



Universidad de Panamá

Facultad de Ciencias Naturales Exactas y Tecnología

Escuela de Física

**FLUORESCENCIA DE RAYOS X EN MUESTRAS DE SUELOS Y ROCAS DEL SUR DE
PENONOMÉ**

Realizado por:

Mayerlis Michell Fernandez Tamura

2-749-789

Trabajo de graduación para optar por el título de Licenciatura en Física

Realizado bajo la asesoría de:

Dr. Alberto Caballero

Panamá, octubre del 2025.

DEDICATORIA

Le dedico este trabajo a mi madre, Matilde Tamura, por su amor incondicional, apoyo y confianza en cada etapa de mi vida.

A mis abuelos, Irma Ibarra, Sergio Brokamp, Nidia Gonzales y en memoria de Ernesto Tamura, por su cariño y ejemplo de vida que me han acompañado en cada paso.

A mi tía, Elsa Ibarra, por abrirme las puertas de su hogar y brindarme siempre cuidado y afecto durante mis estudios.

A mi familia en general, por ser mi mayor motivación y sostén. Y a mis queridos amigos, por su compañía y aliento durante todo este proceso.

AGRADECIMIENTOS

Le agradezco a mi madre por su apoyo durante toda la carrera.

A mi asesor de tesis, el Doctor Alberto Caballero, mi más sincero agradecimiento, por su guía, paciencia y enseñanzas, así como por brindarme la oportunidad de formar parte de su equipo de trabajo durante el desarrollo de este proyecto.

A mis compañeros del Laboratorio de Hidrología Isotópica y Geofísica Aplicada: Prof. Humberto Edward, Bryan Torres, Prof. Juan Cedeño y Laura Villegas, por el apoyo brindado a lo largo del desarrollo de la tesis.

Al Laboratorio de Espectroscopía Mössbauer y Rayos X, de la Universidad de Panamá, por proporcionarme la instrumentación necesaria para esta investigación. En especial, al Dr. Juan Jaén y al Prof. Medin Denvers, por su valioso apoyo en la obtención y procesamiento de los datos.

Al profesor Gonzalo Carrasco, del Departamento de Estadística, por su disposición y asesoramiento en los aspectos estadísticos del estudio.

A la Universidad de Panamá, ya que este trabajo forma parte del proyecto “Determinación de metales pesados en los suelos de Puerto El Gago, como factor ambiental asociado a la enfermedad renal no tradicional”, con código VIP-CEIP-01-04-03-2024-05, financiado por la Vicerrectoría de Investigación y Postgrado.

A la Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (SENACYT), por el apoyo económico brindado durante el desarrollo de esta investigación.

A la Escuela Superior de Ingeniería “Lic. Adolfo López Mateos”, de la Universidad Autónoma de Coahuila, México, por su cordial acogida. En especial, a los doctores: José

Batista, Felipe López, Yuri Almaguer, Ramón Batista, Roberto Díaz, por sus enseñanzas y hospitalidad.

A los señores Luis Mitre y Pedro Mendoza, por el apoyo brindado durante las giras de campo.

A mis amigos y a todos aquellos que contribuyeron, en mayor o menor medida, a la culminación de este trabajo.

A todos ellos, ¡muchas gracias!

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE TABLAS	VIII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	IX
RESUMEN.....	XII
CAPÍTULO 1	1
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 ASPECTOS GENERALES	1
1.2 ANTECEDENTES	2
1.3 JUSTIFICACIÓN	5
1.4 OBJETIVOS	6
1.4.1 GENERALES.....	6
1.4.2 ESPECÍFICOS	6
1.5 ÁREA DE ESTUDIO	7
CAPÍTULO 2	9
2 MARCO TEÓRICO	9
2.1 FUNDAMENTOS FÍSICOS DE LA FLUORESCENCIA DE RAYOS X (FRX)	9
2.1.1 RAYOS X.....	9
2.1.2 INTERACCIÓN DE LOS RAYOS X CON LA MATERIA	10
2.1.3 PRODUCCIÓN DE RADIACIÓN FLUORESCENTE	11
2.1.4 EFECTOS DE ABSORCIÓN Y REALCE.	15
2.2 TIPOS DE ESPECTRÓMETROS DE FRX.....	17
2.2.1 ESPECTRÓMETRO DE DISPERSIÓN POR LONGITUD DE ONDA (WD-XRF)	18
2.2.2 ESPECTRÓMETRO DE ENERGÍA DISPERSIVA (ED-XRF)	20
2.2.3 COMPARACIÓN ENTRE ED-XRF Y WD-XRF.....	22
2.3 PRINCIPIOS DE ANÁLISIS ELEMENTAL POR FRX.....	23
2.3.1 IDENTIFICACIÓN DE ELEMENTOS	23
2.3.2 CUANTIFICACIÓN DE CONCENTRACIONES ELEMENTALES	24
2.3.2.1 MÉTODO EMPÍRICO.....	25

2.3.2.2	MÉTODO DE PARÁMETROS FUNDAMENTALES (FP)	26
2.4	CONSIDERACIONES PARA EL ANÁLISIS DE SUELOS Y ROCAS MEDIANTE FRX	29
2.4.1	CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DE ROCAS Y SUELOS	29
2.4.2	FUENTES DE ACUMULACIÓN DE METALES PESADOS EN SUELOS	30
2.4.3	FACTORES AMBIENTALES ASOCIADOS A METALES PESADOS	30
2.4.4	VENTAJAS Y LIMITACIONES DE LA FRX EN ESTUDIOS GEOAMBIENTALES	31
CAPÍTULO 3		33
3	CONTEXTO GEOLÓGICO	33
3.1	TECTÓNICA Y GEOLOGÍA REGIONAL	33
3.2	GEOLOGÍA LOCAL	34
3.3	GEOMORFOLOGÍA	39
3.4	CLIMATOLOGÍA	40
CAPÍTULO 4		41
4	INSTRUMENTACIÓN Y METODOLOGÍA	41
4.1	RECOLECCIÓN DE MUESTRAS	41
4.2	PREPARACIÓN DE MUESTRAS	46
4.3	DESCRIPCIÓN DE INSTRUMENTACIÓN	48
4.4	PROCESAMIENTO DE DATOS	50
CAPÍTULO 5		53
5	RESULTADOS	53
5.1	EVALUACIÓN INSTRUMENTAL DE LA RESPUESTA ESPECTRAL DE FRX PARA LA DETECCIÓN ELEMENTAL EN LAS MUESTRAS ANALIZADAS	53
5.1.1	RESPUESTA ESPECTRAL SUPERPUESTA	53
5.1.2	RESPUESTA ESPECTRAL POR CONFIGURACIÓN DEL EQUIPO	54
5.1.3	RESPUESTA ESPECTRAL CON DETECCIÓN DE ELEMENTOS TRAZA	59
5.2	CUANTIFICACIÓN ELEMENTAL	62
5.2.1	MUESTRAS DE ROCA	63
5.2.2	MUESTRAS DE SUELOS SUPERFICIALES (0 – 0,30 M)	66
5.2.3	MUESTRAS DE SUELOS SUBSUPERFICIALES (0,30 – 0,60 M)	70
5.3	CLASIFICACIÓN DE SUELOS Y ROCAS	¡Error! Marcador no definido.

5.3.1	ROCAS.....	74
5.3.2	SUELOS SUPERFICIALES.....	75
5.3.3	SUELOS SUBSUPERFICIALES.....	76
5.4	COMPARACIÓN FRX – DRX.....	77
5.5	MAPAS DE DISTRIBUCIÓN ELEMENTAL.....	79
5.3.1	DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DEL MANGANESO	80
5.3.2	DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DEL COBRE.....	83
5.3.3	DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DEL ZINC	86
5.3.4	DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DEL BARIO	89
CAPÍTULO 6		92
6	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN.....	92
6.1	INTERPRETACIÓN ELEMENTAL DE ROCAS Y SUELOS.....	92
6.2	ELEMENTOS DE INTERÉS GEOAMBIENTAL.....	98
6.3.1	MANGANESO	98
6.3.2	COBRE.....	99
6.3.3	ZINC.....	100
6.3.4	BARIO	102
6.3	COMPARACIÓN CON NORMAS AMBIENTALES	104
CONCLUSIONES		107
RECOMENDACIONES		110
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		111

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Formaciones geológicas que afloran en el área de estudio	35
Tabla 2. Localización y descripción de los sitios de muestreo	42
Tabla 3. Concentración en porcentaje (%) o ppm de los elementos presentes en las rocas del Sur de Penonomé	63
Tabla 4. Concentración en porcentaje (%) o ppm de los elementos presentes en los suelos superficiales (0 – 0,30 m) del Sur de Penonomé.....	67
Tabla 5. Concentración en porcentaje (%) o ppm de los elementos presentes en los suelos subsuperficiales (0 – 0,30 m) del Sur de Penonomé	71
Tabla 6. Agrupamiento e interpretación petrológica de las rocas analizadas mediante FRX .	75
Tabla 7. Agrupamiento e interpretación los suelos superficiales a partir de los datos de FRX	76
Tabla 8. Agrupamiento e interpretación los suelos subsuperficiales a partir de los datos de FRX	77
Tabla 9. Comparación entre los resultados de FRX y DRX en muestras de roca, y clasificación litológica propuesta	78
Tabla 10. Valores de referencia y normativos para metales seleccionados en suelos (mg/kg, peso seco) según diferentes agencias y países.....	104

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Mapa del área de estudio en el Distrito de Penonomé, Provincia de Coclé.....	8
Figura 2.1. Interacción de los rayos X con la materia.....	10
Figura 2.2. Producción de radiación característica.....	12
Figura 2.3. Transiciones de rayos X en un átomo con $Z \sim 36$	13
Figura 2.4. Espectro típico de FRX	15
Figura 2.5. Curva de rendimiento fluorescentes en función del número atómico.....	16
Figura 2.6. Fluorescencia primaria y secundaria	17
Figura 2.7. Espectrómetro WD-XRF secuencial.....	19
Figura 2.8. Espectrómetro WD-XRF simultáneo	20
Figura 2.9. Representación esquemática de un espectrómetro ED-FRX	21
Figura 3.1. Mapa de la Microplaca de Panamá	34
Figura 3.2. Mapa geológico del área de estudio.....	366
Figura 3.3. Columna hexagonal rodeada de matriz arcillosa en Cerro Pan de Azúcar	37
Figura 3.4. Rocas observadas in situ en Cerro Divisa. a) Tobas de composición ácida. b) Cantos rodados (basaltos).....	377
Figura 3.5. Rocas observadas in situ en Cerro Posada. a) Tobas. b) Rocas vulcanoclásticas	38
Figura 3.6. Rocas basálticas observadas in situ en Cerro el Gago	39
Figura 4.1. Ubicación de las muestras de suelos y rocas recolectadas en el área de estudio	43
Figura 4.2. Puntos de muestreo cercanos a: a) pozo de la comunidad de Puerto El Gago y b) Cerro Zuela.....	44
Figura 4.3. Sitio de muestreo con: a) suelo arcilloso seco, próximo a Cerro Zuela y b) fragmento rocoso en profundidad, en sitio próximo a Cerro Posada.....	45
Figura 4.4. a) Excavación y b) recolección de muestras	46
Figura 4.5. a) Molienda y b) tamizaje de las muestras	47

Figura 4.6. Colocación en porta muestras.....	48
Figura 4.7. Espectrómetro XRF Epsilon 4 ED-XRF de Malvern Panalytical	49
Figura 4.8. Espectrómetro de fluorescencia de rayos X (EDXRF) en operación durante el análisis de muestras de suelos y rocas.....	50
Figura 4.9. Tabla de energías de emisión de rayos X (series K, L y M) utilizada en espectroscopía de fluorescencia (EDXRF)	52
Figura 5.1. Espectro resultante de la superposición de cinco (5) configuraciones para la muestra M5.....	54
Figura 5.2. Espectro de FRX (5 kV y 1622 μ A) de la muestra M2, sin filtro y en atmósfera de helio	55
Figura 5.3. Espectro de FRX (9 kV, 968 μ A) de la muestra M2, con filtro de Ti y atmósfera de helio	56
Figura 5.4. Espectro de FRX (12 kV, 833 μ A) de la muestra M2, con filtro Al-50 y atmósfera de aire	57
Figura 5.5. Espectro de FRX (20 kV, 500 μ A) de la muestra M2, con filtro Al-200 y atmósfera de aire	57
Figura 5.6a. Espectro de FRX (50 kV, 200 μ A) de la muestra M2 (rango 2,4 – 9,8 keV), con filtro Cu-500 y atmósfera de helio	58
Figura 5.6b. Espectro de FRX (50 kV, 200 μ A) de la muestra M2 (rango 6,4 – 36 keV), con filtro Cu-500 y atmósfera de helio	59
Figura 5.7. Espectro de FRX (12 kV, 833 μ A) de la muestra de suelo MS11 a profundidad de 0 – 0,30 m, con presencia de Cu y Zn	60
Figura 5.8. Espectro de FRX (20 kV, 500 μ A) de la muestra de suelo MS8 (0 – 0,30 m), con presencia de Cu, Zn, Rb, Sr y Zr.....	61
Figura 5.9. Espectro de FRX (50 kV, 200 μ A) de la muestra de suelo MS5 (0 – 0,30 m), con presencia de Cu, Zn, Rb, Sr, Zr y Ba	62
Figura 5.10. Distribución de la concentración de elementos mayoritarios en rocas por puntos de muestreo.....	64
Figura 5.11. Distribución de la concentración de elementos minoritarios en rocas por puntos de muestreo.....	65

Figura 5.12. Distribución de la concentración de elementos trazas en rocas por puntos de muestreo.....	66
Figura 5.13. Distribución de la concentración de elementos mayoritarios en suelos superficiales por puntos de muestreo	68
Figura 5.14. Distribución de la concentración de elementos minoritarios en suelos superficiales por puntos de muestreo	68
Figura 5.15. Distribución de la concentración de elementos trazas en suelos superficiales por puntos de muestreo	700
Figura 5.16. Distribución de la concentración de elementos mayoritarios en suelos subsuperficiales por puntos de muestreo.....	72
Figura 5.17. Distribución de la concentración de elementos minoritarios en suelos subsuperficiales por puntos de muestreo.....	73
Figura 5.18. Distribución de la concentración de elementos trazas en suelos subsuperficiales por puntos de muestreo	74
Figura 5.19. Mapa de distribución de Manganeso en rocas	81
Figura 5.20. Mapa de distribución de Manganeso en suelos a profundidad de 0 – 0,30m	82
Figura 5.21. Mapa de distribución de Manganeso en suelos a profundidad de 0,30 – 0,60 m	83
Figura 5.22. Mapa de distribución de Cobre en rocas	84
Figura 5.23. Mapa de distribución de Cobre en suelos a profundidad de 0 – 0,30 m	85
Figura 5.24. Mapa de distribución de Cobre en suelos a profundidad de 0,30 – 0,60 m	866
Figura 5.25. Mapa de distribución de Zinc en rocas	887
Figura 5.26. Mapa de distribución de Zinc en suelos a profundidad de 0 – 0,30 m	88
Figura 5.27. Mapa de distribución de Zinc en suelos a profundidad de 0,30 – 0,60 m	89
Figura 5.28. Mapa de distribución de Bario en rocas	90
Figura 5.29. Mapa de distribución de Bario en suelos a profundidad de 0 – 0,30 m.....	91

RESUMEN

Este estudio evaluó la composición elemental de suelos y rocas en el sur de Penonomé para establecer una línea base geoambiental y determinar la presencia y distribución de elementos de interés. Se recolectaron 24 muestras de suelo a dos profundidades y 8 de roca, seleccionadas según la variabilidad litológica y el entorno local. Las muestras se analizaron mediante espectrometría de fluorescencia de rayos X de energía dispersiva, utilizando el método Omnian para identificar y cuantificar los elementos.

Los resultados muestran que los suelos están compuestos principalmente por Si, Al, Fe, Ca, Ti, Sr, Zr, entre otros. Los elementos de interés geoambiental identificados (Mn, Cu, Zn y Ba) presentaron concentraciones variables, en su mayoría dentro de los límites establecidos por organismos internacionales como la USEPA, la CCME, el NMHPPE y el SCIJ. Los mapas de distribución espacial indican que las concentraciones más altas se asocian con afloramientos volcánicos, lo que sugiere un origen geogénico y una escasa movilidad lateral. Las diferencias entre suelos superficiales y subsuperficiales confirman que la migración vertical es limitada, debido a la retención en suelos ricos en óxidos metálicos.

En resumen, los resultados muestran que la distribución de los elementos en el área depende de la litología local y de los procesos de meteorización, sin evidencia de influencia antrópica. Esta información servirá como línea base para futuros programas de monitoreo y para evaluar riesgos ambientales y sanitarios en la región.

Palabras clave: espectrometría de fluorescencia de rayos X, caracterización elemental, metales pesados, elementos traza, suelos.

CAPÍTULO 1

1 INTRODUCCIÓN

1.1 ASPECTOS GENERALES

El suelo, considerado como un sistema edáfico, es un recurso natural vital para la supervivencia de organismos y animales, así como para el desarrollo sostenible (Jiménez, 2017). Este es un medio heterogéneo compuesto por material orgánico e inorgánico, que, en condiciones naturales, se encuentra en un equilibrio dinámico.

Este equilibrio puede verse alterado, afectando negativamente sus características y reduciendo su capacidad de autodepuración (Barrio, N., 2017). En consecuencia, el suelo deja de ser eficaz y, en su lugar, actúa como una fuente de contaminación para los organismos que viven en él y otros seres relacionados (Sarmiento, 2020).

Entre los principales tipos de contaminación del suelo se encuentra la acumulación de elementos traza o metales pesados (Bueno et al., 2018). Estos pueden ser de origen geogénico, es decir, proceden de la propia roca madre en la que se formó el suelo, de actividad volcánica o procesos de mineralización natural, o antropogénico, asociado con actividades industriales, agrícolas, mineras, etc. (Flores et al., 2014).

Los metales pesados son difíciles de degradar (Barrón, s.f.) y pueden propagarse al medioambiente por procesos físicos y químicos, generando efectos nocivos sobre el ambiente y la salud de la población, especialmente cuando hay una acumulación excesiva de estos y se encuentran en formas químicas que pueden ser absorbidas por los organismos (Galán & Romero, 2008).

En Panamá se han realizado investigaciones relacionadas con la determinación de metales pesados en el suelo en distintos sitios de estudio. Sin embargo, estos no cubren todo

el territorio nacional, lo cual es fundamental para establecer niveles adecuados de metales pesados y otros contaminantes en los suelos (Villareal et al., 2018).

Investigaciones recientes en áreas de la provincia de Coclé, fueron realizadas con el fin de evaluar niveles de metales pesados en suelos y agua, para establecer su relación con la prevalencia de la enfermedad renal crónica y riesgos probabilísticos a la salud humana. Estas han reportado concentraciones variables de metales como Cu, Fe, As, Pb, Cr y V, cuyos valores medios son cercanos o superiores a los límites de referencia propuestos por el CCME y la USEPA (Valdés et al., 2024; Domínguez et al., 2025). Las mismas incluyen sitios aledaños a la zona de estudio, los cuales presentan características geológicas similares, esto evidencia que existe información insuficiente para la caracterización elemental, que permita establecer una línea base de investigación.

En este escenario, el análisis elemental de suelos y rocas cobra real importancia para evaluar posibles anomalías o fuentes de contaminación. La Fluorescencia de rayos X, es una técnica multielemental, rápida y que requiere una mínima preparación de muestra. Por ello, es útil para caracterizar la composición elemental de suelos y rocas en el área de interés, con el fin de comprender la distribución de estos elementos en la zona.

1.2 ANTECEDENTES

Si bien existen estudios previos sobre calidad de suelos y distribución elemental en Panamá, como se resume a continuación, la información referente a estos temas es limitada. Por otro lado, a nivel nacional no se cuenta con una tabla de referencia del contenido de metales pesados.

En este contexto, es relevante mencionar dos investigaciones desarrolladas en 2003 en las que se aplicó la espectrometría de fluorescencia de rayos X de energía dispersiva a matrices acuosas. Una de ellas se enfocó en la validación metodológica de la técnica

(Avendaño, 2003), mientras que la otra evaluó la calidad del agua en el área de la reserva minera de Remance, en la que se determinaron concentraciones de arsénico superiores a los límites establecidos por la OMS (Jaén, 2003). Estos estudios representan un aporte importante tanto en el desarrollo de metodologías de análisis mediante FRX como en la identificación de riesgos ambientales en zonas con influencia minera.

Posteriormente, en 2006, el Instituto de Innovación Agropecuaria de Panamá (IDIAP) elaboró mapas de la distribución elemental en suelos superficiales (0 – 20 cm) a nivel nacional. Estos representan la concentración de elementos como Al, Fe, Ca, Mg, P, K, Zn, Cu y Mn. Los datos empleados fueron obtenidos mediante análisis químicos convencionales, de muestras representativas tomadas en todo el país. Sin embargo, no proporcionan información detallada sobre su concentración, ni permiten la identificación de anomalías a escala local (IDIAP, 2006).

En 2023, investigadores de la Universidad de Panamá, realizaron a nivel nacional una evaluación de niveles de plomo en varios puntos de muestreo a orillas de la carretera interamericana, incluyendo Penonomé. Si bien, no se encontraron niveles altos en comparación con valores de referencias de la literatura, los niveles más elevados se encontraron en áreas urbanas, lo que podría estar asociado a contaminación antrópica por el flujo vehicular. Este estudio resalta la importancia de monitorear la contaminación por metales pesados en suelos cercanos a las zonas muestreadas (González et al., 2023).

A nivel regional, se han realizado estudios de evaluación de la concentración de metales pesados en suelos y sedimentos en diferentes sectores del país. Por ejemplo, en la cuenca del Río Santa María, que abarca las provincias de Herrera, Coclé y Veraguas, las muestras de suelo no registraron contaminación, pero se identificaron valores elevados de Cu y Ni (Oses et al. 2023). En la cuenca del Río La Villa, provincia de los Santos, se determinaron niveles altos de Cu en suelos y de Cu, Mn, Cr y As en sedimentos, los cuales se atribuyeron a la acción antrópica (Villareal et al. 2018). Por otro lado, en la subcuenca del Río Caño

Quebrado, provincia de Panamá Oeste, no se determinaron concentraciones altas de metales pesados, siendo el Cr el metal con mayor presencia, pero sin sobrepasar los límites permisibles (García M., 2023).

Además, investigaciones de impacto ambiental en zonas mineras, como en Remance, provincia de Veraguas, se determinaron concentraciones elevadas de As y Pb, atribuidas a las actividades extractivas (González, 2022). Cabe señalar que, la presencia de arsénico en esta área ya había sido reportada en aguas en un estudio realizado por Jaén (2003), lo que evidencia que la problemática asociada a este elemento tiene un carácter persistente en el tiempo. Esta situación refuerza la importancia de realizar monitoreos ambientales continuos, que permitan identificar riesgos ambientales y orientar estrategias de gestión.

En general, estos estudios se han interpretado con base en niveles de referencia internacionales, lo que a su vez refleja un creciente interés por evaluar la composición de suelos en distintas áreas del país. No obstante, en la provincia de Coclé la información sobre este tema sigue siendo limitada, aunque recientemente ha surgido un notable interés por explorar esta región.

En el 2024, fue publicado un estudio cuyo objetivo fue evaluar la concentración de metales nefrotóxicos en suelos y aguas de las comunidades con alta prevalencia de la enfermedad renal crónica en la provincia de Coclé. En dicho estudio se emplearon las técnicas de espectrometría de fluorescencia de rayos X (XRF) y espectrometría de emisión óptica con plasma acoplado inductivamente (ICP-OES) para evaluar la presencia de metales en suelos. Los resultados mostraron concentraciones de ciertos metales (As, Cr, V) por encima de los límites permisibles para suelos residenciales, según la USEPA, que reflejan un riesgo potencial para causar problemas de salud y que sugieren la necesidad de realizar una investigación más exhaustiva (Valdés et al., 2024). No se estableció con certeza la procedencia de estos metales, sin embargo, se hace énfasis en que las zonas muestreadas están asociadas a las

formaciones volcánicas como Cerro Viejo y La Yeguada, las cuales son similares a las existentes en la zona de estudio de la presente investigación.

Este año se realizó un estudio hidrogeoquímico de la calidad de las aguas subterráneas para el consumo humano en San Juan de Dios, Pajonal y Caballero, en la provincia de Coclé. Como parte del estudio se realizó una caracterización de rocas, suelos y sedimentos, con el fin de determinar si los metales presentes en las muestras de agua son de origen geogénico o antropogénico. Finalmente, se concluyó que los niveles de metales, como el As, Co, Cu, y Pb, se encuentran por debajo de lo que establece la norma para agua y que están vinculados con la geología local. Sin embargo, se sugiere un monitoreo de las zonas cercanas a las áreas mencionadas (Domínguez et al., 2025).

Los estudios revisados evidencian la relevancia de identificar elementos traza en suelos, aguas y sedimentos en distintas regiones del país, así como la eficacia de la espectrometría de fluorescencia de rayos X para este propósito. En Penonomé, en particular, existe un vacío de información sobre la composición elemental del suelo y la influencia de la geología local en la acumulación de metales, lo que hace imprescindible realizar estudios que permitan evaluar posibles riesgos ambientales o sanitarios.

1.3 JUSTIFICACIÓN

Según Lara Gonzáles (2019), en Panamá, se ha presentado un aumento significativo en la prevalencia de enfermedades renales crónicas no tradicionales (ERC-nt), cuyas causas no han sido determinadas. Los datos aún son limitados, pero se conoce que la mayoría de los casos de ERC-nt se encuentran en la provincia de Coclé, específicamente en áreas rurales y comunidades cercanas a zonas agrícolas.

De acuerdo con esto, investigaciones recientes como la publicada por Valdés et al. (2024), en la que se evaluó la concentración de metales pesados en áreas con alta prevalencia

de estas enfermedades, se reportaron niveles de As, Cr y V por encima los límites propuestos por la USEPA. Aunque la zona de estudio de la presente investigación no fue muestreada, si lo fueron zonas aledañas y las mismas comparten características geológicas similares, lo que refuerza la necesidad de realizar una evaluación elemental a escala local.

Por otra parte, como ya se ha mencionado, no se cuenta con suficiente información sobre caracterización de la composición elemental de los suelos y rocas de la zona de estudio. Esta falta de información representa una limitante de conocimiento que impide establecer niveles de referencia de estos elementos o identificar posibles fuentes de contaminación naturales o inducidas por actividad humana.

Con la información obtenida, mediante la técnica de Fluorescencia de Rayos X (FRX), que es capaz de realizar análisis multielemental con un mínimo de procesamiento de muestra, se podrán obtener datos preliminares sobre la composición elemental de los suelos y rocas de la zona de estudio, contribuyendo a la base de datos regional generando información útil para futuras investigaciones.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 GENERALES

- Evaluar la concentración y distribución elemental en muestras de rocas y suelos localizadas en el Sur de Penonomé, mediante Fluorescencia de Rayos X.

1.4.2 ESPECÍFICOS

- Elaborar mapas de distribución espacial de los elementos presentes en muestras de rocas y suelos del Sur de Penonomé.
- Comparar los resultados obtenidos con estudios previos, datos geológicos regionales y estándares de regulación ambiental.

- Identificar posibles fuentes de acumulación de elementos de interés geoambiental y su origen.

