

Análisis de contaminantes generados por el Relleno Sanitario “La Cortada” en el suelo y la Quebrada Zipachá, aplicando métodos geofísicos, fisicoquímicos y microbiológicos, Pamplona, Norte de Santander (Colombia)

Analysis of contaminants generated by the “La Cortada” landfill in the soil and the Zipachá Creek, using geophysical and physicochemical methods, Pamplona, North of Santander (Colombia)

Francy Juliana Velandia González¹, Janer Rafael Cantillo Romero², Alba Lucia Roa Parra³, Dino Carmelo Manco-Jaraba⁴

¹Especialista en Sistema de Información Geográfico. Grupo de Investigación de Geología y Geofísica PANGAEA, Colombia.
ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-6965-0719>
Email: francyjulianav25@gmail.com

²M.Sc. Geología, Universidad de Pamplona. Grupo de Investigación de Geología y Geofísica PANGAEA, Colombia.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6925-447X>
Email: jrcantillo93@gmail.com

³PhD. Microbióloga, Universidad de Pamplona. Grupo de Investigación en Recursos Naturales, Colombia.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9958-7926>
Email: albalurp@unipamplona.edu.co

⁴M. Sc. Gestión Ambiental y Energética en las Organizaciones, Universidad de La Guajira. Email: dinomancojaraba@gmail.com,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8506-094X>
Email: dinomancojaraba@gmail.com o dcmancoj@uniguajira.edu.co

Cite this article as: F. J. Velandia-González, J. R. Cantillo Romero, A. L. Roa-Parra, D. C. Manco-Jaraba, “Análisis de contaminantes generados por el relleno sanitario “La Cortada” en el suelo y la Quebrada Zipachá, aplicando métodos geofísicos, fisicoquímicos y microbiológicos, Pamplona, Norte de Santander (Colombia)”, *Prospectiva*, Vol 24, N° 1, 2026.

Recibido: 07/02/2025 / Aceptado: 25/09/2025

<http://doi.org/10.15665/rp.v24i1.3734>

RESUMEN

Los rellenos sanitarios son zonas estratégicas de acopio de residuos, los cuales requieren de operación planificada, mantenimiento, recubrimiento de geomembranas, entre otros. Esta investigación tiene como objetivo analizar contaminantes generados por el Relleno Sanitario “La Cortada” en el suelo y la Quebrada Zipachá, aplicando métodos geofísicos, fisicoquímicos y microbiológicos Pamplona, Norte de Santander (Colombia). Metodológicamente inicialmente se realizó revisión en bases de datos académicos y científico, posteriormente se aplicaron métodos geofísicos (Sondeo Eléctrico Vertical (SEV)), análisis fisicoquímicos, microbiológicos y líneas de tomografía de resistividad eléctrica (TRE). Se identificó la presencia de metales pesados, incluyendo hierro, manganeso, cobre, zinc, plomo y cromo, en el suelo del área de estudio, lo cual se atribuye al manejo inadecuado de los lixiviados provenientes del Relleno Sanitario “La Cortada”. La infiltración de estos lixiviados ha causado alteraciones fisicoquímicas significativas en el suelo, resultando en un aumento de la concentración de metales tóxicos que exceden los niveles permisibles establecidos por normativas internacionales.

Palabras clave: Geofísica, Lixiviado, Metales pesados, Relleno sanitario, Suelo.

ABSTRACT

Landfills are areas strategically located as material collection areas, which require planned operation, maintenance, geomembrane lining, among others. The objective of this research is to analyze contaminants generated by the “La Cortada” sanitary landfill in the soil and the Zipachá stream, applying geophysical, physicochemical and microbiological methods in Pamplona, Norte de Santander (Colombia). Methodologically, initially a review of academic and scientific databases was carried out, then geophysical methods were applied (Vertical Electrical Sounding (SEV)), physicochemical analysis, microbiological analysis and tomography lines, microbiological and electrical resistivity tomography (ERT) lines. The presence of heavy metals, including iron, manganese, copper, zinc, lead and chromium, was identified in the soil of the study area, which is attributed to the inadequate management of leachates from the “La Cortada” landfill. The infiltration of these leachates has caused significant physicochemical alterations in the soil, resulting in an increase in the concentration of toxic metals that exceed the permissible levels established by international standards.

Keywords: Geophysics, Leachate, Heavy metals, Landfill, Soil.

1. INTRODUCCIÓN

La generación de residuos sólidos, líquidos y gaseosos son problemáticas ambientales que requieren atención y manejo adecuado. Los rellenos sanitarios, vertederos de residuos o botaderos a cielo abierto, son técnicas de confinamiento de residuos en suelos impermeabilizados [1], [2]; comúnmente, se esparcen y se compactan reduciéndolos al menor volumen posible para que ocupen menor área. Actualmente, la mala operación en los rellenos sanitarios y la no separación en la fuente generan impactos ambientales en los componentes bióticos y abióticos; uno de los efectos secundarios y el más contaminante es la generación de lixiviados, según [3] los lixiviados son producidos por la descomposición de la materia orgánica, agua filtrada al relleno, composición variada (depende del tipo de residuos), velocidades de descomposición química y otras condiciones de lugar. [4] identificaron capas del Relleno Sanitario Río Azul, usando sondeos eléctricos para determinar almacenamiento de lixiviados y su distribución. [5] realizó 3 sondeos eléctricos verticales y análisis fisicoquímico con el fin de evidenciar la acumulación de lixiviados y resistividades de suelos. Por otra parte [6], se encontró metales pesados en la quebrada Zipachá como Molibdeno en altas concentraciones, hidrocarburos aromáticos policíclicos encontrando así el benzo (a) pireno, fluranteno y antraceno atribuyéndolos a el flujo vehicular de la vía que conduce a Saravena. [7] evidencio altas concentraciones de hierro, potasio y calcio; en cambio [8], realizó análisis de la calidad del agua en tres puntos de la Quebrada Zipachá evidenciando contaminación por materia orgánica, metales pesados (hierro, zinc y cobre), microbiológicamente aerobios mesófilos, coliformes totales, bacterias (*Proteus sp*, *Stenotrophomonas sp*) responsable de muchas enfermedades infecciosas del tracto urinario, mohos (género *Penicillium sp*) y macroinvertebrados de la familia Chironomidae.

Este líquido denominado lixiviado posee elevadas concentraciones de sales inorgánicas (cloruro de sodio y carbonatos) y metales pesados convirtiéndose en un potencial de contaminación severo para el suelo y aguas circundantes a los rellenos sanitarios [9]–[11]. Es por esto que se debe tener un control riguroso sobre

su operación garantizando su adecuado manejo, tratamiento y disposición final, así como la infraestructura necesaria para que este líquido contaminante no se infiltre en el suelo, subsuelo y fuentes hídricas cercanas.

En la actualidad existen diversos métodos geofísicos que permiten determinar mediante la variación de resistividades la dinámica de los contaminantes en el suelo y subsuelo, destacando el sondeo eléctrico vertical (SEV) el cual proporciona información de la estructura que yace en el subsuelo y comportamiento de la inyección de corriente eléctrica o campo natural de corriente [12]–[15].

En el Relleno Sanitario “La Cortada”, existen riesgos latentes de contaminación del suelo, subsuelo y fuentes hídricas cercanas por problemas operacionales del sistema de almacenamiento de residuos (ruptura de la geomembraba, rebose del tanque de recirculación, entre otros). [16] aplicó técnica de tomografía de resistividad eléctrica con arreglo de electrodos tipo gradiente, evidenciando resistividades entre 1- 10 Ohm. atribuyéndolo a material saturado con lixiviado, zonas de baja resistividad debajo del contacto con la celda indicando posible ruptura de geomembrana. Esta investigación tiene como objetivo analizar contaminantes generados por el Relleno Sanitario “La Cortada” en el suelo y la Quebrada Zipachá, aplicando métodos geofísicos, fisicoquímicos y microbiológicos, Pamplona, Norte de Santander (Colombia).

2. LOCALIZACIÓN

El área de estudio se encuentra ubicado en el Relleno Sanitario La Cortada, pamplona, departamento de Norte de Santander (Colombia); limitando al norte con el departamento del Cesar, sur departamento de Santander, este departamento de Cesar y oeste Venezuela (Figura 1).

