valores de CE para los tres tipos de agua. Los valores de TDS en el agua superficial estuvieron en el rango de 25 a 200 mg/L. Como se muestra en la Fig. 2a, los valores de TDS son más altos en las quebradas Los Gringos y El Panteón, lo que puede ser indicativo de carga contaminante en el agua, teniendo en cuenta que en las inmediaciones de estas quebradas predominan las actividades mineras. En el agua de grifo los valores de TDS variaron entre 60 y 120 mg/L, siendo un valor adecuado dado que la normativa establece 500 mg/L como LMP para aguas de consumo humano y uso doméstico. Los TDS en el agua subterránea variaron entre 500 y 2500 mg/L.

La temperatura presentó una ligera variabilidad en los tres tipos de agua, con valores promedio de 23.9 °C en aguas superficiales, 26.4 °C en aguas de grifo y 27.5 °C en aguas subterráneas.

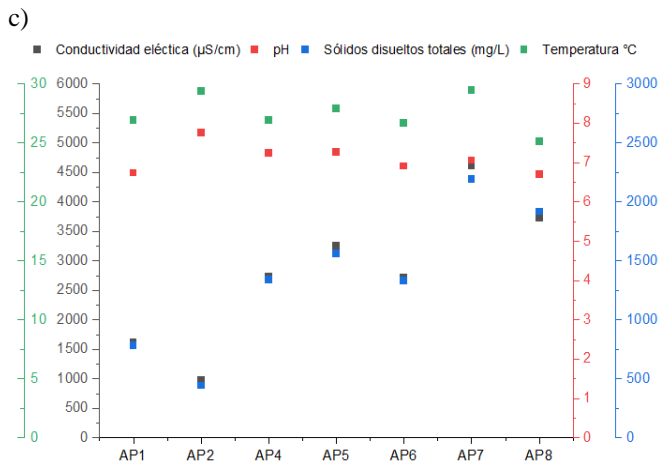
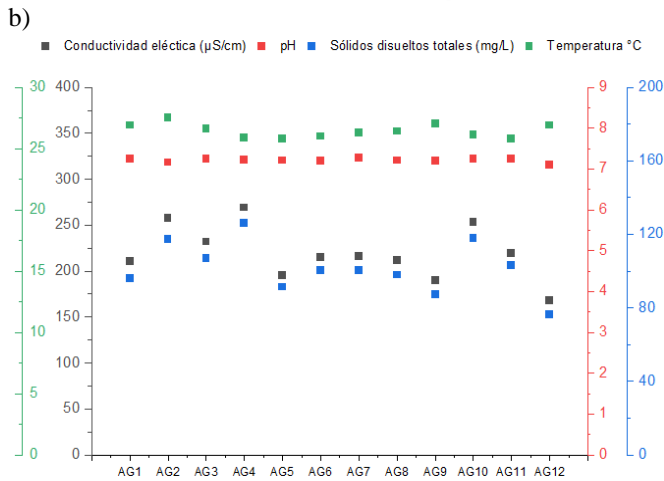
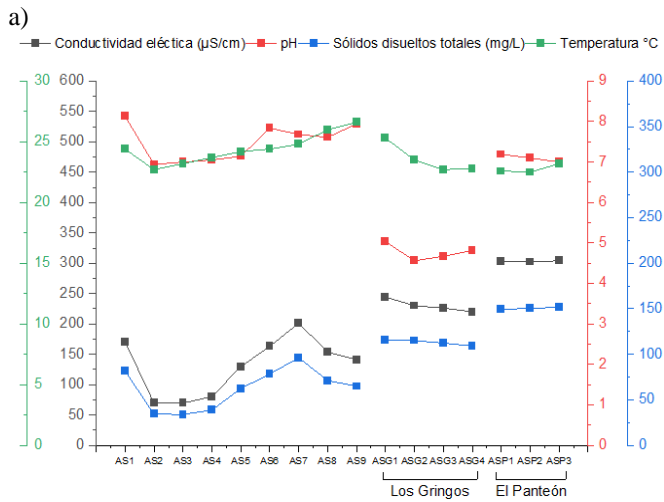


Fig. 2 Valores de pH, CE y TDS en aguas superficiales (a), aguas de grifo (b) y aguas subterráneas (c).

B. Concentración de iones mayoritarios

El resumen estadístico del contenido de iones mayoritarios en las muestras de agua superficial, agua de grifo y agua subterránea se presenta en la Tabla I. Se detectó una variación significativa en la concentración de aniones y cationes,

principalmente en las aguas superficiales y subterráneas (Fig. 3).

La concentración de iones mayoritarios en aguas superficiales y de consumo fue comparada con los valores recomendados (VR) por la Organización Mundial de la Salud (OMS) [30] y por los límites establecidos por la normativa ecuatoriana TULSMA [29] (Fig. 3).

No se cuenta con valores de referencia para la concentración de los cationes Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^{+} , K^{+} en aguas de consumo. Sin embargo, el umbral gustativo para el ion Ca^{2+} está entre 100 y 300 mg/L, mientras que para el Mg^{2+} puede ser un poco más bajo. Con respecto a la concentración de Na^{+} en el agua potable, esta suele ser inferior a 20 mg/L; contenidos mayores a 200 mg/L de Na^{+} en agua pueden alterar su sabor [30].