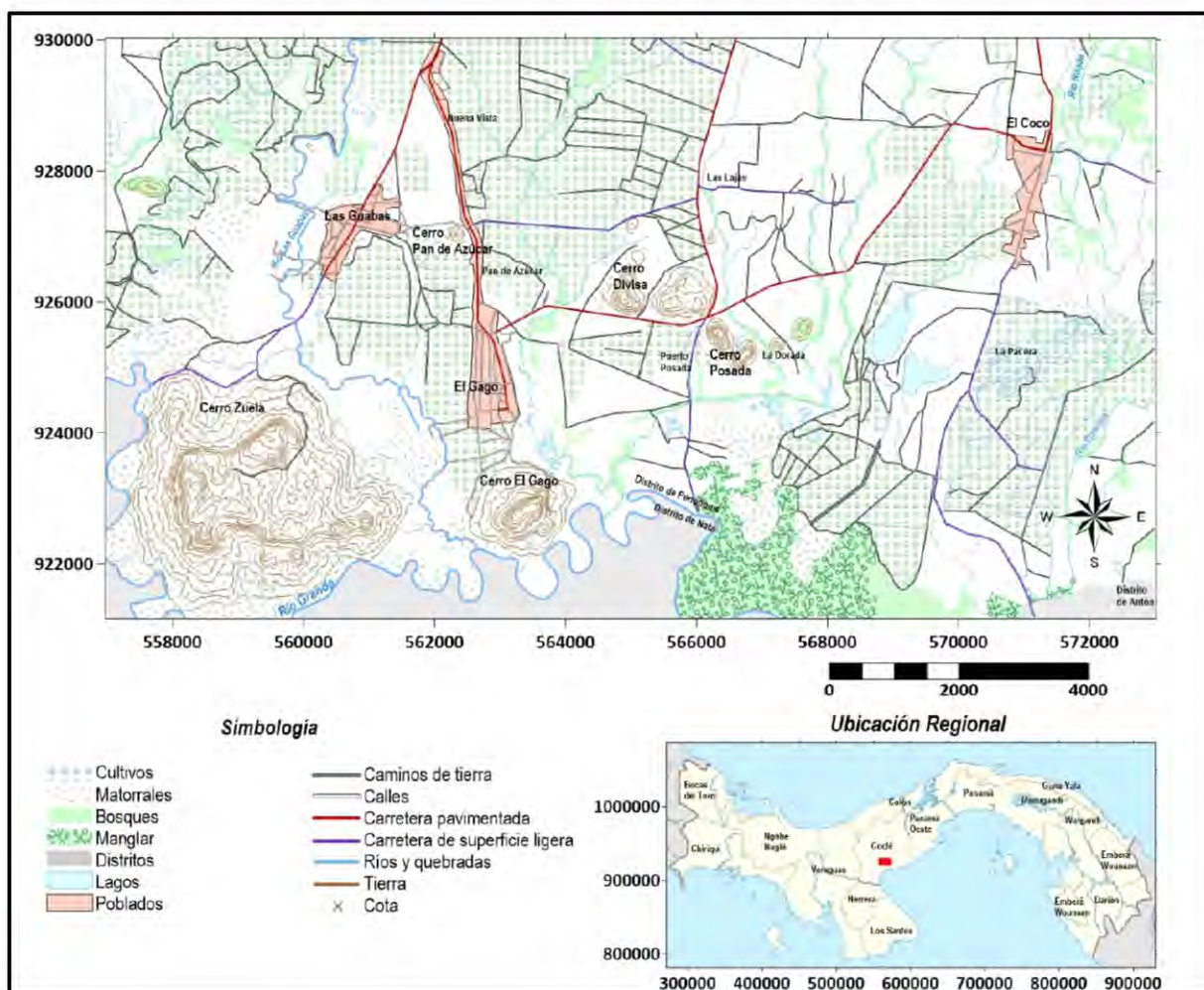
1.5 ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio se localiza al Sur de Penonomé, en el distrito de Penonomé, provincia de Coclé, comprende principalmente los corregimientos de El Coco, Puerto El Gago y Las Guabas.

Esta área se caracteriza por extensas llanuras con pequeñas elevaciones de origen volcánico, donde se observa una serie de cerros aislados con un alineamiento noreste-sureste, ubicados en la zona central, a la que pertenecen Cerro Pan de Azúcar, Cerro Divisa y Cerro Posada. Además, los cerros El Gago y Cerro Zuela, ubicados al suroeste (Figura 1.1).

Figura 1.1

Mapa del área de estudio en el Distrito de Penonomé, Provincia de Coclé



Nota. Adaptado de IGNT, 2012.

CAPÍTULO 2

2 MARCO TEÓRICO

2.1 FUNDAMENTOS FÍSICOS DE LA FLUORESCENCIA DE RAYOS X (FRX)

La fluorescencia de rayos X (FRX) se basa en la interacción de los rayos X con la materia, dando lugar a la emisión de radiación secundaria característica de cada elemento. Comprender los fundamentos físicos detrás de este fenómeno, tales como: naturaleza de los rayos X, mecanismos de interacción, producción de radiación fluorescente y efectos de absorción y realce, los cuales se desarrollan en esta sección, es esencial para interpretar adecuadamente los resultados obtenidos mediante la técnica de FRX.

2.1.1 RAYOS X

Los rayos X son una forma de radiación electromagnética ionizante de longitud de onda corta, que va de $0.1 \text{ \AA}$ a $100 \text{ \AA}$, descubiertos por Wilhelm Röntgen en 1895. Dependiendo del fenómeno que se pretenda explicar, los rayos X pueden ser vistos como ondas electromagnéticas con sus longitudes de onda asociadas, o como haces de fotones con sus energías asociadas, las cuales se expresan convencionalmente en keV.

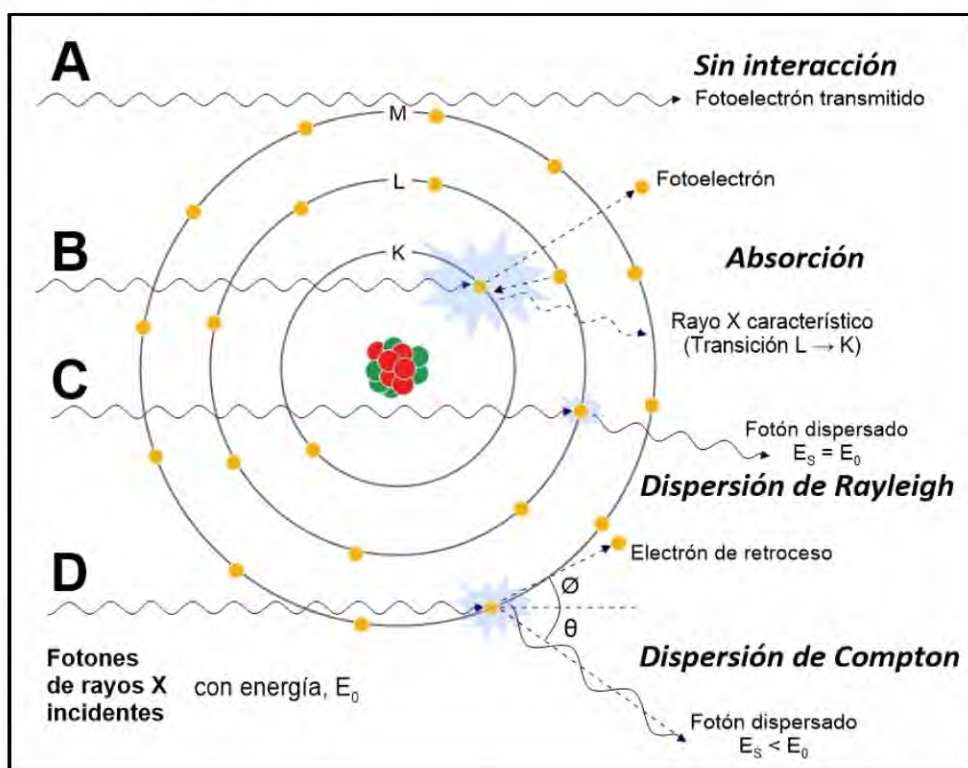
Esta radiación se produce en el ánodo de un tubo de rayos X, donde se emiten electrones de alta energía que son acelerados a través de una diferencia de potencial de miles de volts desde el cátodo hacia el ánodo. Al colisionar con los átomos del ánodo, los electrones son desacelerados y parte de su energía cinética se transforma en radiación electromagnética. Esta radiación incluye una componente continua, conocida como radiación de frenado o Bremsstrahlung y líneas superpuestas de radiación característica, que dependen del material del ánodo (Eisberg & Resnick, 1985).

2.1.2 INTERACCIÓN DE LOS RAYOS X CON LA MATERIA

Para comprender el origen y mecanismo de la fluorescencia de rayos X, es necesario conocer los distintos tipos de interacciones que pueden producirse cuando un haz de rayos X incide sobre un material. Estas interacciones dependen de la energía de fotones incidentes y de las propiedades del material, como su espesor, densidad y composición elemental. Las interacciones relevantes en este contexto son la transmisión, la dispersión (coherente e incoherente) y el efecto fotoeléctrico (Figura 2.1).

Figura 2.1

Interacción de los rayos X con la materia



Nota. Adaptada de Terzano et al., 2019.

Estas interacciones pueden resumirse en los siguientes mecanismos:

- La transmisión ocurre cuando una parte de los fotones atraviesa el material sin desviación, los fotones atraviesan las capas más profundas del material.
- La dispersión ocurre cuando los fotones cambian de dirección. Si el fotón es desviado sin pérdida de energía, se trata de dispersión coherente o de Rayleigh. En cambio, en la dispersión incoherente o de Compton, parte de la energía del fotón se transfiere a un electrón, generando un fotón dispersado de menor energía. Esta interacción no genera fluorescencia, pero contribuye al fondo continuo que se superpone a las líneas características.
- El efecto fotoeléctrico es la interacción más importante en FRX. El fotón de rayos X incidente es absorbido por un electrón de las capas más internas (K o L), que es expulsado del átomo. La vacante resultante conduce a una reestructuración electrónica, acompañada de la emisión de radiación característica del elemento (Eisberg & Resnick, 1985; Van & Markowics, 2002; Brouwer, 2010).

2.1.3 PRODUCCIÓN DE RADIACIÓN FLUORESCENTE

Cuando un átomo es irradiado con rayos X, puede ocurrir un proceso de absorción. Si el fotón incidente de rayos X posee una energía E , mayor que la energía de enlace ϕ de un electrón de las capas más internas (K, L, M, etc.), se produce una interacción primaria conocida como efecto fotoeléctrico. Esto implica la expulsión del electrón afectado, dejando al átomo en un estado excitado (Jenkins, 1999; Brower, 2010)

Para regresar a su estado basal, pueden ocurrir dos procesos: el efecto Auger y la emisión de radiación característica. En el primero, la energía de la transición interna provoca la expulsión de otro electrón desde el átomo. En el segundo, un electrón de una capa más

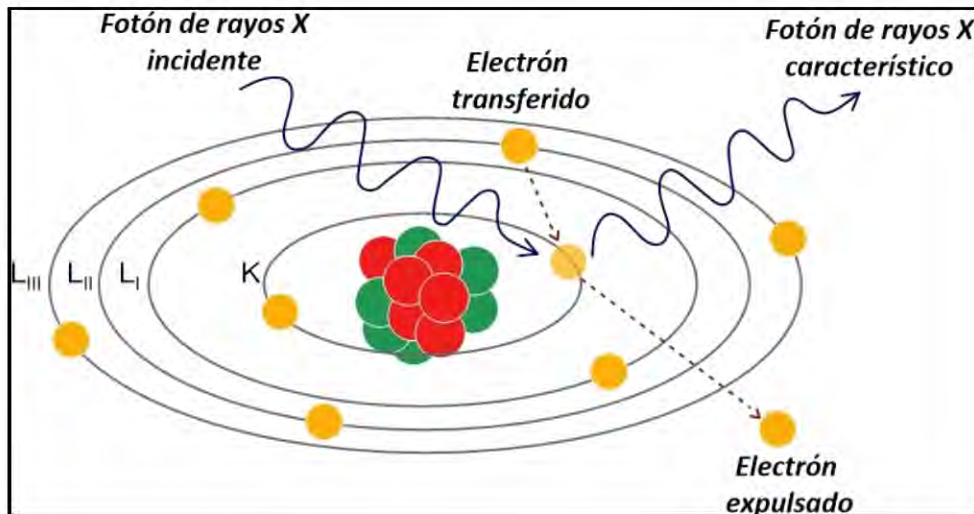
externa ocupa la vacante creada, emitiendo un fotón de rayos X (ver Figura 2.2), cuya energía viene descrita por la diferencia entre los niveles involucrados:

$$h\nu = E_{n_f} - E_{n_i} \quad (1)$$

donde E_{n_i} es la energía del estado inicial y E_{n_f} la energía del estado final del electrón (Dziunikowski, 1989).

Figura 2.2

Producción de radiación característica.



Nota. Adaptada de Brower, 2007.

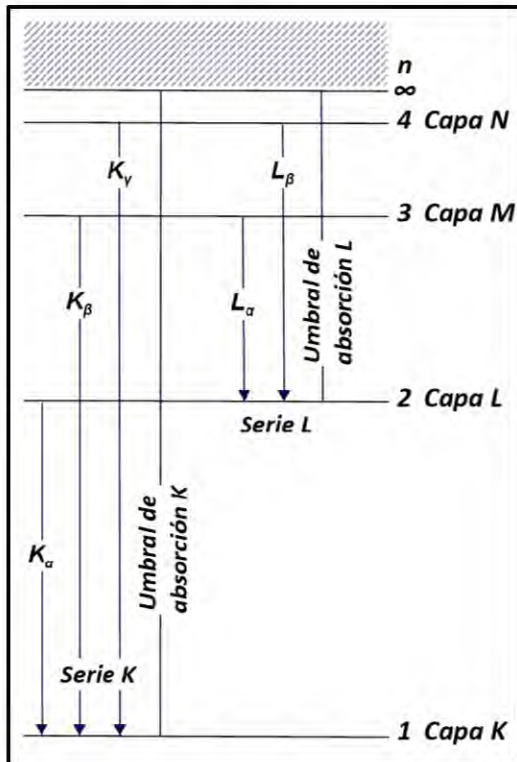
Si se expulsa un electrón de la capa K, la vacante será ocupada por un electrón de las capas L, M o superiores, generando la serie de líneas espectrales $K_\alpha, K_\beta, K_\gamma$, etc. En tanto que, si la vacante se produce en la capa L, las transiciones darán lugar a las líneas L_α, L_β , etc. (Figura 2.3)

Estas transiciones generan un espectro de líneas características cuyas longitudes de onda, dependen únicamente de la estructura electrónica de los átomos que conforman el

material del ánodo y no de la energía del haz incidente. Esto se debe a que cada elemento posee niveles de energía específicos (Alonso & Finn, 1971; Eisberg & Resnick, 1985).

Figura 2.3

Transiciones de rayos X en un átomo con $Z \sim 36$.



Nota. Adaptada de Alonso & Finn, 1971.

La relación entre la longitud de onda de las líneas características y el número atómico fue establecida empíricamente por Moseley en 1913, a partir del análisis de los espectros de rayos X de varios elementos. Su fórmula, conocida como la Ley de Moseley, se expresa como:

$$\frac{1}{\lambda} = K[Z - \sigma]^2 \quad (2)$$

donde K es una constante relacionada con la constante de Rydberg, λ es la longitud de onda característica, Z es el número atómico y σ es una constante que representa el efecto de

apantallamiento de los electrones internos, que reducen la carga nuclear efectiva experimentada por los electrones más externos.

Por otro lado, existe una relación directa entre la energía de un fotón y su longitud de onda:

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad (3)$$

donde h es la constante de Planck ($6,626 \times 10^{-34} \text{ Js}$), y c es la velocidad de la luz ($3 \times 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$), al sustituir estos valores en la ecuación 3 se encuentra la siguiente relación (Jenkins, 1999; Van & Markowicz, 2002):

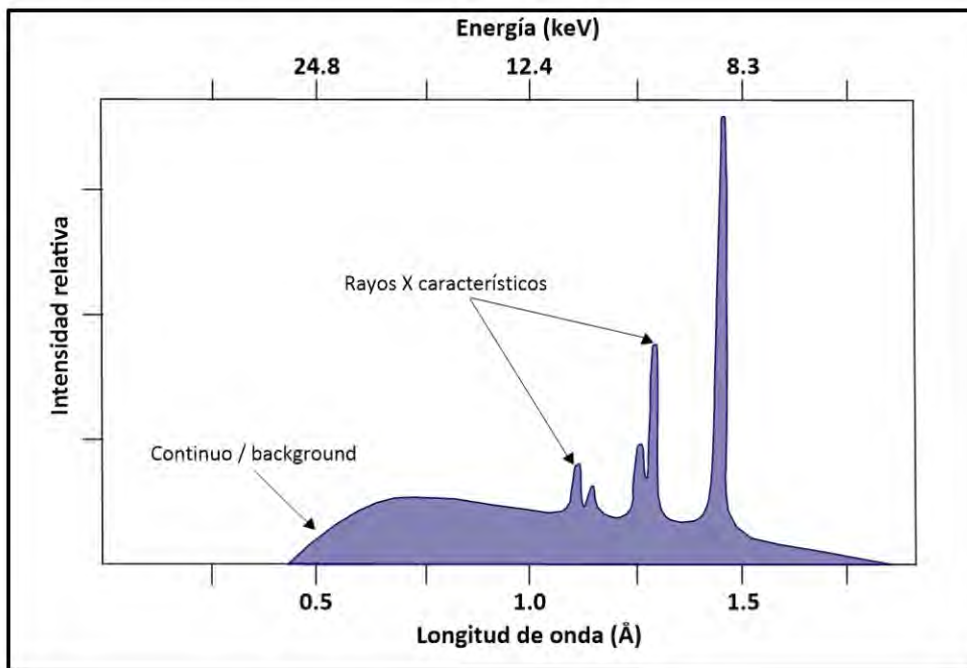
$$E(\text{keV}) = \frac{12,398}{\lambda (\text{\AA})} \quad (4)$$

Combinando esta ecuación con la Ley de Moseley, se deduce la relación entre las energías y longitudes de onda características con el número atómico. Esta relación justifica el uso del espectro de líneas características para la identificación cualitativa de los elementos mediante espectrometría de rayos X.

En la práctica, un espectro típico de fluorescencia de rayos X como el observado en la Figura 2.4, está constituido por las líneas características emitidas por los elementos presentes en la muestra, superpuestas a una señal continua conocida como fondo o background. Este fondo es generado por la dispersión de la radiación incidente y por la radiación continua de bremsstrahlung proveniente del tubo de rayos X. Sin embargo, durante el análisis de XRF, se aplican las correcciones necesarias para separar los picos de fluorescencia de la señal de fondo, garantizando así una interpretación adecuada (Macdonald, 2017).

Figura 2.4

Espectro típico de FRX



Nota. Adaptado de Eisberg & Resnick, 1985.

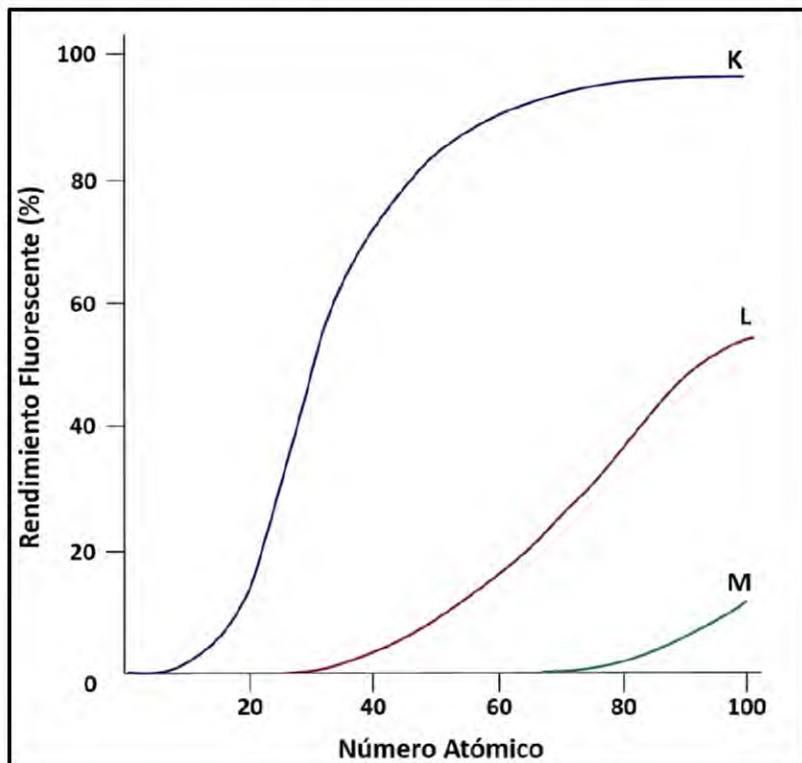
2.1.4 EFECTOS DE ABSORCIÓN Y REALCE.

La fluorescencia de rayos X es un proceso secundario que surge a partir de la absorción por efecto fotoeléctrico. Por lo tanto, cuanto mayor sea la absorción de la radiación incidente, mayor será la fluorescencia generada. Sin embargo, si la energía de los fotones incidentes es demasiado alta, es menos probable que interactúen con los átomos de la muestra, lo que reduce el rendimiento fluorescente.

El rendimiento fluorescente es la probabilidad de que un átomo ionizado emita radiación característica. Su valor depende del número atómico del elemento y de la energía de la radiación incidente. El rendimiento es máximo cuando dicha energía supera el umbral de la energía de enlace del electrón expulsado, y aumenta con el número atómico, siendo más alto en la capa K que en las capas L o M (Figura 2.3).

Figura 2.5

Curva de rendimiento fluorescente en función del número atómico.



Nota. Adaptado de Jenkins, 1999.

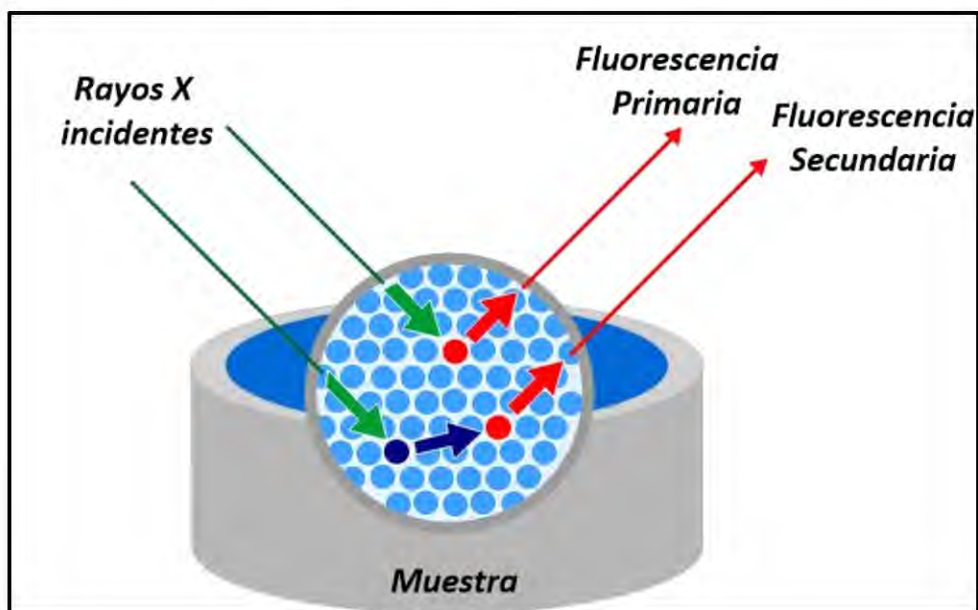
Otro factor importante es el espesor de la muestra, ya que la absorción de la radiación incidente aumenta con la distancia recorrida. Esto a su vez favorece la generación de fluorescencia en las capas superficiales y limita la detección de elementos en las zonas más profundas.

La radiación característica producida por los rayos X provenientes de la fuente se denomina fluorescencia primaria. En cambio, si la fluorescencia primaria es absorbida por un elemento cercano, genera una nueva emisión de radiación característica llamada fluorescencia secundaria (Figura 2.6). Ambas son las principales contribuyentes al espectro

de emisión total. Aunque existen fluorescencias de orden superior, estas suelen ser despreciables en la práctica (Brouwer, 2010).

Figura 2.6

Fluorescencia primaria y secundaria.



Nota. Adaptado de Brouwer, 2010.

2.2 TIPOS DE ESPECTRÓMETROS DE FRX

El desempeño del análisis por FRX depende en gran medida del tipo de espectrómetro empleado. Existen dos configuraciones principales, la de dispersión por longitud de onda (WDXRF) y la de dispersión por energía (EDXRF), cada una con características específicas. A continuación, se describen sus componentes fundamentales y se comparan sus ventajas y limitaciones.

2.2.1 ESPECTRÓMETRO DE DISPERSIÓN POR LONGITUD DE ONDA (WD-XRF)

El principio de funcionamiento de los espectrómetros WD-XRF (por sus siglas en inglés) se basa en la separación de las longitudes de ondas características emitidas por la muestra mediante el proceso de difracción de un cristal analizador. Este proceso está regulado por la Ley de Bragg, la cual establece la condición de interferencia constructiva para los rayos X con longitud de onda λ reflejados en el cristal, siendo esta:

$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad (5)$$

donde n es el orden de difracción, d es la distancia entre planos del cristal, θ es el ángulo de incidencia y difracción (Beckhoff et al., 2007; Acquafredda, 2019).

Los espectrómetros WD-XRF están compuestos por diferentes elementos que permiten la generación, modulación y detección de la radiación emitida por la muestra. Entre los principales se encuentran la fuente de excitación, conformada generalmente por tubos de rayos X de alta potencia, que operan entre 4 - 70 kV y 170 mA; los filtros primarios, ubicados entre el tubo y la muestra, que mejoran la relación entre el pico y el fondo al atenuar la radiación interferente; los colimadores que transforman el haz incidente en un haz estrecho y casi paralelo, aumentando la resolución espectral y reduciendo el fondo; y los cristales analizadores o difractantes, que actúan como monocromadores al dispersar las longitudes de onda según su distancia interplanar (d). Finalmente, los detectores convierten los fotones en señales eléctricas, y pueden ser del tipo contador de flujo o de centelleo. (Beckhoff et al., 2007; Seyfarth & Skelly, 2014)

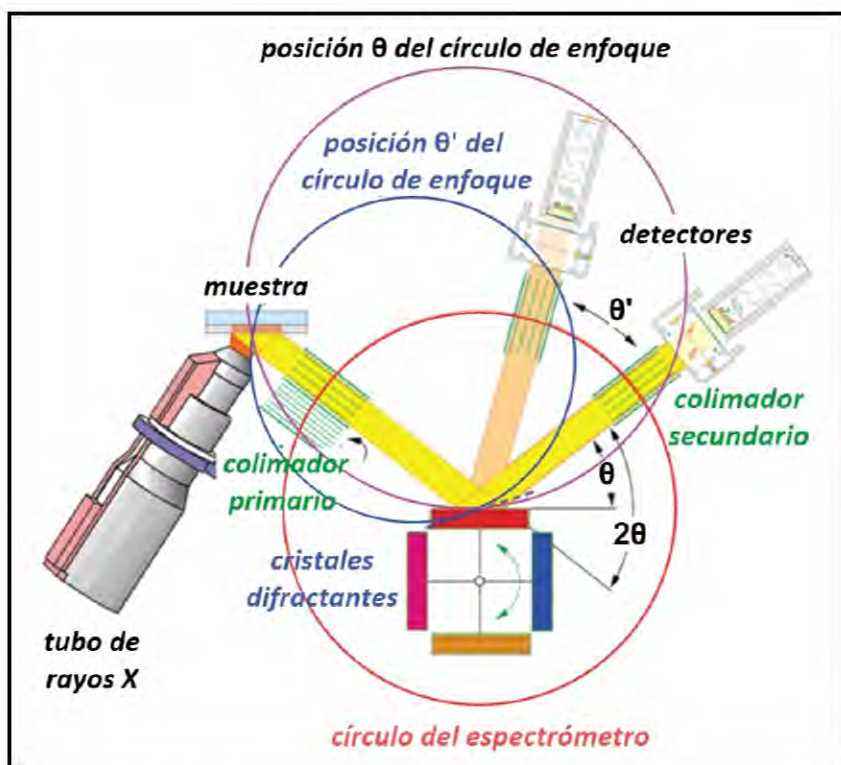
Además de su configuración instrumental, los espectrómetros WD-XRF pueden presentar dos tipos de geometría óptica según el tipo de cristal utilizado:

- Cristal plano o secuenciales (Figura 2.7): estos trabajan en geometría de parafofocalización, en la que un goniómetro permite la rotación del ángulo θ del cristal y 2θ del sistema de

detección, pero no se trasladan. Para ello se requiere de colimadores primarios y secundarios, que permitan enfocar el haz de rayos X en el cristal y en el detector. Sin embargo, tienen la desventaja de que los colimadores pueden absorber rayos X producidos en la muestra (Acquafreda, 2019) y esta configuración solo permite analizar una longitud de onda a la vez (Seyfarth & Skelly, 2014).

Figura 2.7

Espectrómetro WD-XRF secuencial



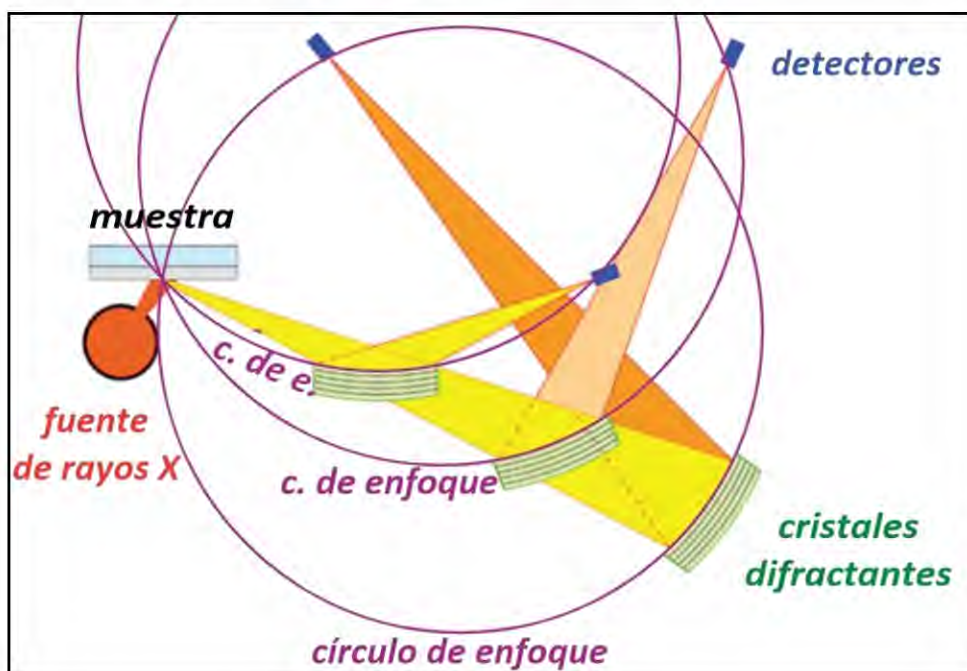
Nota. Adaptado de Acquafredda, 2019.