3. METODOLOGÍA

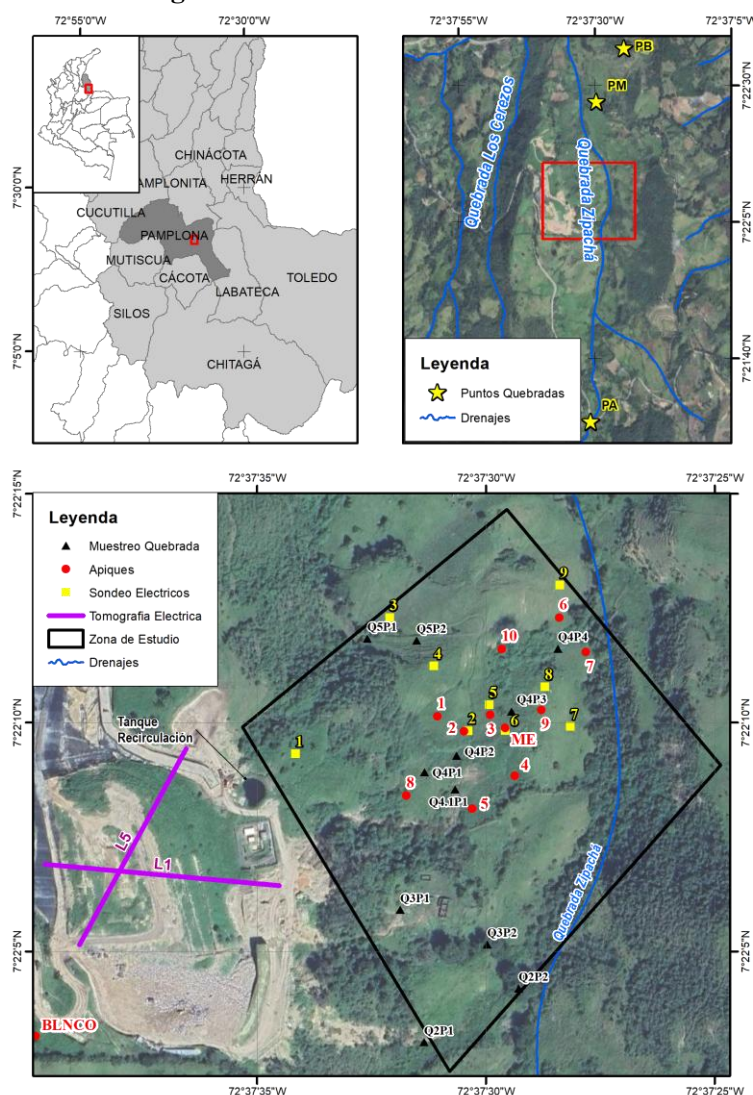
Inicialmente se realizó una revisión documental en las diferentes bases de datos académicas y científicas cómo Scopus, Sciencedirect, Springer, WOS, Nature, Google académico, repositorios institucionales utilizando palabras claves (contaminación del suelo, lixiviados, metales pesados, calidad del agua, Sondeo Eléctrico Vertical, Tomografía de Resistividad Eléctrica, geomembranas, relleno sanitario y gestión de residuos sólidos) y ecuaciones de búsqueda y proximidad (("contaminación del suelo" OR "soil contamination") AND (lixiviados OR leachate) AND ("metales pesados" OR "heavy metals") AND ("calidad del agua" OR "water quality") AND (("Sondeo Eléctrico Vertical" OR "Vertical Electrical Sounding" OR VES) OR ("Tomografía de Resistividad Eléctrica" OR "Electrical Resistivity Tomography" OR ERT)) AND (geomembranas OR geomembranes) AND ("relleno sanitario" OR "sanitary landfill") AND ("gestión de residuos sólidos" OR "solid waste management")). Posteriormente, se llevaron a cabo salidas de campo para evaluar las condiciones generales del área de estudio, operatividad del Relleno Sanitario "La Cortada", levantamiento topográfico, toma de muestras de suelo y agua, identificación de lixiviados y el análisis de cambios en la cobertura vegetal. Para el levantamiento topográfico, se utilizó un dron Phantom 3, a partir del cual se obtuvieron fotografías aéreas y ortomosaicos mediante el software Pix4D.

Se tomaron 11 Sondeos Eléctricos Verticales (SEV) con el fin de conocer la variación de la resistividad eléctrica del subsuelo en función de la profundidad, teniendo presente que la longitud de tendido máxima no superara pendiente de 12% a través del arreglo electrodo (Wenner α para mayor resolución superficial) y procesados en el software IPI2WIN. Se realizaron 11 apiques con profundidad máxima de 3 metros para la toma de 32 muestras en total de suelo para análisis fisicoquímicos [17] para determinar el tipo de suelo utilizando el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) [18], permeabilidad por el método de

carga constante y porosidad mediante relaciones gravimétricas basados en las normas de INVIAS INVE 125, 126, 130 y 181 [19], además, se midieron parámetros como pH, conductividad, humedad, materia orgánica, fósforo, fosfatos y capacidad de intercambio catiónico; la preparación de muestras para determinar algunos metales pesados presentes fue basada en el Estándar Métodos [20].

Figura 1. Localización del área de investigación.

Figure 1. Location of the research area.



Para el muestreo de agua se seleccionaron 3 puntos de referencia ubicados en la parte alta, media y baja de la Quebrada Zipachá, por cada punto se tomaron 4 muestras en temporadas de altas y bajas precipitaciones. Además, 12 muestras en 5 quebradas afluentes a la Quebrada principal Zipachá (atravesan la ladera de estudio), todas se recolectaron en frascos plásticos de 2.5 litros, rotuladas y almacenadas en nevera de icopor con hielo para conservar sus propiedades fisicoquímicas a temperatura promedio de 4°C durante 24 horas. Los análisis fisicoquímicos se realizaron en el laboratorio de control de calidad y diagnóstico de la Universidad de Pamplona, basados en el procedimiento de [21] para determinar los parámetros: pH, conductividad, turbiedad, DQO, DBO5, nitritos, fosfatos, sulfatos, sólidos sedimentables, sólidos volátiles, dureza, alcalinidad, acidez, cloruros y metales pesados como Pb, Cr, Zn, Cu, Mn, Cd, He. De igual forma

se recolectaron 2 muestras en el tanque de recirculación de lixiviado ubicado en el Relleno Sanitario La Cortada, por duplicado en temporada de bajas y altas precipitaciones, su caracterización se basó en la metodología de métodos normalizados [21].

Para el análisis microbiológico de agua, suelo y lixiviado se recolectaron muestras por duplicado para una mejor exactitud de los resultados, se realizó la determinación por el método de recuento en placa para bacterias Coliformes Totales y Fecales. Las muestras de suelo fueron colectadas en bolsas Ziploc, las de agua en frascos de vidrio previamente esterilizados y lixiviado en botellas plásticas esterilizadas, todas se conservaron en refrigeración durante el transporte al Laboratorio en Investigaciones Biotecnológicas de la Universidad de Pamplona. En el laboratorio se procedió a preparar material para las diluciones y medio Chromocult, se escogió este medio por las grandes ventajas que ofrece como ahorro de tiempo, al ser un medio cromogénico, selectivo y diferencial, proveer resultados claros y que no es necesario otro medio de cultivo para confirmación [22], [23].

4. RESULTADOS

De acuerdo con las 6 líneas analizadas, tomadas de la tesis realizada por [16], se logró evidenciar que en la línea 1 y 5 de Tomografía de Resistividad Eléctrica, presentó posibles plumas de contaminación por infiltración de lixiviados. Este hallazgo concuerda con los resultados obtenidos en estudios previos realizados en el Relleno sanitario 'La Cortada', donde [24] también detectaron anomalías de resistividad eléctrica en zonas activas y clausuradas, posiblemente asociadas a la acumulación de contaminantes en estas áreas." debido a que se encuentra por debajo de la zona de contacto entre la celda y la roca base, como se muestra en las **Figura 2. Línea 1 de TRE en el Relleno Sanitario La Cortada.** **Figure 2. TRE Line 1 at La Cortada Landfill.**

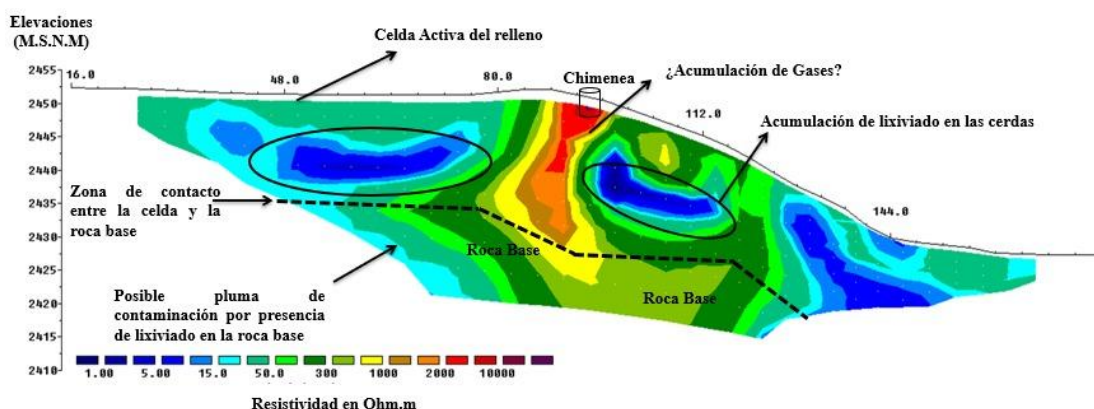
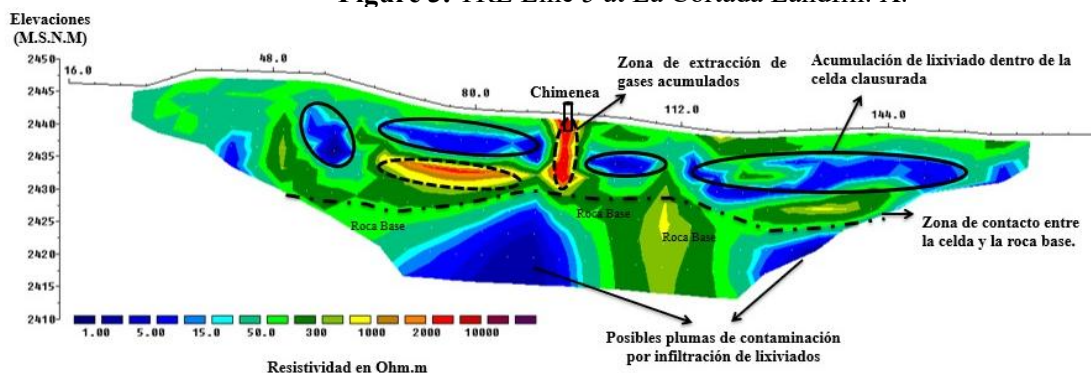


Figura 3. Línea 5 de TRE en el Relleno Sanitario La Cortada. X.**Figure 3.** TRE Line 5 at La Cortada Landfill. X.

