

Calidad hidrogeológica y seguridad para el consumo humano de las aguas subterráneas en chimborazo

Hydrogeological quality and safety for human consumption of groundwater in Chimborazo

Nancy Rocío Castillo¹, César Borja Bernal² & Clelia Naranjo Freire¹

¹ Universidad de Guayaquil, Facultad de Ciencias Naturales, carrera Geología.

² Universidad de Guayaquil, Facultad de Ciencias Naturales, carrera Ingeniería Ambiental

Recibido febrero 2026, aceptado mayo 2026, en línea 18 junio 2026.

Resumen

Se evaluó la calidad de agua subterránea en Chimborazo (Ecuador) mediante 36 muestras de vertientes, pozos, tanques, casas y grifos. El 100 % de los puntos incumplió al menos un límite de potabilidad (OMS/ARCA). Todos los tipos de fuente presentaron coliformes fecales (promedio 15,8 NMP/100 mL; máx. 40 NMP/100 mL) y concentraciones $> 0,01 \text{ mg L}^{-1}$ de arsénico (0,013-0,016 mg L^{-1}) y plomo (0,035-0,089 mg L^{-1}). La turbiedad alcanzó 45 NTU (CV 327 %) en vertientes. ANOVA, Kruskal-Wallis y correlación de Pearson no detectaron diferencias significativas entre fuentes, lo que indica un sistema de acuíferos volcánicos fracturados interconectados y una contaminación regional extendida. La correlación Fe-Pb ($r = 0,55$) sugiere lixiviación desde depósitos piroclásticos; la correlación negativa coliformes-Pb ($r = -0,61$) refleja distintos caminos de transporte. La homogeneidad estadística constituye una alerta sanitaria: toda el agua subterránea requiere tratamiento antes del consumo humano y la protección urgente de zonas de recarga.

Palabras clave: agua subterránea, calidad, Chimborazo, arsénico, plomo, coliformes fecales, contaminación regional, acuíferos volcánicos, tratamiento de agua.

Abstract

Ground-water quality was assessed across Chimborazo Province (Ecuador) using 36 samples from springs, tanks, wells, households and public taps. Every source failed at least one WHO/ARCA drinking-water limit. All source types contained fecal coliforms (mean 15.8 MPN/100 mL; max 40 MPN/100 mL) and exceeded 0.01 mg L^{-1} for arsenic (0.013-0.016 mg L^{-1}) and lead (0.035-0.089 mg L^{-1}). Turbidity reached 45 NTU (CV 327 %) in springs. ANOVA, Kruskal-Wallis and Pearson correlation detected no significant differences among source types, indicating interconnected volcanic-fractured aquifers and region-wide contamination. Iron-lead correlation ($r = 0.55$) suggests leaching from pyroclastic deposits; negative coliform-lead correlation ($r = -0.61$) reflects contrasting transport pathways. The statistical "non-difference" is a health warning: all ground water requires treatment before human use and recharge areas need urgent protection.

Keywords: ground-water quality, Chimborazo, arsenic, lead, fecal coliforms, regional contamination, volcanic aquifers, water treatment.

Introducción

El agua subterránea representa el 97% del agua dulce líquida disponible en el planeta (UNESCO, 2022); y en Ecuador es la principal fuente de abastecimiento rural. Sin embargo, su calidad está amenazada por la ausencia de infraestructura sanitaria, sobreexplotación de acuíferos y contaminación difusa (ARCA, 2024).

En la provincia de Chimborazo, el 68% de la población rural depende de agua subterránea no regulada (INEC, 2023), sin monitoreo sistemático de parámetros físico-químicos ni microbiológicos.

Estudios previos en la región andina han detectado arsénico $>0.01 \text{ mg/L}$ en acuíferos volcánicos (Ortega et al., 2021) y coliformes fecales en vertientes protegidas (Sotomayor, 2016). No obstante, existen escasos estudios estadísticos que comparen la calidad del agua subterránea entre tipos de fuente (vertientes, tanques, pozos, casas, grifos) en Chimborazo.

Por consiguiente, ¿existe diferencia significativa en la calidad microbiológica y química del agua subterránea entre vertientes, tanques, pozos, casas y grifos públicos en la provincia de Chimborazo?

* Correspondencia del autor:

E-mail: nancy.castillo@ug.edu.ec



Esta obra está bajo una licencia de creative commons: atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0. Los autores mantienen los derechos sobre los artículos y por tanto son libres de compartir, copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra.

Este análisis se justifica desde una perspectiva científica, ambiental y social, debido a la importancia estratégica del agua subterránea como fuente de abastecimiento para numerosas comunidades de la provincia de Chimborazo.

Este estudio se base en evaluar la calidad del agua subterránea en Chimborazo mediante análisis estadístico descriptivo e inferencial, según tipo de fuente y con base en los límites de la Norma ARCA (2024) y OMS (2011). En concordancia con este objetivo, se formulan los siguientes objetivos específicos:

Establecer la calidad de las aguas subterráneas de la provincia de Chimborazo a partir de sus principales parámetros de interés ambiental y sanitario.

Determinar las variaciones espaciales en la calidad del agua subterránea entre las distintas localidades de la provincia.

Tabla 1. Parámetros y criterios normativos para la calidad del agua en Ecuador

Tipo	Parámetro	Símbolo / Expresión	Unidad	Criterio
Físico	Potencial de hidrógeno	pH	—	6-7
	Turbiedad	—	NTU	100
Biológico	Coliformes fecales	NMP	NMP	1
Orgánico	Hidrocarburos totales	TPH	mg/L	0,2
	Aceites y grasas	Sustancias solubles en hexano	mg/L	0,3
Químico	Arsénico	As	mg/L	0,1
	Bario	Ba	mg/L	1
	Cadmio	Cd	mg/L	0,02
	Cianuro	CN ⁻	mg/L	0,1
	Cobre	Cu	mg/L	2
	Cromo hexavalente	Cr ⁶⁺	mg/L	0,05
	Demanda bioquímica de oxígeno	DBO ₅	mg/L	< 2
	Demanda química de oxígeno	DQO	mg/L	< 4
	Fluoruro	F ⁻	mg/L	1,5
	Hierro total	Fe	mg/L	1
	Mercurio	Hg	mg/L	0,0006
	Nitratos	NO ₃ ⁻	mg/L	50
	Nitritos	NO ₂ ⁻	mg/L	0,2
	Plomo	Pb	mg/L	0,01
	Selenio	Se	mg/L	0,01
	Sulfatos	SO ₄ ²⁻	mg/L	500

Nota. Extraído de Regulaciones del Sector Hídrico - Agencia de Regulación y Control del Agua [ARCA] (2024)

Diagnosticar el estado general de la calidad de las aguas subterráneas y su implicación para el consumo humano.