- Cristal curvo o simultáneos (Figura 2.8): su geometría es de enfoque perfecto, en la que el cristal, detector y muestra permanecen en el mismo círculo de enfoque, lo que aumenta su eficiencia y resolución (Acquafredda, 2019). Estos se pueden emplear para sistemas con múltiples canales fijos, cada uno con su propio cristal y detector, optimizados para un

elemento específico, lo que permite analizar varios elementos a la vez (Seyfarth & Skelly, 2014).

Figura 2.8

Espectrómetro WD-XRF simultáneo



Nota. Adaptado de Acquafredda, 2019.

2.2.2 ESPECTRÓMETRO DE ENERGÍA DISPERSIVA (ED-XRF)

En comparación con los espectrómetros WD-XRF, los espectrómetros ED-XRF son ampliamente utilizados debido a su rapidez de análisis y simplicidad instrumental. Su funcionamiento se basa en la detección directa de la energía de los fotones fluorescentes emitidos por la muestra (Beckhoff et al., 2007).

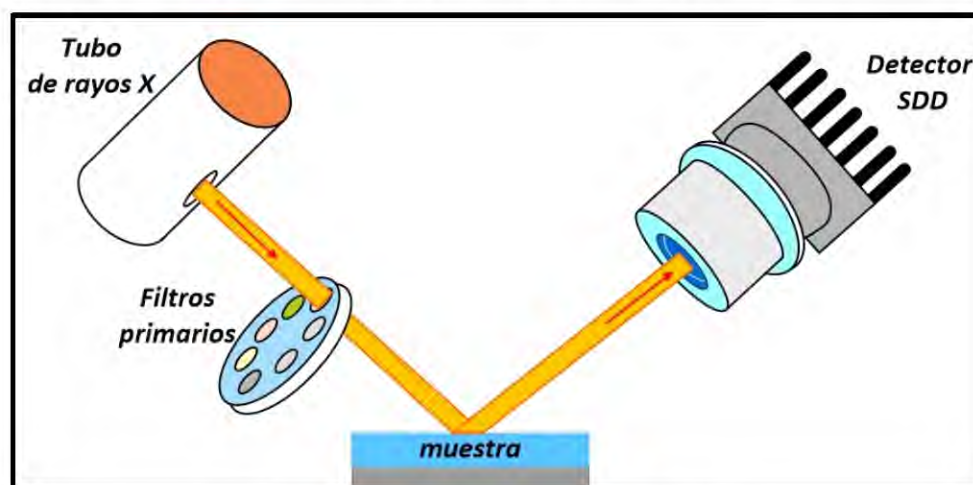
Los espectrómetros ED-XRF típicos constan de diversos componentes que trabajan en conjunto para realizar el análisis (Figura 2.9). En primer lugar, la fuente de excitación, el cual genera el haz primario que incide sobre la muestra. Generalmente consiste en un tubo de

rayos X, que opera normalmente a voltajes entre 15 y 50 kV, con corrientes del orden de los microamperios, dependiendo del instrumento y tipo de muestra (Seyfarth & Skelly, 2014).

Para mejorar la resolución del espectro generado por la muestra, los espectrómetros pueden utilizar filtros primarios o metálicos, cuyo propósito es atenuar ciertas regiones no deseadas del espectro del haz primario. Además, aunque no es indispensable para su funcionamiento como en el caso de los WD-XRF, muchos equipos suelen incluir colimadores para definir el área de análisis y reducir la dispersión de la radiación incidente (Van & Markowicz, 2002).

Figura 2.9

Representación esquemática de un espectrómetro ED-FRX



Nota. Adaptado de Brouwer, 2010 & Acquafredda, 2019.

En cuanto a la muestra, esta puede estar ubicada en una cámara sometida a una atmósfera específica (como helio) o al vacío, para mejorar la detección de elementos ligeros (Seyfarth & Skelly, 2014). La radiación fluorescente producida por la muestra es captada por detectores de estado sólido, el más utilizado actualmente es un detector de deriva de silicio

(SDD), que tiene alta eficiencia y resolución (115 – 125 eV). Además, presenta una respuesta rápida que permite operar a altas tasas de conteo sin saturación (Acquafreda, 2019).

Cuando los fotones de rayos X fluorescentes inciden sobre el detector, se generan pulsos de señal eléctrica proporcionales a la energía de estos fotones. Esta señal es procesada mediante un analizador multicanal, donde cada canal corresponde a la energía característica de un elemento, el cual se encarga de construir el espectro de energía producido por la muestra (Van & Markowicz, 2002; Acquafreda, 2019).

Finalmente, los datos son procesados mediante un software integrado al equipo, que permiten la visualización del espectro y realizar los análisis correspondientes.

2.2.3 COMPARACIÓN ENTRE ED-XRF Y WD-XRF.

Existen diferencias importantes entre ambos espectrómetros, principalmente en cuanto a su resolución espectral, eficiencia y aplicabilidad. Respecto a la resolución, los espectrómetros WD-XRF ofrecen una mayor resolución energética, con valores entre 5 y 20 eV, gracias al uso de cristales analizadores. Por el contrario, los ED-XRF presentan una resolución más baja (150 – 300 eV), debido a las limitaciones propias de los detectores semiconductores (Seyfarth & Skelly, 2014; Acquafreda, 2019).

La principal ventaja de los espectrómetros ED-XRF es su configuración instrumental, que permite el análisis multielemental en menor tiempo, además presenta un diseño compacto y de bajo costo, ideal para sistemas portátiles. Por su parte los WD-XRF presentan un diseño más complejo y de mayor tamaño. En el caso de sistemas secuenciales, el tiempo de adquisición de datos es mucho mayor, mientras que los sistemas simultáneos son más costosos (Beckhoff et al., 2007; Seyfarth & Skelly, 2014).

Tomando en cuenta las diferencias descritas, en este estudio se utilizó un ED-XRF (modelo Epsilon 4, Malvern PANalytical), cuya configuración multielemental, menor tiempo de

adquisición y diseño compacto lo hacen óptimo para la identificación y cuantificación de elementos traza en suelos y rocas. En este caso, el detector SDD del equipo utilizado tiene una eficiencia de 135 eV a Mn-K α . Aunque los sistemas WD-XRF ofrecen mayor resolución energética, la resolución del ED-XRF ofrece resultados óptimos para los objetivos del estudio.

2.3 PRINCIPIOS DE ANÁLISIS ELEMENTAL POR FRX

El análisis elemental mediante FRX combina la identificación cualitativa y la cuantificación de los elementos presentes en una muestra a partir de su espectro de fluorescencia de rayos X. Esta sección aborda los fundamentos de ambos enfoques, explicando cómo se determinan las líneas características y cómo se traducen las intensidades espectrales en concentraciones, con énfasis en los métodos y modelos de cuantificación empleados en la actualidad.

2.3.1 IDENTIFICACIÓN DE ELEMENTOS

En espectrometría de FRX, el análisis cualitativo consiste en la identificación de los elementos presentes en una muestra a partir de sus líneas espectrales características. Este procedimiento se basa en relacionar las energías o longitudes de onda de la radiación característica, dependiendo del equipo utilizado, y el número atómico del elemento, según la Ley de Moseley. Esta relación permite asignar los picos observados en el espectro a elementos específicos mediante tablas de referencia (Jenkins, 1999).

En los espectrómetros modernos, el software integrado realiza una identificación automática preliminar de los picos espectrales, comparándolos con bases de datos internas. Sin embargo, es fundamental que esta asignación preliminar sea verificada y ajustada manualmente por el analista, ya que estos algoritmos pueden presentar errores, principalmente por la presencia de solapamiento de picos o elementos traza (Van & Markowicz, 2002; Drake & Macdonald, 2023).

2.3.2 CUANTIFICACIÓN DE CONCENTRACIONES ELEMENTALES

Una vez identificados los elementos presentes en la muestra mediante los espectros de FRX, el siguiente paso es la cuantificación elemental, que consiste en relacionar la intensidad de las líneas características con la concentración relativa de cada elemento.

En los primeros desarrollos de la espectrometría de rayos X, se formuló una relación básica entre la intensidad de una línea característica y la concentración del elemento (Jenkins, 1995). Sin embargo, es importante señalar que dicha intensidad no depende solo de la concentración, sino también de diversos factores asociados tanto a la muestra (composición de la matriz, tipo y preparación) como al instrumento (configuración del espectrómetro y condiciones de análisis), entre otros (Beckhoff et al., 2007).

En el caso particular de la ED-XRF, estos factores se manifiestan en una serie de problemas y limitaciones que pueden afectar la cuantificación. Entre ellos destacan los efectos de matriz, que abarcan la absorción diferencial, el refuerzo o excitación secundaria, y las variaciones en densidad y composición. También es fundamental controlar la preparación de las muestras para evitar granulometría inadecuada, superficies rugosas o irregulares, humedad residual y la contaminación o segregación de fases.

Además, deben tenerse en cuenta factores instrumentales, como el solapamiento de picos, la resolución energética del detector, el ruido electrónico y la estabilidad del detector. En equipos portátiles, la geometría de excitación/detección, así como el ángulo y la distancia de análisis, pueden influir significativamente en la cuantificación. Otros aspectos relevantes son la autoabsorción en elementos ligeros (Na, Mg, Al), la energía de las líneas K y L, y el espesor de la muestra, los cuales pueden afectar la homogeneidad y representatividad del análisis (Van & Markowicz, 2002; Beckhoff et al., 2007; Potts & West, 2008).

Partiendo de la relación básica establecida, entre otros, existen dos enfoques principales para la cuantificación de FRX: métodos empíricos y de parámetros fundamentales.

2.3.2.1 MÉTODO EMPÍRICO

Este método emplea una de las relaciones más simples entre la intensidad de fluorescencia de un elemento y su concentración, expresada como:

$$C_i = K_i I_i \quad (6)$$

donde C_i es la concentración del elemento i , I_i es su intensidad medida y K_i es una constante que depende de las condiciones experimentales. Sin embargo, esta relación solo es válida bajo condiciones ideales, es decir, cuando se utilizan muestras estándar con matrices similares a la muestra desconocida y que cubren un amplio rango de concentraciones. De lo contrario, pueden generarse incertidumbres significativas en la pendiente y la intersección de la curva de calibración (Acquafredda, 2019; Van & Markowics, 2002).

Aunque se asume que la curva de calibración ideal es lineal, esta puede distorsionarse debido a los efectos de matriz. Para corregir estas desviaciones, se introducen los llamados “coeficientes de influencia”, los cuales describen cómo otros elementos presentes en la matriz afectan la intensidad de fluorescencia de un elemento específico. Estos coeficientes se determinan de forma empírica mediante regresiones aplicadas a patrones de concentración conocida (Jenkins, 1995; Beckhoff et al., 2007).

En este contexto, uno de los modelos más utilizados es una variante de la ecuación de Lucas-Tooth, que incorpora coeficientes empíricos para compensar los efectos de matriz al ajustar la intensidad neta de otros elementos. Esta ecuación se escribe de la siguiente forma:

$$C_i = r_0 + I_i \left(r_i + \sum (r_{in} + I_n) \right) \quad (7)$$

donde r_0 , r_i y r_{in} son coeficientes empíricos, I_i es la intensidad neta del elemento i , e I_n es la intensidad de otros elementos que afectan la señal (Drake & Macdonald, 2023).

Cabe destacar que los métodos empíricos pueden alcanzar una alta precisión, siempre que las condiciones experimentales sean rigurosas. Factores como la repetibilidad y reproducibilidad de las mediciones, homogeneidad de la muestra y la calidad de los estándares son determinantes. Sin embargo, la obtención de estos estándares suele ser costosa y, en algunos casos, imposible de obtener o fabricar (Beckhoff, 2007).

2.3.2.2 MÉTODO DE PARÁMETROS FUNDAMENTALES (FP)

Como se ha señalado, la intensidad de las líneas características no solo depende de la concentración del elemento, sino también de una serie de parámetros físicos e instrumentales. Por esta razón, se ha propuesto una ecuación más general que expresa la relación entre la concentración del elemento C_i , la homogeneidad de la muestra S_i , la intensidad medida I_i y el efecto de matriz M_i , según lo descrito por Van & Markowicz (2002) y Seyfarth & Skelly (2014):

$$C_i = K_i I_i M_i S_i \quad (8)$$

No obstante, esta ecuación representa una formulación simplificada que resume el principio general del análisis cuantitativo por FRX. Para lograr una cuantificación precisa y generalizable, surge el método de parámetros fundamentales, el cual se basa en principios físicos y permite realizar análisis cuantitativo sin necesidad de utilizar estándares para cada tipo de muestra.

El método FP, no se limita a una única formulación matemática, sino que constituye una familia de algoritmos con características similares, que pueden ser ajustados por cada fabricante y adaptados a la configuración y geometría del espectrómetro (Drake & Macdonald, 2023).

Uno de los algoritmos más representativos dentro del método FP es el Algoritmo Fundamental (FA), basado en la ecuación de Sherman. Esta fórmula fue desarrollada inicialmente para modelar la relación entre la intensidad espectral de una muestra y su composición elemental, expresada como:

$$I_i = f(C_i, C_j, \dots C_n) \quad (9)$$

Debido a su complejidad, esta ecuación fue reformulada para facilitar su aplicación en espectrometría, dando lugar a la siguiente expresión:

$$R_i = C_i \frac{1 + \sum \varepsilon_{ij} C_j}{1 + \sum \alpha_{ij} C_j} \quad (10)$$

donde R_i es ahora la intensidad corregida relativa o corregida, normalizada para ser independiente del equipo utilizado, incorporando factores como el tiempo de adquisición, el fondo continuo (background), la eficiencia del detector y el área de irradiación efectiva. Los coeficientes ε_{ij} y α_{ij} representan las medias ponderadas de los efectos de realce (fluorescencia secundaria) y absorción respectivamente, definidos como:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{\sum w_i(\lambda_k) \delta_{ij}(\lambda_k)}{\sum w_i(\lambda_k)} \quad (11)$$

$$\alpha_{ij} = \frac{\sum w_i(\lambda_k) \beta_{ij}(\lambda_k)}{\sum w_i(\lambda_k)} \quad (12)$$

El factor de ponderación $w_i(\lambda_k)$, se puede calcular como:

$$w_i(\lambda_k) = \frac{\mu_i(\lambda_k) I_0(\lambda_k) \Delta\lambda_k}{\mu_i^* [1 + \sum C_j \beta_{ij}(\lambda_k)]} \quad (13)$$

donde μ_i es el coeficiente de atenuación de masa del elemento i , $I_0(\lambda_k)$ representa la intensidad de la fuente de excitación a una longitud de onda dada, y $\Delta\lambda_k$ representa la suma finita sobre intervalos de λ_k . Finalmente, la ecuación para la concentración se expresa como:

$$C_i = R_i \frac{1 + \sum \varepsilon_{ij} C_j}{1 + \sum \alpha_{ij} C_j} \quad (14)$$

Esta formulación permite realizar una cuantificación multielemental sin necesidad de patrones específicos para cada muestra, especialmente útil para muestras de composición desconocida o variable, pues considera el grado de influencia que tiene cada elemento sobre el resultado espectral (Rosseau, 2009; Drake & Macdonald, 2023).

El modelo permite estimar la influencia combinada de la absorción y la fluorescencia secundaria: un incremento en la absorción disminuye la señal detectada, mientras que el realce puede generar una señal más intensa de lo esperado (Rosseau, 2009).

Aunque este modelo físico constituye la base del Algoritmo Fundamental, su implementación práctica es más compleja y depende del software de cada fabricante. Este ejecuta los cálculos mediante un proceso iterativo: primero simula un espectro teórico a partir de una composición inicial estimada, lo compara con el espectro medido y ajusta sucesivamente los valores hasta obtener la mejor aproximación de las concentraciones elementales (Rousseau, R., 2013).

Basándose en el principio del método FP, el espectrómetro ED-XRF empleado en este estudio utiliza el software Omnian, un paquete de software desarrollado por Malvern PANalytical para el análisis cuantitativo “sin estándares” en fluorescencia de rayos X. Su objetivo es proporcionar resultados de composición elemental sin necesidad de preparar ni medir patrones de referencia específicos para cada matriz. Especialmente adecuado para matrices complejas como suelos y rocas.

Omnian calcula las intensidades de fluorescencia esperadas a partir de las ecuaciones físicas que describen la interacción de los rayos X con la materia, considerando procesos como la absorción, excitación primaria y secundaria, rendimientos de fluorescencia y la geometría

del instrumentos. A partir de la intensidad medida para cada línea característica, el software ajusta los cálculos hasta que la composición teórica y la señal experimental coincidan.

El equipo se calibra una sola vez mediante un conjunto de materiales bien caracterizados. Esta calibración “universal” determina con precisión factores como la potencia del tubo de rayos X, la respuesta del detector, la geometría del instrumento y la eficiencia de transmisión de filtros y ventanas. Finalmente, Omnian calcula y aplica de manera automática las correcciones por absorción y realce (efectos de matriz), considerando además la densidad aparente, el grosor, la composición elemental estimada y la autoabsorción.

2.4 CONSIDERACIONES PARA EL ANÁLISIS DE SUELOS Y ROCAS MEDIANTE FRX

El análisis de suelos y rocas mediante FRX proporciona información esencial sobre su composición geoquímica, y ofrece información clave para comprender los procesos de acumulación y movilidad de los metales pesados. Esta sección aborda los aspectos relacionados con las características químicas de los materiales, las fuentes y factores que influyen en la acumulación de los elementos y compuestos en suelos, así como las principales ventajas y limitaciones de la técnica en estudios geoambientales.

2.4.1 CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DE ROCAS Y SUELOS

La caracterización de rocas y suelos es fundamental para comprender la composición natural de la corteza terrestre y los procesos geoquímicos asociados. Estos materiales contienen elementos en concentraciones que reflejan la geoquímica de fondo o la concentración natural en un área específica. Entre ellos se incluyen algunos elementos potencialmente tóxicos, tales como Pb, Cd, As, Cr, Cu, Ni y Zn, que pueden encontrarse de forma natural en ciertas zonas.

Las rocas presentan una diversidad de elementos químicos, influenciada por su origen y procesos naturales como la meteorización. Esta variabilidad geológica influye directamente

en la composición de los suelos derivados (Kabata-Pendias, 2011; Alloway 2012). Por su parte, los suelos presentan una mayor heterogeneidad química que las rocas debido a la influencia de múltiples procesos edafogénicos, como el material geológico, el clima, la vegetación y la actividad biológica. Dicha diversidad determina la distribución natural de elementos en el suelo (Lenoir, 2004).

2.4.2 FUENTES DE ACUMULACIÓN DE METALES PESADOS EN SUELOS

El suelo funciona como receptor y reservorio de elementos y compuestos provenientes de diversas fuentes. Entre los factores que condicionan la presencia de metales pesados se encuentran tanto las fuentes naturales como antrópicas.

En condiciones naturales, la concentración de estos elementos en el suelo está controlada principalmente por la composición geoquímica de la roca madre, así como por procesos de origen volcánico y sedimentario. La erosión y meteorización de rocas con alto contenido de minerales sulfurados u óxidos pueden liberar elementos como As, Hg, Pb o, en asociación con el Zn y el Cd, favoreciendo su incorporación al suelo y su eventual lixiviación hacia aguas subterráneas sin necesidad de intervención humana. Por otro lado, las fuentes antrópicas representan la causa más significativa de acumulación de pesados en suelos. Estas incluyen la actividad minera, el uso de agroquímicos y la contaminación por residuos urbanos e industriales (Zúñiga, 1999; Miras, 2009; Abou et al., 2019).

2.4.3 FACTORES AMBIENTALES ASOCIADOS A METALES PESADOS

En el contexto geoambiental, el término metales pesados se aplica a elementos metálicos, que representan un riesgo potencial para el ambiente y la salud, por su toxicidad y persistencia. Esta categoría incluye tanto elementos esenciales como Fe, Zn o Cu, que pueden ser perjudiciales en concentraciones elevadas, como otros sin función biológica reconocida, como Cd, Pb o As, altamente tóxicos incluso en pequeñas cantidades (Torres-Rodríguez et al.,

2022). La movilidad de estos elementos varía según sus propiedades químicas y las características físicas del suelo, lo que influye en su biodisponibilidad y facilita su incorporación en la cadena alimentaria a través de cultivos, agua y animales (Wuana & Okieimen, 2011).

La biodisponibilidad de un elemento se refiere a la fracción química en que un elemento está presente y disponible para su absorción por organismos vivos. Este aspecto es clave para determinar su movilidad y toxicidad, y en muchos casos resulta más determinante que la concentración total del elemento. De hecho, estudios indican que altas concentraciones totales pueden no representar riesgo si la fracción disponible es baja. Por ello, la biodisponibilidad constituye un parámetro esencial en evaluaciones de riesgo ambiental (González-Flores et al., 2011; Reyes et al., 2016; Lago, 2018; Petruzzelli & Rosellini, 2020).

Para llevar a cabo dichas evaluaciones, se requiere en primera instancia comparar las concentraciones detectadas con valores de referencias establecidos por normativas nacionales e internacionales. Sin embargo, en América Latina muchos países aún no cuentan con límites específicos para suelos, lo que limita considerablemente la capacidad de gestión de riesgo (Reyes et al., 2016). Panamá no escapa de esta realidad, evidenciando la necesidad de desarrollar normativas locales basadas en su contexto geológico y socioambiental.

2.4.4 VENTAJAS Y LIMITACIONES DE LA FRX EN ESTUDIOS GEOAMBIENTALES

La técnica de fluorescencia de rayos X se ha consolidado como una herramienta eficaz en estudios geoambientales por su capacidad para identificar y cuantificar múltiples elementos simultáneamente de forma rápida y con mínima preparación de muestra (Moreno, 2019).

Sin embargo, presenta limitaciones que deben considerarse para una correcta interpretación de los resultados. Su sensibilidad disminuye en elementos ligeros y en concentraciones bajas, y factores físicos como la granulometría, la humedad y la heterogeneidad de la muestra pueden afectar la precisión del análisis. Para minimizar estos

efectos, se recomienda que las muestras sean secadas, finamente molidas y homogeneizadas (Van & Markowicz, 2002; Beckhoff et al., 2007; Potts & West, 2008).

Además, la FRX proporciona únicamente información sobre la concentración total de los elementos, sin distinguir su forma química ni su biodisponibilidad, por lo que en evaluaciones de riesgo ambiental resulta necesario complementar el análisis con metodologías de especiación o pruebas de extracción selectiva.

CAPÍTULO 3

3 CONTEXTO GEOLÓGICO

El conocimiento del ámbito geológico del área de estudio es esencial para comprender la naturaleza y distribución de los materiales que conforman el suelo y subsuelo. Por otro lado, factores como el tipo de roca, la geomorfología y el clima influyen en la formación del suelo, la movilidad y acumulación de posibles contaminantes. Por ello, es importante hacer una revisión de estos aspectos, para comprender las características físicas del sitio de estudio.

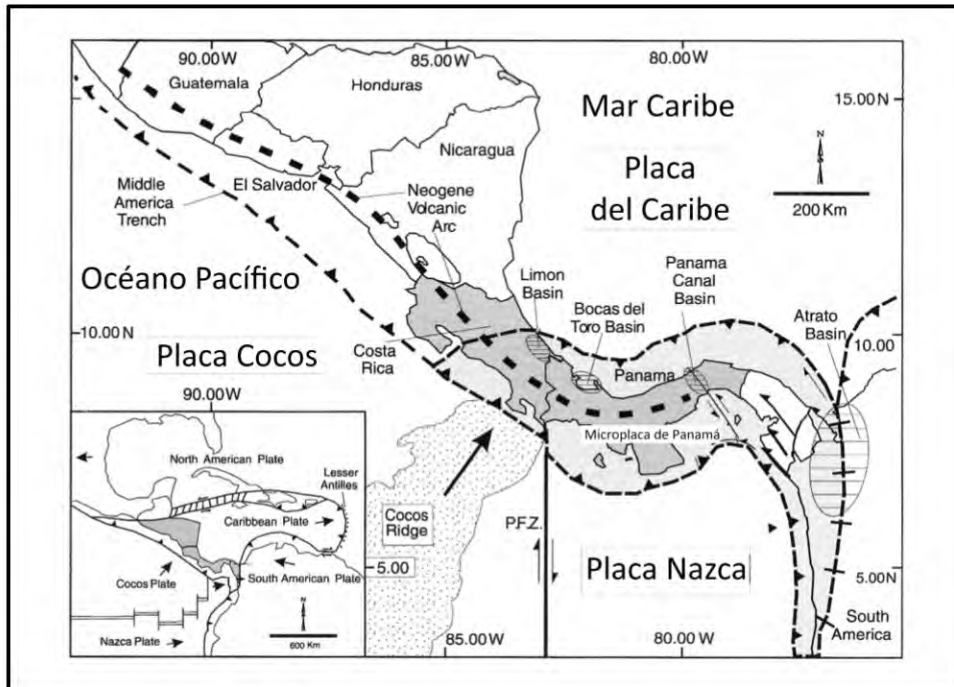
3.1 TECTÓNICA Y GEOLOGÍA REGIONAL

El Istmo de Panamá se encuentra en una región tectónica compleja, debido a su ubicación, el mismo se ve influenciado por la interacción de al menos cuatro placas: Caribe, Cocos, Nazca y Sudamérica. A partir de esta interacción tectónica surge una microplaca tectónica independiente, denominada “Microplaca de Panamá”, que cubre el territorio panameño y parte de Costa Rica (Figura 3.1) (Montero et al., 1991; Rodríguez & O'Dea, 2015, Gómez et al., 2019; Sagel et al., 2025).

El surgimiento del Istmo de Panamá fue un proceso progresivo, que ocurrió hace aproximadamente 3 millones de años. Está ligado principalmente a la subducción de las placas de Cocos y Nazca por debajo de las placas del Caribe y Sudamérica. Provocando el cierre de la conexión entre los océanos Atlántico y Pacífico, produciendo importantes cambios en el clima global y la biodiversidad. También, contribuyó a la formación de estructuras montañosas y a la generación de actividad volcánica en gran parte del país. Prueba de ello es la presencia de rocas volcánicas e intrusivas en diferentes regiones del país, con formaciones de origen volcánico y sedimentario que van desde el período Cretácico hasta la actualidad (MICI, 1991; D'Croz, 2002; O'Dea et al., 2016; Brikiatis, 2021, Bendaña, 2021)

Figura 3.1

Mapa de la Microplaca de Panamá



Nota. Adaptado de Coates et al., 2005.

3.2 GEOLOGÍA LOCAL

De acuerdo con el Mapa Geológico de la República de Panamá (Figura 3.2), el área de estudio, ubicada al sur del distrito de Penonomé, está descrita por las formaciones geológicas presentes en la Tabla 1.