4.1 Levantamiento Geofísico

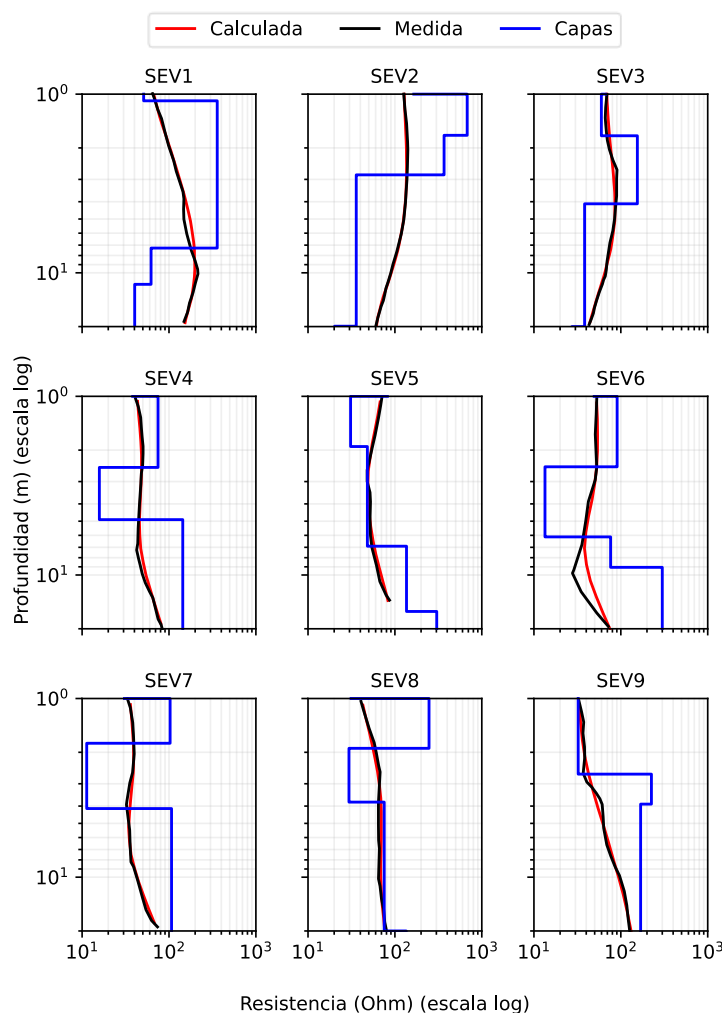
El sondeo eléctrico vertical (SEV) 1 tuvo profundidad máxima (20 metros) permitiendo evidenciar tres (3) capas con resistividades de 51.1 Ω .m, 359 Ω .m y 62.2 Ω .m, asociado este último valor a lutitas fracturadas de grano fino correspondiente a la Formación Colón (Figura 4A). El SEV 2 se realizó al lado de la zona saturada, al obtener la curva en el programa ipi2win y valores de resistividad se analizó que era poco real de acuerdo con las características geomorfológicas de la zona; por tanto, se analizó exhaustivamente por cada capa (Figura 4B). El SEV 3 presentó 4 capas con resistividades de 67 Ω .m, 59.7 Ω .m, 155 Ω .m y 38.3 Ω .m; la capa 1 presentó alto contenido de materia orgánica, la capa 2 y 3 Formación Colón y el valor de la última capa (38.3 Ω .m) fue atribuido a un limo ligeramente saturado (Figura 4C). El SEV 4, presentó 4 capas de resistividades 38.2 Ω .m, 74.8 Ω .m, 15.8 Ω .m y 144 Ω .m, evidenciándose disminución significativa de la capa 2 a la capa 3 indicando que el valor de 15.8 Ω .m representa el comienzo del nivel freático (Figura 4D).

El SEV 5 presentó 4 capas de resistividades 81.9 Ω .m, 30.9 Ω .m, 48.2 Ω .m y 136 Ω .m, la capa 2 presentó suelo de textura limosa a arenosa ligeramente saturado y la capa 4 limolita y areniscas de grano fino de la Formación Colón (Figura 4E). El SEV 6 se realizó en el humedal artificial de contaminante, presentando error al procesar de 15,8% y dispersión indicando resistividades poco reales (Figura 4F).

El SEV 7 presentó 4 capas con resistividades de 30.7 Ω .m, 103 Ω .m, 11.3 Ω .m y 107 Ω .m, evidenciándose disminución significativa de resistividad de la capa 2 y 3, indicando areniscas y limolitas saturadas (Figura 4G). SEV 8 presenta 4 capas con resistividades de 31.3, 247 Ω .m, 29.6 Ω .m y 75.3 Ω .m, determinándose en la capa 3 a 3,88 metros de profundidad el inicio del nivel freático y a 20 m limolitas ligeramente saturadas (Figura 4H). SEV 9 presentó tres (3) capas con resistividades de 32.3 Ω .m, 225 Ω .m y 169 Ω .m, indicando en la capa 1 suelo residual de textura limosa con alto contenido de materia orgánica y húmedo, igual forma en la capa 2 y 3 predominó la Formación Colón K2cm (Figura 4I).

Figura 4. Sondeos Eléctricos Verticales (SEV), A) SEV 1, B) SEV 2, C) SEV 3, D) SEV 4, 5) SEV 6, 6) SEV 7, 8) SEV 8, 9) SEV 9.

Figure 4. Vertical Electrical Soundings (SEV), A) SEV 1, B) SEV 2, C) SEV 3, D) SEV 4, 5) SEV 6, 6) SEV 7, 8) SEV 8, 9) SEV 9.



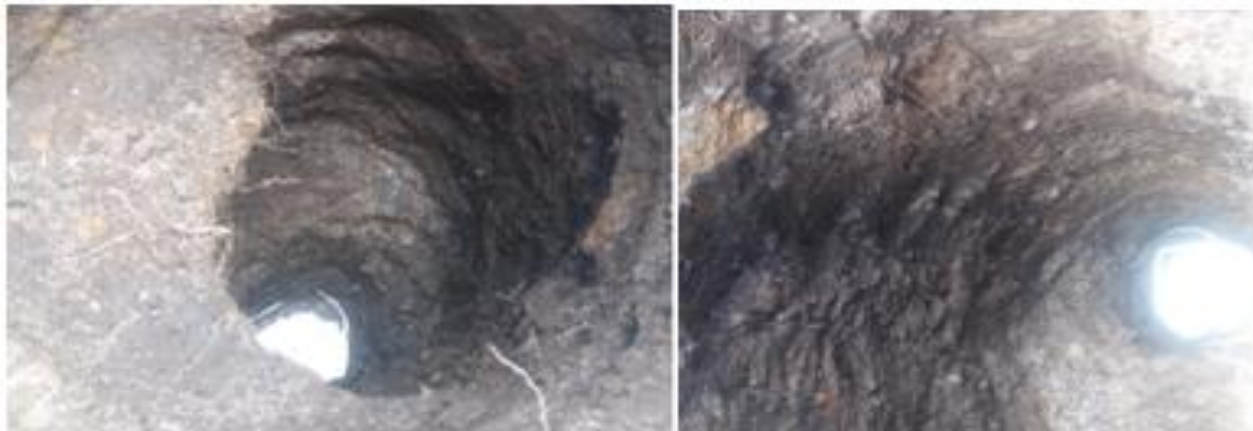
4.2 Caracterización fisicoquímica, microbiológica y determinación del tipo de suelo

El apique 1 se realizó a una profundidad de 130 cm, identificando tres horizontes. El horizonte "O" (0-30 cm) mostró una textura arcillosa con fuerte olor a materia orgánica, indicando una alta retención de humedad y potencial de acumulación de contaminantes. El horizonte "A" (30-100 cm) presentó tonos moteados a naranja, asociados a la presencia de hierro y concentraciones de metales pesados como Fe, Mn, Zn y Cd, sugiriendo la infiltración de lixiviados. El horizonte "B" (100-130 cm) exhibió un incremento en las concentraciones de Fe y Zn, indicando la migración de estos metales en profundidad. El apique 2, a 190 cm de profundidad, mostró también tres horizontes. El horizonte "O" (0-18 cm) presentó una permeabilidad de 0,089 cm/min, sugiriendo buena infiltración, lo cual puede facilitar la movilización de contaminantes. El horizonte "A" (18-145 cm) mostró colores anaranjados por la presencia de hierro y a 145 cm se encontró el nivel freático (Figura 5), lo que aumenta el riesgo de contaminación del agua subterránea. El horizonte "B"

(145-190 cm) se caracterizó por un pH de 4,75 extremadamente ácido, que facilita la solubilización de metales como Fe, Mn, Zn y Cd, incrementando su movilidad hacia el acuífero.

Figura 5. Evidencia del nivel freático a 145cm de profundidad, apique 2.

Figure 5. Evidence of the water table at 145cm depth, pit 2.



El apique 3 se realizó hasta una profundidad de 210 cm, identificando tres horizontes. El horizonte "O" (0-32 cm) consistió en una capa superficial típica con características orgánicas. El horizonte "A" (32-120 cm) presentó un suelo granular gravoso, con partículas superiores a 5 cm, hasta los 70 cm, donde se encontraron areniscas de grano fino a muy fino. Esta estructura sugiere una alta capacidad de drenaje, lo que podría facilitar la percolación de lixiviados. El horizonte "B" (120-210 cm) marcó la zona de saturación a partir de los 120 cm de profundidad, donde se detectó la presencia de metales pesados como Fe, Mn, Cu, Zn, Cd y Cr. El apique 4 se realizó a una profundidad de 167 cm, identificando tres horizontes. El horizonte "O" (0-30 cm) mostró características orgánicas superficiales. El horizonte "A" (30-85 cm) evidenció un aumento del pH de 5,68 a 5,95. El horizonte "B" (85-167 cm) presentó la zona de saturación a partir de los 100 cm de profundidad y un aumento significativo de la conductividad eléctrica, que pasó de 32,6 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en el horizonte "A" a 82,6 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Este incremento en la conductividad indica una mayor presencia de iones, posiblemente derivados de la infiltración de lixiviados, lo que podría afectar la calidad del agua subterránea en esta área. El apique 5 se realizó hasta una profundidad de 145 cm, identificándose tres horizontes. El horizonte "O" (0-40 cm) mostró características orgánicas típicas de la capa superficial. El horizonte "A" (40-95 cm) presentó un moteado de color naranja debido a la presencia de hierro, con una matriz de textura arenosa y estructura granular. El horizonte "B" (95-145 cm) no mostró la presencia del nivel freático, lo que indica que esta capa aún se encuentra por encima de la zona de saturación, lo cual podría limitar temporalmente la movilización de contaminantes hacia el sistema acuífero profundo.