En aguas subterráneas dulces la concentración de Mg^{2+} y Na^{+} suele ser inferior a 50 mg/L y 150 mg/L, respectivamente. Valores altos, principalmente de Na^{+} , pueden ser perjudiciales para diversas actividades como el riego en campos agrícolas, ya que puede ocasionar la impermeabilización de los suelos [32].

Con respecto a los aniones SO_4^{2-} , Cl^{-} , y NO_3^{-} , estos pueden ser importantes indicadores de contaminación antropogénica [33]. El contenido de SO_4^{2-} en aguas naturales puede alcanzar valores de aproximadamente 100 mg/L [34]. El SO_4^{2-} puede originarse de fuentes naturales y antropogénicas, como la precipitación atmosférica, oxidación de sulfuros, fertilizantes y aguas residuales [35]. La concentración máxima permitida de SO_4^{2-} en el agua de consumo es de 500 mg/L, según la normativa ecuatoriana [29]. En nuestro estudio, la concentración de SO_4^{2-} , en todas las muestras de agua, estuvo por debajo del límite recomendado (< 500 mg/L).

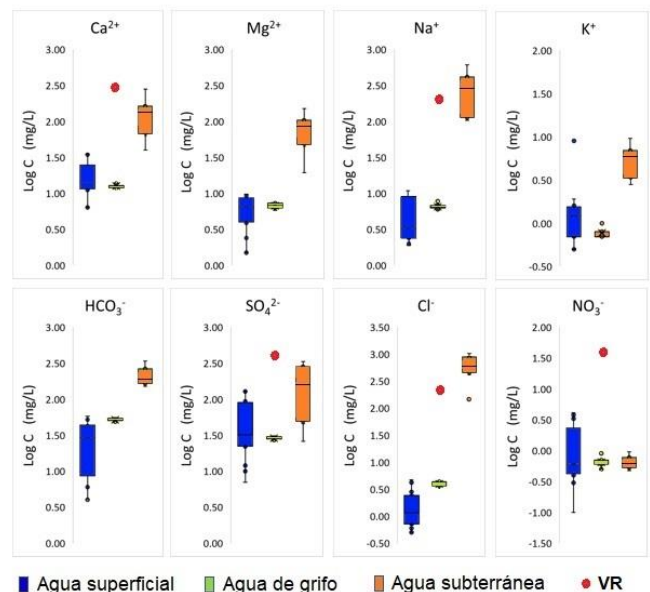


Fig. 3. Boxplot del logaritmo de la concentración (Log C) de iones mayoritarios en las muestras de agua en comparación con los valores recomendados (VR) por la OMS y la normativa ecuatoriana.

TABLA I
DATOS HIDROQUÍMICOS DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS, SUPERFICIALES Y DE GRIFO COLECTADAS EN ÉPOCA SECA

Época seca		Cationes (mg/L)				Aniones (mg/L)			
		Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻
Agua superficial	Max	35.2	9.7	11.3	9.0	58.0	128.0	4.7	4.1
	Min	6.4	1.5	1.9	0.5	4.0	7.0	0.5	0.1
	p50	18.7	6.1	3.4	1.2	30.1	55.4	1.7	1.3
	SD	9.8	2.8	3.5	2.0	17.8	41.2	1.2	1.4
Agua de grifo	Max	13.6	7.3	7.8	1.0	52.0	31.0	4.4	0.9
	Min	12.0	5.8	5.9	0.7	52.0	27.0	3.7	0.5
	p50	12.7	6.8	6.4	0.7	52.0	28.7	4.1	0.7
	SD	0.6	0.5	0.5	0.1	0.0	1.3	0.2	0.1
Aguas subterráneas	Max	280.0	144.0	609.0	10.0	338.0	280.0	1080.0	0.8
	Min	40.0	19.4	103.0	2.8	158.0	26.0	146.0	0.5
	p50	133.0	78.5	286.0	6.0	209.0	149.0	615.0	0.6
	SD	73.7	39.0	185.0	2.5	62.5	102.0	280.0	0.1

Max = valor máximo; Min = valor mínimo; p50 = percentil 50 o mediana; SD = desviación estándar.

Los cuerpos de agua superficial a menudo tienen una baja concentración de Cl⁻ en comparación con el agua subterránea [34]. En el área de estudio, el valor de Cl⁻ en aguas superficiales y de grifo (cuya fuente es el agua superficial) fue bajo (< 4.7 mg/L). Sin embargo, en las muestras de agua subterránea estuvo en el rango de 146 mg/L y 1080 mg/L. Las aguas subterráneas donde predominan los iones Cl⁻ son consideradas aguas con largo tiempo de residencia, sometidas a meteorización de rocas salinas, o contaminación con desechos industriales o aguas residuales [36]. No se propone ningún valor de referencia basado en efectos sobre la salud para el Cl⁻ en el agua de consumo. Sin embargo, valores mayores a 250 mg/L pueden resultar desagradables para los consumidores [30].