Tabla 1

Formaciones geológicas que afloran en el área de estudio

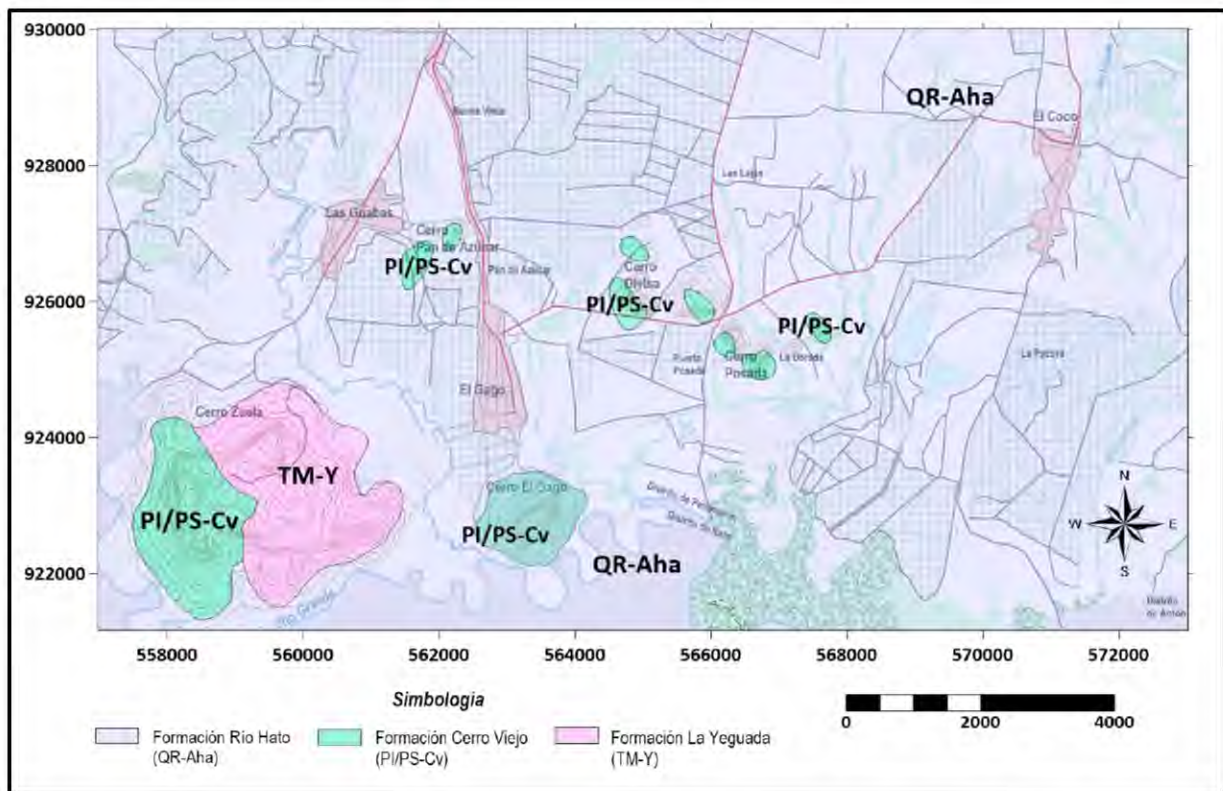
FORMACIÓN	SÍMBOLO	GRUPO	PERÍODO	ORIGEN	DESCRIPCIÓN
Río Hato	QR-Aha	Aguadulce	Cuaternario	Sedimentario	Conglomerados, areniscas, lutitas, tobas, areniscas no consolidadas, pómez.
La Yeguada	TM-Y	La Yeguada	Terciario	Volcánico	Dacitas, ignimbritas y tobas.
Cerro Viejo	PI/PS-Cv	---	Cuaternario	Volcánico	Basaltos / andesita, amigdaloides vidriosos. Basaltos Post-ignímríticos

Nota. Adaptado de MICI, 1991.

Según el mapa geológico de la zona La Yeguada (TM-Y) aflora principalmente en la zona este de Cerro Zuela. La formación Cerro Viejo (PI/PS-Cv) se manifiesta en colinas como el Cerro Pan de Azúcar, Cerro Divisa y Cerro Posada, localizadas al norte de la zona de estudio, y en la zona oeste del Cerro Zuela. Mientras que, en las llanuras predomina la formación Río Hato (QR-Aha), la cual se caracteriza por ser una zona de acumulación de sedimentos fluviales y marinos (Figura 3.2).

Figura 3.2

Mapa geológico del área de estudio



Nota. Adaptado de MICI, 1991.

En el Cerro Pan de Azúcar se han observado basaltos columnares in situ y fragmentos de rocas basálticas rodeadas de una matriz arcillosa (Figura 3.3). En Cerro Divisa se encontraron tobas de composición ácida que muestran procesos de intemperización y caolinitización, además de cantos rodados de rocas basálticas dispersas sobre el terreno (Figura 3.4). Por su parte, el Cerro Posada, es utilizado como cantera y está conformado por afloramientos de rocas volcánicas de composición ácida, como tobas líticas y rocas vulcanoclásticas (Figura 3.5).

Figura 3.3

Columna hexagonal rodeada de matriz arcillosa en Cerro Pan de Azúcar



Figura 3.4

Rocas observadas in situ en Cerro Divisa. a) Tobas de composición ácida. b) Cantos rodados (basaltos)

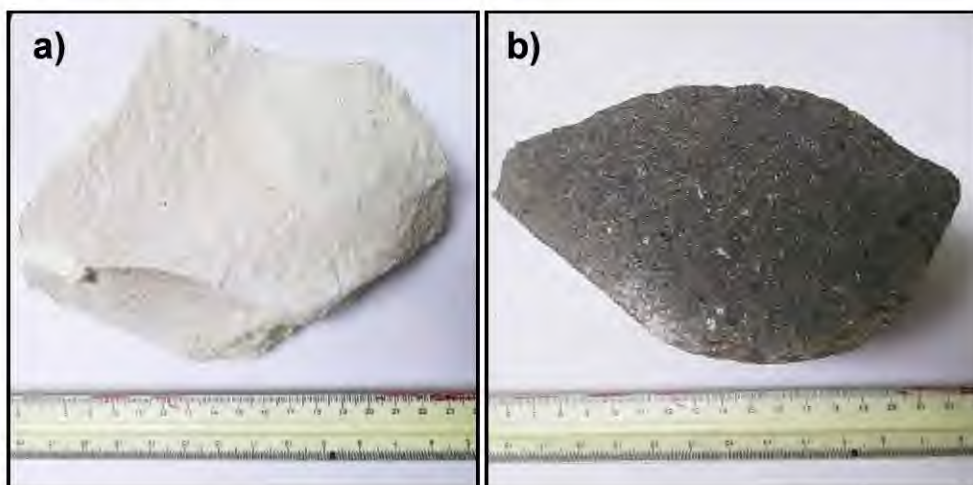
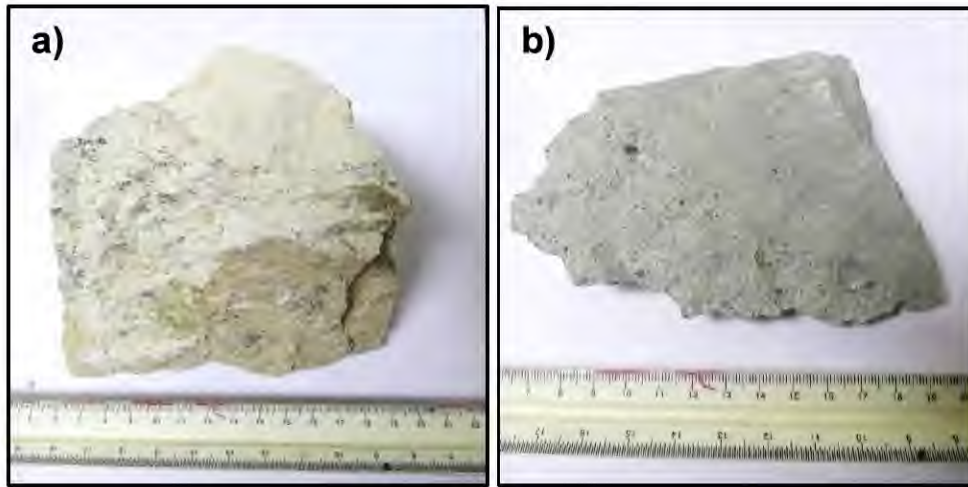


Figura 3.5

Rocas observadas in situ en Cerro Posada. a) Tobas. b) Rocas vulcanoclásticas



El trabajo realizado en campo evidencia la existencia de rocas de composición básica, de color oscuro con textura similar a la de un basalto en Cerro El Gago (Figura 3.6). De igual forma, aunque el Cerro Zuela esté conformado por dos formaciones geológicas, se observan afloramientos principalmente de rocas basálticas, de color oscuro.

La disposición geológica de la zona sugiere que la región ha experimentado una transición desde ambientes volcánicos activos a zonas de sedimentación y erosión, que conforman las llanuras. El origen de esta zona está asociado al relleno de depresiones tectónicas y al arrastre de materiales producto de la erosión (Tourinho, 1976). En la zona de estudio se han identificado principalmente secuencias de areniscas, intercaladas con limolita y lutita (Edward, 2021).

Figura 3.6

Roca basáltica observada en Cerro el Gago



3.3 GEOMORFOLOGÍA

La geomorfología del área parece estar correlacionada con las formaciones geológicas presentes en el subsuelo. Las colinas que afloran en zonas de rocas volcánicas tienden a presentar formas más abruptas, mientras que las zonas donde predominan sedimentos recientes forman un relieve más suave. (MICI, 1991; IGNTG, 2012)

De acuerdo con la clasificación morfoestructural nacional propuesta por ETESA (1999), la región Sur de Penonomé se ubica principalmente en una planicie litoral y de colinas bajas del Pacífico. Donde se observa una extensa llanura con elevaciones aisladas como los cerros Pan de Azúcar, Divisa, Posada y La Dorada, menores a 100 msnm, y otros más sobresalientes como Cerro El Gago y Cerro Zuela, con elevaciones de hasta 300 msnm.

Como complemento al modelo de elevación del Instituto Tommy Guardia (IGNTG), el mapa de pendientes de Panamá permite observar que la pendiente del terreno en las planicies de la zona de estudio es de 0° - 3° , hacia la zona costera, y en las colinas es de 4° - 15° (Mi

Ambiente, 2010). Esto se corresponde con el comportamiento erosivo y de arrastre de materiales hacia la zona costera.

3.4 CLIMATOLOGÍA

La región de estudio presenta un clima del tipo tropical con una estación seca prolongada, típica del llamado Arco Seco de Panamá. El cual se caracteriza por temperaturas cálidas todo el año, que oscilan entre 27 y 28°, y una temporada seca que puede durar hasta 7 meses. (Mi Ambiente, 2010)

La precipitación anual es mucho menor que en otras partes del país, con un promedio anual entre 1 200 y 1 800 mm/año. Según datos históricos, las lluvias se concentran en pocos meses, principalmente entre mayo y octubre. Durante la temporada seca, la evaporación es alta y puede causar escasez de agua superficial, lo que acentúa las condiciones de sequía en la región (Mi Ambiente, 2010; ETESA, 2025).

CAPÍTULO 4

4 INSTRUMENTACIÓN Y METODOLOGÍA

La técnica de fluorescencia de rayos X (FRX) fue seleccionada frente a otras posibles alternativas, como espectrometría de masas, de emisión óptica o de absorción atómica, debido a su precisión en la determinación multielemental, su carácter no destructivo y la mínima preparación de muestras. Estas propiedades la convierten en una herramienta adecuada para evaluar la presencia y distribución espacial de los elementos en rocas y suelos. Además, el procedimiento empleado garantiza la representatividad de las muestras, lo cual es fundamental para cuantificar las concentraciones de los elementos presentes en el área de estudio.

De forma complementaria, se efectuaron análisis de difracción de rayos X (DRX) en las muestras de roca, con el propósito de identificar las fases cristalinas presentes y respaldar la interpretación de los resultados de FRX.

4.1 RECOLECCIÓN DE MUESTRAS

El estudio fue llevado a cabo en la zona sur del distrito de Penonomé, que comprende las comunidades de Las Guabas, Puerto El Gago y El Coco. Los puntos de interés en este estudio comprenden Cerro Pan de Azúcar, Cerro Zuela, Cerro El Gago, Cerro Posada y Cerro Divisa, así como diversos puntos en las llanuras del Sur de Penonomé.

En total se recolectaron 24 muestras de suelos y 8 muestras de roca, distribuidas en los distintos puntos seleccionados dentro del área de estudio (Figura 4.1) y descritos con sus respectivas coordenadas en la Tabla 2.

Tabla 2

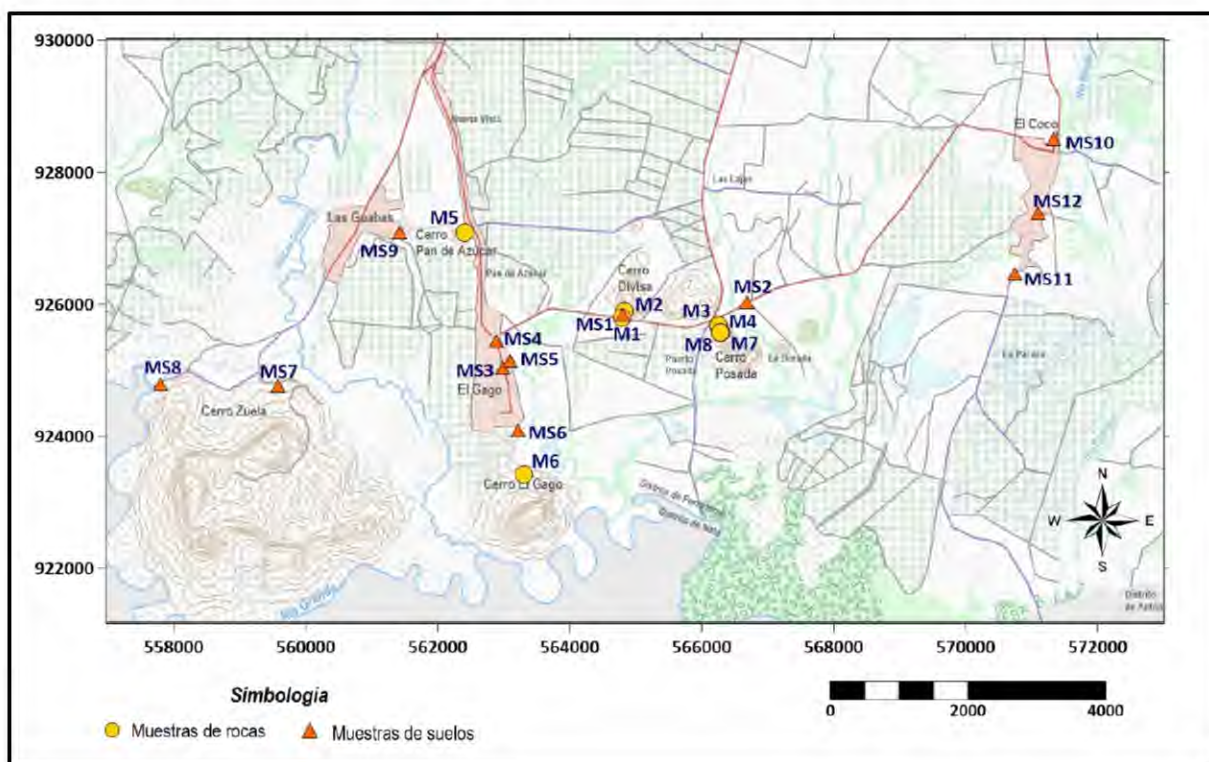
Localización y descripción de los sitios de muestreo

CÓDIGO	MATERIAL	COORDENADAS	DESCRIPCIÓN
M1	Roca	564831 m E, 925900 m N	Cerro Divisa
M2	Roca	564795 m E, 925799 m N	
M3	Roca	566252 m E, 925673 m N	Cerro Posada (Parte baja)
M4	Roca	566251 m E, 925680 m N	
M5	Roca	562403 m E, 927087 m N	Cerro Pan de Azúcar
M6	Roca	563296 m E, 923424 m N	Cerro El Gago
M7	Roca	566295 m E, 925573 m N	Cerro Posada (Parte alta)
M8	Roca	566274 m E, 925577 m N	
MS1	Suelo	564806 m E, 925809 m N	Cerro Divisa
MS2	Suelo	566688 m E, 925995 m N	Próximo a Cerro Posada
MS3	Suelo	562986 m E, 924998 m N	Pozo 2 de Puerto El Gago
MS4	Suelo	562884 m E, 925403 m N	Pozo 1 de Puerto El Gago
MS5	Suelo	563091 m E, 925107 m N	Comunidad de Puerto El Gago
MS6	Suelo	563210 m E, 924045 m N	Próximo a Cerro El Gago
MS7	Suelo	559571 m E, 924731 m N	Alrededores de Cerro Zuela
MS8	Suelo	557794 m E, 924757 m N	
MS9	Suelo	561415 m E, 927050 m N	Próximo a Pozo Las Guabas
MS10	Suelo	571327 m E, 928462 m N	Escuela Ana Pérez Isaza, El Coco
MS11	Suelo	570746 m E, 926419 m N	Final de la Vía a El Coco
MS12	Suelo	571095 m E, 927340 m N	JAAR de la comunidad de El Coco (Pozo)

Las muestras de roca fueron recolectadas directamente de la roca madre expuesta en los cerros de la zona, procurando seleccionar afloramientos representativos, frescos y libres de alteración superficial. Este tipo de material permite establecer la composición geoquímica de base y comparar las concentraciones elementales naturales con las observadas en los suelos derivados.

Figura 4.1

Ubicación de las muestras de suelos y rocas recolectadas en el área de estudio



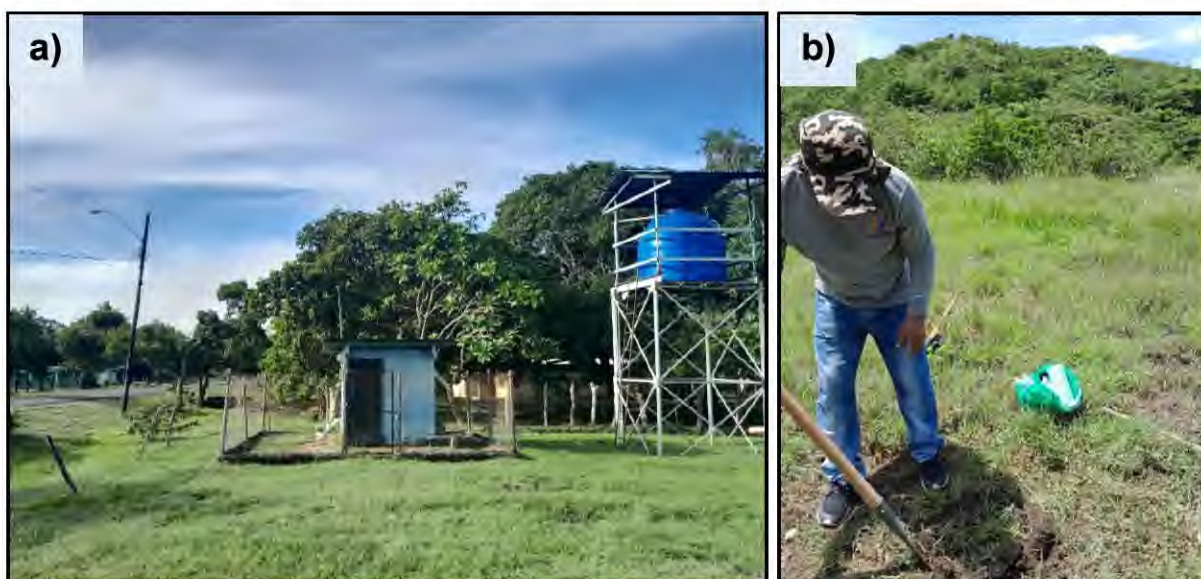
Nota. Adaptado de MICI, 1991.

Para la elección de los puntos de muestreo de suelos se procuró incluir sitios estratégicos y accesibles, ubicados cerca de comunidades, pozos y cerros (Figura 4.2).

Las muestras recolectadas fueron de aproximadamente 1 kg, a profundidades de 0 - 0,30 m (superficial) y 0,30 - 0,60 m (subsuperficial), con el propósito de evaluar posibles variaciones en la composición elemental con la profundidad. Como referencia de medición se utilizó un tubo señalizado con diferentes colores a cada 0,10 m, lo que permitió mantener la uniformidad y control durante la excavación y el muestreo.

Figura 4.2

Puntos de muestreo cercanos a: a) pozo de la comunidad de Puerto El Gago y b) Cerro Zuela



En general, las condiciones de campo durante la recolección fueron mayormente favorables. La mayoría de los sitios presentaba suelos arcillosos con un nivel de humedad intermedio (Figura 4.3a), lo que facilitó la excavación hasta la profundidad establecida. No obstante, en algunos puntos se observaron suelos con mayor proporción de arena en superficie (MS9 y MS11) o con fragmentos rocosos (MS2) (Figura 4.3b).

Por otro lado, las variaciones climáticas registradas durante el muestreo también influyeron en las condiciones de trabajo. Algunos días fueron lluviosos, lo que dificultó la recolección al provocar compactación adicional de la capa superficial del suelo.

Figura 4.3

Sitio de muestreo con: a) suelo arcilloso seco, próximo a Cerro Zuela y b) fragmento rocoso en profundidad, en sitio próximo a Cerro Posada



Para la recolección se utilizaron palas y pala coa de fibra de vidrio no metálica, así como herramientas de plástico, todas en buen estado, con el objetivo de minimizar la contaminación de las muestras por agentes metálicos externos (Figura 4.4). Entre cada punto de muestreo, las herramientas fueron cuidadosamente limpiadas y secadas para evitar contaminación cruzada.

Tanto las muestras de suelos como de rocas fueron recolectadas en bolsas de plástico y etiquetadas con la información correspondiente con su código único, profundidad (en caso de suelos) y sus coordenadas, registradas mediante un GPS. Posteriormente fueron transportadas al laboratorio, protegidas de la luz directa, para su preparación y análisis.

Figura 4.4

a) Excavación y b) recolección de muestras



4.2 PREPARACIÓN DE MUESTRAS

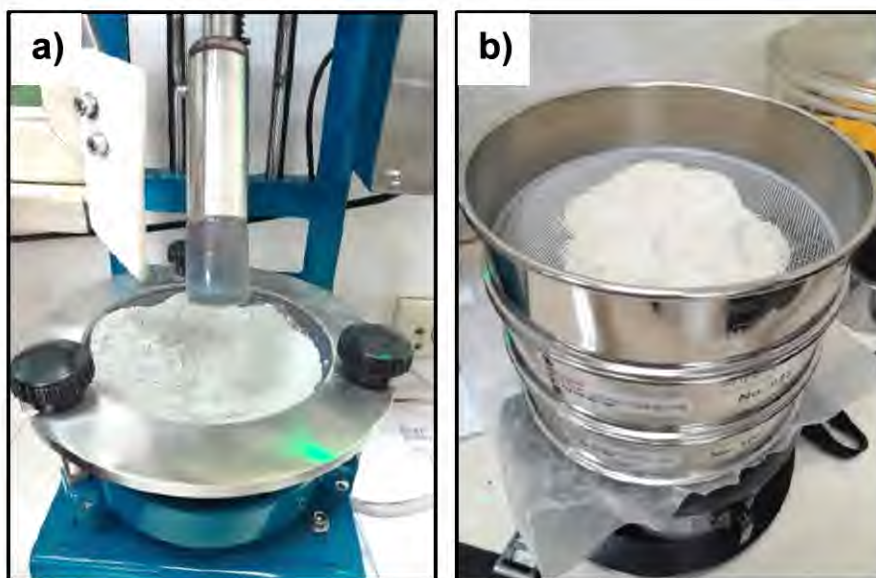
Inicialmente, en el laboratorio, las muestras de suelo se colocaron en un horno durante la noche a 70 °C para eliminar su contenido de agua. Esto garantiza que el nivel de humedad de todas las muestras sea uniforme, lo que evita cualquier problema durante el análisis de datos.

Una vez secas, fueron colocadas en un mortero de ágata y molidas durante media hora. Posteriormente, se tamizaron logrando un tamaño de partícula menor que 150 μm , un polvo fino y homogéneo (Figura 4.5). El mortero y el tamiz fueron limpiados a fondo entre cada muestra para evitar la contaminación cruzada.

En el caso de las rocas, se realizó un procedimiento similar, excepto que estas fueron trituradas previamente y luego se colocaron en el mortero de ágata para disminuir el tamaño de partícula.

Figura 4.5

a) Molienda y b) tamizaje de las muestras



Para el análisis por fluorescencia de rayos X (FRX), las muestras de suelo y rocas fueron colocadas en portamuestras con un diámetro interno de 30 mm, equipados con películas de Mylar de 6 μm para preservar la muestra (Figura 4.6). Las muestras fueron colocadas en forma de polvo de aproximadamente 7g cada una y un espesor de 5-10 mm, dependiendo del material. Debidamente etiquetadas con su código único, para su posterior análisis.

Figura 4.6

Colocación en porta muestras



4.3 DESCRIPCIÓN DE INSTRUMENTACIÓN

Para el análisis elemental de las muestras se utilizó el espectrómetro de Fluorescencia de rayos X por dispersión de energía, modelo Epsilon 4 ED-XRF de Malvern Panalytical (Figura 4.7), que realiza mediciones rápidas y cubre casi todos los elementos de la tabla periódica en un solo análisis. Este puede realizar mediciones con un mínimo de preparación de muestra, pues se pueden utilizar polvos obtenidos simplemente deshidratando y moliendo las muestras.

El dispositivo está equipado con un tubo de rayos X con ánodo de plata con una potencia máxima de 10 W, un voltaje de 50 kV y una corriente de 2 mA. La detección de la señal se realiza mediante un detector de deriva de silicio de alta resolución (SDD10) con una resolución de 135 eV a 5.9 keV.

Durante una rutina de análisis, cada muestra se bombardea directamente y a través de los filtros primarios del instrumento, a saber, blanco, Cu 500 μm , Al 50 μm , Al 200 μm , Ti 7 μm , Ag 100 μm , Cu 300 μm . El uso de estos filtros permite concentrar el análisis en una parte del

espectro, lo que limita los efectos de apantallamiento. Además, el equipo utiliza una atmósfera de helio que favorece la observación de elementos con mayor sensibilidad.

Figura 4.7

Espectrómetro XRF Epsilon 4 ED-XRF de Malvern Panalytical



Las mediciones se realizan mediante el método Omnian, un software de análisis semicuantitativo, que fue calibrado al momento de la entrega del equipo. Este se basa en el método de parámetros fundamentales, lo que quiere decir que no requiere de estándares para estimar las concentraciones elementales de cada tipo de muestra.

El software Omniam escanea automáticamente seis condiciones específicas de medición, para cada muestra, con diferentes combinaciones de voltajes, filtros y corrientes. Este ajuste automático optimiza la detección de las líneas espectrales, para que sea posible cubrir el rango de elementos desde el sodio (Na) hasta el uranio (U).

Figura 4.8

Espectrómetro de fluorescencia de rayos X (EDXRF) en operación durante el análisis de muestras de suelos y rocas



Adicionalmente, se efectuaron análisis de difracción de rayos X (DRX) en polvo a las ocho muestras de roca, con el fin de identificar las fases minerales predominantes y complementar los resultados elementales obtenidos por FRX.

Las mediciones se realizaron en un difractómetro Aeris (Malvern PANalytical) con radiación Co-K α , operando a 40 kV y 15 mA, con radio de goniómetro de 145 mm, rendijas Soller de 0,04 rad, rendija de divergencia de 0,4585°, paso de 0,02°, y tiempo de adquisición de 98 s/paso. El rango de barrido fue de 8-100° en 2 θ , en geometría Bragg-Brentano, empleando un detector lineal PIXcel1D Medipix3.

4.4 PROCESAMIENTO DE DATOS

El análisis de las muestras mediante el espectrómetro XRF, bajo el método Omnian, se desarrolla en dos etapas complementarias. En primer lugar, se realiza la identificación cualitativa de los elementos presentes a partir de los espectros de fluorescencia obtenidos,

donde el software distingue las líneas de energías características propias de cada elemento en la muestra.

Posteriormente, se efectúa la cuantificación en concentraciones porcentuales o ppm, lo que implica que el software ejecute correcciones por efectos de matriz (absorción de radiación), fluorescencia secundaria y heterogeneidad de la muestra, procesando todos los espectros adquiridos bajo distintas configuraciones de voltaje y corriente. De esta manera, Omnian genera un valor final más representativo de la concentración de cada elemento, minimizando la influencia de variaciones instrumentales.

Como complemento, se efectuaron ajustes manuales en los espectros para mejorar la resolución de picos superpuestos en ciertas regiones, particularmente en el caso de elementos con líneas características muy próximas en energía. Estos ajustes se apoyaron en una tabla de referencia (Figura 4.9), que contiene los valores de las energías correspondientes a cada elemento, lo que permitió la asignación correcta de las líneas, en caso de haber sido mal identificada de forma automática, y una mayor precisión en los resultados.

En el caso del análisis DRX, la información fue procesada mediante el software HighScore Plus (versión 5.2) de Malvern PANalytical, utilizando las bases de datos ICDD PDF-2 y una base de datos abierta, lo que permitió la identificación de las fases cristalinas mayoritarias en cada roca analizada.

Tabla de energías de emisión de rayos X (series K, L y M) utilizada en espectroscopía de fluorescencia (EDXRF)

52

CAPÍTULO 5

5 RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados obtenidos mediante espectroscopía FRX en las muestras de roca y suelo. Primero, se evalúa la respuesta instrumental a partir de los espectros FRX. Luego, se reportan las concentraciones elementales por tipo de muestra, diferenciando los elementos mayoritarios, minoritarios y trazas. Posteriormente, se realiza un agrupamiento de las muestras según sus tendencias químicas, lo que permitió clasificar las rocas de acuerdo con su afinidad geoquímica y los suelos según su composición predominante. En el caso de las rocas, se comparan los resultados FRX con los obtenidos por DRX a fin de contrastar la composición elemental con fases minerales identificadas. Finalmente, se presentan mapas de distribución espacial de los elementos de interés ambiental detectados.