Los resultados de los apiques 6, 7, 8, 9 y el apique "Blanco" muestran variaciones significativas en la presencia de contaminantes y la interacción con el agua subterránea. En el apique 6, realizado a 190 cm de profundidad, se identificaron tres horizontes con presencia de plomo desde la superficie (0-30 cm) hasta la zona de saturación a partir de 110 cm, lo que indica un riesgo de contaminación del acuífero. El apique 7, de 110 cm de profundidad, mostró un incremento del contenido de fosfatos en el horizonte "A" (20-110 cm), pasando de 0,64 mg/litro a 2,16 mg/litro, aunque no se encontró nivel freático. En el apique 8, de 200 cm de profundidad, la zona de saturación comenzó a los 170 cm en el horizonte "B" (80-200 cm), sugiriendo potencial de infiltración de contaminantes. El apique 9, con una profundidad de 220 cm, presentó cadmio en el horizonte "B" (80-220 cm) y nivel freático a partir de los 180 cm, lo cual es preocupante por la posibilidad de que el metal se disemine en el agua subterránea. Por último, el apique "Blanco" también se realizó a 220 cm, pero a diferencia de los otros, mostró texturas de arena bien graduada y ausencia de nivel freático, lo que sugiere una menor influencia de la saturación y una potencial menor exposición a la contaminación. Estos hallazgos subrayan la variabilidad en las características del suelo y la dinámica de

contaminantes, evidenciando un riesgo ambiental particular en las áreas donde se identificó la presencia de metales pesados y zonas de saturación.

A través de la caracterización fisicoquímica y microbiológica se identificaron metales pesados para los diferentes apiques, pH ácido (<6) para todas las muestras de alta precipitación, lixiviación y ausencia de Coliformes fecales.

Tabla 1. Caracterización fisicoquímica, microbiológica y determinación de metales pesados en el suelo.
Table 1. Physicochemical and microbiological characterization and determination of heavy metals in the soil.

APIQUES		PRUEBAS FISICOQUIMICAS							METALES PESADOS (mg/litro)							Coliformes	
		pH	Conductividad (µs/cm)	Humedad (%)	Materia Orgánica (%)	Fosfatos (mg/litro)	Fosforo (mg/kg)	C.I.C (meq/g)	Fe	Mn	Cu	Zn	Cd	Pb	Cr	Totales (U.F.C/g)	Fecales (U.F.C/g)
APIQUE 1	30-70 cm	5,85	62,8	23	14	43,9	99,226	-	27,2904	0,114	ND	0,5867	0,082	ND	ND	0	0
	1- 1,30 m	5,67	84,7	14	7	2,32	5,288	20	33,2214	-	ND	0,3227	ND	ND	ND	100	0
APIQUE 2	0-18 cm	5,06	127	19	26	4,4	9,994	-	44,2377	2,5818	0,3183	2,4787	0,1037	ND	ND	29000	0
	18- 42 cm	5,32	108,5	19	17	4,54	9,989	30	39,0712	0,7027	ND	1,0148	0,2145	ND	0,0344	300	0
	42cm-1,15m	5,6	67,1	20	11	0,98	2,262	-	34,5642	-	0,0916	1,1729	0,0751	ND	ND	200	0
	1,15-1,45m	5,69	98,5	12	6	3,52	7,916	-	40,2632	2,9405	ND	1,6914	0,4653	ND	ND	2700	0
	1,45-1,90m	4,75	191,1	-	4	1,38	3,22	-	32,157	1,0902	ND	0,6471	ND	ND	ND	1750	0
APIQUE 3	32 cm	5,28	69,6	37	32	3,55	7,525	-	24,9702	1,6967	ND	1,1729	0,0139	ND	ND	35100	0
	1,2 metros	6,18	51	23	17	3,11	6,41	32	55,161	3,5199	0,3064	0,5546	0,0263	ND	1,95	50	0
	2,10 metros	5,2	373	25	10	3,11	6,397	-	56,7883	6,7171	0,3596	0,7254	0,0451	ND	0,055	0	0
APIQUE 4	30 cm	5,68	78,1	-	30	2,94	6,223	-	44,3785	2,3828	0,3035	1,8209	0,138	ND	ND	1800	0
	80 cm	5,95	32,6	15	8	1,44	3,167	34	37,8502	0,106	ND	0,5518	ND	ND	0,0392	1300	0
	1,67 m	5,45	82,6	21	7	36,9	81,522	-	32,9517	0,5679	ND	2,9711	0,555	ND	0,4764	0	0
APIQUE 5	95 cm	6,08	45,4	18	15	4,28	10,08	-	35,0631	4,0486	ND	1,1955	0,2599	ND	0,0296	700	0
	1,45 metros	6,29	41,4	15	12	3,42	7,21	14	38,8073	11,2933	0,0975	1,2848	0,3291	ND	0,1545	50	0
APIQUE 6	30 cm	4,76	34,4	34	21	3,39	7,708	-	39,164	11,4862	0,6708	1,1856	ND	0,1946	0,0056	100	0
	75 cm	4,73	54,9	18	6	2,07	4,626	10	39,6629	5,4539	0,6777	0,6823	ND	0,327	0,0728	0	0
	75cm-1,90 m	5,07	61,9	-	11	0,85	1,931	-	39,9326	11,6584	1,1132	1,1517	ND	0,4982	0,1257	0	0
APIQUE 7	20cm	5,06	57	30	15	0,64	1,486	24	39,2249	14,2959	0,6925	1,3988	ND	0,2647	0,145	200	0
	1,10m	4,53	44,5	13	6	2,16	4,849	-	36,0665	12,4341	0,499	1,7323	ND	0,1635	0,2026	0	0
APIQUE 8	30 cm	5,48	67,7	40	28	1,53	3,484	-	39,0364	4,0723	0,3133	1,2057	0,1318	0,039	0,0248	1400	0
	30 -80 cm	5,27	118,7	20	12	1,26	2,964	22	40,4778	4,5775	0,2264	0,6305	0,0084	0,1557	0,1881	50	0
	80 cm-1,70 m	5,62	64,1	33	15	1,85	4,092	-	40,1965	1,8533	0,257	0,7039	ND	ND	0,1401	0	0
	1,70 - 2m	5,61	86,6	28	14	1,83	3,833	-	40,4198	6,0466	0,3153	1,2619	-	0,0124	0,4332	0	0
APIQUE 9	30 cm	5,16	74,8	45	23	1,75	4,434	-	37,885	7,3349	0,4288	1,3155	0,0516	0,3851	ND	45000	0

PROSPECTIVA 24 N ° 1.

	80 cm	5,28	41	22	9	1,66	3,631	20	37,3543	2,8763	0,2175	0,4597	ND	0,2417	0,0008	100	0
	2,20 m	5,7	35,6	20	9	2,07	4,696	-	40,0747	6,1142	1,2287	1,4115	0,0403	0,6072	0,1881	0	0
APIQUE 10	1,40 m	4,91	30	-	14	2,57	5,267	14	34,8919	1,1541	0,335	0,279	ND	0,4749	ND	-	-
M. E (H.A.C)	30 cm	5,49	62	-	-	1,34	3,063		61	11,6062	0,2946	1,4599	0,0042	0,1612	-	-	-
BLANCO	40 cm	4,37	47,8	25	15	0,04	2,38	-	29,1447	0,4381	0,0783	0,2764	ND	0,0779	0,2575	0	0
	1,20 m	4,3	31	29	13	0,08	2,265	12	19,3797	0,1551	0,0714	0,2301	ND	0,1168	0,7375	0	0
	1,80 m	4,29	48,2	22	9	0,31	2,291	-	29,4073	0,1447	0,1603	0,272	ND	ND	1,6	0	0
	2,20 m	4,71	30,7	28	14	0,18	2,342	-	29,5588	0,2032	0,2037	0,2779	ND	ND	2,545	0	0

Según [7] las concentraciones de cadmio en algunas muestras fueron menores, debido a la alta acidez de los suelos, lo que puede afectar la movilidad de este metal. Es importante destacar que la materia orgánica y sesquióxidos juegan un papel clave en este proceso ya que controlan solubilidad de metales, limitando su disponibilidad en el suelo y favoreciendo la inmovilización del metal en lugar de su absorción por las plantas.

4.3 Caracterización fisicoquímica y microbiológica de la Quebrada Zipachá y sus afluentes

Los valores de pH registrados oscilan entre 6.38 y 7.77, lo que indica que el agua se mantiene cercana a la neutralidad, sin presentar niveles significativos de acidez. Sin embargo, los valores ligeramente básicos en algunos puntos durante las altas precipitaciones podrían estar relacionados con la influencia de lixiviados provenientes del relleno sanitario (Tabla 2).

La conductividad varía considerablemente, siendo más alta durante las bajas precipitaciones. Esto sugiere una mayor concentración de iones disueltos debido a la menor dilución de contaminantes en el agua. Por otro lado, la turbidez aumenta significativamente durante las lluvias [25]–[27], alcanzando hasta 42.5 UNT en el punto alto, lo que podría estar relacionado con el arrastre de sedimentos y contaminantes sólidos desde el relleno sanitario hacia el cauce de la quebrada.