Los contenidos naturales de NO₃⁻ en agua rondan los 10 mg/L, valores más altos pueden ser indicativos de contaminación, principalmente agrícola y ganadera [37]. En agua de consumo el LMP de NO₃⁻, según la normativa ecuatoriana, es de 50 mg/L [29]. Los valores de NO₃⁻ reportados en la zona de estudio fueron bajos, en el rango de 0.1 mg/L y 4.10 mg/L. El valor más alto corresponde a una muestra de agua superficial recolectada en la quebrada Los Gringos.

C. Caracterización hidroquímica

La composición hidroquímica proporciona información útil sobre los procesos hidrogeoquímicos del agua, como el origen de los solutos y el alcance de las interacciones agua-roca [38]. Las facies hidroquímicas del agua se presentan en un diagrama de Piper (Fig. 4). En las aguas superficiales se aprecia un patrón hidroquímico donde predominan la facie bicarbonatada sulfatada cálcica. En el agua de grifo predomina la facie bicarbonatada cálcica; estas muestras presentaron una mínima variabilidad en el contenido de aniones y cationes mayoritarios. Por otro lado, las aguas subterráneas son más mineralizadas que las aguas superficiales, predominando la facie clorurada sódica potásica - cálcica. La elevada

concentración de cationes y aniones en las aguas subterráneas puede estar relacionada con el tiempo de contacto entre la roca y el agua, y a la gran cantidad de minerales en disolución [39].

El contenido de los iones mayoritarios en las muestras analizadas con relación a su ubicación espacial se presenta mediante diagramas de Stiff (Fig. 5). Las muestras de agua superficial tomadas en el Río Santa Rosa tienen concentraciones de iones mayoritarios similares entre sí, y son aguas de tipo bicarbonatada cálcica, mayoritariamente. Por el contrario, las muestras que fueron tomadas en las quebradas Los Gringos y El Panteón son de tipo sulfatada cálcica.

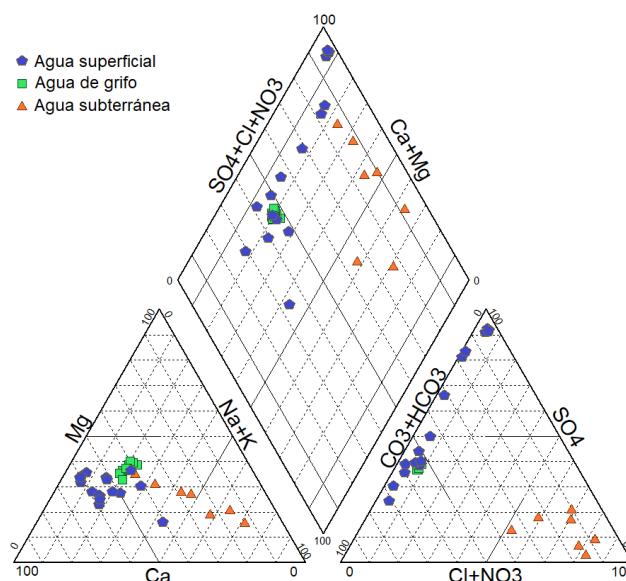


Fig. 4 Diagrama de Piper de la composición hidroquímica de las aguas superficiales, aguas de grifo y aguas subterráneas.

Las concentraciones de SO_4^{2-} en las quebradas podrían deberse a que cerca de esta zona se realizan actividades mineras, lo cual puede estar contribuyendo a un aumento del ion SO_4^{2-} en el agua. El predominio del SO_4^{2-} puede estar asociado con la meteorización de la piritita y la oxidación de otros minerales como los sulfuros de Zn, Pb y Cu en el agua, así como a la presencia de drenaje ácido [34], mientras que el predominio del HCO_3^- en el agua puede deberse a la disolución de los minerales de carbonato de las rocas hospedantes y a la escorrentía superficial rica en bicarbonatos [40].

Espacialmente, en las muestras de agua de grifo no se observa una variabilidad significativa en cuanto al contenido de aniones y cationes. Además, se evidencia que las muestras de agua de grifo tienen mucha similitud con las muestras de agua superficial recolectadas en la parte baja del Río Santa Rosa, lo que era de esperarse, ya que este río es la fuente de abastecimiento para la planta de tratamiento de agua que abastece al cantón Santa Rosa.

Con respecto a las muestras de agua subterránea, estas son de tipo clorurada sódica-potásica cálcica. El valor más bajo de Cl^- (146 mg/L) fue medido en un pozo situado al oeste de la cabecera cantonal; fue el único pozo con agua de tipo bicarbonatada sódica-potásica. Por otro lado, el mayor contenido de cloruro (1080 mg/L) fue detectado en un pozo situado en la zona centro de la cabecera cantonal, lo que sugiere que no es una característica propia del acuífero, sino que puede estar relacionado con aportes de contaminación antropogénica.