En los estudios de hidrogeología regional, la literatura indexada constituye la primera fuente de comparación y validación de resultados. Para la presente revisión se empleó Google Scholar (<https://scholar.google.com>) aplicando la cadena de búsqueda: agua subterránea (groundwater), análisis estadístico (statistical analysis) y Ecuador.

Del universo de 1.420 documentos recuperados entre 2010 y 2024, se seleccionaron con criterios de relevancia temporal, calidad metodológica y ajuste al objeto de estudio, dos trabajos que se describen a continuación:

La evaluación de la calidad del agua superficial realizado por Sotomayor (2016) en la cuenca del río Paute es a través del análisis con base a la técnica multivariable compuesta por algoritmos genéticos, componentes principales y regresión múltiple. Además, recurren a dos índices bióticos porque utilizan macroinvertebrados acuáticos en forma combinada -el ABI (*Andean Biotic Index*) con el BMWP (*Biological Monitoring Working Party*)- constituyéndose como una variable de tipo biológica para responder adecuadamente, y validada de manera sólida mediante la regresión por estar relacionada con el cambio del suelo según el coeficiente de determinación . La conclusión es que la vegetación en la ribera del río y lo heterogéneo del lecho son características integrales de la ecología de alto nivel, pero incluye, además, lo asociado que está con la contaminación, debido a la presencia de coliformes, amonio, turbiedad.

Guzhñay (2023) lleva a cabo el análisis de interacción entre aguas subterráneas y la laguna de Guabizhun ubicadas a 2.950 metros sobre el nivel del mar (m s. n. m.) mediante algunos parámetros relacionados con la temperatura, átomos o moléculas con carga eléctrica que se encuentran disueltos en el agua, isótopos estables con un mismo elemento químico con igual número de protones y diferente número de neutrones en su núcleo, y otros elementos radioactivos. Utilizando la prueba de Kruskal-Wallis y correlación de Spearman. Los resultados evidencian: (a) la relación inversa y significativa entre temperatura y conductividad eléctrica lo que explica la influencia de agua subterránea en la laguna y (b) la ausencia de relación radioactiva con el radón-222 (²²²Rn) como indicador geoquímico asociado a materiales sedimentarios no resulta suficiente para afirmar ausencia, pues influye factores como muestreo y tiempo (menor a 5 días), y por tanto, no permite determinar con solidez.

Según la Programa Mundial de la UNESCO para la Evaluación de los Recursos Hídricos se afirma que el 99 % del agua dulce en estado líquido en todo el planeta está almacenada en los denominados

Tabla 2. Unidades geomorfológicas y características ambientales
Fuente: Ministerio de Educación del Ecuador (2016); Leiva (2018); Wiese (1914); Bordino (2023).

Geo morfo logía	Altitud (m s. n. m.)	Clima	Vegetación y suelo	Importancia ambiental
Nevados o glaciares	> 4 500	Clima glacial, temperaturas muy bajas	Vegetación escasa o inexistente	Grandes reservas de agua dulce; regulación hídrica natural
Páramos	3 400 - 3 700	Clima frío y húmedo; presencia de heladas	Suelos fértiles; vegetación limitada	Regulación hídrica y almacenamiento de agua
Altiplanos y mesetas	> 3 600	Clima frío; alta variabilidad térmica diaria	Vegetación similar al páramo	Transición geomorfológica y climática; influencia en la recarga hídrica
Valles	< 2 000	Clima templado	Vegetación abundante; suelos fértiles	Asentamientos humanos y aprovechamiento agrícola

Fuente: Ministerio de Educación del Ecuador (2016); Leiva (2018); Wiese (1914); Bordino (2023).

acuíferos, y de este porcentaje, aproximadamente la mitad es destinada al consumo en los hogares y una cuarta parte a riego en la agricultura. No obstante, a nivel regional de América Latina, la explotación de agua subterránea representa menos del 30 % debido a la disponibilidad de aguas superficiales (Connor & Miletto, 2022).

La Organización Mundial de la Salud (OMS, 2017) establece cinco criterios para agua potable: (i) inocuidad microbiológica, (ii) desinfección, (iii) ausencia de contaminantes químicos por encima de valores de referencia, (iv) seguridad radiológica y (v) aceptabilidad (sabor, olor y apariencia). En Ecuador, la Agencia de Regulación y Control del Agua (ARCA, 2024) define estos umbrales en la Resolución No. 020-2024-ARCA, incluyendo 26 parámetros físicos, químicos y biológicos (tabla 1).

La Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AECID, 2017) define las aguas subterráneas como el agua almacenada en formaciones geológicas saturadas, la cual interviene en el ciclo hidrológico mediante procesos de recarga, almacenamiento y descarga.

López-Geta et al. (2009) clasifican los acuíferos en función de: (a) su grado de confinamiento (libres, semiconfinados y confinados), (b) la naturaleza del medio poroso (materiales consolidados y no consolidados) y (c) la litología (rocas ígneas, metamórficas o sedimentarias). Esta clasificación permite establecer la selección de métodos de exploración, como la prospección eléctrica en medios no consolidados o las técnicas sísmicas en rocas fracturadas.

Sahuquillo (2009) identifica dos diferencias principales en el comportamiento de los acuíferos. En primer lugar, las escalas temporales, debido a que estos sistemas pueden almacenar agua asociada a periodos de recarga promedio que oscilan entre 10 y 10³ años. En segundo lugar, la calidad del agua, influenciada por la baja velocidad de circulación (del orden de metros por año), condición que favorece procesos de mineralización natural. Sin embargo, esta característica también incrementa la susceptibilidad a la intrusión salina cuando se produce sobreexplotación, entendida como una extracción anual superior al 5 % del espesor saturado del acuífero.

Larroza y Centurión (1995) proponen tres clases de agua subterránea según su contenido de sales: dulce (< 1 000 mg L⁻¹ de TDS), salobre (1 000-10 000 mg L⁻¹) y salina (> 10 000 mg L⁻¹). Estos límites son establecidos por la norma INEN 1108 (2019) para la clasificación de aguas destinadas al consumo humano en Ecuador.

Tabla 3. Relieve terrestre de la Provincia de Chimborazo

Nevados	Páramos	Mesetas altiplanos	Valles
Altar	Achupallas	Cajabamba	Guano
Chanloor	Cubilín	Colta	Penipe
Chimborazo	Urbina	Guamote	Riobamba
Cruzpungo			
Cubilín			
Lalagusto			
Ñaupán			

Provincia de Chimborazo.