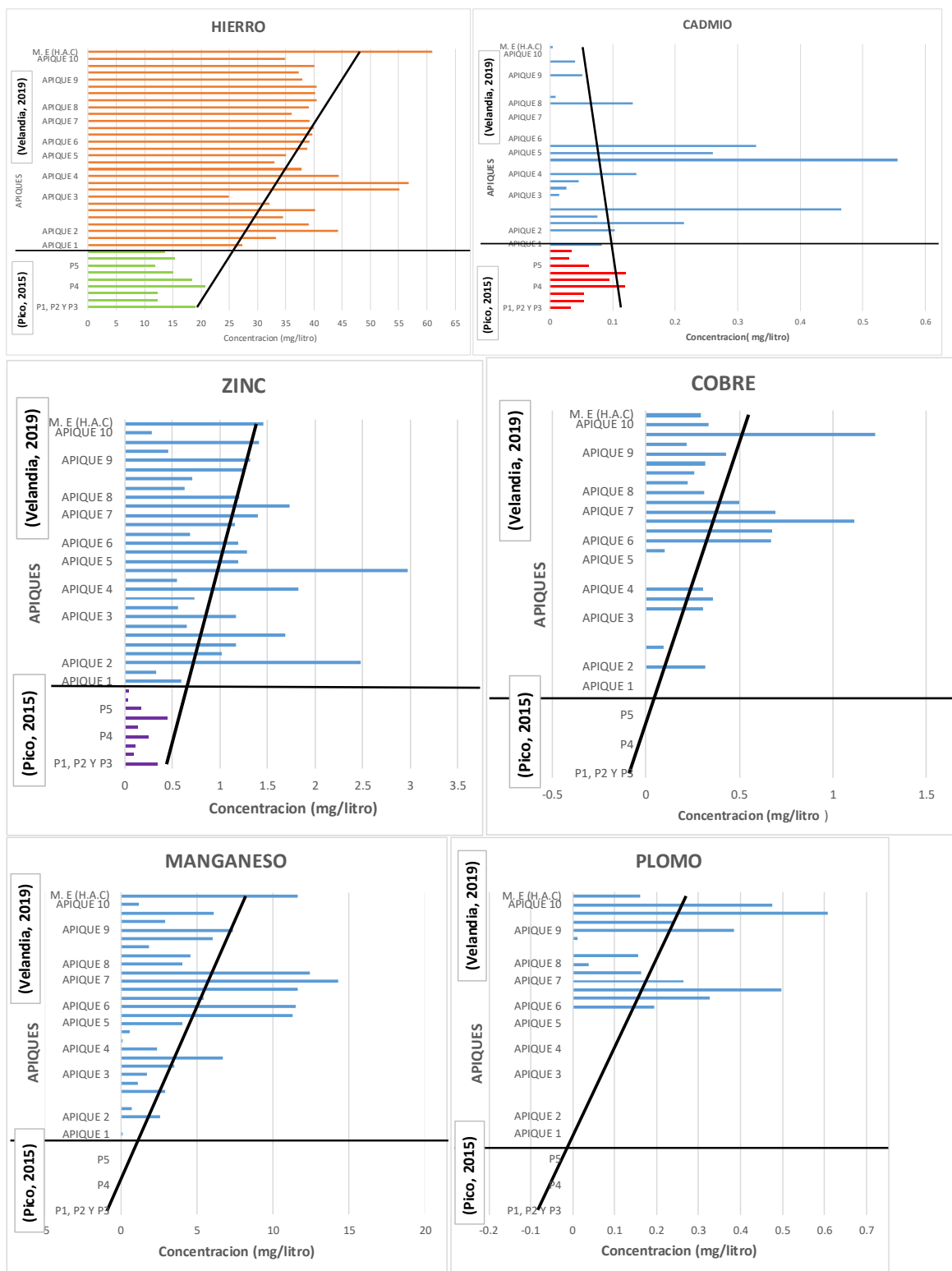
La demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅), que mide la cantidad de materia orgánica presente, alcanza valores entre 26.84 mg O₂/L y 39.44 mg O₂/L, siendo más alta en periodos de bajas precipitaciones. Esto sugiere una acumulación de materia orgánica, posiblemente proveniente del relleno sanitario. Además, se observa un mayor contenido de sólidos sedimentables durante las bajas precipitaciones, lo que indica la deposición de sedimentos pesados en el fondo de la quebrada, posiblemente transportando contaminantes adheridos.

La presencia de metales pesados es un indicador relevante de contaminación. El plomo (Pb) presenta concentraciones elevadas durante las bajas precipitaciones, con un máximo de 0.1379 mg/litro en el punto alto, lo que es alarmante debido a su toxicidad para los ecosistemas y la salud humana. El cromo (Cr) aparece en concentraciones bajas y de forma intermitente, lo que sugiere fuentes esporádicas de este metal. Otros metales como cobre (Cu), manganeso (Mn) y cadmio (Cd) también están presentes en pequeñas cantidades, pero su aparición en ciertos puntos puede estar relacionada con el arrastre de estos contaminantes en periodos de lluvia.

Finalmente, la presencia de coliformes fecales es significativa, especialmente en bajas precipitaciones, alcanzando hasta 2200 UFC/ml. Esto evidencia una contaminación microbiológica importante, que podría provenir del escurrimiento de aguas residuales o de los lixiviados del relleno sanitario, lo que representa un riesgo para la Salud Pública.

Figura 6. Comparación de la concentración de metales pesados reportados por [7] con las determinadas en el presente estudio.

Figure 6. Comparison of the concentration of heavy metals reported by [7] with those determined in the present study.



La Quebrada Zipachá muestra signos claros de afectación en su calidad de agua, especialmente durante las lluvias, con aumentos en turbidez, sólidos sedimentables y la presencia de metales pesados como el plomo. Los altos niveles de DBO5 y la presencia de coliformes fecales refuerzan la hipótesis de que el Relleno

Sanitario “La Cortada” está contribuyendo a la contaminación del agua, lo que requiere la implementación de medidas urgentes de control y monitoreo para mitigar los riesgos ambientales y para la salud humana.

Tabla 2. Caracterización fisicoquímica, microbiológica y determinación de metales pesados para la Quebrada Zipachá.

Table 2. Physicochemical and microbiological characterization and determination of heavy metals for the Zipachá Creek.

Parametro fisicoquímico, metales pesados y coliformes.	QUEBRADA ZIPACHA- BAJAS PRECIPITACIONES							QUEBRADA ZIPACHA- ALTAS PRECIPITACIONES					
	PB	PB	PM	PM	PM	PA	PA	PB	PB	PM	PM	PA	PA
pH	7,24	6,58	7,15	6,85	6,88	6,9	7,15	7,71	7,67	7,58	7,54	7,74	7,77
Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	129,2	135,6	161,5	133,6	130,8	98,3	119,1	38,3	45	83,6	88,5	108,9	107,8
Turbiedad (UNT)	19,6	21,2	24,1	20,5	23,8	10,3	8,65	70,9	32	27,7	34,8	15,1	16,5
DQO (mg/litro)	433	319	8	52	33	120	124	49	120	23	50	36	28
Nitritos (mg/ litro NO_2)	0,033	0,033	0,026	0,024	0,021	0,002	0,004	0,014	0,012	0,014	0,021	0,002	0,004
Fosfatos	0,04	0,02	ND	0,02	0,03	ND	ND	1,4	3,4	2,4	1,9	1,2	1
Sulfatos	87	112	19	85	21	46	97	22	29	24	29	ND	ND
Solidos Sedimentables (ml/litro)	0,05	0,03	0,2	0,05	0,1	0,05	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,1	0,1
Solidos volátiles	60	70	32	30	34	30	30	88	82	90	96	130	156
Dureza (MgCaCO_3/L)(ppm)	60	72	60	58	58	70	75	70	60	70	60	70	80
Alcalinidad ($\text{MgCaCO}_3/\text{litro}$)	50	45	22,5	45	47	61	65	35	35	45	40	60	45
Acidez ($\text{MgCaCO}_3/\text{litro}$)	30	20	15	25	40	35	25	15	10	10	10	10	10
Cloruros (Mg/litro)	63,81	53,17 5	49,63	39,70 4	20,56 1	19,49 75	24,81 5	9,926	14,18	8,862 5	7,799	7,799	10,63 5
DBO5 ($\text{mgO}_2/\text{litro}$)	268,4 6	40	4,96	8	20,46	74,4	20	30,38	74,4	14,3	31	22,32	17,36
Pb (mg/litro)	ND	ND	0,026 7	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Cr (mg/litro)	ND	0,152 5	ND	0,07	ND	0,122 5	ND	0,021 3	0,033 5	0,009 1	0,021 3	0,015 2	0,003
Zn (mg/litro)	0,054 3	0,061 9	0,005 8	0,051 3	0,052	0,057 5	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Cu (mg/litro)	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0,046 7	0,047 7	0,006 2	0,025	0,045 7	0,048 7
Mn (mg/litro)	0,065 4	0,070 4	ND	0,064 4	0,068 4	0,064 4	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Cd (mg/litro)	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Fe (mg/litro)	ND	0,137 9	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Coliformes Totales (U.F.C/ ml)	2200	1700	800	300	-	100	500	-	-	-	-	-	-
Coliformes Fecales (U.F.C/ml)	0	0	0	0	0	0	0	-	-	-	-	-	-

PB: Punto bajo, PM: Punto medio, PA: Punto alto.

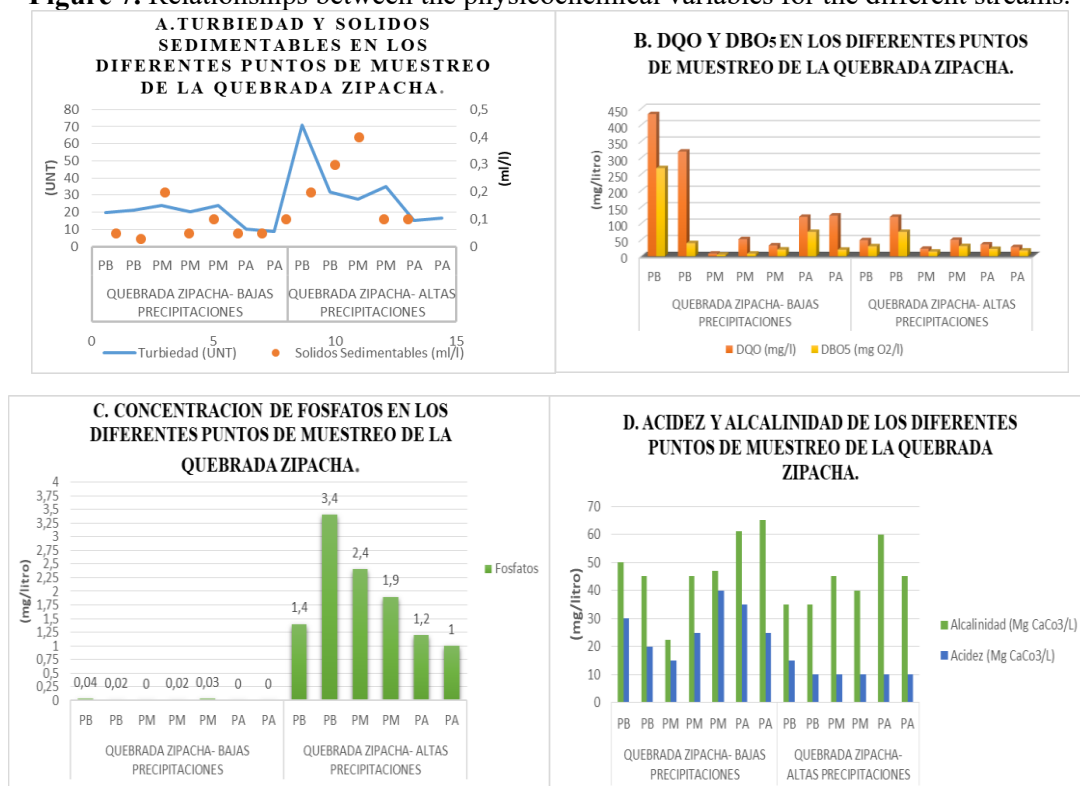
ND: No demostró.