De forma general, las aguas subterráneas con propiedades físicoquímicas normales son de tipo bicarbonatadas-cálcicas o bicarbonatadas-mixtas, con bajos niveles de sulfatos, cloruros, sodio y potasio [41]. Por lo tanto, las aguas subterráneas de Santa Rosa deben ser estudiadas a profundidad para comprender el origen del alto contenido de cloruros.

D. Correlación de Spearman

La Tabla II presenta los resultados de la correlación de la concentración de los cationes y aniones en cada tipo de agua. En las muestras de agua superficial, se detectaron correlaciones positivas moderadas ($r \geq 0.6$) entre $\text{Na}^+ - \text{HCO}_3^-$ y $\text{Na}^+ - \text{Cl}^-$, correlaciones moderadas negativas entre $\text{Na}^+ - \text{NO}_3^-$ y $\text{HCO}_3^- - \text{NO}_3^-$, y una fuerte correlación positiva ($r \geq 0.8$) entre $\text{Ca}^{2+} - \text{Mg}^{2+}$, $\text{Ca}^{2+} - \text{SO}_4^{2-}$ y $\text{Mg}^{2+} - \text{SO}_4^{2-}$. En las muestras de agua de grifo se observó una correlación positiva moderada ($r \geq 0.6$) entre $\text{Ca}^{2+} - \text{HCO}_3^-$, $\text{Mg}^{2+} - \text{SO}_4^{2-}$, $\text{Mg}^{2+} - \text{NO}_3^-$, $\text{Na}^+ - \text{NO}_3^-$ y $\text{SO}_4^{2-} - \text{NO}_3^-$, y una correlación moderada negativa entre $\text{K}^+ - \text{Cl}^-$. En las muestras de agua subterránea se observó correlaciones positivas moderadas ($r \geq 0.6$) entre $\text{Ca}^{2+} - \text{Cl}^-$, $\text{Na}^+ - \text{HCO}_3^-$, $\text{Na}^+ - \text{SO}_4^{2-}$, $\text{K}^+ - \text{SO}_4^{2-}$ y $\text{HCO}_3^- - \text{SO}_4^{2-}$, y una fuerte correlación positiva ($r \geq 0.8$) entre $\text{Ca}^{2+} - \text{Mg}^{2+}$ y $\text{Mg}^{2+} - \text{Cl}^-$. La correlación positiva moderada y fuerte entre los iones individuales puede estar relacionada con fuentes comunes o un comportamiento geoquímico similar [42]. Las aguas de grifo mostraron un comportamiento diferente al de las aguas superficiales, a pesar de que las aguas del Río Santa Rosa son la fuente de abastecimiento para la planta de tratamiento de

agua del cantón. Esto puede deberse a que estas aguas han pasado por un proceso de tratamiento que ha modificado su composición.

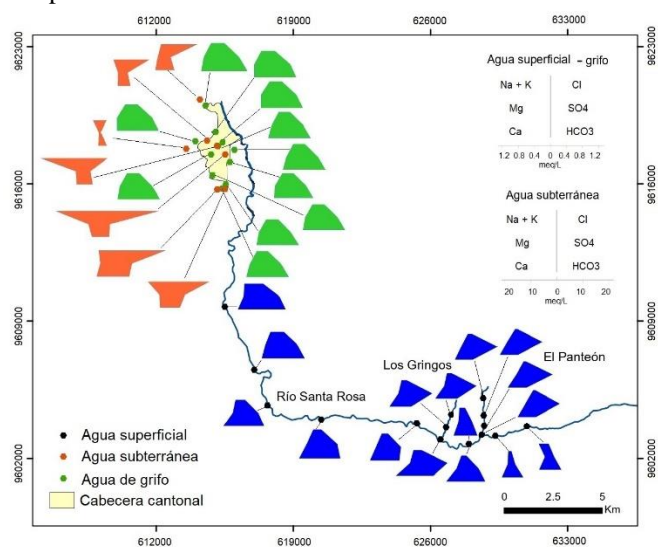


Fig. 5 Diagrama Stiff de las aguas superficiales, aguas de grifo y aguas subterráneas.

TABLA II
COEFICIENTE DE CORRELACIÓN ENTRE LA COMPOSICIÓN
HIDROQUÍMICA DEL AGUA (a) SUPERFICIAL, (b) DE GRIFO, Y (c)
AGUA SUBTERRÁNEA

	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}
(a) Mg^{2+}	0.93						
Na^+	0.38	0.40					
K^+	0.44	0.49	0.34				
HCO_3^-	0.01	-0.03	0.79	0.18			
Cl^-	0.28	0.33	0.64	0.08	0.56		
SO_4^{2-}	0.95	0.99	0.41	0.54	-0.02	0.34	
NO_3^-	-0.01	-0.06	-0.70	-0.29	-0.81	-0.37	-0.05
(b) Mg^{2+}	-0.43						
Na^+	0.31	0.51					
K^+	0.29	-0.22	0.28				
HCO_3^-	0.61	-0.45	0.11	0.13			
Cl^-	-0.25	0.47	-0.20	-0.67	-0.26		
SO_4^{2-}	-0.23	0.70	0.30	-0.08	-0.50	0.39	
NO_3^-	0.09	0.74	0.62	0.10	-0.00	0.32	0.61
(c) Mg^{2+}	0.94						
Na^+	0.07	0.32					
K^+	0.58	0.39	0.02				
HCO_3^-	0.14	0.27	0.71	0.45			
Cl^-	0.75	0.90	0.57	0.18	0.46		
SO_4^{2-}	0.52	0.59	0.67	0.65	0.68	0.52	
NO_3^-	-0.50	-0.28	0.39	-0.35	0.06	-0.18	-0.02