6.1 EVALUACIÓN INSTRUMENTAL DE LA RESPUESTA ESPECTRAL DE FRX PARA LA DETECCIÓN ELEMENTAL EN LAS MUESTRAS ANALIZADAS

En esta sección se presentan algunos espectros de FRX obtenidos, organizados en función de la respuesta espectral de las muestras y su comportamiento bajo distintas condiciones de operación y la identificación de elementos potencialmente relevantes desde el punto de vista ambiental. Dado que el número de espectros generados es amplio, por la cantidad de muestras trabajadas, se han seleccionado algunos ejemplos que ilustren los aspectos técnicos y analíticos de la técnica, así como los casos en los que se identificaron elementos de interés geoambiental.

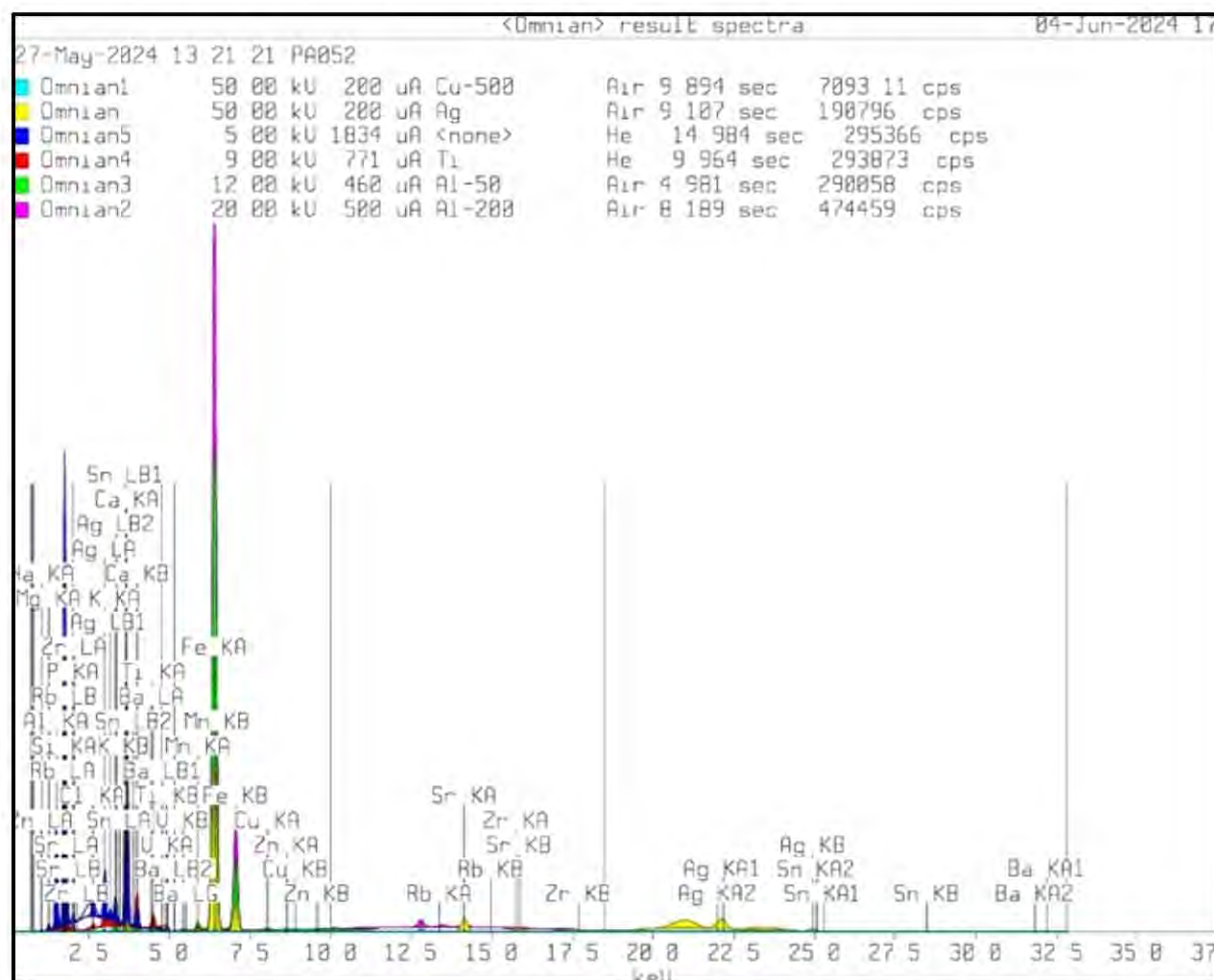
5.1.1 RESPUESTA ESPECTRAL SUPERPUESTA

La figura 5.1 muestra el espectro total de una muestra representativa de roca, en este caso la M5, obtenido mediante el método Omnian, al superponer los espectros individuales de

6 configuraciones diferentes. Esta representación total permite identificar un amplio rango de elementos, desde ligeros como Mg y Si, hasta metales pesados como Zr y V. Se observa que ninguna configuración individual permite detectar todos los elementos, por lo que se justifica el uso de múltiples parámetros de excitación

Figura 5.1

Espectro resultante de la superposición de cinco (5) configuraciones para la muestra M5



5.1.2 RESPUESTA ESPECTRAL POR CONFIGURACIÓN DEL EQUIPO

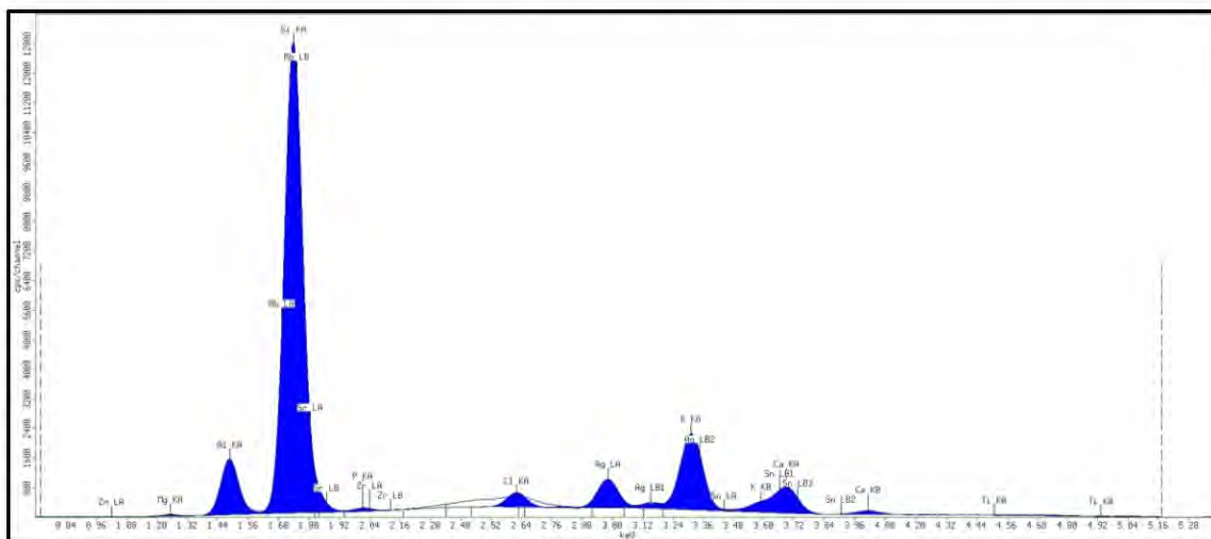
Antes de analizar los espectros individuales obtenidos bajo distintas configuraciones del equipo, se destaca la presencia constante de picos característicos de plata (Ag), originados

por el ánodo del tubo de rayos X del equipo utilizado (Epsilon 4 de Malvern Panalytical) y no por las muestras. A continuación, se presentan los espectros de una muestra representativa de roca (M2), que permiten visualizar cómo varía la respuesta espectral según los parámetros de excitación (voltaje y corriente) y el rango de elementos detectables.

En la figura 5.2 se presenta el espectro obtenido con la configuración de 5 kV y 1622 μ A, sin filtro y en atmósfera de helio, ideal para la detección de elementos ligeros, debido al bajo voltaje aplicado y la reducción de absorción. En este destacan picos K_{α} intensos de Si, Al, Cl, P, K y Ca, además de líneas de Rb (L_{α} y L_{β}) y elementos más débiles como Zn, Sn, Sr y Zr. El nivel de fondo es relativamente bajo, permitiendo detectar elementos con energías entre 1 y 5 keV.

Figura 5.2

Espectro de FRX (5 kV, 1622 μ A) de la muestra M2, sin filtro y en atmósfera de helio

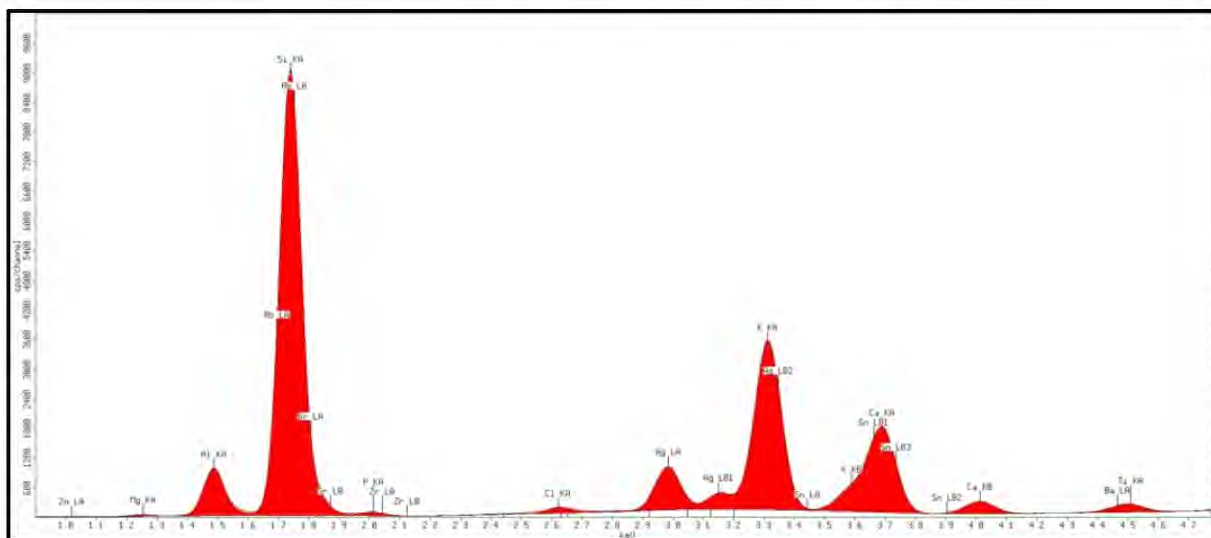


El espectro obtenido con los parámetros de excitación de 9 kV y 968 μ A (Figura 5.3), presenta una distribución muy similar de elementos en comparación con el espectro mostrado

en la Figura 5.1. La principal diferencia radica en la intensidad relativa de los picos y la reducción del ruido de fondo asociado a bajas energías.

Figura 5.3

Espectro de FRX (9 kV, 968 μ A) de la muestra M2, con filtro de Ti y atmósfera de helio



Con la configuración de 12 kV y 833 μ A, utilizando un filtro de aluminio (Al-50) y atmósfera de aire, se obtiene un espectro más completo que los obtenidos con voltajes más bajos (Figura 5.4). Destacan los picos K_{α} y K_{β} de hierro (Fe), por su alta intensidad, los cuales no eran detectables con configuraciones de 5 y 9 keV. Esto evidencia una mayor eficiencia en la excitación de elementos de mayor número atómico como V, Mn, Cu y Zn. Además, se observa un leve aumento del nivel de fondo a partir de los 5 keV. Aunque esta medición se realizó en atmósfera de aire, el espectro no presenta un nivel de ruido significativo.

Cuando la muestra es analizada a 20 kV y 500 μ A, con filtro Al-200 y atmósfera de aire (Figura 5.5), se puede observar un aumento significativo del fondo a energías superiores a los 8 keV, sin ruido visible. El espectro es similar al de 12 kV, excepto por la detección de líneas K_{α} y K_{β} de elementos con mayor número atómico, tales como Rb, Sr y Zr.

Figura 5.4

Espectro de FRX (12 kV, 833 μ A) de la muestra M2, con filtro Al-50 y atmósfera de aire

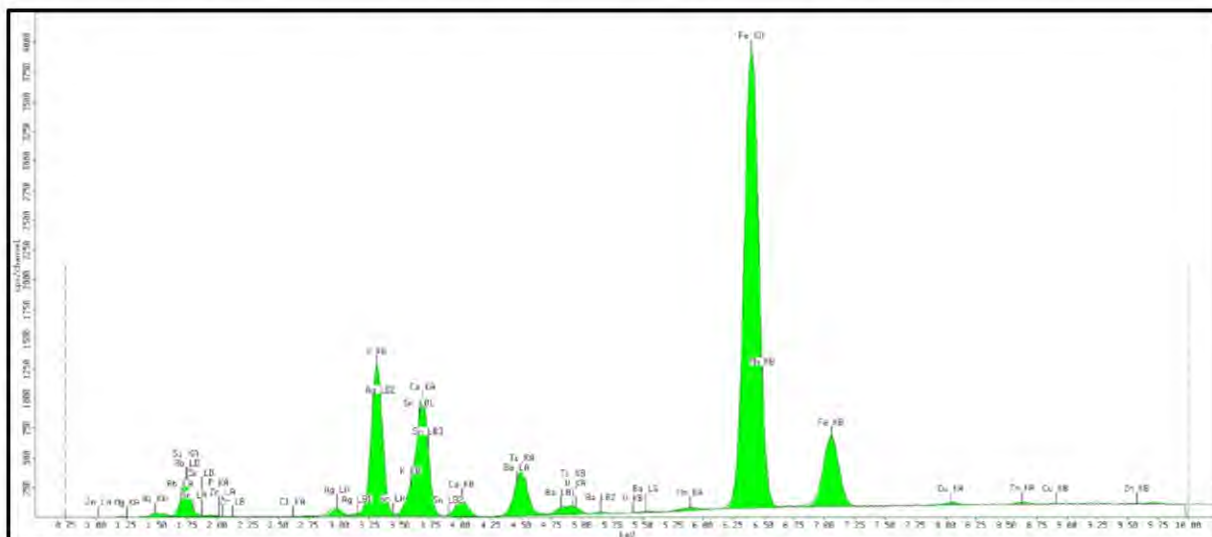
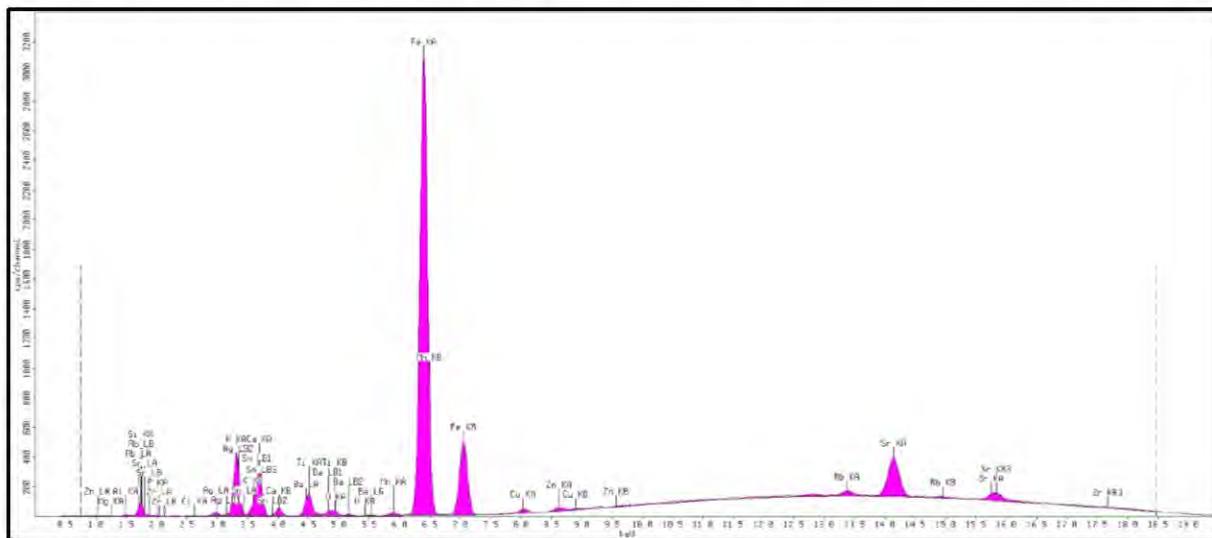


Figura 5.5

Espectro de FRX (20 kV, 500 μ A) de la muestra M2, con filtro Al-200 y atmósfera de aire

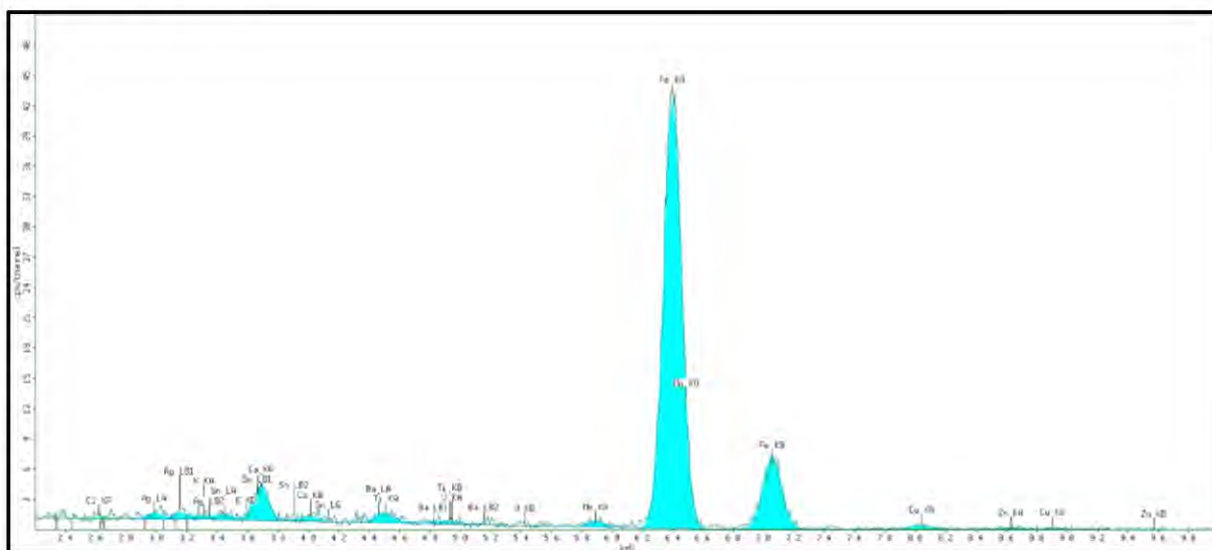


El espectro presentado en la Figura 5.6a y Figura 5.6b fue obtenido con una configuración de 50 kV y 200 μ A, utilizando un filtro de Cu-500 y atmósfera de helio, condiciones que favorecen la detección de elementos de alto número atómico. La señal

registrada abarca un amplio rango energético, desde bajas energías hasta aproximadamente 33 keV, por lo que se ha dividido en dos secciones para facilitar su visualización.

Figura 5.6a

Espectro de FRX (50 kV, 200 μ A) de la muestra M2 (rango 2,4 – 9,8 keV), con filtro Cu-500 y atmósfera de helio



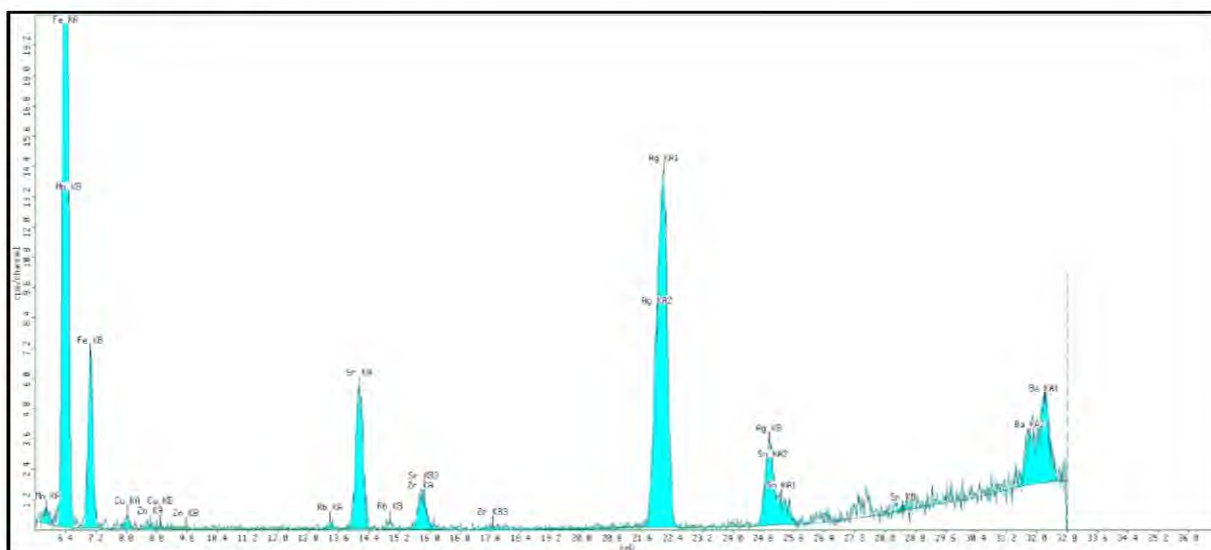
En ambas secciones, se identifican múltiples picos correspondientes a elementos previamente detectados en otras configuraciones, así como a elementos adicionales como Sn y Ba, cuya emisión característica se encuentra en el rango de altas energías (Figura 5.6b). No obstante, se observa una disminución en la sensibilidad hacia elementos ligeros, cuyas señales son más tenues en comparación con las de elementos pesados.

El espectro presenta un fondo continuo que se incrementa tanto en las regiones de baja como de alta energía, aunque se mantiene por debajo de la intensidad de los principales picos. Además, se observan fluctuaciones irregulares superpuestas a la señal, lo que eleva el nivel de ruido, reduce la relación señal/ruido y compromete la resolución espectral. Esto

dificulta la identificación precisa de baja intensidad o cercanos entre sí, como ocurre en la región de 2 a 5 keV (Figura 5.6a).

Figura 5.6b

Espectro de FRX (50 kV, 200 μ A) de la muestra M2 (rango 6,4 – 36 keV), con filtro Cu-500 y atmósfera de helio



5.1.3 RESPUESTA ESPECTRAL CON DETECCIÓN DE ELEMENTOS TRAZA

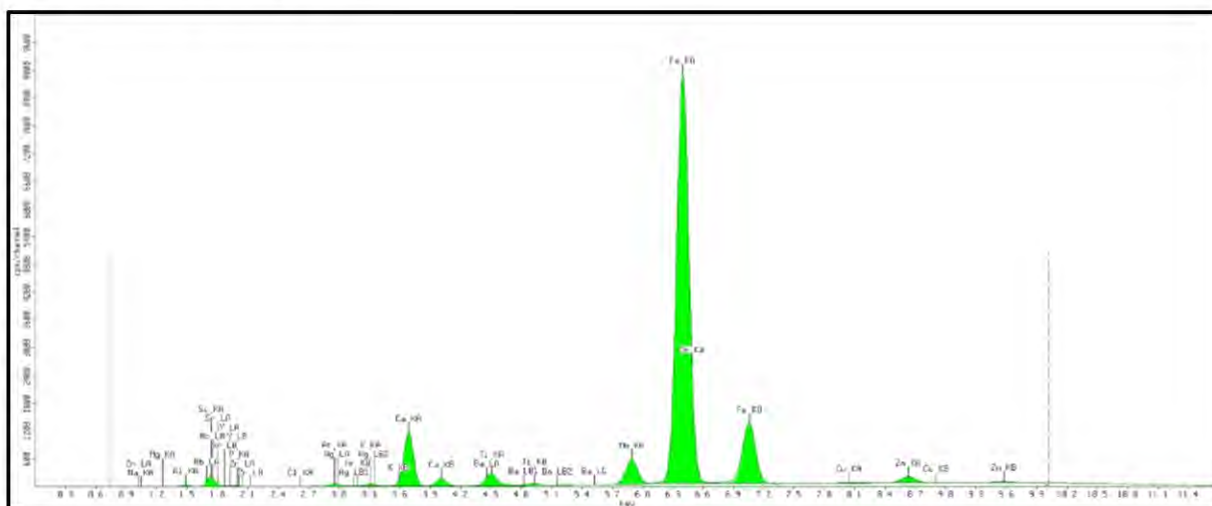
A continuación, se presentan espectros de muestras representativas, donde se observan señales asociadas a elementos traza, cuya detección resulta relevante en esta investigación. Estos elementos, aunque se encuentren en bajas concentraciones, generan picos característicos en el espectro, que permiten su identificación preliminar. Aunque los espectros mostrados no corresponden a la misma muestra, es posible comparar cómo la configuración instrumental influye en la detectabilidad de estos elementos.

En el espectro de la Figura 5.7, correspondiente a la muestra de suelo MS11 (0–0,30 m), se evidencian señales correspondientes a Cu y Zn en sus líneas características K_{α} y K_{β} (8

- 9,5 keV), cuya baja intensidad, aunque apenas superior al fondo, confirma su presencia en concentraciones traza.

Figura 5.7

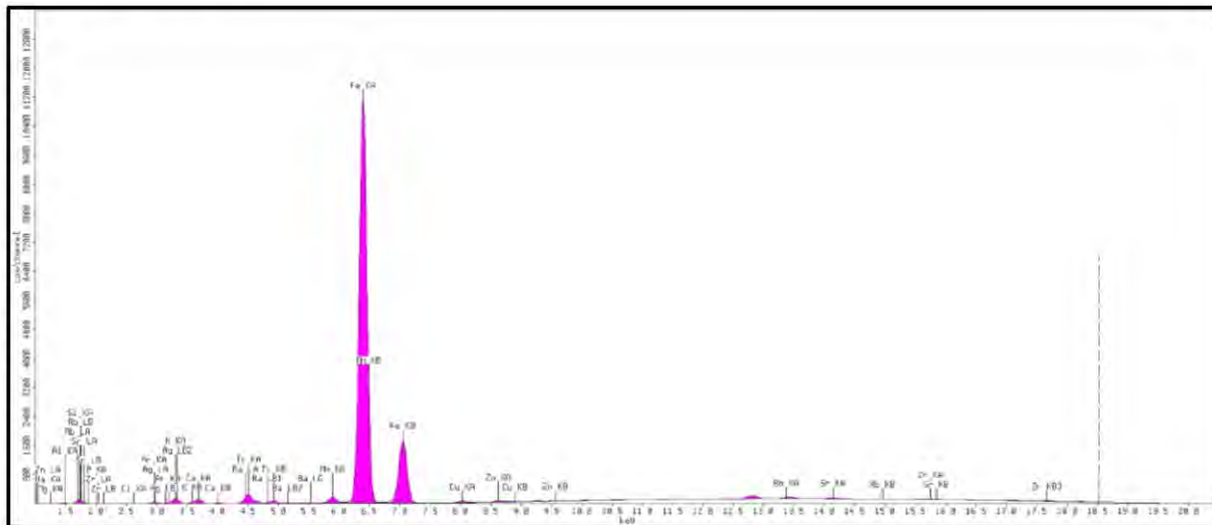
Espectro de FRX (12 kV, 833 μ A) de la muestra de suelo MS11 a profundidad de 0 – 0,30 m, con presencia de Cu y Zn



Por su parte, la muestra de suelo MS8 (0–0,30 m), analizada a mayor energía (Figura 5.8), revela no solo las señales de Cu y Zn, sino también la presencia de Rb, Sr y Zr. Aunque en ambos espectros se identifica el Cu y Zn, la eficiencia de excitación de sus líneas K es significativamente mayor a 20 kV.