– No se determinó el dato.

A continuación, se presentan (Figura 2), las relaciones entre algunas variables fisicoquímicas determinadas en la quebrada Zipachá. En la gráfica 2(A), se evidencia el incremento de la turbiedad y de la cantidad de sólidos sedimentables debido a las altas precipitaciones, las cuales arrastran diferentes tipos de materiales, que se incorporan a la fuente hídrica; en la gráfica 2(B) se observa la variación de DQO y DBO5 en esta se

aprecia una disminución de los valores de DQO y DBO5 en periodos de altas precipitaciones debido a que estas ayudan a diluir la concentración de materia orgánica presente en la fuente hídrica, de igual manera es necesario saber que las variaciones de concentración de DQO y DBO5 están sujetas al flujo másico de descarga del lixiviado, el cual no es constante; en la gráfica 2(C) se observa un incremento abrupto de las concentraciones de fosfatos en temporada de altas precipitaciones, es posible que la escorrentía superficial ayude a transportar las trazas de fosfatos y por último en la gráfica 2(D) se aprecia la variabilidad de la alcalinidad y acidez, siendo estos dos parámetros de gran importancia ya que permiten establecer la capacidad de amortiguación del agua frente a cambios bruscos del pH.

Figura 7. Relaciones entre las variables fisicoquímicas para las diferentes quebradas.
Figure 7. Relationships between the physicochemical variables for the different streams.



En la tabla 3, se presenta la caracterización fisicoquímica, microbiológica y la determinación de metales pesados para las Quebradas afluentes a la Quebrada Zipachá y en la gráfica 3 las relaciones de algunas variables fisicoquímicas. El análisis de los parámetros físico-químicos, metales pesados y coliformes en las cinco quebradas adyacentes al relleno sanitario revela una significativa alteración de la calidad del agua a lo largo de los puntos de muestreo. Los elevados valores de DQO y DBO5, especialmente en la Quebrada 2 P1 y Quebrada 3 P1, indican una alta carga de materia orgánica, posiblemente derivada de la infiltración de lixiviados del relleno sanitario. La presencia de metales pesados como plomo y cromo en concentraciones que exceden los límites normativos en la Quebrada 1 P1 y Quebrada 4 P1 sugiere una movilización de contaminantes desde el relleno hacia las aguas superficiales. Además, los altos niveles de turbiedad y sólidos sedimentables reflejan procesos de erosión y arrastre de sedimentos contaminados. La detección de coliformes totales y fecales en concentraciones elevadas en varias muestras evidencia una contaminación microbiológica significativa, reforzando la hipótesis de un impacto directo del relleno sanitario en la calidad de las aguas circundantes.

Tabla 3. Caracterización fisicoquímica, microbiológica y determinación de metales pesados de las Quebradas afluentes a la Quebrada Zipachá.

Table 3. Physicochemical and microbiological characterization and determination of heavy metals in the tributary streams to the Zipachá Stream.

PARAMETRO FISICOQUIMICO, METAL PESADO Y COLIFORMES.	QUEBRADA 1				QUEBRADA 2			QUEBRADA 3		QUEBRADA 4	QUEBRADA 5	
	P1	P2	P3	P4	P1	P2	P3	P1	P2	P1	P1	P2
pH	7,27	7,22	5,98	7,37	7,18	7,32	7,37	7,12	7,15	7,63	7,04	6,89
Conductividad (µS/cm)	280	435	516	267	118,2	134,3	140,4	96,1	101,9	2,29	163,1	189,8
Turbiedad (UNT)	36,9	39,5	32,7	33,2	238	135	51,7	876	284	12	193	230
DQO (mg/litro)	26	50	36	36	216	5	0	175	29	25	22	39
Nitritos (mg/ litro NO ₂)	0,089	0,068	0,056	0,046	ND	0,011	0,017	ND	ND	0,012	0,027	0,053
Fosfatos (mg/litro PO ₄)	4,3	6,3	1,5	1,8	ND	8,4	4	17	ND	ND	0,2	ND
Sulfatos (mg/litro SO ₄)	1	2	17	0	ND	12	18	ND	ND	95	1	6
Solidos Sedimentables (ml/litro)	0,5	0,6	0,2	0,4	3	0,8	0,5	1,8	0,5	0,2	0,7	3
Solidos volátiles(mg/litro)	-	-	-	-	70	46	60	86	28	80	1090	588
Dureza (MgCaCO ₃ /litro) (ppm)	60	500	1020	210	500	80	64	316	44	305	150	160
Alcalinidad (Mg CaCO ₃ /litro)	25	20	20	15	45	60	50	40	28	180	10	16
Acidez (MgCaCO ₃ /litro)	100	50	55	50	45	10	10	12,5	15	65	5	20
Cloruros (mg/litro)	67,355	258,785	70,9	85,08	77,99	63,81	35,45	26,5875	24,815	141,8	51,4025	76,2175
DBO5 (MgO ₂ /litro)	16,12	31	22,32	22,32	40	5	-	20	5	8	13,64	24,18
Pb(mg/litro)	0,2417	-	0,0554	0,0841	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Cr(mg/litro)	0,13	-	ND	0,0104	ND	ND	ND	ND	-	0,055	ND	ND
Zn(mg/litro)	0,7494	-	0,0065	0,009	0,0421	0,0382	0,05	0,0837	0,058	0,0782	0,0745	0,0666
Cu(mg/litro)	ND	ND	ND	ND	0,0092	0,0013	0,0171	0,0181	0,0161	0,0388	-	-
Mn(mg/litro)	-	-	-	0,0624	0,0674	0,0654	0,0723	0,0743	0,0654	0,3389	0,0565	0,0605
Cd(mg/litro)	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Fe(mg/litro)	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Coliformes Totales (U.F.C/ ml)	5450	-	-	450	0	-	1150	200	250	-	1250	3350
Coliformes Fecales (U.F.C/ml)	0	-	-	0	0	-	0	0	0	-	1200	0

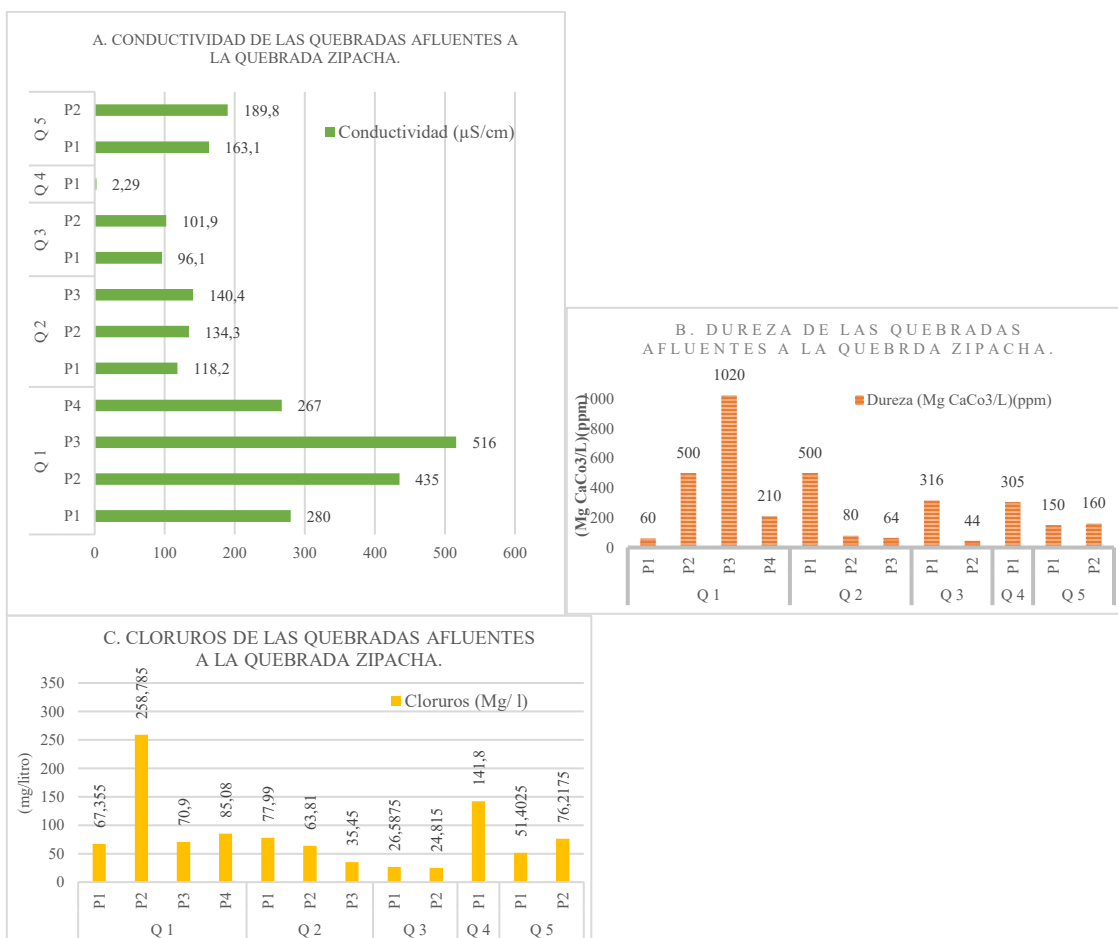
ND: No demostró.

- No se determinó el dato.