La provincia (6 500 km²; 1,8 M hab.) presenta un relieve volcanogénico conformado por cuatro unidades geomorfológicas (tabla 2): (i) nevados (> 4 500 m s.n.m.), (ii) páramos (3 400-3 700 m s.n.m.), (iii) mesetas interandinas (3 000-3 600 m s.n.m.) y (iv) valles intramontanos (< 2 000 m s.n.m.) (JICA, 2004; BGE, 2016). Las precipitaciones varían de 14 00 mm año⁻¹ en la vertiente oriental a 600 mm año⁻¹ en la occidental, con una recarga potencial estimada de 1,1 km³ año⁻¹ (Senplades, 2022).

De acuerdo está clasificación geomorfológica (tabla 2), se identifican las principales unidades de relieve en la provincia de Chimborazo, las cuales se distribuyen espacialmente en nevados, páramos, mesetas-altiplanos y valles, tal como se detalla en la tabla 3.

Características geológicas de la provincia Chimborazo para la formación de aguas subterráneas

El estudio de prefactibilidad desarrollado por la Agencia de Cooperación Internacional de Japón (JICA, 2004) integró sondeos eléctricos verticales (SEV; n = 312) y técnicas de resistividad eléctrica con la finalidad de delimitar áreas de interés hidrogeológico en la provincia de Chimborazo. A partir de este análisis, se identificaron cuatro zonas con comportamiento hidrogeológico diferenciado, las cuales constituyen la base técnica para el diseño de la red de monitoreo propuesta en la presente investigación.

La prospección eléctrica constituye una herramienta para la identificación de acuíferos, basada en el análisis de las propiedades físicas del subsuelo. Según Geotechnical (2021), esta técnica permite reconocer: (i) variaciones de resistividad y conductividad eléctrica, indicadores indirectos del tipo de material geológico y de su grado de saturación y (ii) procesos electroquímicos naturales asociados a la presencia de electrolitos en los poros del suelo, que contribuyen a la detección de formaciones con capacidad de almacenamiento de agua subterránea.

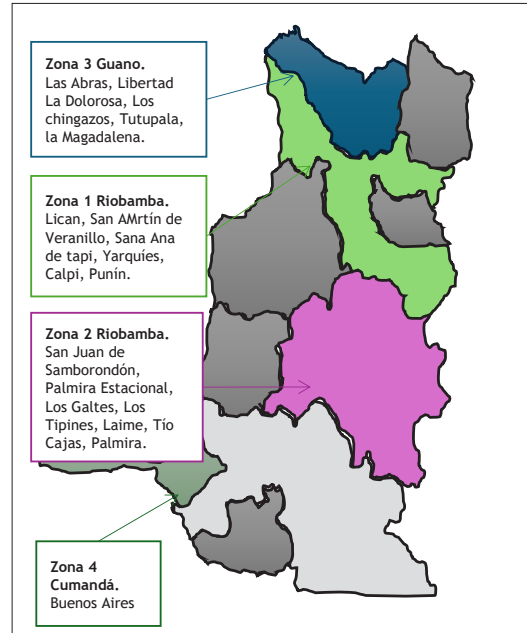
De acuerdo con los resultados por JICA (2004), la hidrogeología de la provincia de Chimborazo está condicionada por su origen volcanogénico; amplias áreas se encuentran cubiertas por depósitos derivados de erupciones volcánicas, con permeabilidad y capacidad de almacenamiento variables en el espacio. En los sectores de alta montaña, donde las precipitaciones son reducidas, la acumulación de agua subterránea es limitada; en contraste, en zonas de menor altitud o con presencia de sedimentos no consolidados, las condiciones favorecen la recarga y el almacenamiento.

El análisis permitió delimitar las siguientes zonas hidrogeológicas (figura 1):

Zona 1: Riobamba.

Corresponde a un sector dominado por depósitos

Figura 1 Ubicación de las Zonas y sus comunidades en la provincia de Chimborazo



Nota. Extraído y adaptado de la Agencia de Cooperación Internacional del Japón [JICA] (2004)

piroclásticos y flujos de lodo volcánico, con resistividades relativamente bajas (15-40 Ω ·m), lo que sugiere la presencia de un acuífero freático somero, localizado a profundidades menores a 25 m. La identificación de un estrato de pómez blanquecino, altamente permeable, indica una rápida infiltración de la precipitación. Además, los valores de resistividad reducidos asociados a lineamientos tectónicos permiten concluir la presencia de fallas geológicas, que favorecen la captación de agua subterránea.

Zona 2: Guano.

Esta zona está conformada por lavas andesíticas fracturadas, provenientes principalmente del volcán Chimborazo, con valores de resistividad entre 80 y 200 Ω ·m. Aunque la litología sugiere condiciones desfavorables para la formación de acuíferos, las fracturas profundas asociadas a las coladas de lava facilitan la infiltración del agua resultante del deshielo de los nevados, permitiendo la formación de reservorios subterráneos. El potencial de almacenamiento en esta zona es aproximadamente 10 hm³.

Zona 3: Guamote.

Se caracteriza por la presencia de tobas volcánicas semiconsolidadas, con resistividades moderadas (20-60 Ω ·m), ubicadas en un altiplano cerrado de mayor antigüedad geológica que la Zona 1 (Riobamba). Hidrológicamente, el área se encuentra delimitada por los ríos Chambo y Chanchán. La combinación de permeabilidad aceptable y resistividad relativamente baja indica la existencia de aguas subterráneas,

con una recarga asociada al deshielo. Sin embargo, la presencia de escarpes y precipicios dificulta la observación directa de manantiales y complica los estudios hidrogeológicos detallados.

Zona 4: Cumandá.

Situada hacia la transición con la región Costa, esta zona presenta relieves bajos y terrenos planos, mayor precipitación anual y abundante cobertura vegetal. Predominan sedimentos cuaternarios no consolidados, principalmente gravas y arenas, con alta permeabilidad ($K \approx 5 \times 10^{-4} \text{ m s}^{-1}$), favoreciendo a la conductividad hidráulica. Estas condiciones convierten a Cumandá en el sector con mayor potencial para la acumulación y explotación de aguas subterráneas dentro de la provincia.

La zonificación propuesta por JICA (2004) proporciona una base técnica para comprender la distribución espacial de los acuíferos en la provincia de Chimborazo y sustenta la planificación de estrategias de monitoreo y gestión de los recursos hídricos subterráneos (figura 1).

Materiales y Método

La investigación se desarrolló con un diseño cuantitativo de tipo descriptivo-exploratorio, orientado a la caracterización de la calidad del agua subterránea en la provincia de Chimborazo.

Este diseño permitió comparar sistemáticamente las variables físicas, químicas y biológicas, sin intervención directa ni alteración de las condiciones naturales del recurso hídrico. De manera complementaria, se emplearon los métodos: analítico-sintético e inductivo-deductivo.