Figura 5.8

Espectro de FRX (20 kV, 500 μ A) de la muestra de suelo MS8 (0 – 0,30 m), con presencia de Cu, Zn, Rb, Sr y Zr

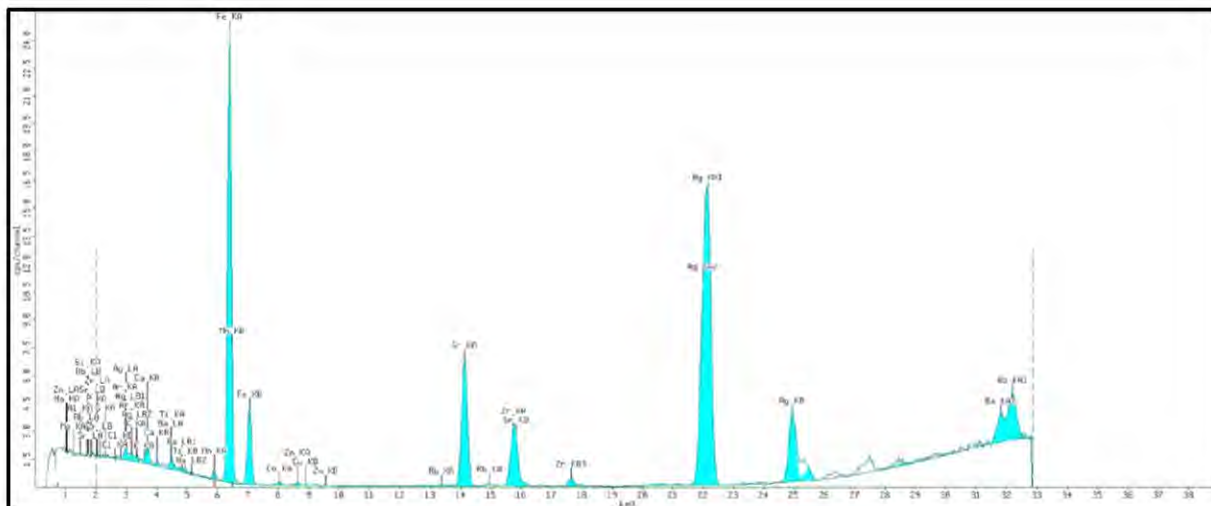


En la Figura 5.9 se observa el espectro obtenido de la muestra de suelo MS5 (0 – 0,30 m), analizada a 50 kV. Destacan los picos característicos de Ba, no detectados a menor voltaje. También se distinguen con mayor claridad la presencia de picos asociados a elementos traza como el Cu y Zn, debido a la mayor energía del haz incidente.

Además, la compresión de la escala de intensidades acentúa visualmente los picos de baja intensidad. Aunque las intensidades de estos elementos no varíen significativamente entre configuraciones, su identificación cualitativa resulta más evidente bajo condiciones de mayor voltaje.

Figura 5.9

Espectro de FRX (50 kV, 200 μ A) de la muestra de suelo MS5 (0 – 0,30 m), con presencia de Cu, Zn, Rb, Sr, Zr y Ba



6.2 CUANTIFICACIÓN ELEMENTAL

La cuantificación de los elementos presentes en las muestras se realizó mediante el análisis de los datos espectrales obtenidos con el espectrómetro FRX, el cual incorpora el software Omnian. Este permitió estimar los valores de la concentración de los elementos detectados a partir de seis configuraciones distintas de voltaje y corriente.

A continuación, se presentan los resultados en forma de tablas numéricas y gráficos de barras para facilitar su interpretación, expresados en porcentajes o ppm según corresponda. Para una mejor visualización de los datos, se han clasificado los elementos en función de su porcentaje de peso como mayoritarios ($>1\%$), minoritarios ($0,1 - 1\%$) y trazas ($<0,1\%$) (Ebby, 2004; McSween et al., 2003).

5.2.1 MUESTRAS DE ROCA

En la Tabla 3, se presentan los valores numéricos de las concentraciones de los elementos detectados, con variaciones notables entre muestras. Estos datos ofrecen información sobre la composición elemental del sustrato rocoso y permiten establecer comparaciones con los suelos asociados.

Tabla 3

Concentración en porcentaje (%) o ppm de los elementos presentes en las rocas del Sur de Penonomé.

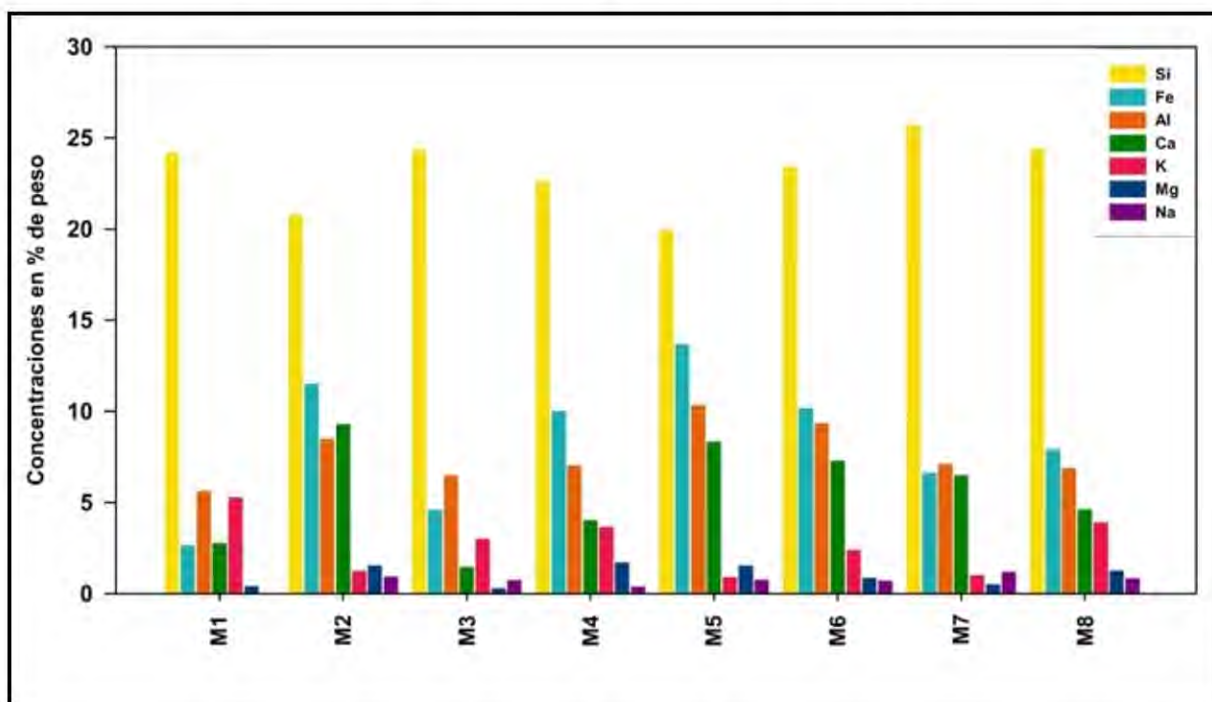
Elemento	Muestras de roca pulverizada							
	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
Na (%)	ND	0.94	0.75	0.39	0.76	0.72	1.20	0.84
Mg (%)	0.42	1.54	0.30	1.73	1.55	0.85	0.52	1.27
Al (%)	5.61	8.48	6.47	7.04	10.35	9.34	7.10	6.88
Si (%)	24.19	20.80	24.40	22.66	19.94	23.40	25.71	24.42
K (%)	5.30	1.25	3.01	3.66	0.91	2.39	1.02	3.90
Fe (%)	2.66	11.52	4.59	10.02	13.68	10.18	6.62	7.90
Ca (%)	2.77	9.30	1.46	4.05	8.34	7.29	6.49	4.63
P (%)	0.19	0.31	0.22	0.21	0.31	0.30	0.28	0.27
S (%)	ND	ND	ND	0.21	ND	ND	ND	ND
Cl (%)	0.13	0.11	0.14	0.11	0.11	0.12	0.13	0.11
Mn (ppm)	2000	2100	1400	2800	2100	2400	1700	2000
Ti (ppm)	4700	7880	4265	6178	8708	8072	6232	5392
V (ppm)	84	480	94	297	599	363	171	206
Cu (ppm)	84	450	85	102	387	210	84	101
Zn (ppm)	144	247	192	265	261	256	204	212
Rb (ppm)	269	57	317	237	45	181	152	237
Sr (ppm)	2335	1302	2378	675	1150	1258	1120	725
Zr (ppm)	374	131	340	242	110	179	292	277
Sn (ppm)	79	118	91	99	123	105	111	96
Ba (ppm)	1445	729	2298	954	869	1343	1568	1493

En la Figura 5.10 se presentan los contenidos de los elementos mayoritarios identificados en las muestras de rocas, expresados en porcentaje de peso. Se observa una clara dominancia del silicio (Si) en todas las muestras, con valores que oscilan entre el 20% y el 25%.

El aluminio (Al), el hierro (Fe) y el calcio (Ca) también exhiben concentraciones significativas. Estos elementos presentan una mayor variabilidad entre muestras, alcanzando sus valores máximos en M2 y M5. Otros elementos como el potasio (K), el sodio (Na) y el magnesio (Mg) aparecen en menores proporciones, pero están presentes en todas las muestras.

Figura 5.10

Distribución de la concentración de elementos mayoritarios en rocas por puntos de muestreo



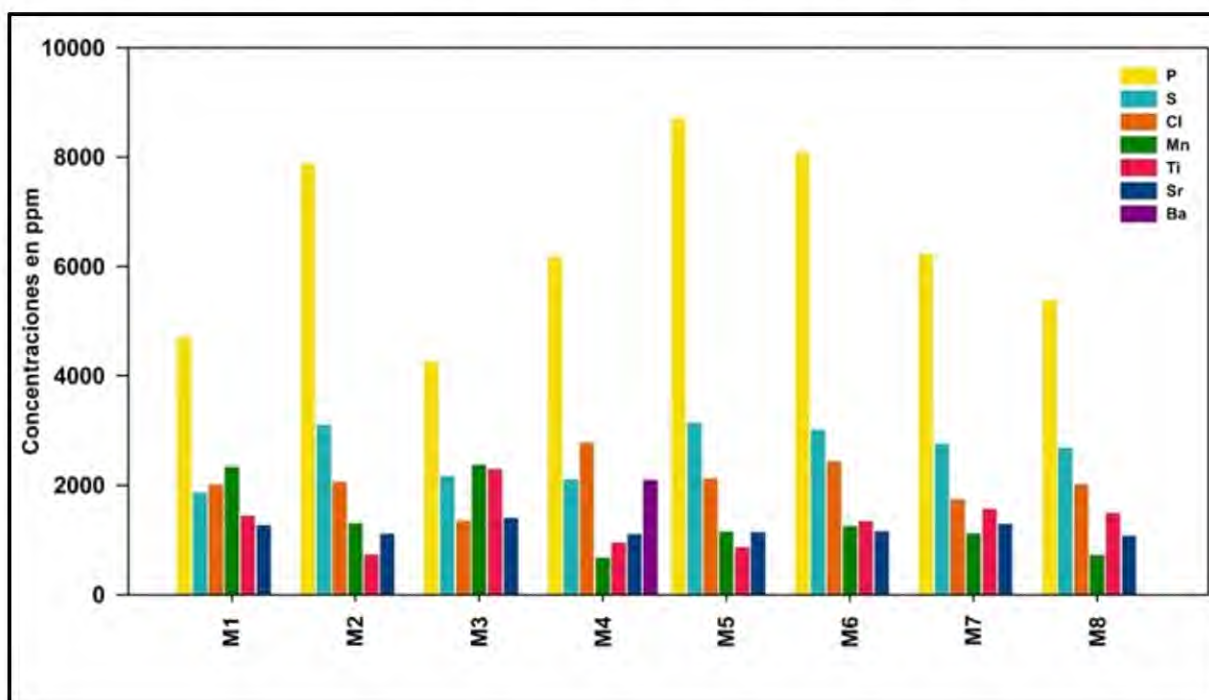
En la Figura 5.11 se presenta las concentraciones de elementos minoritarios en las muestras de roca, expresadas en ppm. El titanio (Ti) presenta las concentraciones más altas de estos elementos, superando los 8 000 ppm en algunas muestras, especialmente M2, M5 y M6.

A este elemento le sigue el fósforo (P), el manganeso (Mn) y el estroncio (Sr), que presentan valores intermedios. El cloro (Cl), el azufre (S) y el bario (Ba), aparecen en

concentraciones más bajas, aunque detectables en todas las muestras a excepción del Ba, el cual solo se detectó en la muestra M4. Estos resultados indican una composición variable en las rocas analizadas.

Figura 5.11

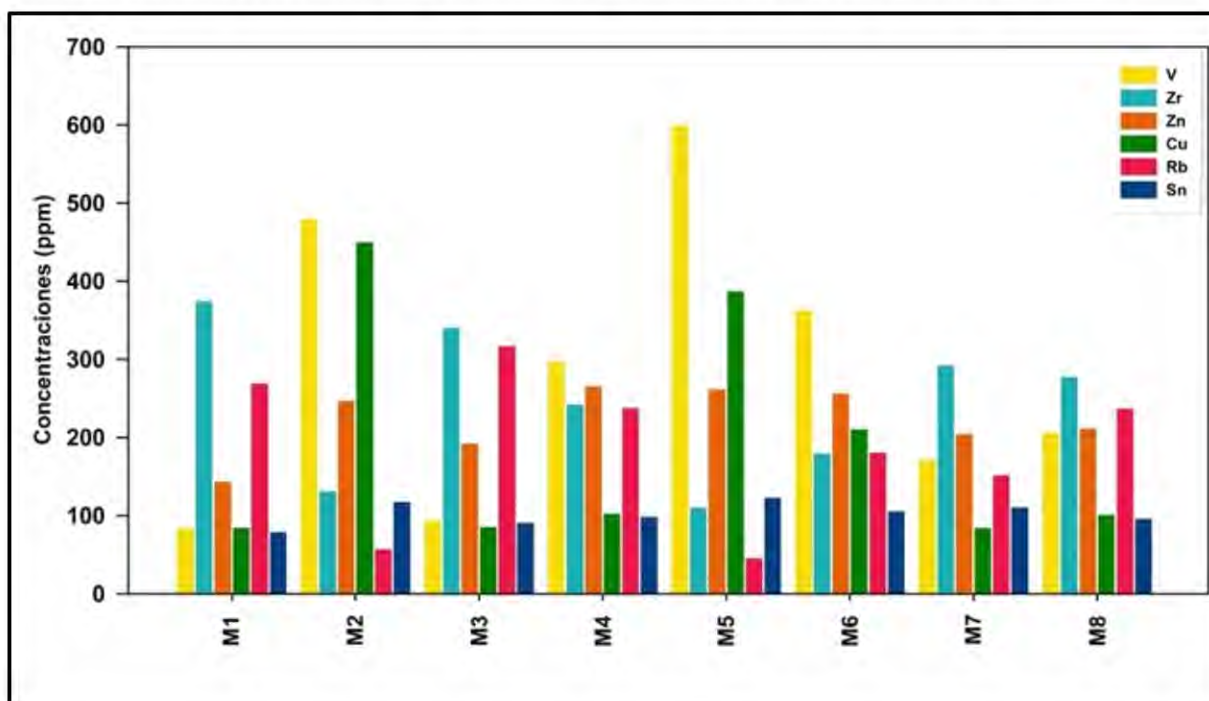
Distribución de la concentración de elementos minoritarios en rocas por puntos de muestreo



Finalmente, en la Figura 5.12 se pueden observar los elementos traza en las muestras de roca. Se observa una notable variabilidad entre muestras, con vanadio (V), cobre (Cu) y zinc (Zn) presentando los valores más altos, especialmente en M2 y M5, donde superan los 400 ppm. El rubidio (Rb) y circonio (Zr) también están presentes en cantidades moderadas, mientras que el estaño (Sn) muestra las concentraciones más bajas de este grupo, aunque se detecta en todas las muestras.

Figura 5.12

Distribución de la concentración de elementos trazas en rocas por puntos de muestreo



5.2.2 MUESTRAS DE SUELOS SUPERFICIALES (0 – 0,30 M)

En la Tabla 4 se presentan los resultados obtenidos para las muestras de suelos superficiales recolectadas en el área de estudio. Estos datos ofrecen información relevante sobre la composición de elementos presentes en la fracción superficial del suelo.

Tabla 4

Concentración en porcentaje (%) o ppm de los elementos presentes en los suelos superficiales (0 – 0,30 m) del Sur de Penonomé.

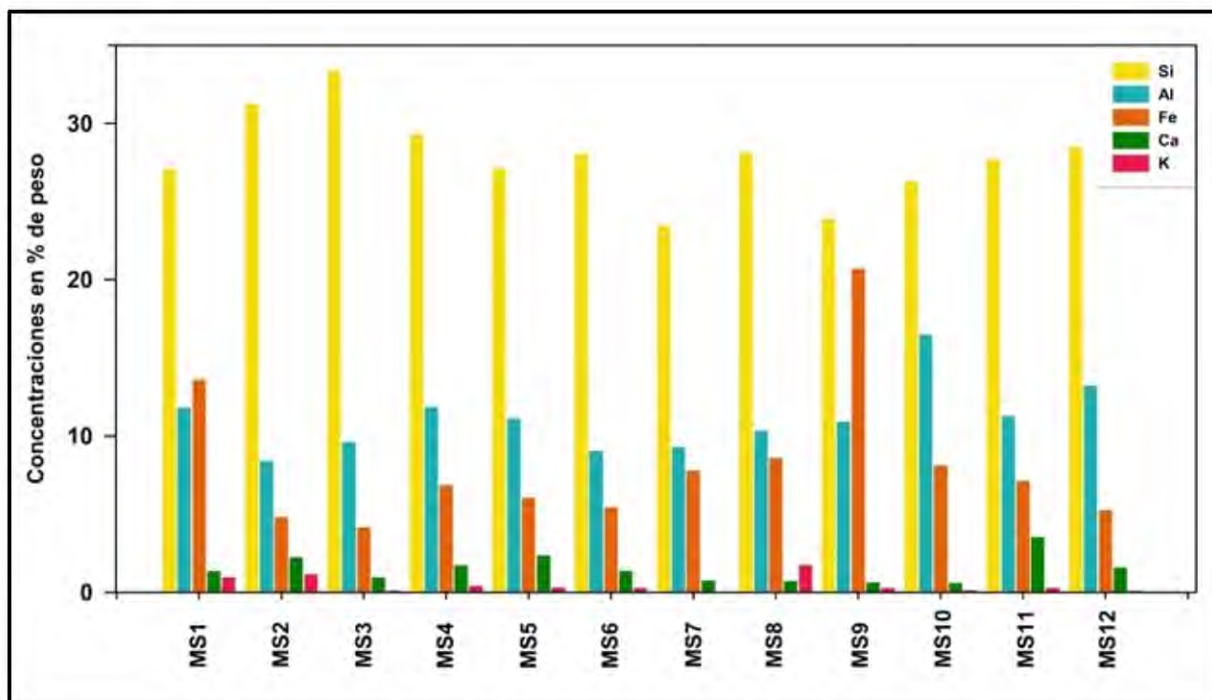
Elemento	Muestras de suelos superficiales (0 – 0,30 m)											
	MS1	MS2	MS3	MS4	MS5	MS6	MS7	MS8	MS9	MS10	MS11	MS12
Na (%)	ND	0.67	0.09	0.33	0.32	0.11	ND	0.09	0.02	ND	0.18	0.10
Mg (%)	0.60	0.31	0.10	0.18	0.21	0.16	0.10	0.33	0.08	ND	0.19	0.14
Al (%)	11.81	8.41	9.60	11.87	11.12	9.06	9.30	10.34	10.91	16.49	11.27	13.22
Si (%)	27.04	31.25	33.36	29.29	27.11	28.06	23.43	28.13	23.90	26.31	27.73	28.52
K (%)	0.96	1.16	0.10	0.40	0.31	0.27	0.06	1.74	0.28	0.13	0.28	0.09
Fe (%)	13.61	4.81	4.16	6.85	6.06	5.44	7.79	8.58	20.72	8.12	7.14	5.25
Ca (%)	1.38	2.24	0.95	1.71	2.35	1.38	0.74	0.73	0.64	0.59	3.54	1.61
P (%)	0.19	0.18	0.20	0.19	0.22	0.19	0.18	0.24	0.21	0.20	0.27	0.20
Cl (%)	0.11	0.30	0.15	0.13	0.12	0.15	0.12	0.13	0.11	0.12	0.14	0.12
Mn (ppm)	3600	500	3900	600	1500	8400	500	1600	17100	400	4400	1000
Ti (ppm)	1026	3100	4950	4520	3900	4200	7500	7130	3370	4030	4300	3730
Cu (ppm)	300	139	56	66	90	117	130	152	134	82	79	81
Zn (ppm)	109	102	53	92	152	73	72	134	152	99	ND	100
Rb (ppm)	69	32	7	17	13	16	12	138	17	20	25	9
Sr (ppm)	518	910	404	763	1120	634	263	269	305	213	ND	734
Zr (ppm)	380	180	340	213	290	371	318	286	260	226	338	265
Ba (ppm)	1600	1020	225	509	541	1600	177	811	2930	231	939	452

En las muestras de suelos superficiales (Figura 5.13), los elementos mayoritarios como el silicio (Si), el hierro y el aluminio (Al) presentan concentraciones más elevadas que en rocas, con variaciones entre muestras (Figura 5.13). El silicio alcanzó hasta un 33% en la muestra MS3, el hierro presentó su valor máximo del 20% en la MS9 y el aluminio de ~16 % en MS10. En conjunto, estos valores superan los rangos observados en rocas.

Por otro lado, se observan concentraciones bajas de calcio (Ca) y el potasio (K). El calcio alcanzó un máximo de ~3,5% en la muestra MS11, mientras que el potasio llegó a ~2% en la MS8. A diferencia de los elementos mencionados anteriormente, estos valores se encuentran en rangos por debajo de los registrados en rocas.

Figura 5.13

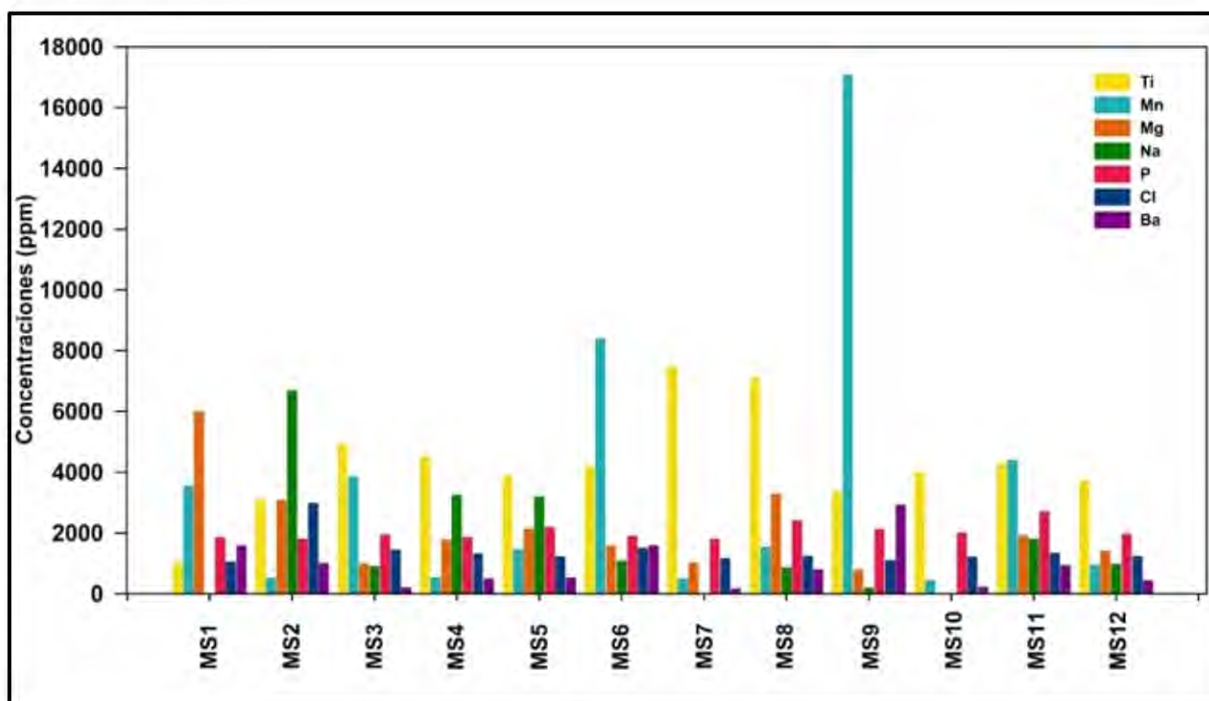
Distribución de la concentración de elementos mayoritarios en suelos superficiales por puntos de muestreo



Los elementos minoritarios (Figura 5.14) destacan con un nivel extremadamente alto para el manganeso (Mn), en la muestra MS9 (~17 000 ppm), e intermedio en la muestra MS6 (~4 000 ppm). El resto de los elementos muestran una variabilidad significativa entre muestras, sin un patrón definido, con concentraciones que oscilan entre bajas e intermedias. Después del manganeso, el titanio (Ti) presenta los valores más elevados, alcanzando un valor máximo de ~8 000 ppm.

Figura 5.14

Distribución de la concentración de elementos minoritarios en suelos superficiales por puntos de muestreo

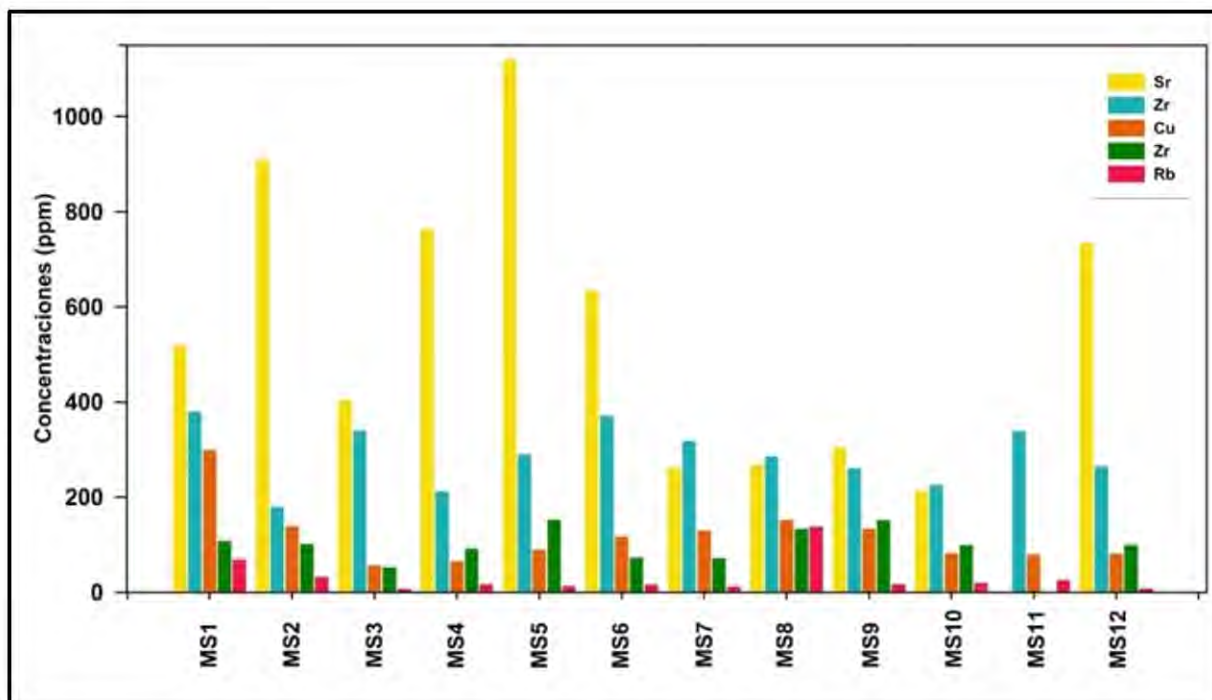


En cuanto a los elementos traza (Figura 5.15), el estroncio (Sr) mostró los valores más elevados, con variaciones marcadas, alcanzando su valor máximo en la muestra MS5. Por su parte, el cobre (Cu) y el zinc (Zn), presentan concentraciones moderadas.

Cabe destacar que, en comparación con los datos obtenidos en rocas, los elementos detectados son muy similares, excepto por el azufre (S), vanadio (V) y estaño (Sn), que no se detectaron en suelos superficiales.

Figura 5.15

Distribución de la concentración de elementos trazas en suelos superficiales por puntos de muestreo



5.2.3 MUESTRAS DE SUELOS SUBSUPERFICIALES (0,30 – 0,60 M)

Los resultados obtenidos para las muestras de suelos superficiales recolectadas en el área de estudio se presentan en la Tabla 5. Estos datos permiten evaluar posibles variaciones de las concentraciones elementales en profundidad en comparación suelos superficiales, con el fin de comprender cómo se formaron estos suelos y qué factores pueden haber influido en su composición, como el tipo de suelo del que provienen o el desplazamiento de elementos desde la superficie hacia capas más profundas.