En la gráfica 3(A) se muestra la conductividad de las diferentes quebradas, en donde se logró notar que la quebrada 1 es la que tiene mayores valores de conductividad, esto puede ser por el contacto directo que tiene esta quebrada con el lixiviado, puesto que recientemente adecuaron un canal para el paso de lixiviados en el mismo sitio por donde pasa la quebrada; de igual manera en la gráfica 3(B) también se evidencio altas concentraciones de dureza en la quebrada 1 como 1020 ppm clasificándolas de duras a muy duras, esto según El Servicio Geologico de Estados Unidos - USGS (2018) Se debe principalmente al contenido de iones de calcio (Ca²⁺) o magnesio (Mg²⁺); en la gráfica 3(C) se presenta la concentración de cloruros, en la que se evidencia un pico en el punto 2 de la quebrada 1.

Figura 8. Variables fisicoquímicas de las diferentes Quebradas.

Figure 8. Physicochemical variables of the different ravines.



La Tabla 4 presenta la caracterización fisicoquímica, microbiológica y la determinación de metales pesados del lixiviado proveniente del Relleno Sanitario "La Cortada". En este análisis, se observó la ausencia de nitritos y fosfatos durante los periodos de bajas precipitaciones, así como la no detección de metales pesados como plomo y cadmio. Al comparar estos resultados con la caracterización del lixiviado realizada por Berbesi (2014), se identificó que, mientras en ese estudio no se reportaba la presencia de cobre, en la actualidad se detecta una concentración significativa de este metal. Además, se evidenció un incremento progresivo en las concentraciones de hierro, que pasaron de 1.4 mg/litro en el estudio de [6] a 8.14 mg/litro en la presente investigación, particularmente durante los periodos de altas precipitaciones. Esto sugiere un cambio en la composición del lixiviado a lo largo del tiempo, lo que podría tener implicaciones en la calidad del agua de la zona.

Tabla 4. Caracterización fisicoquímica, microbiológica y determinación de metales pesados del lixiviado proveniente del Relleno Sanitario La Cortada.

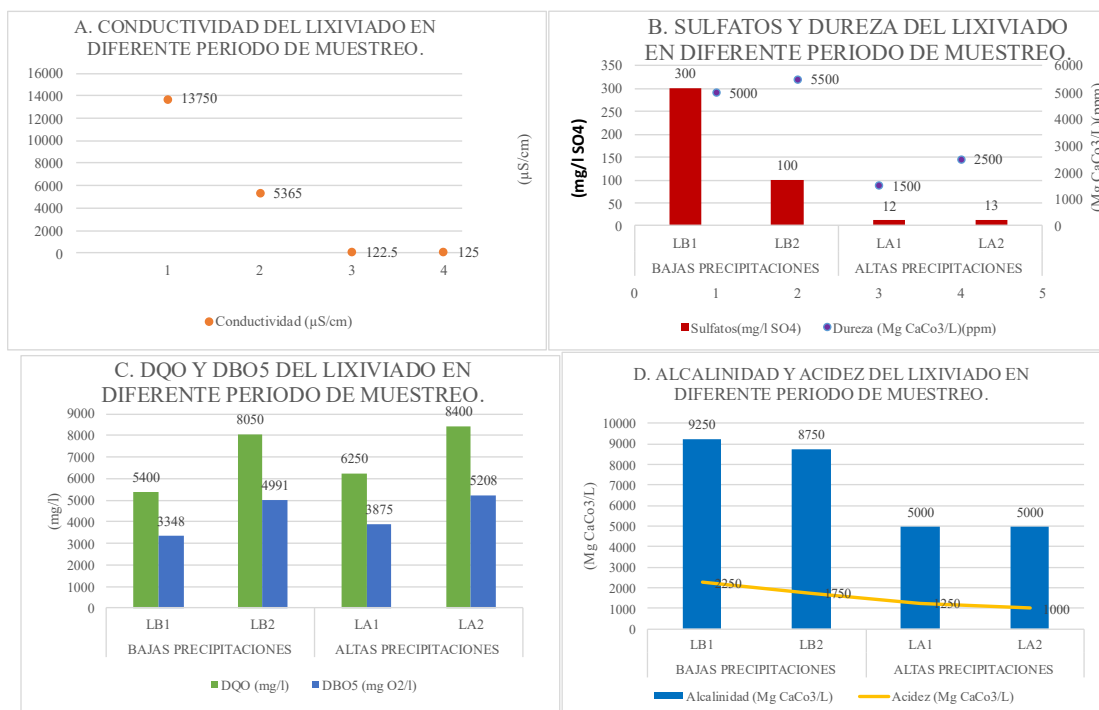
Table 4. Physicochemical and microbiological characterization and determination of heavy metals in the leachate from the La Cortada Landfill.

<i>Parametro fisicoquimico, metales pesados y coliformes.</i>	BAJAS PRECIPITACIONES		ALTAS PRECIPITACIONES	
	LB1	LB2	LAI	LA2
pH	7,8	8,02	-	-
Conductividad (µS/cm)	13750	5365	122,5	125
Turbiedad (UNT)	715	735	1000	690
DQO (mg/litro)	5400	8050	6250	8400
Nitritos (mg/litro NO ₂)	ND	ND	0,009	0,008
Fosfatos(mg/litro PO ₄)	ND	ND	2,8	2
Sulfatos(mg/litro SO ₄)	300	100	12	13
Solidos Sedimentables (ml/litro)	10	5	10	10
Sólidos volátiles	19000	14000	13900	9000
Dureza (MgCaCO ₃ /litro)(ppm)	5000	5500	1500	2500
Alcalinidad (MgCaCO ₃ /litro)	9250	8750	5000	5000
Acidez (MgCaCO ₃ /litro)	2250	1750	1250	1000
Cloruros (mg/litro)	1861,13	3988,13	1063,50	1772,50
DBO5 (MgO ₂ /litro)	3348	4991	3875	5208
Pb (mg/litro)	ND	ND	ND	ND
Cr(mg/litro)	0,94	0,98	0,28	0,28
Zn(mg/litro)	0,37	0,56	-	-
Cu(mg/litro)	0,07	0,08	0,06	0,07
Mn(mg/litro)	0,66	0,60	0,47	0,50
Cd(mg/litro)	ND	ND	ND	ND
Fe(mg/litro)	7,62	7,77	7,42	8,14
Coliformes Totales (U.F.C/ ml)	-	-	1000	100
Coliformes Fecales (U.F.C/ml)	-	-	0	0

ND: No demostró.

– No se determinó el dato

Figura 9. Variables fisicoquímicas del lixiviado proveniente del Relleno Sanitario La Cortada.
Figure 9. Physicochemical variables of the leachate from the La Cortada Sanitary Landfill.



En las gráficas 4 (A, B, C y D) se observa las variables fisicoquímicas en los diferentes periodos muestreados, en las que se evidencia: en la gráfica 4 (A) se muestra la conductividad del lixiviado, presentándose valores altos de conductividad en el periodo de bajas precipitaciones; en la gráfica 4(B) se evidencia que la dureza y la concentración de fosfatos aumento en el periodo de bajas precipitaciones, la dureza en general es mayor 1500 ppm lo que hace que este residuo líquido sea muy duro; de igual manera en la gráfica 4 (C) se observa las concentraciones de DQO y DBO5 en la que se evidencia un valor elevado de DQO y DBO5 en periodos de altas precipitaciones, por último en la gráfica 4(D) se observó mayor alcalinidad y acidez en bajas precipitaciones; si se analizan los parámetros de conductividad, dureza y alcalinidad se logra observar que son directamente proporcionales; cabe resaltar que los valores obtenidos son función directa de las condiciones del relleno sanitario como la edad de las diferentes celdas y tipo de residuos.

4.4 Comparación con normativa

Se evidencio que los parámetros fisicoquímicos determinados en la Quebrada Zipachá comparados con el Decreto 1076: Por medio del cual se expide el decreto único reglamentario [29], no cumplen para el consumo humano y doméstico (tratamiento convencional y desinfección) sobrepasando el límite permisible para cromo y turbiedad, de igual manera no cumple la destinación del recurso para uso agrícola, preservación de flora y fauna sobrepasando los límites permisibles de cromo, plomo, zinc y hierro; siendo cromo y plomo sustancias de interés sanitario en la normativa mencionada. De igual manera al comparar la caracterización con el RAS Titulo C se evidencia que es una fuente muy deficiente superando la DBO5, el RAS menciona que los procesos que se requiere para potabilizarla son: pretratamiento, coagulación, floculación, sedimentación, filtración rápida o filtración en múltiples etapas, desinfección, estabilización y tratamientos específicos. Así mismo al comparar los valores con la Resolución conjunta 2115 del Ministerio de Vivienda & Ministerio de la Protección Social (2007) [30] se evidencio que no cumple la turbiedad, la cantidad de fosfatos y excede la concentración de cromo lo cual resulta preocupante pues esta es actualmente utilizada para riego de cultivos y consumo doméstico sin ningún tratamiento.

La Agencia de Protección Ambiental - EPA (2017) sugiere valores para metales pesados como el plomo, cromo y cobre. Según la (EPA) el contenido normal de plomo es de 10mg/kg, así mismo dice que para el cromo es de 0,1 a 0,5 mg/kg y el rango tóxico esta entre 5 y 30 mg/kg, de igual manera menciona que el rango normal para el cobre esta entre 5 y 30 mg/kg, según estos valores para este estudio no se supera la concentración normal de plomo y cobre, pero se evidencia que para el caso de cromo si supera el 0,5 mg/kg el apique 3 obteniéndose un valor de 7,8 mg/kg encontrándose en el rango de toxicidad. Así mismo [32] menciona que el rango normal para zinc es de 10 a 100mg/kg en este caso ningún apique lo supera. Cabe resaltar que estos valores son simplemente consideraciones.