El método analítico permitió la identificación y medición de los componentes físico, químico y biológico del agua subterránea mediante pruebas hidroquímicas, mientras que el método inductivo-deductivo facilitó la identificación de regularidades y la formulación de inferencias generales a partir de los resultados.

La población de estudio estuvo conformada por las fuentes de abastecimiento de agua subterránea utilizadas para consumo humano en comunidades rurales y urbanas de la provincia de Chimborazo.

Tabla 4. Muestra para la extracción de agua

Comuna	Fuente	Codif.	Comuna	Fuente	Codif.
Licán	Vertiente	A	Riobamba	Vertiente	A
Calpi	Vertiente	A	Licán	Tanque	B
Punín	Vertiente	A	Yaruquíes	Tanque	B
Palmira Estación	Vertiente	A	Punín	Tanque	B
Palmira Estación	Vertiente	A	Buenos Aires	Tanque	B
Palmira Estación	Vertiente	A	Jatunloma	Tanque	B
Galte Lime	Vertiente	A	Las Abras	Tanque	B
Tipín San Vicente	Vertiente	A	Tutupala	Tanque	B
Tipín San José	Vertiente	A	Palmira	Tanque	B
Tipín San Juan	Vertiente	A	Palmira	Tanque	B
Chingazo	Vertiente	A	San Martín de Veranillo	Casa	C
Chingazo	Vertiente	A	La Dolorosa	Casa	C
Chingazo	Vertiente	A	San Borondon	Casa	C
Chingazo	Vertiente	A	Riobamba	Pozo	D
Maldareña	Vertiente	A	Yaruquíes	Pozo	D
Maldareña	Vertiente	A	San Gabriel	Pozo	D
Lime Totorillos	Vertiente	A	Santa Ana	Grifo público	E
Lime Totorillos	Vertiente	A	Tío Cajas	Grifo público	E

Nota. Adaptado de la Agencia de Cooperación Internacional del Japón [JICA] (2004)

Tabla 5. Parámetros de calidad del agua para consumo humano y límites permisibles

Categoría	Parámetro de control	Unidad	Límite permisible
Físico	Potencial de hidrógeno (pH)	Unidades pH	6,5 - 8,5
	Turbiedad	NTU	< 1,0
Biológico	Coliformes fecales	NMP/100 mL	0
	Arsénico (As)	mg/L	≤ 0,01
	Plomo (Pb)	mg/L	≤ 0,01
	Fluoruro (F ⁻)	mg/L	≤ 1,5
Químico	Nitratos (NO ₃ ⁻)	mg/L	≤ 50
	Hierro total (Fe)	mg/L	≤ 0,30
	Sulfatos (SO ₄ ²⁻)	mg/L	≤ 250

Nota. Adaptado de la Agencia de Cooperación Internacional del Japón [JICA] (2004)

La selección de la muestra se realizó mediante un muestreo no probabilístico de tipo intencional, justificado por restricciones logísticas y limitaciones de acceso a los puntos de captación. Se analizaron un total de 36 muestras, correspondientes a 19 vertientes (código A), nueve tanques de almacenamiento (código B), tres viviendas (código C), tres pozos (código D) y dos grifos públicos (código E), considerando cada muestra como un punto de captación independiente (tabla 4).

Variables y parámetros analizados

Se consideraron variables físicas (pH y turbiedad), biológicas (coliformes fecales) y químicas (arsénico, cobre, flúor, hierro, nitratos, plomo y sulfatos), seleccionadas conforme a los criterios establecidos por la Agencia de Regulación y Control del Agua (ARCA) y las directrices de la Organización Mundial de la Salud para la calidad del agua destinada al consumo humano (tabla 5).

Tratamiento de datos y análisis estadístico

Los valores no detectados (ND) se sustituyeron por la mitad del límite de detección (LOD/2), procedimiento recomendado para evitar sesgos en el análisis estadístico. Previo a la aplicación de pruebas inferenciales, se evaluó la distribución de los datos mediante la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk.

El procesamiento de los datos se realizó mediante estadística descriptiva, calculándose medidas de tendencia central y dispersión. Posteriormente, se aplicaron pruebas de estadística inferencial, incluyendo el análisis de varianza (ANOVA) para la comparación de medias, la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis para la comparación de medianas y la correlación de Pearson para la evaluación de

la asociación entre variables. Se adoptó un nivel de significancia estadística de 0,05. Debido a la naturaleza exploratoria del estudio y al tamaño reducido de algunos grupos muestrales, los resultados inferenciales se interpretaron considerando las limitaciones propias del diseño y de la estructura muestral.

De manera complementaria, se emplearon los método analítico-sintético e inductivo-deductivo. El método analítico permitió la identificación y cuantificación de los componentes físico-químico y biológicos del agua subterránea, mientras que el enfoque inductivo-deductivo facilitó la identificación de patrones, regularidades y la formulación de inferencias generales a partir de los resultados obtenidos.

La población de estudio estuvo constituida por las fuentes de abastecimiento de agua subterránea utilizadas para consumo humano en comunidades rurales y urbanas de la provincia de Chimborazo. La selección muestral se efectuó de manera intencional, considerando cada punto de captación como una unidad de análisis independiente. La distribución de las muestras por comunidad y tipo de fuente se presenta en la tabla 4.

Resultados

Para establecer si las aguas subterráneas de Chimborazo son aptas para consumo humano se determinó pH, turbiedad, coliformes fecales y químicos prioritarios (arsénico, plomo, flúor, hierro, nitratos y sulfatos) en 36 muestras provenientes de vertientes, pozos, tanques, casas y grifos públicos (tabla 4). Los valores se compararon con los límites de la OMS/INEN y se evaluaron mediante ANOVA, Kruskal-Wallis y correlación de Pearson con el fin de identificar diferencias entre fuentes y posibles asociaciones entre contaminantes.

3.1. Análisis físicos

El pH promedio de las cinco fuentes evaluadas se encuentra en el rango aceptable para agua de consumo humano (6,5-8,5), de acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS). Sin embargo, los pozos presentan la mayor variabilidad con un coeficiente de variación del 16,16 %, lo que indica una mayor dispersión de los valores en comparación con las demás fuentes (tabla 6).

En relación con la turbiedad, las vertientes registran los valores más elevados y la mayor variabilidad, con un promedio de 3,11 NTU, un coeficiente de variación del 327,5 % y un valor máximo de 45 NTU, superando el límite normativo de 1 NTU establecido para agua potable. Aunque parte de las mediciones individuales se encuentran por debajo del límite normativo, la ocurrencia de valores extremos sugiere un riesgo potencial para la calidad del agua en este tipo de fuente.