E. Índice de saturación

Los diagramas de dispersión comparan la distribución de la relación entre iones con las líneas correspondientes a la disolución estequiométrica teórica de sus minerales, en este caso Yeso y Halita. En los gráficos Ca^{+2} vs SO_4^{-2} (Fig. 6a) y Na^+ vs Cl^- (Fig. 6b) se observa que las aguas superficiales parecieran obtener parte de sus iones de las fuentes minerales. En la mayoría de los pozos la presencia de estos iones podría estar relacionada con otros procesos, puesto que la distribución de sus datos se apartan de la línea 1:1. Los puntos de agua subterránea localizados por encima de la línea 1:1 en el gráfico Ca^{+2} - SO_4^{-2} y por debajo de la línea 1:1 en el gráfico Na - Cl pueden estar relacionados con la adsorción de Na^+ y liberación de Ca^{2+} durante las reacciones de intercambio de bases en el acuífero.

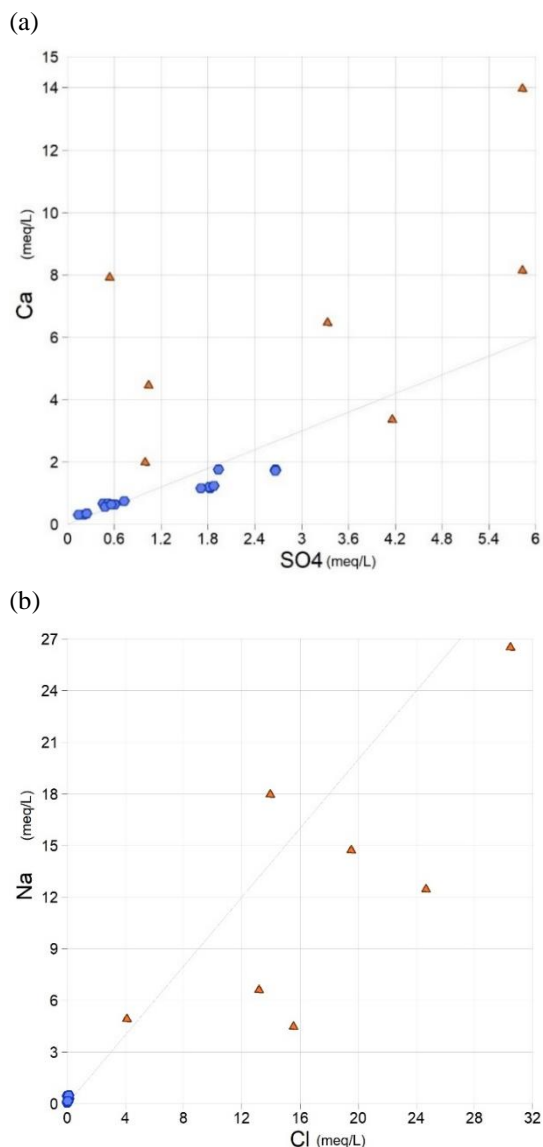


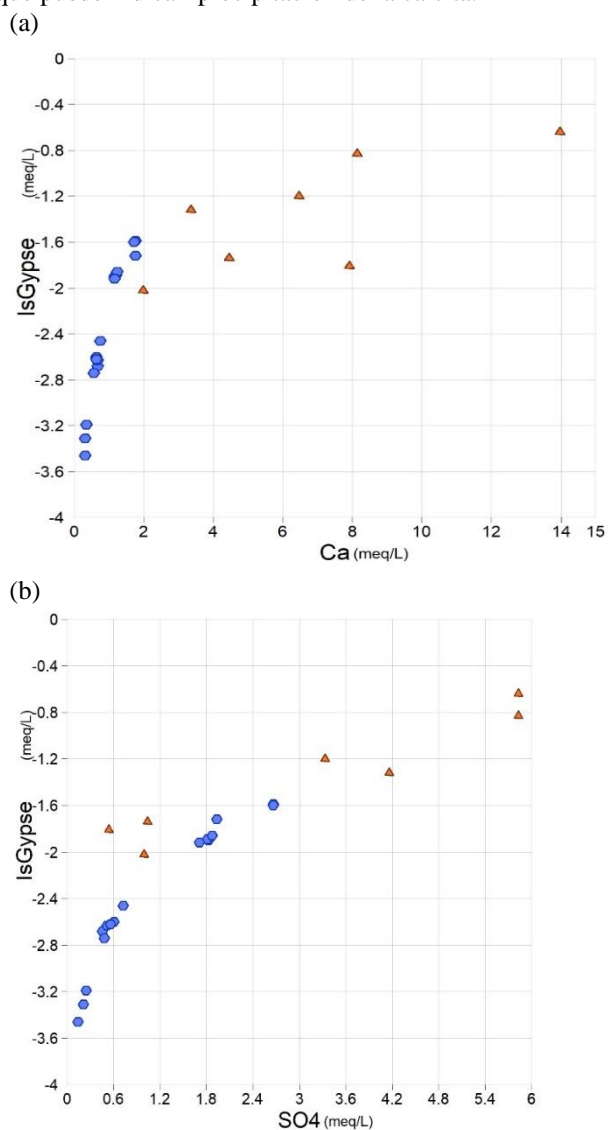
Fig. 6 Gráficos de relación (a) Ca^{+2} vs SO_4^{-2} y (b) Na^+ vs Cl^- .