6. CONCLUSIONES

Los resultados de los 11 sondeos eléctricos verticales (SEV) mostraron variaciones de resistividad entre 11,3 $\Omega \cdot m$ y 359 $\Omega \cdot m$, identificándose valores inferiores a 20 $\Omega \cdot m$ en las capas de contacto entre el relleno y la Formación Colón, lo que indica zonas altamente conductivas por saturación de lixiviados. Las líneas 1 y 5 de tomografía de resistividad eléctrica (TRE) evidenciaron plumas de contaminación con resistividades promedio de 1 a 10 $\Omega \cdot m$, atribuibles a material saturado con lixiviado. Este patrón anómalo se asocia a la posible ruptura de la geomembrana y al rebose del tanque de recirculación, favoreciendo la migración de contaminantes hacia profundidades de hasta 20 metros y su incorporación al nivel freático local. En consecuencia, el método geofísico permitió delimitar zonas críticas de infiltración con una resolución vertical efectiva superior al 90 % respecto a los perfiles obtenidos.

Los análisis de las 32 muestras de suelo en 11 apiques revelaron pH entre 4,3 y 6,3, lo que indica acidez moderada a alta que incrementa la solubilidad de los metales pesados. Se detectaron concentraciones de hierro (Fe) entre 19,3 y 56,8 mg/L, manganeso (Mn) hasta 14,3 mg/L, cobre (Cu) entre 0,07 y 1,11 mg/L, zinc (Zn) hasta 2,97 mg/L, cromo (Cr) hasta 1,95 mg/L, y plomo (Pb) hasta 0,61 mg/L. Estos valores superan los límites de referencia establecidos por la EPA (Fe \leq 0,3 mg/L, Mn \leq 0,05 mg/L, Pb \leq 0,01 mg/L, Cr \leq 0,1 mg/L) en más de un 1000 % en algunos casos, evidenciando una contaminación severa. Asimismo, la conductividad eléctrica alcanzó valores de hasta 191,1 $\mu S/cm$, confirmando una elevada carga iónica asociada a los lixiviados. Se identificó el nivel freático entre 1,2 y 1,9 metros de profundidad en seis apiques (2, 3, 4, 6, 8 y 9), demostrando la conexión hidráulica entre la zona de depósito y el acuífero superficial, con riesgo directo de contaminación subterránea.

Los resultados de 18 muestras de agua mostraron que el pH osciló entre 6,38 y 7,77, manteniéndose cercano a la neutralidad, pero con una conductividad de hasta 161,5 $\mu S/cm$ y turbidez máxima de 70,9 UNT durante altas precipitaciones. La DBO₅ alcanzó valores de 39,44 mg O₂/L, y la DQO hasta 433 mg/L, superando ampliamente los estándares del Decreto 1076 de 2015 (DBO₅ \leq 10 mg O₂/L). Se detectaron coliformes totales de hasta 2200 UFC/ml y presencia de plomo (Pb = 0,1379 mg/L) y cromo (Cr = 0,1525 mg/L), ambos por encima de los límites permisibles (Pb \leq 0,01 mg/L; Cr \leq 0,05 mg/L). En los lixiviados del relleno se registraron valores extremos de conductividad de 13.750 $\mu S/cm$, DQO de 8.400 mg/L y Fe hasta 8,14 mg/L, lo que confirma su alta capacidad contaminante. Estos resultados demuestran que el Relleno Sanitario “La Cortada” afecta directamente la calidad del agua superficial y subterránea, volviéndola no apta para riego ni consumo humano, y exigiendo la implementación urgente de sistemas de tratamiento, impermeabilización y monitoreo hidrogeoquímico permanente.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICA

- [1] J. Ullca, “Los rellenos sanitarios,” *La Granja Rev. Ciencias la Vida*, vol. 4, pp. 2–17, 2006.
- [2] A. A. S. Junior, S. B. F. Von Der Osten, E. H. de Sá Júnior, C. F. Miyashiro, E. dos Reis Duarte, and A. V. Sauer, “Aterro sanitário: relevância e técnicas de impermeabilização do solo,” *Diversity*, vol. 13, pp. 142–153, 2021.

- [3] M. J. Corena, “Sistemas de tratamientos para lixiviados generados en Rellenos Sanitarios,” Universidad de Sincelejo, 2018.
- [4] J. Suarez and H. Zuñiga, “Detección de capas de desechos con métodos geoelectricos: caso Relleno Sanitario Río Azul, Costa Rica.,” *Rev. Geológica América Cent.*, vol. 49, pp. 129–139, 2013.
- [5] L. Carvajal, J. Ramón, and J. Ramon, “Contaminación fisicoquímica de acuíferos por los lixiviados generados del relleno sanitario El Carrasco, de Bucaramanga,” *Prod. + Limpia*, vol. 11, 2016.
- [6] A. F. Berbesi, “Modelación del comportamiento del flujo del agua de la Quebrada Zipacha, Municipio de Pamplona- Norte de Santander. Mediante el software Hec- Ras, ArcGis, Qual 2K.,” Universidad de Pamplona, 2014.
- [7] N. A. Pico, “Biorremediación a escala piloto del lixiviado generado en el Relleno Sanitario La Cortada, ubicado en el municipio de Pamplona, Norte de Santander a partir de los microorganismos encontrados en este. Pamplona, Colombia.,” 2015.
- [8] A. G. Carrillo, “Evaluación Hidromorfológica, Fisicoquímica e Hidrobiológica del agua de la Quebrada Zipachá del municipio de Pamplona, Norte de Santander,” 2018.
- [9] S. Villamizar, J. Soto-Verjel, A. M. Cordoba, and C. A. P. Bustos, “Scoping acoplado a la metodología de Conesa para la evaluación ambiental de un sistema avanzado de descontaminación de lixiviado de relleno sanitario,” *Ing. y Compet.*, 2022.
- [10] E. Rivera-Laguna, L. E. Barba-Ho, and P. Torres-Lozada, “Determinación de la toxicidad de lixiviados provenientes de residuos sólidos urbanos mediante indicadores biológicos,” 2013.
- [11] D. E. Martínez, “IMPACTO DEL LIXIVIADO DE RELLENOS SANITARIOS EN LA CUENCA DEL ARROYO LOBERÍA: I. CARACTERIZACIÓN DE LA CARGA CONTAMINANTE,” 2004.
- [12] M. Moraru and A. V. Tanasie, “Geoelectric Tomography and Electrical Methods, with Applicability in the Strategy for Identifying Contaminated Area,” *2016 Int. Symp. Fundam. Electr. Eng.*, pp. 1–6, 2016.
- [13] P. M. Pagán, “Aplicación de diferentes técnicas no destructivas de prospección geofísica a problemas relacionados con contaminación ambiental producidas por diferentes actividades antrópicas en la Región de Murcia,” 2006.
- [14] A. J. M. Gutierrez, “Caracterización de Sitio empleando Prospección Geofísica y Geotécnica. Caso de estudio Vía principal Troncal Central del Norte (Ruta Nacional 55) a la altura del Km 68+500 en el Municipio de Pamplona, Norte De Santander (Colombia),” 2020.
- [15] G. O. Bayowa, D. E. Falebita, and R. O. Adegboyesga, “Surface DC resistivity survey of contamination Beneath Ido-Osun dumpsite, southwestern Nigeria,” *Geofis. Int.*, vol. 54, pp. 343–352, 2015.
- [16] Y. D. Hinojosa, *Aplicación de métodos geoelectricos en zonas clausuradas y activas del relleno sanitario regional “La cortada”, Municipio de Pamplona, Norte de Santander, Colombia.* 2017.

- [17] Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), *Métodos analíticos del laboratorio de suelos*. 1990.
- [18] Unified System Soil Classification, *Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes*. 2011. doi: 10. DOI: 10.1520/D2487-11.
- [19] Instituto Nacional de Vías, *Normas y especificaciones técnicas 2012 INVIAS*. 2012.
- [20] A. P. H. Association, *Standard methods for the examination of water and wastewater*, 24th ed. 2012.
- [21] APHA-AWWA-WPCF, *Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales*, 1st ed. España, 1992.
- [22] E. M. C. Zapata and A. M. L. Caicedo, “Validación del método de detección de coliformes totales y fecales en agua potable utilizando agar chromocult,” 2014.
- [23] S. L. Ainscough and C. C. Kibbler, “An evaluation of the cost-effectiveness of using CHROMagar for yeast identification in a routine microbiology laboratory.,” *J. Med. Microbiol.*, vol. 47 7, pp. 623–628, 1998.
- [24] J. A. Torres Peña, J. R. Cantillo Romero, and M. A. Contreras, “Metodos Geofisicos Aplicados a La De Celdas Activas Y Clausuradas Del Relleno Sanitario ‘La Cortada’ (Norte De Santander),” *Rev. Ambient. Agua, Aire Y Suelo*, vol. 9, no. 1, pp. 1–11, 2018, doi: 10.24054/19009178.v1.n1.2018.3210.
- [25] A. G. Chavarro and E. J. G. Bernal, “Caracterización de la calidad de las aguas de la quebrada Fucha utilizando los índices de contaminación ICO con respecto a la precipitación y usos del suelo,” 2016.
- [26] Y. V. Mendoza, J. D. R. Valencia, and L. A. L. Areniz, “ANÁLISIS DE LAS CONDICIONES DEL RECURSO HIDRICO EN LA QUEBRADA ESCORIAL, PAMPLONA NORTE DE SANTANDER,” *Rev. Ambient. AGUA, AIRE Y SUELO*, 2021.
- [27] D. Gelvez Suarez, M. E. Rivera, and F. Solano Ortega, “Análisis estadístico de parámetros hidrometeorológicos, fisicoquímicos y microbiológicos incidentes en la calidad de la quebrada Monteadentro,” *Rev. Ambient. AGUA, AIRE Y SUELO*, vol. 11, no. 2 SE-Artículos, pp. 1–8, Jul. 2020, doi: 10.24054/aaas.v11i2.872.
- [28] U.S. Geological Survey’s - USGS, “Water Hardness,” Water Science School.
- [29] Presidente de la republica de Colombia, “Decreto 1076: Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del sector Ambiente y Desarrollo Sostenible.” 2015.
- [30] Ministerio de Vivienda and Ministerio de la Protección Social, “Resolución Conjunta 2115: Por medio de la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano.” Colombia, 2007.
- [31] EPA, “Causal Analysis Diagnosis Decision Information System (CADDIS).”
- [32] A. Kabata and H. Pendias, “Trace Elements in Soils and Plants,” *Sci. Res.*, 2001.