Desviación estándar (SD) por fuente (el valor promedio

Tabla 6. Parámetros físicos de las aguas subterráneas.

Prueba	Fuente	Prom.	Desv.	Coef.	Min.	Med.	Máx.
pH	E	7,633	0,586	7,68	7,2	7,4	8,3
	D	7	1,131	16,16	6,2	7	7,8
	C	7,5	0,529	7,06	6,9	7,7	7,9
	B	7,056	0,422	5,98	6,6	6,8	7,6
	A	7,181	0,574	7,99	6,4	7,2	8
Turbiedad	E	0,653	0,373	57,07	0,31	0,6	1,05
	D	1,05	0,919	87,55	0,4	1,05	1,7
	C	0,307	0,11	35,92	0,2	0,3	0,42
	B	0,694	0,45	64,84	0,3	0,45	1,5
	A	3,11	10,2	327,5	0,23	0,5	45

Nota. (NTU = Unidad Nefelométrica de Turbiedad)
Limite normativo: pH 6,5 - 8,5 (WHO); turbiedad ≤ 1 NTU (WHO) para agua potable.

Tabla 7. Coliformes fecales (NMP/100 mL)

Prueba	Fuente	Prom.	Desv.	Coef.	Min.	Med.	Máx.
Coliformes Fecales	E	*	*	*	*	*	*
	D	4	*	*	4	4	4
	C	*	*	*	*	*	*
	B	2,2	*	*	2,2	2,2	2,2
	A	15,84	14,89	94,03	2,2	16	40

Nota: Limite: 0 NMP/100 mL (WHO, ausencia). * Sin recuperación estadística por falta de datos.

Tabla 8. Evidencia de arsénico

Prueba	Fuente	Prom.	Desv.	Coef.	Min.	Med.	Máx.
Arsénico	E	0,016	0,004	27,44	0,013	0,015	0,021
	D	0,009	0,004	47,14	0,006	0,009	0,013
	C	0,008	*	*	0,008	0,008	0,008
	B	0,014	0,007	53,12	0,006	0,011	0,025
	A	0,013	0,007	50,46	0,001	0,014	0,03

Nota. Resultados del análisis

Tabla 9. Evidencia de cobre

Prueba	Fuente	Prom.	Desv.	Coef.	Min.	Med.	Máx.
Cobre	E	0,296	0,271	91,56	0,019	0,308	0,56
	D	0,034	0,026	74,87	0,016	0,034	0,052
	C	0,019	*	*	0,019	0,019	0,019
	B	0,06	0,079	132,2	0,019	0,021	0,179
	A	0,158	0,11	69,92	0,028	0,12	0,303

Nota. Resultados del análisis

más/menos la variabilidad típica de los datos.)

3.2. Análisis biológicos

Las muestras procedentes de fuentes de vertientes “A” evidencian contaminación fecal con promedio de 15,84 NMP/100 mL, superando ampliamente el límite normativo de ausencia total establecido por la

Tabla 10. Evidencia de flúor

Prueba	Fuente	Prom.	Desv.	Coef.	Min.	Med.	Máx.
Flúor	E	0,907	0,35	38,59	0,63	0,79	1,3
	D	0,83	0,453	54,52	0,51	0,83	1,15
	C	0,873	0,076	8,75	0,79	0,89	0,94
	B	15,4	43,7	284,9	0,5	0,8	132
	A	0,943	0,291	30,84	0,6	0,88	1,64

Nota. Resultados del análisis

Tabla 11. Evidencia de hierro

Prueba	Fuente	Prom.	Desv.	Coef.	Min.	Med.	Máx.
Hierro	E	0,032	0,025	78,31	0,006	0,034	0,056
	D	0,065	0,007	10,88	0,06	0,065	0,07
	C	0,099	0,132	133,1	0,007	0,04	0,25
	B	0,059	0,039	66,91	0,003	0,05	0,11
	A	0,053	0,043	82,3	0,001	0,048	0,16

Nota. Resultados del análisis

Tabla 12. Evidencia de nitrato

Prueba	Fuente	Prom.	Desv.	Coef.	Min.	Med.	Máx.
Nitratos	E	0,08	0,04	49,2	0,04	0,082	0,119
	D	0,392	0,449	114,4	0,075	0,392	0,71
	C	0,347	0,206	59,28	0,15	0,33	0,56
	B	0,103	0,139	135,7	0,012	0,053	0,46
	A	0,226	0,233	103,3	0,007	0,187	0,96

Nota. Resultados del análisis

Tabla 13. Evidencia de plomo

Prueba	Fuente	Prom.	Desv.	Coef.	Min.	Med.	Máx.
Plomo	E	0,089	0,072	81,2	0,006	0,123	0,138
	D	0,062	*	*	0,062	0,062	0,062
	C	*	*	*	*	*	*
	B	0,043	0,032	74,25	0,002	0,048	0,1
	A	0,035	0,031	88,07	0,002	0,024	0,106

Nota. Resultados del análisis

Tabla 14. Evidencia de sulfato

Prueba	Fuente	Prom.	Desv.	Coef.	Min.	Med.	Máx.
Sulfatos	E	15,24	10,02	65,74	3,7	20,33	21,7
	D	33,7	14,3	42,38	23,6	33,7	43,8
	C	90,5	64,7	71,46	16,5	118,7	136,2
	B	26,9	47,2	175,8	0,9	7,6	149
	A	33,27	29,97	90,09	0,46	28,6	93,4

Nota. Resultados del análisis

OMS. Además, se ubica inferiormente alejado de valor máximo de 40 NMP/100 mL que se ha encontrado. Descriptivamente, el escaso número de observaciones limitó el cálculo de estadísticos, pero los valores permiten confirmar presencia de contaminantes

el valor máximo de 0,062 mg L⁻¹ siendo el más bajo de todos. En este caso, la presencia de plomo en el agua representa un riesgo sanitario relevante (tabla 13).

La presencia promedio de sulfato en cada una de las fuentes de agua no supera el límite de 250 mg L⁻¹. Aunque, está más presente en los hogares con 90,5 mg L⁻¹ y subterráneas con 33,27 mg L⁻¹. En los hogares se registra valor máximo de sulfato en 136,2 mg L⁻¹ y cuya mediana está cercana con 118,7 mg L⁻¹. De esta manera, el sulfato no es un peligro, pero es un riesgo que requiere control (tabla 14).

Prueba de ANOVA

El análisis de varianza (ANOVA) de una vía y con nivel de significancia ($\alpha = 0,05$) tiene por objetivo de evaluar la igualdad de las medias por cada parámetro correspondiente a las características físicos, biológicos y químicos del agua entre las distintas fuentes de abastecimiento. Las hipótesis estadísticas planteadas fueron:

Hipótesis nula (H₀): No existe igualdad significativa entre los valores promedios de los parámetros evaluados.