Para realizar una evaluación más específica sobre qué factores podrían provocar la no linealidad en las gráficas, se

calculó el índice de saturación. Este se define como el logaritmo de la división entre la multiplicación de los productos y la actividad iónica (IAP) y la constante de equilibrio del mineral a determinada temperatura (1). Para este estudio, el índice de saturación fue calculado para los minerales yeso y calcita.

$$SI = \log \left(\frac{IAP}{K_{sp}} \right) \quad (1)$$

El índice de saturación para yeso (Fig. 7a-b) indica que la concordancia estequiométrica de la relación Ca^{+2} vs SO_4^{-2} para aguas superficiales no se debe a la precipitación de yeso. En el gráfico se puede observar que ninguna muestra se aproxima al valor de saturación con respecto a este mineral, por lo tanto, se descarta esta opción. Esto apoya la hipótesis anterior de las reacciones de intercambio de bases en el agua subterránea. En el gráfico de índice de saturación para la calcita (Fig. 7c), se puede observar que algunas de las muestras de pozos están sobresaturadas ($SI > 0$) con respecto a la calcita, lo que puede indicar precipitación de la calcita.



(c)

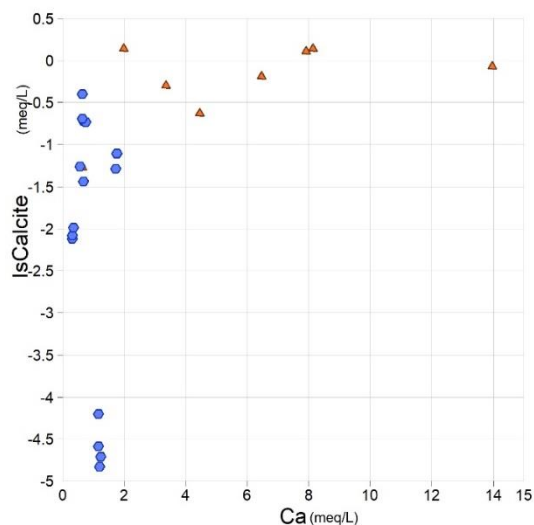


Fig. 7 Gráficos Índice de saturación para yeso y calcita.

IV. CONCLUSIONES

Los parámetros fisicoquímicos y el contenido de iones mayoritarios Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , NO_3^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , y K^+ , determinados en las muestras de agua potable del cantón Santa Rosa, cumplieron con lo estipulado en los estándares de calidad de la OMS y de la normativa ecuatoriana. Con respecto a la calidad del agua superficial, se encontraron condiciones de acidez en el 25% de las muestras recolectadas, principalmente en la quebrada Los Gringos, situada dentro de un área minera. Los contenidos de SO_4^{2-} y NO_3^- en las muestras de agua superficial estuvieron dentro de los valores establecidos en la normativa ecuatoriana. Sin embargo, se recomienda realizar análisis de metales pesados y metaloides para tener una evaluación integral de la calidad del recurso hídrico en la zona de estudio, teniendo en cuenta el impacto que las actividades antropogénicas podrían tener a largo plazo en la calidad del agua del cantón.

Con respecto a las muestras de agua subterránea, estas presentan un elevado contenido de ion Cl^- , que puede estar relacionado con procesos naturales de meteorización y evaporación o con actividades antropogénicas. En este sentido, queda en evidencia la necesidad de realizar estudios que brinden información sobre las características del sistema acuífero, además de la implementación de medidas de protección y control de la calidad de los recursos hídricos subterráneos, teniendo en cuenta su uso actual y las actividades antropogénicas que se realizan en la zona. Por otro lado, se debe implementar estrategias de gestión para el manejo de los efluentes mineros y para la gestión adecuada de residuos industriales, de cara a proteger la calidad del río Santa Rosa y, por ende, la salud de los usuarios del recurso hídrico.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Organismo Internacional de Energía Atómica y a la Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra de la Escuela Superior Politécnica del Litoral. Este proyecto se realizó en el marco del proyecto: IAEA Research Contract No. 24619 “Hydrological, Hydrochemical and Isotopic Evaluation of the Mining Impact on Drinking Water Resources in the Santa Rosa River Basin, Southern Ecuador”.