Tabla 5

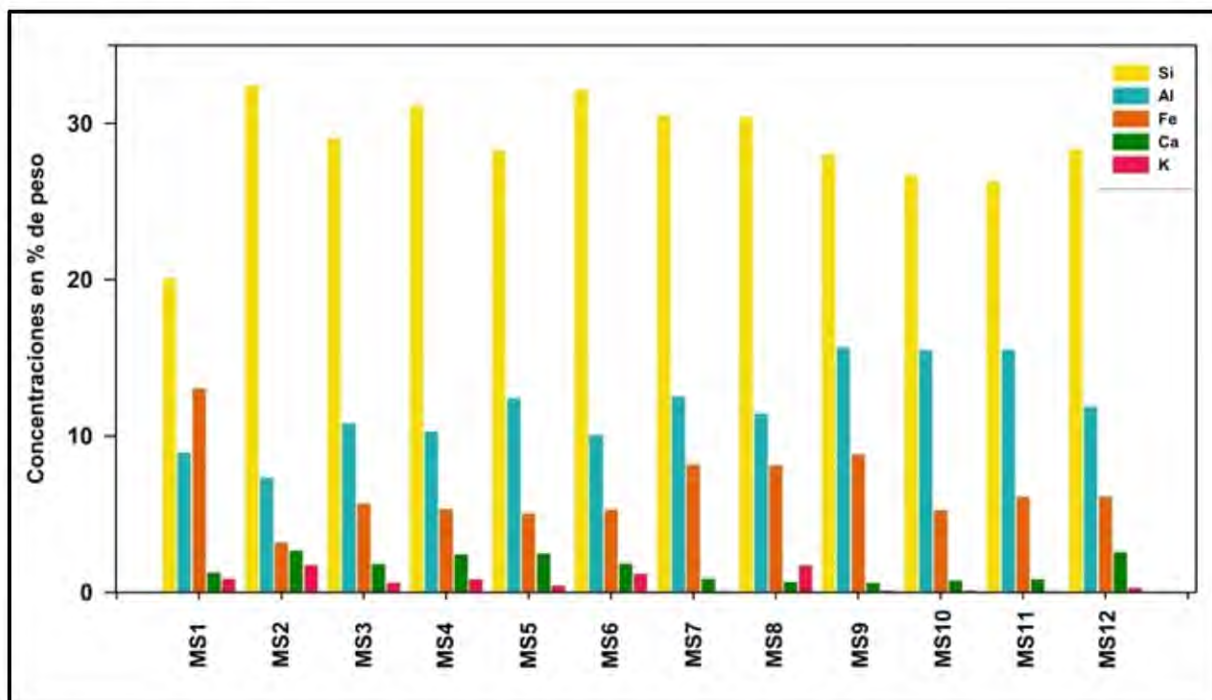
Concentración en porcentaje (%) o ppm de los elementos presentes en los suelos subsuperficiales (0 – 0,30 m) del Sur de Penonomé

Elemento	Muestras de suelos subsuperficiales (0 - 0.60 m)											
	MS1	MS2	MS3	MS4	MS5	MS6	MS7	MS8	MS9	MS10	MS11	MS12
Na (%)	ND	1.03	0.32	0.69	0.37	0.70	ND	ND	ND	ND	ND	0.42
Mg (%)	0.42	0.28	0.31	0.20	0.25	0.30	0.19	0.33	ND	ND	0.07	0.25
Al (%)	8.94	7.32	10.81	10.28	12.42	10.05	12.51	11.43	15.66	15.48	15.51	11.89
Si (%)	20.09	32.44	29.05	31.12	28.26	32.17	30.52	30.43	28.01	26.73	26.28	28.33
K (%)	0.86	1.74	0.61	0.84	0.42	1.19	0.06	1.72	0.10	0.10	0.07	0.27
Fe (%)	13.05	3.19	5.69	5.32	5.03	5.29	8.17	8.11	8.82	5.26	6.12	6.12
Ca (%)	1.26	2.67	1.80	2.43	2.49	1.84	0.88	0.66	0.62	0.75	0.85	2.56
P (%)	0.17	0.19	0.20	0.19	0.20	0.18	0.18	0.23	0.18	0.20	0.19	0.20
S (%)	ND	0.01	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Cl (%)	0.12	0.38	0.13	0.14	0.13	0.26	0.14	0.14	0.14	0.13	0.14	0.17
Mn (ppm)	4100	600	2600	400	800	500	500	1800	900	200	1300	1700
Ti (ppm)	10140	2700	4750	4300	3580	3430	8410	7570	4660	3100	3280	4240
V (ppm)	ND	ND	ND	ND	ND	114	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Ni(ppm)	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	48
Cu (ppm)	322	101	124	60	89	163	128	169	82	80	70	99
Zn (ppm)	118	93	126	83	100	102	73	151	110	85	84	110
Rb (ppm)	76	43	31	24	16	33	7	136	11	10	10	12
Sr (ppm)	539	1030	744	1020	1110	757	282	238	266	317	311	1100
Zr (ppm)	380	165	253	170	251	209	393	317	238	187	146	255
Ga (ppm)	ND	ND	ND	ND	ND	53	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Ba (ppm)	ND	894	1220	ND	638	ND	251	948	513	212	310	671

En los suelos subsuperficiales, los elementos mayoritarios (Figura 5.16) muestran un patrón similar al de los suelos superficiales, como el silicio (Si) siendo el componente más abundante en todas las muestras, seguido por el aluminio (Al) y el hierro (Fe). No obstante, se registran ligeras variaciones entre muestras, y en general, concentraciones levemente menores. En contraste, el calcio (Ca) y potasio (K) mantienen bajas concentraciones.

Figura 5.16

Distribución de la concentración de elementos mayoritarios en suelos subsuperficiales por puntos de muestreo

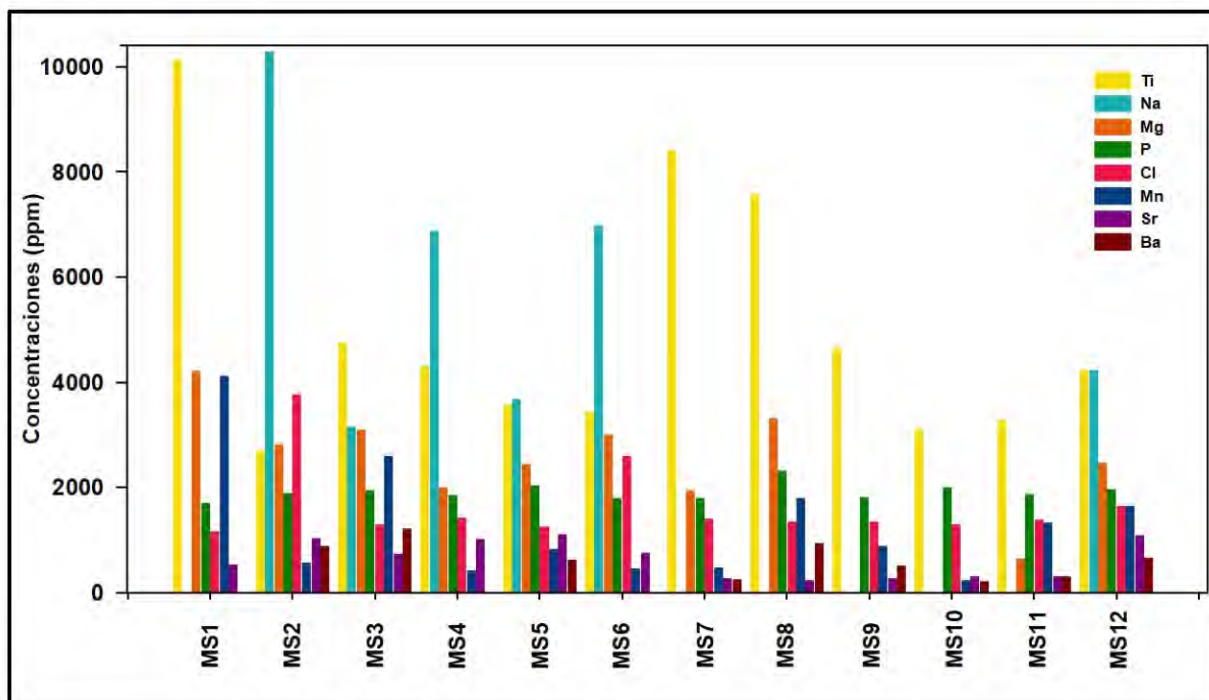


En cuanto a los elementos minoritarios (Figura 5.17), en comparación con suelos superficiales, el titanio (Ti) vuelve a ser el más destacado con concentraciones de hasta ~10 000 ppm. De manera similar, el sodio (Na) alcanza valores relativamente altos, también cercanos a 10 000 ppm.

El resto de los elementos presentan valores intermedios a bajos, aunque el estroncio (Sr) se posiciona como elemento minoritario, con un aumento significativo en sus valores de concentración en algunas muestras, y el bario (Ba) no se detectó en las muestras MS1, MS4 y MS6.

Figura 5.17

Distribución de la concentración de elementos minoritarios en suelos subsuperficiales por puntos de muestreo

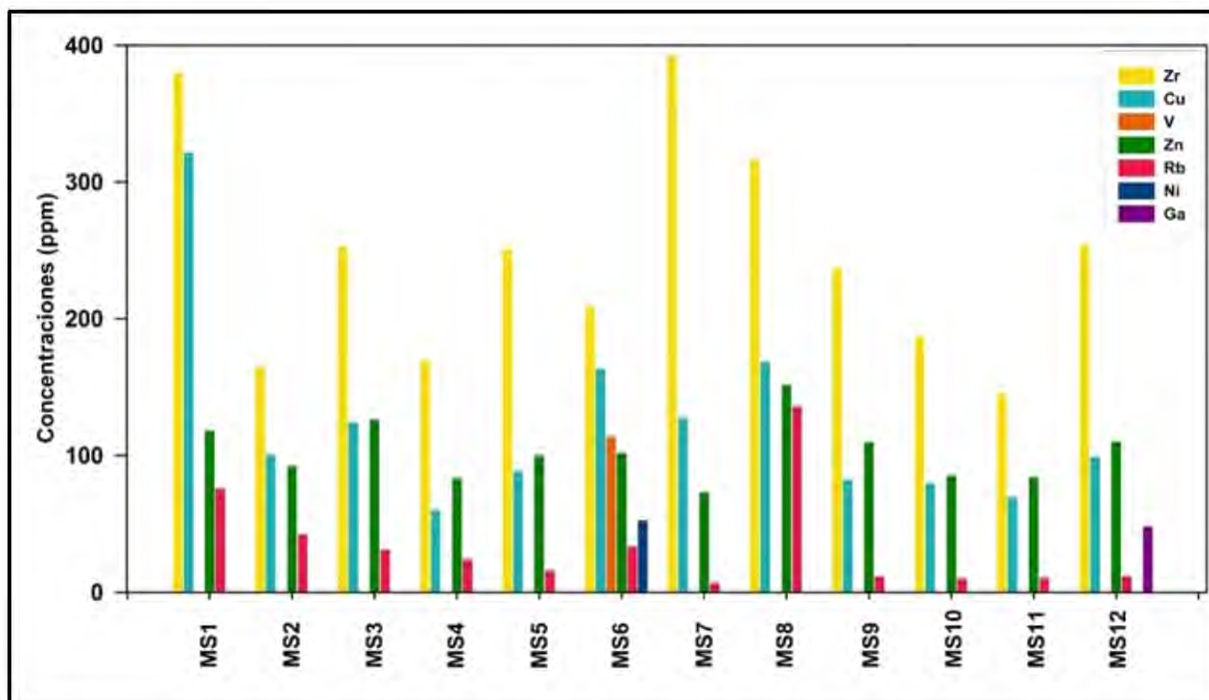


Respecto a los elementos traza mostrados en la Figura 5.18, las concentraciones generales tienden a ser más bajas que en la capa superficial del suelo. El cobre (Cu), el zinc (Zn), el rubidio (Rb) y el circonio (Zr), siguen presente en todas las muestras, aproximadamente con la misma intensidad.

Otros elementos como el vanadio (V), níquel (Ni) y galio (Ga), que no se observan en suelos superficiales, solo se detectaron en muestras puntuales y en muy bajas concentraciones.

Figura 5.18

Distribución de la concentración de elementos trazas en suelos subsuperficiales por puntos de muestreo



6.3 CLASIFICACIÓN DE SUELOS Y ROCAS

Con el objetivo de identificar patrones de composición y similitudes entre las muestras de roca y suelo, se realizó un agrupamiento basado en las tendencias y rangos aproximados observados en los elementos mayoritarios y trazas relevantes. Este análisis permite organizar las muestras en grupos con características químicas similares, lo que facilita la identificación de tipos de roca y perfiles de suelo con potencial de interés geoambiental. Estos grupos se presentan a continuación, de manera individual, para rocas y suelos.

6.3.1 ROCAS

Se definieron tres grupos principales de muestras de roca (A, B y C) según las tendencias de los elementos Si, Al, K, Rb, Fe, Mg, Ca, Sr y Ba, seleccionados por su capacidad

para mostrar diferencias composicionales entre las litologías. Estos elementos ayudan a identificar variaciones en el contenido de sílice y en la proporción de minerales félsicos y máficos. Las características químicas de cada grupo, descritas en la Tabla 6, muestran tendencias y posibles afinidades entre las muestras analizadas.

Tabla 6

Agrupamiento e interpretación petrológica de las rocas analizadas mediante FRX

Grupo	Muestras	Origen probable	Características principales
A	M1, M3, M4, M8	Rocas ígneas félsicas	▸ Si (~22 – 25 %, elemental) alto. SiO₂ (~50 – 55 %, óxido) ▸ Fe (~2 – 5 %) bajo a moderado. ▸ Al (~6%) moderado. ▸ Ca (hasta 2%) y Mg (<0,5 %) bajos. ▸ K (3 – 5 %) y Rb (237 – 317 ppm) altos. ▸ Ba (~1400 – 2300 ppm): enriquecido.
B	M2, M5, M6	Rocas ígneas máficas	▸ Si (~19 – 23 %) relativamente menor que A. ▸ Fe (~10 – 13 %) alto. ▸ Al (~8 – 10%) alto. ▸ Mg (hasta 1,7%) alto. ▸ Ca (~4 – 9%) alto. ▸ Sr (>1100 ppm) alto. ▸ K (~1 – 2 %) y Rb (~50 – 180 ppm) bajos.
C	M7	Rocas ígneas de composición intermedia (máficas / félsicas)	▸ Química mixta. ▸ Si (~25 %) alto. ▸ Fe y Al (~7 %) moderado. ▸ Ca (~6 %) moderado ▸ K (~1 %) bajo. ▸ Rb (152 ppm) moderado. ▸ Sr (1100 ppm) moderado.

6.3.2 SUELOS SUPERFICIALES

En los suelos superficiales (0 - 0,30 m), los grupos se establecieron según las tendencias observadas en los elementos Si, Al, K, Rb, Fe, Mn, Ti, Sr y Ba. Estos elementos muestran tanto la composición heredada del material parental como los cambios inducidos por

la meteorización y los procesos de retención o movilización de elementos en la capa superficial.

El análisis permitió identificar tendencias composicionales que distinguen zonas con mayor presencia de óxidos de hierro y manganeso de otras en las que predominan los componentes aluminosilicatos. La Tabla 7 muestra los diferentes patrones de composición según el tipo de suelo, las muestras de cada grupo y los elementos característicos de cada tendencia..

Tabla 7

Agrupamiento e interpretación los suelos superficiales a partir de los datos de FRX

Grupo	Muestras	Clasificación	Características principales
A	MS1, MS9	Suelos fuertemente ferruginosos / lateríticos	▸ Fe y Mn excepcionalmente altos. ▸ Ti moderado. ▸ Baja concentración de elementos alcalinos como K, Na y Rb.
B	MS3, MS4, MS10, MS12	Suelos arcillosos – aluminosilicatos	▸ Al y Si elevados. ▸ K y Rb bajos.
C	MS2, MS5, MS6, MS8	Suelos intermedios con aporte de carbonatos / feldespatos	▸ Sr y Ca moderados - altos. ▸ Ba intermedio. ▸ Proporciones relativamente altas de elementos alcalinotérreos como Ca, Sr y Ba.
D	MS7, MS11	Suelos mixtos o transicionales	▸ Enriquecimiento de Ti y Mn. ▸ Fe moderado. ▸ Composiciones intermedias entre grupos adyacentes.

6.3.3 SUELOS SUBSUPERFICIALES

Las muestras de suelos subsuperficiales (0,30 – 0,60 m) se agruparon según las tendencias observadas en los mismos elementos indicadores (Tabla 8) para mantener la comparabilidad con las muestras superficiales. En este horizonte, las concentraciones están

menos influenciadas por los procesos superficiales y muestran una composición más cercana al material parental. Estos valores ayudan a identificar gradientes de profundidad y variaciones elementales entre los distintos perfiles analizados.

Tabla 8

Agrupamiento e interpretación los suelos subsuperficiales a partir de los datos de FRX

Grupo	Muestras	Clasificación	Características principales
A	MS1, MS7, MS8	Ferruginosos / Ti enriquecidos	▸ Altos contenidos de Fe ($\geq 8\%$) y Ti (> 7500 ppm). ▸ Bajos contenidos de K y Na.
B	MS5, MS9, MS10, MS11	Aluminosilicatos arcillosos	▸ Al $> 12\%$; K muy bajo; Fe 5 – 9 %.
C	MS2, MS4, MS6	Arenosos con aporte carbonatado / feldespático	▸ Si ($\sim 30\%$) alto; Fe bajo $< 6\%$. ▸ K y Sr moderados / altos
D	MS3, MS12	Intermedios ricos en Sr/Ba	▸ Altos contenidos de Sr (> 1000 ppm) y Ba (> 600 ppm). ▸ Al y Fe medios. ▸ Composiciones intermedias.

6.4 COMPARACIÓN FRX – DRX

Con el fin de complementar la caracterización realizada mediante fluorescencia de rayos X (FRX), se compararon los resultados obtenidos mediante difracción de rayos X (DRX) con los de FRX en las mismas muestras de roca.

En la sección anterior, los resultados de FRX permitieron establecer tendencias de composición elemental que sugieren afinidades ígneas félsicas, intermedias o máficas. En esta sección, se contrastan dichas tendencias con las fases cristalinas identificadas por DRX, con el propósito de corroborar la composición mineralógica y definir la clasificación litológica final de cada muestra (Tabla 9).

Tabla 9

Comparación entre los resultados de FRX y DRX en muestras de roca, y clasificación litológica propuesta

Muestra	FRX: elementos predominantes	DRX: fases minerales (grupo mineral)	Clasificación litológica
M1	Si, Al, K, Ca – tendencia félsica.	Clinoptilolita-Ca (zeolita), Sanidino (feldespato potásico) – toba volcánica zeolítica.	Toba volcánica zeolítica de composición félsica.
M2	Alto contenido de Ca, Fe, y Mg, con Al y Si dominantes – tendencia máfica.	Anortita (plagioclasa cálcica), Silicato de Mg-Fe (olivino/piroxeno), Silicato de Ca-Na-Al (plagioclasa intermedia) – roca basáltica.	Basalto máfico.
M3	Si y Al predominantes, K moderado, muy bajo Mg y Fe – tendencia félsica.	Óxidos de silicio (cuarzo), Anortita sodiana (plagioclasa intermedia), Silicato de K-Al (feldespato potásico), Angarfitita (silicato cálcico) – roca ígnea alterada / toba volcánica.	Toba volcánica de composición félsica, posiblemente alterada.
M4	Si y Al predominantes, K y Ca intermedios, Fe moderado y bajo Mg – tendencia félsica.	Óxido de silicio (cuarzo), Silicato de Na-K-Al (feldespato potásico o mixto), Silicato de Ca-Al (plagioclasa cálcica), Silicato de Ca-Al hidratado (feldespato alterado) – toba dacítica o dacita alterada.	Toba dacítica alterada.
M5	Predominio de Si, Al, Ca, Fe y Mg – tendencia máfica.	Bitownita (plagioclasa cálcica), Kanoíta y Diopsido (piroxeno), Silicato de K-Al (feldespato potásico) – basalto / andesita.	Roca máfica (basáltica / andesítica)
M6	Si y Fe altos, Al y Ca moderados, Mg y Na bajos – tendencia máfica.	Silicato de Ca-Na-Al (plagioclasa cálcica), Silicato de Na-Ca-Al (plagioclasa intermedia), Clinoenstatita (piroxeno magnesiano), Magnetita (óxido de hierro) – basalto / diabasa	Roca ígnea máfica, tipo basalto / diabasa.
M7	Predominio de Si, Al, Ca y Fe; Na–K–Mg bajos – tendencia intermedia.	Anortita (plagioclasas cálcicas), Silicato de Ca-Al-Na (feldespatos), Pigeonita (piroxeno) – anortosita / cúmulo plagioclásico o basalto.	Roca plutónica o volcánica, según textura.
M8	Altos Si y Al, K-Na-Ca moderados, Fe y Mg bajos – tendencia félsica.	Óxido de silicio (cuarzo), Silicato Ca-Al (plagioclasa cálcica), Silicato de K-Al (feldespato potásico), Albita (plagioclasa sódica), Laumonita (zeolita) – toba zeolítica	Toba dacítica zeolítica.

Los resultados XRD corroboran la interpretación realizada mediante FRX, al mostrar una estrecha correspondencia entre los elementos predominantes y las fases minerales identificadas. Esta coherencia fortalece la clasificación litológica propuesta y confirma la presencia de asociaciones félsicas y máficas coherentes con los tipos de roca esperados en el área de estudio.

6.5 MAPAS DE DISTRIBUCIÓN ELEMENTAL

Para complementar la caracterización de las muestras analizadas, se elaboraron mapas de distribución espacial de elementos de interés: manganeso (Mn), cobre (Cu), zinc (Zn) y bario (Ba). Estos elementos fueron seleccionados por su relevancia ambiental, ya que han sido identificados en la literatura como elementos potencialmente tóxicos cuando se acumulan en concentraciones elevadas, los cuales requieren especial atención, por sus posibles efectos sobre organismos y ecosistemas (Kabata-Pendias, 2011; Alloway, 2012; ATSDR, 2024).

Los mapas se elaboraron en el software Surfer 16® de la Golden Software, mediante interpolación Kriging, y se presentan agrupados por elemento para mostrar su distribución en las matrices estudiadas (rocas, suelo superficial y subsuperficial). Debido al número limitado de muestras ($n = 8$ para rocas; $n = 12$ para suelos), estos mapas tienen un carácter exploratorio y se emplean con fines ilustrativos, permitiendo visualizar tendencias espaciales generales, patrones de acumulación, continuidad vertical o concentraciones localizadas de interés ambiental.

Es importante señalar que, al tratarse de estimaciones derivadas de un número reducido de puntos, los mapas no reflejan con precisión la variabilidad espacial y los valores deben considerarse aproximaciones relativas. Por ello, cualquier interpretación debe realizarse con cautela y, en caso de ser necesario, corroborarse mediante un muestreo más exhaustivo.

5.3.1 DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DEL MANGANESO

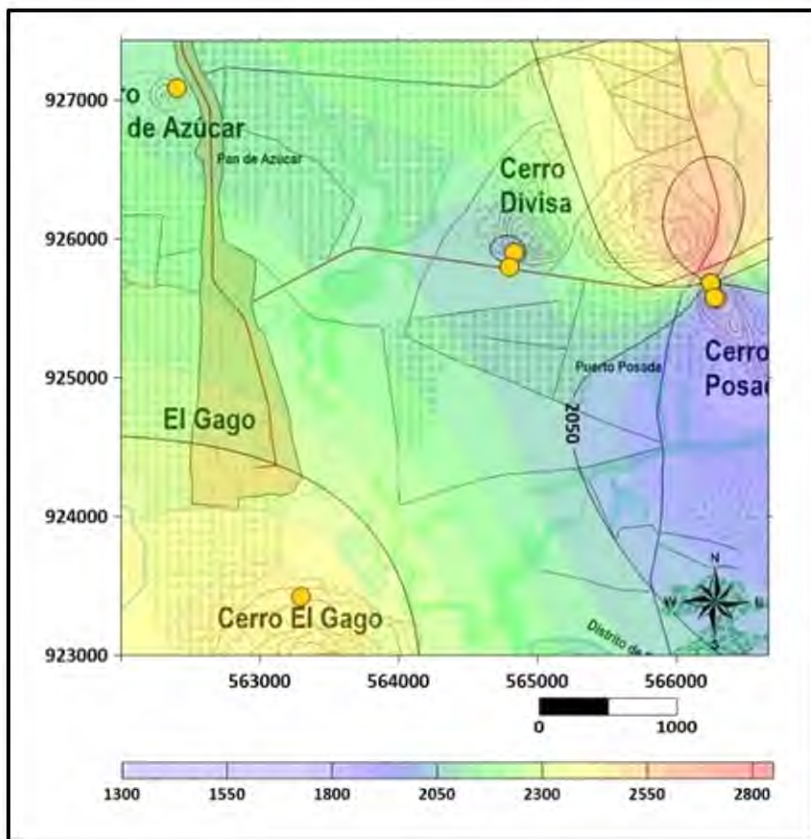
El manganeso (Mn) es un micronutriente esencial para plantas, animales y seres humanos, involucrado en procesos enzimáticos, fotosíntesis y metabolismo celular. Aunque, en concentraciones elevadas puede ser tóxico, afectando la actividad microbiana del suelo, el desarrollo vegetal e incluso la salud humana, principalmente por inhalación (ATSDR, 2012).

La concentración de manganeso en rocas (Figura 5.19) muestra una distribución heterogénea con valores que varían entre aproximadamente 1 300 y 2 800 ppm. Los mapas sugieren una tendencia a concentraciones más elevadas en el sector noreste del área, especialmente al este de Cerro Divisa y hacia Cerro Posada, donde las tonalidades indican rangos entre 2 550 y 2 800 ppm.

Hacia el suroeste, en zonas como Cerro El Gago y El Gago, predominan valores intermedios, mientras que las concentraciones relativamente menores se distribuyen a lo largo del eje noroeste-sureste, abarcando sectores como Cerro Pan de Azúcar, Cerro Divisa y el extremo sur de Cerro Posada. En este último cerro, las muestras presentan una transición marcada de valores más altos al norte hacia menores concentraciones al sur, lo que podría reflejar variaciones litológicas locales o efectos de meteorización diferencial.

Figura 5.19

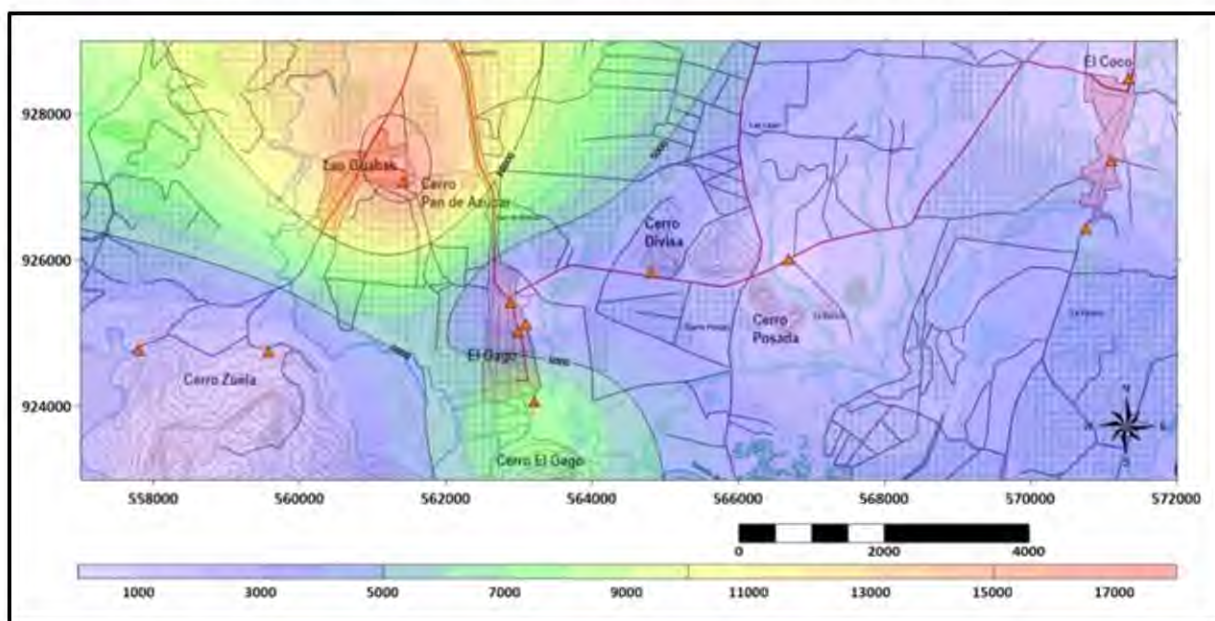
Mapa de distribución de Manganeso en rocas



En los suelos superficiales (Figura 5.20), el mapa sugiere una concentración excepcionalmente alta en la zona de Las Guabas, con un valor cercano a los 17 000 ppm, considerablemente superior al resto del área, donde las concentraciones muestran una distribución más uniforme. Esta diferencia genera un contraste notable frente al mapa de rocas; sin embargo, se debe tener en cuenta que la escala de valores en el rango bajo (aproximadamente 1 000 – 3 000 ppm) coincide con el intervalo completo observado en las muestras de roca. Por ello, la interpretación del patrón espacial general resulta limitada, ya que las variaciones fuera de la zona de mayor concentración (Las Guabas) podrían ser menos evidentes debido a la diferencia de escala. En el área de Cerro El Gago, el mapa muestra una tendencia concéntrica de valores intermedios, con concentraciones cercanas a los 8 000 ppm.