Hipótesis alternativa (H₁): Si existe igualdad significativa entre los valores promedios de los parámetros evaluados.

Los resultados muestran que las probabilidades (valor-p) correspondiente a cada parámetro logra superar el nivel de significancia y como tal, no se rechaza H₀. En consecuencia, se afirma que no hay evidencia estadísticamente significativa para señalar que los valores medios de cada parámetro difieran (tabla 15).

Prueba de Kruskal-Wallis

Se aplicó la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis con nivel de significancia ($\alpha = 0,05$) y con la finalidad de evaluar la igualdad de medianas de los parámetros

Tabla 15. Prueba ANOVA de igualdad de medias ($\alpha = 0,05$)

N°	Parámetro	Valor F	Valor-p	A	Decisión H ₀
1	pH	0,87	0,493	0,05	Acepta
2	Turbiedad	0,23	0,922	0,05	Acepta
3	Coliformes fecales	0,53	0,627	0,05	Acepta
4	Arsénico	0,46	0,766	0,05	Acepta
5	Cobre	1,93	0,154	0,05	Acepta
6	Flúor	0,71	0,590	0,05	Acepta
7	Hierro	0,72	0,585	0,05	Acepta
8	Nitratos	1,52	0,221	0,05	Acepta
9	Plomo	1,79	0,182	0,05	Acepta
10	Sulfatos	2,00	0,118	0,05	Acepta

Nota. Resultados del análisis no paramétrico de Kruskal-Wallis aplicado a los parámetros evaluados.

biológicos (tabla 7).

3.3. Análisis químicos

Las concentraciones medias de arsénico son más elevadas en las fuentes de vertientes, tanques y grifo que superan el límite de 0,01 mg L⁻¹. Incluso, los pozos con media de 0,009 están cercano a dicho límite. Solo el agua de las casas marca valor inferior de 0,008. No obstante, los valores máximos evidencia presencia de arsénico, excepto en las casas, donde el agua ya ha sido tratada (tabla 8). El promedio de cobre encontrado en cada una de las fuentes analizadas está por debajo del límite aceptable a 2 mg L⁻¹. Esto incluye el resto de los referentes estadísticos. Por tanto, el no hay riesgo (tabla 9).

El promedio de flúor en el tanque es mayor que el resto de las fuentes, porque supera con creces el límite permitido de 1,5 mg L⁻¹. Incluso, se ha detectado niveles exageradamente altos en los altos como marca el valor 132 mg L⁻¹, pero también existe evidencia de máximos en las vertientes subterráneas de 1,64 mg L⁻¹ (tabla 10).

Las concentraciones promedio de hierro correspondientes a todas las fuentes superan el límite de 0,30 mg L⁻¹. Solo la fuente del grifo registra el valor medio más bajo de 0,032 mg L⁻¹. La presencia más fuerte se encuentra en los hogares con media de 0,99 mg L⁻¹ (tabla 11).

El nivel promedio de nitrato de cada fuente de agua no supera el límite de 50 mg L⁻¹ y tampoco sus valores máximos. En este sentido, no existe riesgo sanitario a considerar (tabla 12).

Los niveles promedio y medianos de plomo superan el límite de 0,01 mg L⁻¹. También, se registra ausencia de valor en la fuente de las casas. La fuente de agua que se encuentran en los pozos es donde se registró

Tabla 16. Resultados de la prueba de Kruskal-Wallis ($\alpha = 0,05$)

N°	Parámetro	Estadístico H (ajustado por empates)	Valor-p	A	Decisión H ₀
1	pH	3,17	0,530	0,05	Acepta
2	Turbiedad	3,68	0,452	0,05	Acepta
3	Coliformes fecales	2,16	0,340	0,05	Acepta
4	Arsénico	2,96	0,564	0,05	Acepta
5	Cobre	7,86	0,097	0,05	Acepta
6	Flúor	1,06	0,900	0,05	Acepta
7	Hierro	1,97	0,742	0,05	Acepta
8	Nitratos	6,22	0,183	0,05	Acepta
9	Plomo	2,68	0,443	0,05	Acepta
10	Sulfatos	4,85	0,303	0,05	Acepta

Nota. Resultados del análisis no paramétrico de Kruskal-Wallis aplicado a los parámetros evaluados

Tabla 17. Coeficientes de correlación de Pearson (r)

Pruebas	pH	Turbiedad	Coliformes Fecales
Turbiedad	28,0%		
Coliformes Fecales	-14,4%	-21,9%	
Arsénico	-11,5%	-7,7%	-37,9%
Cobre	18,6%	-14,8%	-21,2%
Flúor	-11,9%	-3,5%	-39,1%
Hierro	28,6%	7,3%	-53,2%
Nitratos	22,2%	0,3%	-38,8%
Plomo	44,0%	50,7%	-61,3%
Sulfatos	36,9%	12,8%	-10,1%
	Arsénico	Cobre	Flúor
Cobre	7,0%		
Flúor	-14,0%	37,0%	
Hierro	10,8%	-46,8%	-18,2%
Nitratos	-7,0%	-30,7%	-11,0%
Plomo	-4,0%	-2,6%	10,2%
Sulfatos	-0,7%	-15,0%	-14,3%
	Hierro	Nitratos	Plomo
Nitratos	41,7%		
Plomo	54,5%	0,9%	
Sulfatos	27,1%	23,7%	0,8%

Nota. Coeficientes de correlación de Pearson (r) entre los parámetros evaluados.

físicos, biológicos y químicos del agua subterránea entre los distintos tipos de fuentes analizadas. Las hipótesis fueron las siguientes:

Hipótesis nula (H₀): Las medianas de los parámetros evaluados son iguales entre las diferentes fuentes.
Hipótesis alternativa (H₁): Al menos una de las medianas difiere entre las fuentes evaluadas.

Los resultados señalan que todas las variables analizadas con sus respectivos valores probabilísticos (valor-p) son superiores a 0,05 y por tanto, no se rechaza en ningún caso H₀, indicando que es estadísticamente significativa afirmar que no hay diferencia entre los valores medianos por cada tipo de fuente de agua subterránea (tabla 16).

Correlación de Pearson

La correlación de Pearson se empleó para analizar la relación lineal entre los parámetros físicos, biológicos y químicos del agua subterránea (tabla 17).

Los resultados evidencian una correlación negativa moderada entre coliformes fecales y plomo (r = -0,613), lo que indica que mayores concentraciones de plomo se asocian con menores niveles de coliformes fecales. Esta relación corresponde al coeficiente de mayor magnitud observado en la matriz

de correlación.