REFERENCIAS

- [1] UNDP, “Sustainable Development Goals | United Nations Development Programme,” 2022. <https://www.undp.org/sustainable-development-goals> (accessed Feb. 03, 2022).
- [2] P. Campoverde-Muñoz *et al.*, “Risk Assessment of Groundwater Contamination in the Gala, Tenguel, and Siete River Basins, Ponce Enriquez Mining Area—Ecuador,” *Sustainability*, vol. 15, no. 1, p. 403, 2022, doi: 10.3390/su15010403.
- [3] WHO, “Guidelines for Drinking-water Quality,” 2011.
- [4] “Futuro del Agua en el Ecuador Perspectivas presidenciales - Fundación Futuro Latinoamericano.”
- [5] J. D. Appleton, J. M. Weeks, J. P. S. Calvez, and C. Beinhoff, “Impacts of mercury contaminated mining waste on soil quality, crops, bivalves, and fish in the Naboc River area, Mindanao, Philippines,” vol. 354, pp. 198–211, 2006, doi: 10.1016/j.scitotenv.2005.01.042.
- [6] G. T. Carling *et al.*, “Particulate and dissolved trace element concentrations in three southern Ecuador rivers impacted by artisanal gold mining,” *Water, Air, Soil Pollut.*, vol. 224, no. 2, 2013, doi: 10.1007/s11270-012-1415-y.
- [7] K. Escobar-Segovia *et al.*, “Heavy Metals in Rivers Affected By Mining Activities in Ecuador: Pollution and Human Health Implications,” *Sustain. Water Resour. Manag. XI Eff. Approaches River Basins Urban Catchments*, vol. 1, pp. 61–72, 2021, doi: 10.2495/wrm210061.
- [8] S. Jiménez-Oyola *et al.*, “Probabilistic multi-pathway human health risk assessment due to heavy metal(loid)s in a traditional gold mining area in Ecuador,” *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, vol. 224, no. May, p. 112629, 2021, doi: 10.1016/j.ecoenv.2021.112629.
- [9] C. Mestanza-Ramón, R. Ordóñez-Alcivar, C. Arguello-Guadalupe, K. Carrera-Silva, G. D’orio, and S. Straface, “History, Socioeconomic Problems and Environmental Impacts of Gold Mining in the Andean Region of Ecuador,” *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 19, no. 3, 2022, doi: 10.3390/ijerph19031190.
- [10] J. I. Mendez-ruiz, M. B. Barcia-carreño, L. J. Mej, Á. K. Cornejo-pozo, C. A. Salas-v, and P. E. Valverde-armas, “Assessment of the Performance of a Water Treatment Plant in Ecuador: Hydraulic Resizing of the Treatment Units,” 2023.
- [11] J. Molinero, I. Cipriani-Avila, and M. Barrado, “Heavy metal concentrations in rivers and drinking water of Esmeraldas (Ecuador) under an intermittent water supply service,” *Environ. Monit. Assess.*, vol. 193, no. 12, 2021, doi: 10.1007/s10661-021-09579-w.
- [12] I. Cipriani-Avila *et al.*, “Heavy metal assessment in drinking waters of Ecuador: Quito, Ibarra and Guayaquil,” *J. Water Health*, vol. 18, no. 6, pp. 1050–1064, 2020, doi: 10.2166/wh.2020.093.
- [13] D. A. Capa Sarango and A. E. Valdivieso Palma, “Escuela Superior Politécnica,” p. 122, 2019.
- [14] D. Angamarca and L. Valarezo, “Determinación de la contaminación del recurso hídrico provocado por la actividad minera en la cuenca alta del Río Santa Rosa, provincia de El Oro,” Universidad Politécnica Salesiana, 2020.
- [15] INHAMI, “Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología | Ecuador,” 2022. <https://inamhi.wixsite.com/inamhi/novedades> (accessed Feb. 02, 2022).
- [16] P. E. F. J., and F. B., “Informe N° 1, Proyecto de Desarrollo Minero y Control Ambiental, Programa de Información Cartográfica y