Se identificó una correlación positiva moderada entre hierro y plomo (r = 0,545), lo que sugiere una tendencia conjunta de incremento entre ambos elementos, posiblemente asociada a condiciones geoquímicas similares.

La relación entre turbiedad y nitratos fue nula (r = 0,003), lo que indica la ausencia de asociación lineal entre estas variables. De manera similar, la correlación entre arsénico y sulfatos presentó un coeficiente negativo muy bajo (r = -0,007), evidenciando una relación débil sin relevancia analítica.

En general, la mayoría de las correlaciones observadas se ubicaron en rangos débiles a moderados, lo que sugiere que los parámetros evaluados presentan, en su mayoría, comportamientos independientes, con asociaciones puntuales que podrían estar relacionadas con procesos hidrogeoquímicos locales.

Discusión

No se observaron diferencias significativas entre vertientes, pozos, tanques y grifos según las pruebas ANOVA y Kruskal-Wallis. Esto va acorde con el escenario esperado entre los sistemas hidrológicos heterogéneos. Esto indica que los niveles de contaminación no corresponden a sitio puntual o de su forma de captación del agua, más bien es un fenómeno regional.

Los hallazgos de Sotomayor (2016) identifican variaciones en aguas superficiales de la cuenca del Paute responde a su localidad, mientras que JICA (2004) los acuíferos volcánicos fracturados en el Chimborazo funcionan como un único compartimento hidrodinámico. Sin embargo, los valores estadísticos homogéneos demuestran degradación generalizada en todas las fuentes, pero no indican calidad en el agua. También, se evidencia presencia de coliformes fecales en las aguas subterráneas y se transmite en por las vías de vertientes, tanques y grifos transmitidos por las lluvias, lo que es típico de acuíferos someros en medios volcánicos fracturados (JICA, 2004). La falta de diferencia estadística en medias y medianas de cada parámetro del agua pone en evidencia que la contaminación por coliformes puede ser sistémica, dada la infraestructura desde los pozos y vertientes, ya que carece de medidas técnicas recomendadas por el ARCA (2024) que impiden la infiltración de aguas residuales como sellado sanitario, perímetros de protección y saneamiento domiciliario.

Los contenidos de arsénico y plomo superan el límite de 0,01 mg L⁻¹ (OMS/ARCA) en ≥ 80 % de las fuentes, con promedios de 0,013-0,016 mg L⁻¹ (As) y 0,035-0,089 mg L⁻¹ (Pb). La ausencia de diferencias estadísticas entre tipos de fuente sugiere que la contaminación se transmite a través de la red de fracturas que conectan los acuíferos. La relación hierro-plomo (r = 0,55) es positiva y sugiere lixiviación

Tabla 18. Contraste de hallazgos con estudios en Ecuador andino

Parámetro / estudio	Sotomayor (2016)	Guzhña (2023)	Chimborazo (este trabajo)
Escala de variabilidad	Alta (uso de suelo)	Moderada (trazadores)	Nula (homogénea)
Nitratos (mg L ⁻¹)	15-45	< 2	0,007-0,96 (mediana 0,19)
Tiempo de residencia	Horas a días	< 5 días	< 5 días
Metales (As, Pb)	No reportados	No reportados	As 0,013-0,030; Pb 0,035-0,089
Contaminación dominante	Difusa agrícola	Flujo preferencial	Mixta: litológica + fecal

Nota: NMP = Número más probable; OMS/ARCA = Organización Mundial de la Salud / Agencia de Regulación Ambiental. Los datos de Sotomayor (2016) y Guzhña (2023) se presentan para comparación con los resultados obtenidos en este estudio.

desde depósitos piroclásticos ricos en minerales. La relación coliforme-plomo ($r = -0,61$) es negativa y son diferentes formas de transporte contaminante, pues las lluvias transportan rápidamente microorganismos y el plomo va lentamente por la roca.

Los resultados por parte de Guzhña (2023) en la laguna Guabizhun encuentra radioactividad según radón ²²²Rn con tiempo menor a cinco días utilizando. En el caso de las aguas subterráneas del Chimborazo presentan alta turbiedad; no obstante, la ausencia de relación entre turbiedad y nitratos ($r = 0,003$) indica ausencia de correspondencia, es decir, la contaminación por factores microbiológicos y la actividad agrícola siguen sus propias rutas.

Por parte de Ortega et al. (2021) reportan concentraciones de arsénico en acuíferos volcánicos andinos siendo una característica regional. La relación plomo-coliformes ($r = -0,61$) van en dirección opuesta y esto indica el plomo puede afectar a los parásitos, pero no los elimina. La relación hierro-plomo ($r = 0,55$) logran entenderse porque van en el mismo sentido y posiblemente con un origen común, ricos en piritita y galena como detecta JICA (2004) para la Zona 1 (Riobamba). Sin embargo, los contenidos de arsénico y plomo superan el valor de referencia determinado por la OMS y el ARCA.

Las aguas subterráneas en Chimborazo están contaminadas y saturadas en elementos microbióticos y químicos, ya que el sistema volcánico fracturado constituye una unidad hidroquímica única. A diferencia de las aguas superficiales que pueden ser mitigadas por las variaciones locales. Sin embargo, el agua subterránea necesita de ser tratada y las zonas de descarga requiere ser protegidas junto a una debida reducción de emisiones locales contaminantes. Como parte de medidas urgentes de salud pública.

La comparación entre los estudios encontrados muestra las diferencias (tabla 18). Los resultados muestran que, a diferencia de aguas superficiales estudiadas por Sotomayor (2016), donde la

variabilidad espacial era alta y dependía del uso del suelo y de descargas subterráneas analizadas por Guzhña (2023), donde la variabilidad era moderada y controlada por trazadores, el acuífero de Chimborazo presenta homogeneidad en todos los parámetros evaluados. Esto puede indicar que los contaminantes se mezclan a escala provincial y que la variabilidad es principalmente intra-acuífero, no entre fuentes individuales. Dado el tamaño muestral reducido en algunos grupos ($n \leq 3$) y la ausencia de controles espaciales, no puede afirmarse con certeza que todas las captaciones sean igualmente riesgosas; si es razonable esperar que la contaminación sea frecuente en acuíferos someros de origen volcánico. Hasta que se disponga de un muestreo más denso y estratificado, la precaución obliga a tratar cualquier nueva fuente como potencialmente no apta.