- Geológica: Mapa escala 1: 200.000. Geology of the Cordillera Occidental of Ecuador between 3° S and 4° S. CODIGEM -BGS,” Quito - Ecuador, 1997.
- [17] S. R. Noble, J. A. Aspden, and R. Jemielita, “Northern Andean crustal evolution: New U-Pb geochronological constraints from Ecuador,” *GSA Bull.*, vol. 109, no. 7, pp. 789–798, Jul. 1997, doi: 10.1130/0016-7606(1997)109<0789:NACENU>2.3.CO;2.
- [18] J. Aspden, W. Bonilla, and P. Duque, *El Oro Metamorphic Complex Ecuador: Geology and Economic Minerals (Overseas Geology & Mineral Resources)*. British Geological Survey Overseas Geol. & Miner. 1995.
- [19] IIGE, “Hoja Geológica Santa Rosa de El Oro, hoja 37 escala 1:100 000.,” Quito - Ecuador, 2017.
- [20] T. John, E. E. Scherer, V. Schenk, P. Herms, R. Halama, and D. Garbe-Schönberg, “Subducted seamounts in an eclogite-facies ophiolite sequence: The Andean Raspas Complex, SW Ecuador,” *Contrib. to Mineral. Petrol.*, vol. 159, no. 2, pp. 265–284, 2010, doi: 10.1007/s00410-009-0427-0.
- [21] A. Valdivieso *et al.*, “Evaluación de la contaminación por elementos potencialmente tóxicos cerca de áreas mineras auríferas eb Santa Rosa (El Oro), Ecuador,” Puertollano, 2022.
- [22] Hach, “Phenolphthalein and Total Alkalinity Method 8221: Buret Titration,” pp. 1–6, 2017.
- [23] T. Method, “Hardness , Calcium,” pp. 1–8.
- [24] D. I. S. E. Method and F. Ise, “Direct ISE Method 0.1 to 10.0 mg/L F –,” pp. 1–8.
- [25] C. R. Method and P. Pillows, “Method 8192 Powder Pillows Test preparation Instrument-specific information,” no. 3, pp. 1–8.
- [26] Hach Company/Hach Lange GmbH, “SulfaVer 4 Method,” pp. 1–6, 2019.
- [27] Hach Company, “Chloride: Mercuric Thiocyanate Method 0.1 to 25.0 mg/L Cl –,” *Methods Chem. Anal. Water Wastewater*, no. edition 9, pp. 1–6, 2018.
- [28] R. L. Klein and C. Gibbs, “Nitrate Method 8039,” *Water Anal. Handb.*, vol. 584, no. 10, pp. 1–8, 2019.
- [29] MAE-TULSMA, “Texto Unificado de Legislación Secundaria Medio Ambiental. Ministerio de Ambiente de Ecuador.,” Quito, 2015.
- [30] WHO, “Guidelines for Drinking-water Quality, Fourth Edition Incorporating The First Addendum,” 2017.
- [31] INEN, “Norma Técnica Ecuatoriana INEN 1108 Sexta revisión - Agua para consumo humano,” Quito - Ecuador, 2020.
- [32] IGME, “Algunos constituyentes minoritarios Características fisico-químicas,” p. 33, 2000.
- [33] I. Hussain, N. Mubarak, J. Shabbir, T. Hussain, and M. Faisal, “Spatial Interpolation of Sulfate Concentration in Groundwater Including Covariates Using Bayesian Hierarchical Models,” *Water Qual. Expo. Heal.*, vol. 7, no. 3, pp. 339–345, 2015, doi: 10.1007/s12403-014-0154-2.
- [34] Y. Meride and B. Ayenew, “Drinking water quality assessment and its effects on residents health in Wondo genet campus, Ethiopia,” *Environ. Syst. Res.*, vol. 5, no. 1, pp. 1–7, 2016, doi: 10.1186/s40068-016-0053-6.
- [35] H. Mao, C. Wang, S. Qu, F. Liao, G. Wang, and Z. Shi, “Source and evolution of sulfate in the multi-layer groundwater system in an abandoned mine—Insight from stable isotopes and Bayesian isotope mixing model,” *Sci. Total Environ.*, vol. 859, no. July 2022, p. 160368, 2023, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.160368.
- [36] Y. G. Hidalgo, C. B. Espinosa, and H. V. Rodríguez, “Caracterización hidroquímica de las aguas de riego de la cuenca del río Naranjo , municipio Majibacoa , provincia Las Tunas Hydrochemical characterization of irrigation water of the Naranjo river watershed , municipality Majibacoa , province Las Tunas,” *Rev. Ciencias Técnicas Agropecu.*, vol. 21, no. 3, pp. 29–34, 2012.
- [37] S. A. Irigoien and R. Z. Galarza, “fuentes naturales de la comarca de Sakana (Navarra) Sarabe Arakama Irigoien Raquel Zufiaurre Galarza,” 2021.
- [38] C. Jiang, L. Cheng, C. Li, and L. Zheng, “A hydrochemical and multi-isotopic study of groundwater sulfate origin and contribution in the coal mining area,” *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, vol. 248, no. October, p. 114286, 2022, doi: 10.1016/j.ecoenv.2022.114286.
- [39] Bernardo Labs, “Parámetros Clave para Aguas de Pozos – BERNARDO LABORATORIOS.”
- [40] F. N. Atirah Affandi, F. Mohd Kusin, N. Aqilah Sulong, and Z. Madzin, “Hydrogeochemical assessment of mine-impacted water and sediment of iron ore mining,” *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 140, no. 1, 2018, doi: 10.1088/1755-1315/140/1/012023.
- [41] F. Pérez Moreno *et al.*, “Caracterización química de aguas subterráneas en pozos y un distribuidor de agua de Zimapán, Estado de Hidalgo, México,” *Hidrobiológica*, vol. 13, no. 2, pp. 95–102, 2003.
- [42] K. B. Githaiga, S. M. Njuguna, R. W. Gituru, and X. Yan, “Assessing heavy metal contamination in soils using improved weighted index (IWI) and their associated human health risks in urban, wetland, and agricultural soils,” *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 2021, doi: 10.1007/s11356-021-15404-1.