Conclusión

Los resultados muestran que no existen diferencias estadísticamente significativas entre los distintos tipos de fuente de agua subterránea (vertientes, pozos, tanques, casas y grifos públicos) en Chimborazo, tanto para parámetros físicos, químicos como microbiológicos. Esto evidencia que la contaminación del agua subterránea es regional y sistémica, o asociada a un tipo específico de captación. El acuífero volcánico fracturado funciona como una unidad hidroquímica única, donde los contaminantes se mezclan y distribuyen de manera homogénea.

Se identificaron concentraciones de arsénico y plomo que superan los límites recomendados. La presencia de coliformes fecales indica contaminación microbiológica. La combinación de contaminación química y biológica sugiere un riesgo para la salud humana, independiente del tipo de fuente. Por consiguiente, de debe tratar el agua para consumo.

La turbiedad se relaciona con la geología fracturada de los volcanes en la región, así como la infiltración rápida de aguas superficiales tras precipitaciones, lo que permite la entrada de microorganismos a los acuíferos.

Las correlaciones entre parámetros indican rutas de transporte distintas: la contaminación microbiológica se asocia a flujos rápidos tras lluvias, mientras que los metales pesados se movilizan lentamente por la matriz rocosa.

El análisis estadístico no permite detectar diferencias entre las distintas fuentes de agua, pero el limitado tamaño muestral impide descartar variaciones locales. Mientras tanto, la precaución sanitaria impone tratar todas las aguas subterráneas antes del consumo y proteger las zonas de recarga como medida de salud pública.

Recomendaciones

Emplear trazadores como radón-222 (^{222}Rn) y análisis isotópicos para estimar la dinámica de recarga y determinar proporciones diferenciales entre de agua reciente y antigua.

Realizar ensayos de columna con muestras de tobas y pómez para determinar la velocidad de liberación de arsénico y plomo en contextos distintos de pH.

Priorizar la conservación y manejo de las áreas de recarga, ya que la infiltración de aguas residuales persiste y, las intervenciones puntuales son insuficientes.

Establecer un plan de seguimiento que distinga entre eventos de contaminación aguda y exposición crónica geoquímica, son sus debidos ajustes según vaya avanzándose.

Realizar muestreos periódicos a lo largo del año para evaluar la variabilidad de los contaminantes en relación con precipitación, temperatura y uso del suelo.

Desarrollar modelos que combinen información geológica e hidrológica para simular el comportamiento de los acuíferos, identificar zonas de riesgo y prever impactos de diferentes escenarios de recarga y contaminación.

Vincular los datos de calidad del agua con indicadores de salud pública en las comunidades para detectar posibles asociaciones entre exposición a contaminantes y enfermedades, fortaleciendo la evidencia para intervenciones de salud ambiental.

Referencias bibliográficas

Agencia de Cooperación Internacional del Japón [JICA]. (julio de 2004). Informe del estudio de diseño básico sobre el proyecto de desarrollo de aguas subterráneas de la Provincia de Chimborazo de la República del Ecuador. https://openjicareport.jica.go.jp/pdf/11766474_01.pdf

Agencia de Regulación y Control del Agua [ARCA]. (septiembre de 2024). Guía técnica para determinar los parámetros y frecuencia de monitoreo para el control a la calidad de agua cruda por parte de los prestadores del servicio de agua potable público y comunitario [Regulaciones del Sector Hídrico]. <https://www.regulacionagua.gob.ec/nacional/>

Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo [AECID]. (2017). La importancia de las aguas subterráneas en la gestión integrada de los recursos hídricos: aplicaciones prácticas en proyectos de cooperación internacional para el desarrollo. Centro de Formación de la Cooperación Española, Antigua Guatemala.

Bordino, J. (21 de noviembre de 2023). Valle: qué es, formación y tipos [Blog de geología]. GeoEnciclopedia: <https://www.geoenciclopedia.com/valle-que-es-formacion-y-tipos-781.html>

Connor, R., & Miletto, M. (2022). Informe mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos 2022: aguas subterráneas: hacer visible el recurso invisible

[Resumen ejecutivo. Versión Español]. Perugia, Italia: Programa Mundial de la UNESCO de Evaluación de los Recursos Hídricos (UNESCO / UN-Water).

Geotechnical Consulting ABC. (5 de mayo de 2021). Prospección eléctrica [Blog de temas Geotécnicos]. <https://geotecniaymecanicasuelosabc.com/prospeccion-electrica/>

Gushña, W. (septiembre de 2023). Identificación de posibles zonas de descarga de agua subterránea mediante el uso de trazadores naturales (Radón, temperatura y conductividad eléctrica) en la Laguna Guabizhun, provincia del Cañar, Ecuador [Tesis de grado Ingeniería Ambiental]. Cuenca, Ecuador: Universidad Politécnica Salesiana, Sede Cuenca. <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/26077>

Larroza, F., & Centurión, C. (6 de septiembre de 1995). Estudio hidrogeológico e hidroquímico del agua freática en el área urbana de Loma Plata. Revista Aguas Subterráneas: Estudio hidrogeológico e hidroquímico del agua freática en el área urbana de Loma Plata, 38-54.

Leiva, J. (2018). Análisis multitemporal del retrocesos glaciario de los nevados de Colombia a través de la utilización de herramientas SIG. Bogotá, Colombia: Universidad Militar Nueva Granada.

López, J., Fornés, J., Ramos, G., & Villarroja, F. (2009). Las aguas subterráneas: un recurso natural del subsuelo (Edición 4). Instituto Geológico y Minero de España: Madrid, España.

Ministerio de Educación del Ecuador [MEE]. (2016). Ciencias Naturales para Noveno grado. Educación General Básica-Subnivel Superior. Quito, Ecuador: SMEcuadeciones.

Organización Mundial de la Salud [OMS]. (2011). Guías para la calidad del agua de consumo humano. Edición cuarta que incorpora la primera agenda. Ginebra, Suiza: Organización Mundial de la Salud. Licencia: CCBY-NC-SA 3.0 IGO.

Sahuquillo, A. (2009). La importancia de las aguas subterráneas para el X Programa de Promoción de la Cultura Científica y Tecnología. Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, 103(1), 97-114.

Sotomayor, G. (2016). Evaluación de la calidad de las aguas superficiales mediante técnicas de estadística multivariante: Un estudio de caso en la cuenca del Río Paute, al sur de Ecuador [Tesis para grado de Magister en Ecohidrología]. La Plata, Argentina: Facultad de Ciencias Naturales y Museo y Facultad de La Plata.

Wiese, C. (1914). Geografía del Perú: para los colegios de segunda enseñanza y escuelas especiales [Extraído de la enciclopedia Wikipedia]. Recuperado el septiembre de 2025, de https://www.google.de/books/edition/Geograf%C3%ADa_delPer%C3%BAUyJDAQAAMAJ?hl=de&bpv=1&dq=clima+del+peru&pg=PA48&printsec=frontcover