Figura 5.20

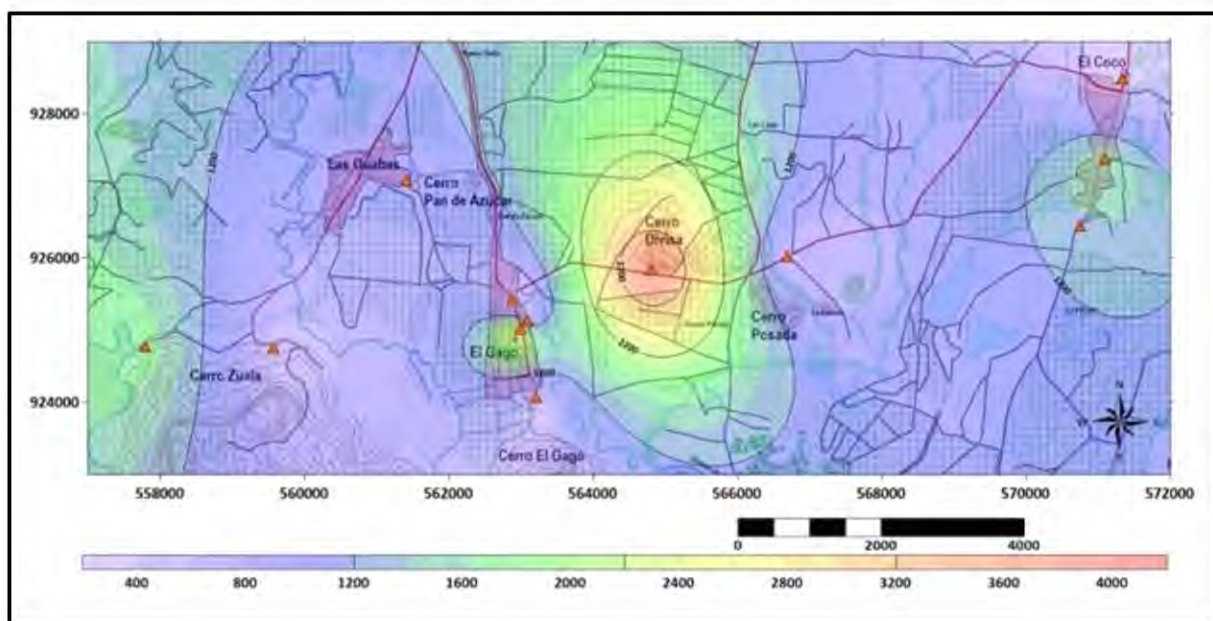
Mapa de distribución de Manganeso en suelos a profundidad de 0 – 0,30 m



En comparación con el mapa de manganeso en suelos superficiales, la distribución observada en suelos subsuperficiales (Figura 5.21), presenta un patrón distinto, con concentraciones más elevadas localizadas en el área de Cerro Divisa. Se observan valores intermedios en sectores como El Gago, El Coco y el extremo oeste de Cerro Zuela, mientras que el resto del área muestra una distribución relativamente homogénea, con concentraciones generalmente inferiores a 1 200 ppm.

Figura 5.21

Mapa de distribución de Manganese en suelos a profundidad de 0,30 – 0,60 m



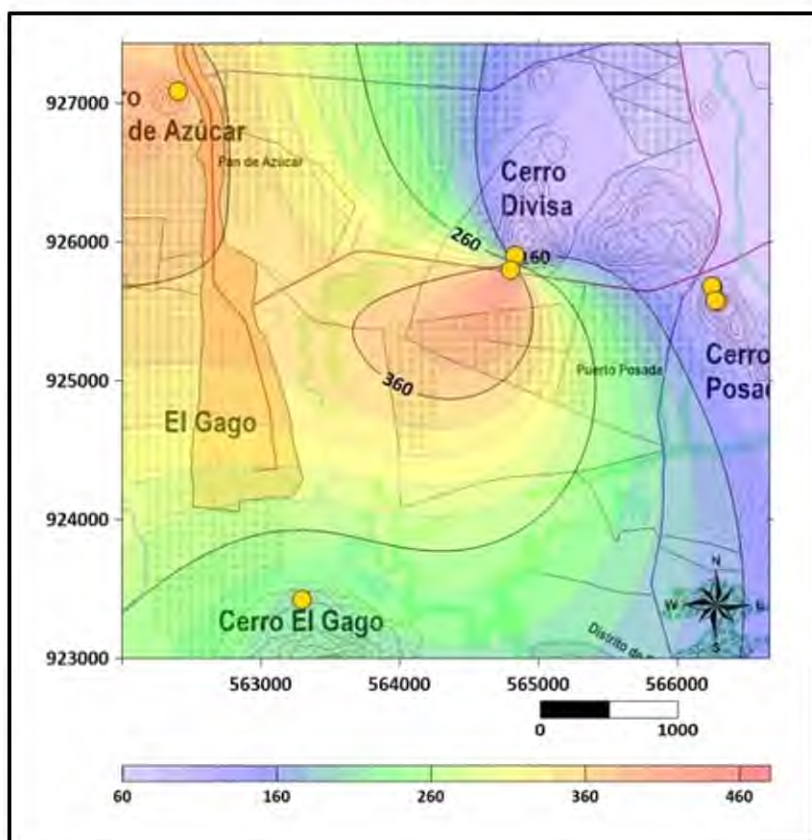
5.3.2 DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DEL COBRE

El cobre (Cu) es un elemento traza esencial en suelos y organismos vivos, aunque en concentraciones elevadas puede generar efectos tóxicos, afectar la actividad microbiana y representar un riesgo ambiental (Kabata-Pendias, 2011). A continuación, se presenta su distribución espacial en rocas, suelos superficiales y subsuperficiales.

En el mapa correspondiente a las muestras de roca (Figura 5.22), se observa una zona con concentraciones más elevadas en el sector central del área muestreada, entre las localidades de El Gago y Cerro Divisa, donde los valores alcanzan hasta 400 ppm. A partir de este sector, las concentraciones tienden a disminuir gradualmente hacia los extremos norte, sur y este, con valores mínimos cercanos a 60 ppm.

Figura 5.22

Mapa de distribución de Cobre en rocas

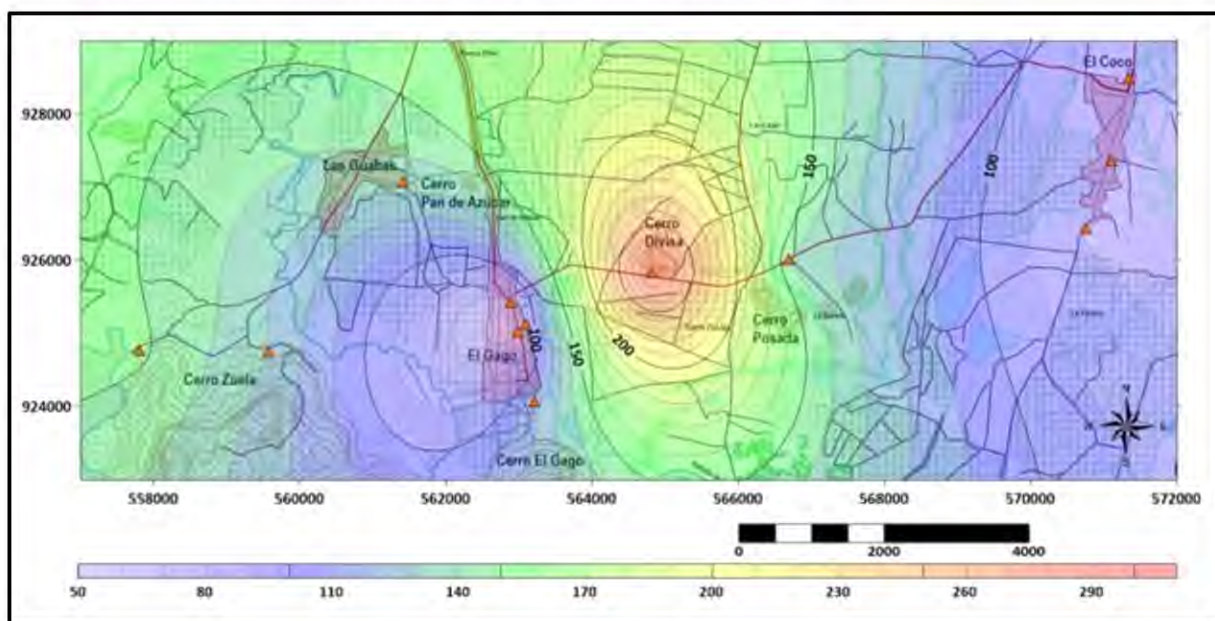


En contraste con la distribución espacial del cobre en rocas, el mapa de suelos superficiales (Figura 5.23) muestra un patrón concéntrico con concentraciones más altas en el sector de Cerro Divisa, lo que sugiere cierta correspondencia con la tendencia observada en las muestras de roca.

Fuera de esta zona de mayor concentración, los valores tienden a disminuir gradualmente hacia el este y suroeste, especialmente en áreas como El Gago y Cerro Zuela, donde predominan concentraciones bajas (< 100 ppm). De igual forma, en los sectores noreste y noroeste, cerca del Coco, se mantienen niveles relativamente bajos.

Figura 5.23

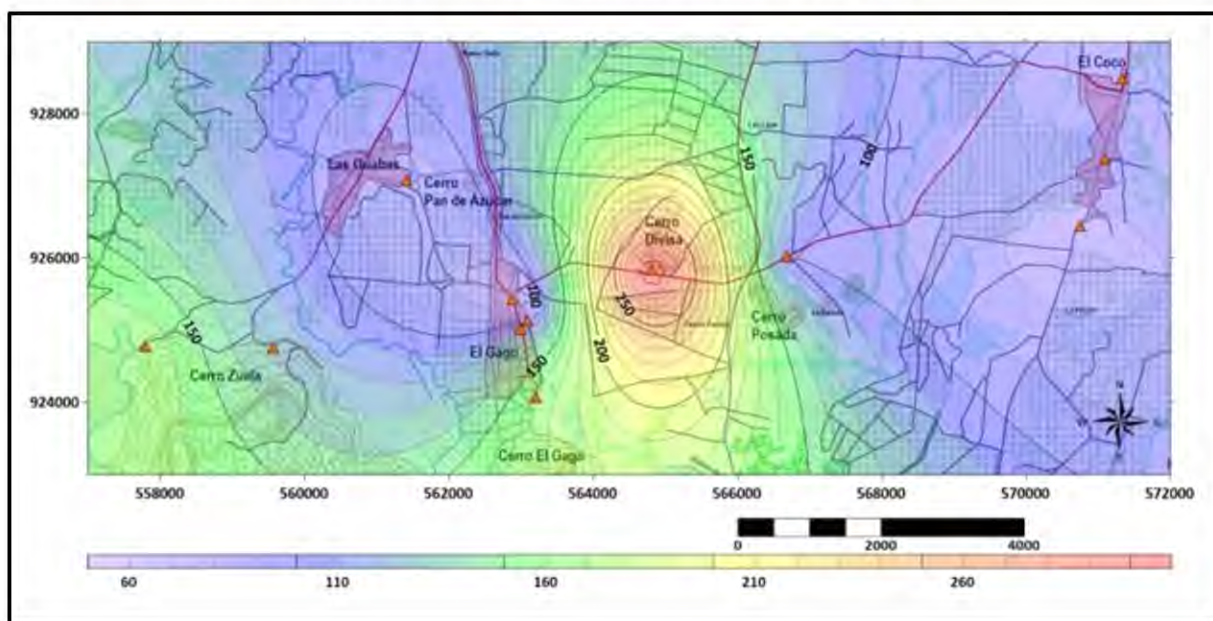
Mapa de distribución de Cobre en suelos a profundidad de 0 – 0,30 m



En los suelos subsuperficiales (Figura 5.24), se mantiene la tendencia de mayor concentración en el sector de Cerro Divisa. No obstante, en otras áreas se observa una disminución de los niveles en profundidad, como ocurre en la zona de Las Guabas - Pan de Azúcar, mientras que en sectores como El Coco persisten concentraciones bajas (<100 ppm). En contraste, en zonas como Cerro Zuela y Cerro El Gago, las concentraciones subsuperficiales superan ligeramente a las registradas en superficie, lo que sugiere una posible redistribución local de cobre en el perfil del suelo.

Figura 5.24

Mapa de distribución de Cobre en suelos a profundidad de 0,30 – 0,60 m



5.3.3 DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DEL ZINC

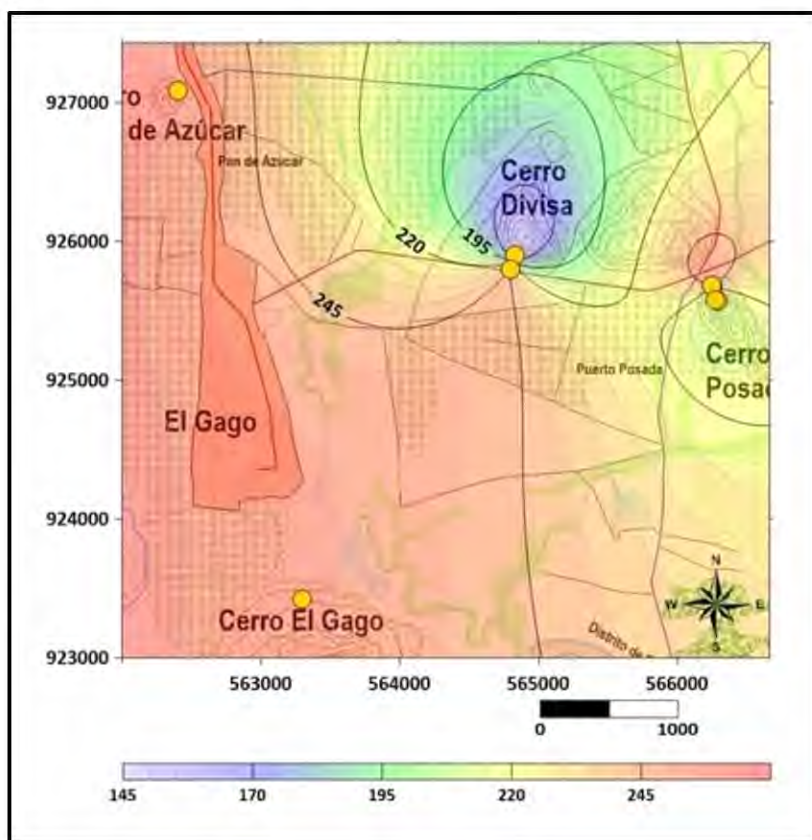
El zinc (Zn), al igual que el cobre (Cu) y el manganeso (Mn), es un micronutriente esencial para los seres vivos, involucrado en funciones enzimáticas, síntesis de proteínas y regulación hormonal. No obstante, en concentraciones elevadas puede generar efectos tóxicos sobre la biota del suelo y representar un riesgo ambiental, especialmente si su biodisponibilidad es alta (Kabata-Pendias, 2011; Alloway, 2012). De acuerdo con la ATSDR (2005), aunque el zinc tiene baja toxicidad aguda en humanos, la exposición prolongada a niveles elevados (particularmente por ingestión de agua o alimentos) puede causar efectos adversos.

La Figura 5.25 muestra la distribución espacial del zinc en muestras de rocas, donde se observa un predominio de concentraciones mayores a 245 ppm en gran parte del área muestreada, específicamente en sectores como Pan de Azúcar, El Gago y Cerro El Gago. En

contraste, las concentraciones más bajas se registran en el sector de Cerro Divisa, donde el mapa sugiere una tendencia concéntrica de valores inferiores a 170 ppm.

Figura 5.25

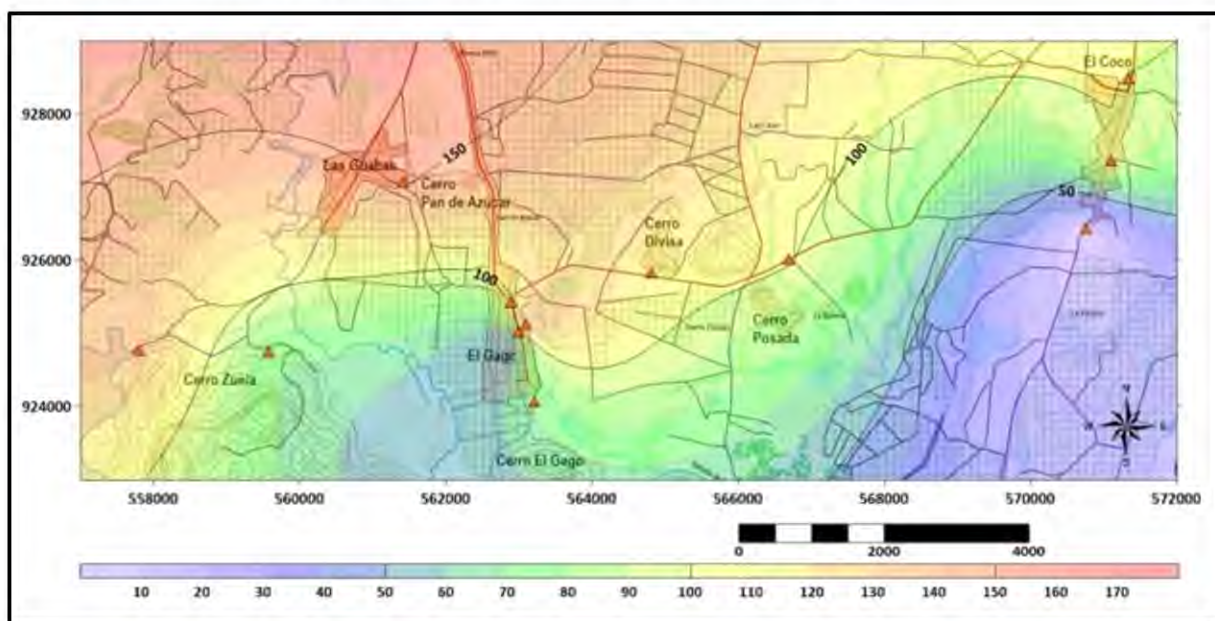
Mapa de distribución de Zinc en rocas.



En suelos superficiales (Figura 5.26), la distribución del zinc muestra una tendencia decreciente de noroeste a sureste, con una acumulación en Las Guabas y Pan de Azúcar, donde las concentraciones superan los 150 ppm. Hacia la zona sur de El Gago, El Coco y los alrededores de Cerro Posada, los valores tienden a disminuir a menos de 100 ppm. Mientras que, en las zonas de transición, como Cerro Divisa y zona norte de El Gago se presentan valores moderados de zinc (110 – 150 ppm).

Figura 5.26

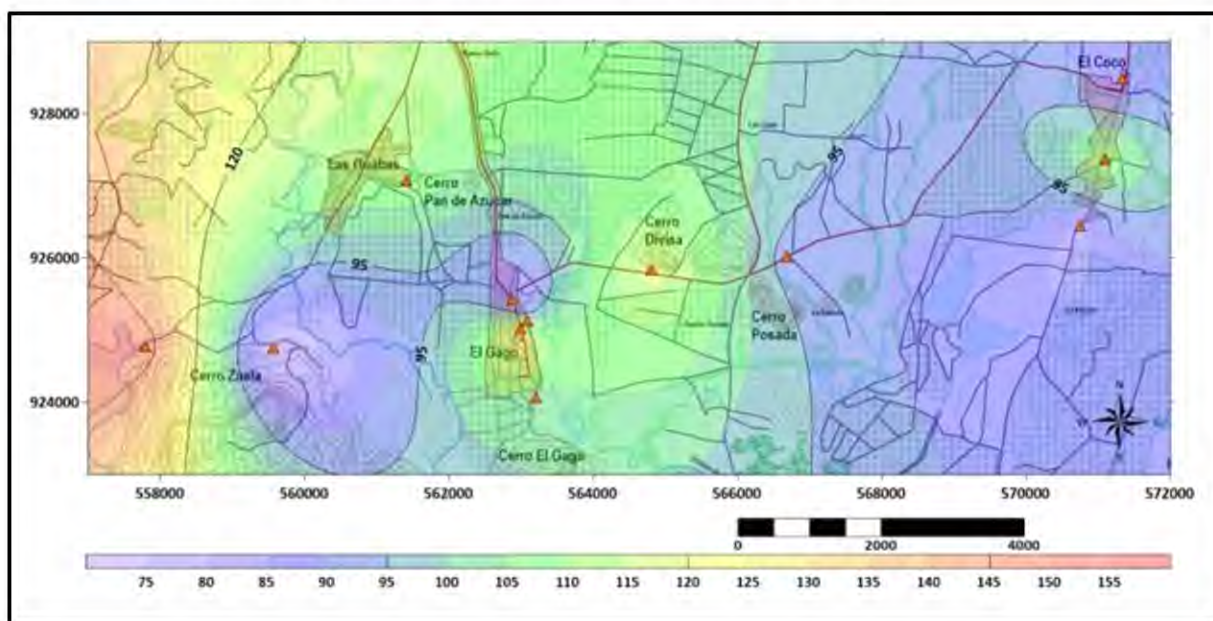
Mapa de distribución de Zinc en suelos a profundidad de 0 – 0,30 m



En suelos subsuperficiales (Figura 5.27), el patrón presenta variaciones respecto al nivel superficial, con concentraciones entre 95 – 100 ppm en gran parte del área de estudio. La zona de Las Guabas y Pan de Azúcar, que anteriormente mostraba valores más altos, presenta ahora niveles intermedios (~105 – 110 ppm), al igual que Cerro Divisa. Por lo contrario, las concentraciones tienden a aumentar hacia el extremo occidental del área, principalmente en Cerro Zuela con un nivel mayor a 145 ppm.

Figura 5.27

Mapa de distribución de Zinc en suelos a profundidad de 0,30 – 0,60 m



5.3.4 DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DEL BARIO

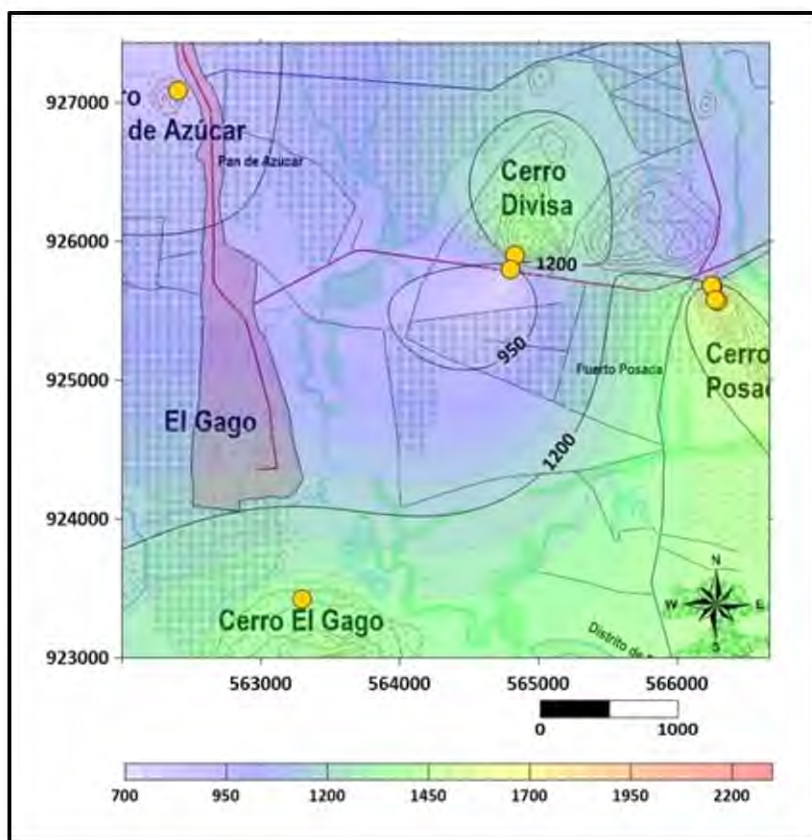
El bario (Ba) es un elemento traza que, aunque no esencial para plantas ni humanos, puede representar un riesgo potencial en ambientes terrestres cuando está presente en concentraciones elevadas. En su forma natural, suele encontrarse en minerales como la barita (BaSO_4) y la witherita (BaCO_3), siendo relativamente poco soluble. Sin embargo, bajo ciertas condiciones ambientales, puede alcanzar formas más biodisponibles. Si bien la absorción directa por organismos del suelo suele ser baja, el bario puede acumularse y representar un riesgo ecotoxicológico (Kabata-Pendias, 2011; Alloway, 201; ATSDR, 2007).

La distribución del bario en muestras de roca (Figura 5.28) muestra un patrón relativamente homogéneo en la mayor parte del área de estudio. Se observa una zona con concentraciones intermedias de ~1 200 – 1 700 ppm en sectores como Cerro El Gago, Cerro

Posada y Cerro Divisa. Las concentraciones más bajas (<1 000 ppm) se registran alrededor del Cerro pan de Azúcar, El Gago y el sector norte de Cerro Posada.

Figura 5.28

Mapa de distribución de Bario en rocas

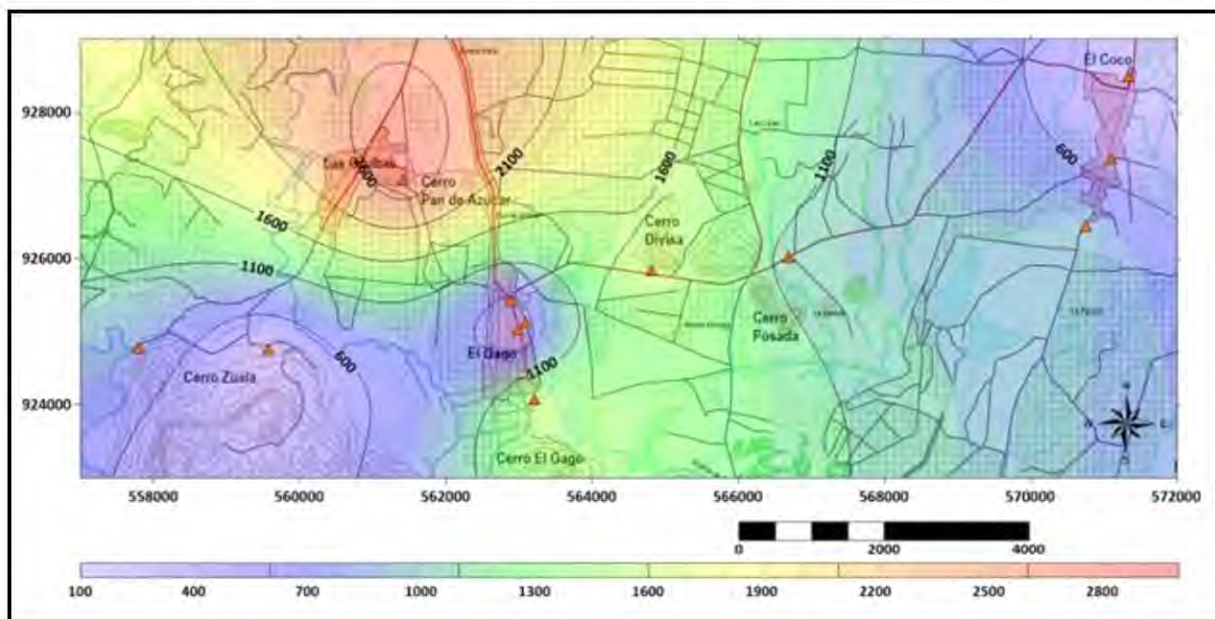


En contraste, el mapa de distribución del bario en suelos superficiales (Figura 5.29) muestra concentraciones más altas (~2 800 ppm) en el sector noroeste, particularmente en Las Guabas, donde se identifica un área de concentración destacada. Hacia el centro del área de estudio, en Cerro Divisa, parte de Cerro Posada y norte de Cerro El Gago, predominan niveles intermedios de Ba (~1 100 – 1 600 ppm), mientras que, en sectores como Cerro Zuela, El Gago y El Coco se registran las concentraciones más bajas (<600 ppm).

En general, mientras que las rocas presentan una distribución más uniforme y concentraciones moderadas (~700 – 2 200 ppm), los suelos superficiales reflejan una mayor variabilidad espacial, aunque dentro de un rango de valores similar. No fue posible elaborar el mapa de suelos subsuperficiales debido a la falta de datos, ya que en varias muestras no se detectó este elemento.

Figura 5.29

Mapa de distribución de Bario en suelos a profundidad de 0 – 0,30 m



CAPÍTULO 6

6 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

En esta sección se presentan e interpretan los resultados obtenidos mediante espectroscopía de fluorescencia de rayos X (FRX) en las diferentes matrices analizadas, junto con los análisis de difracción de rayos X (DRX) realizados en las muestras de roca. El objetivo es entender los patrones de composición elemental de todas las muestras y cómo se relacionan con los procesos de formación, alteración y evolución del suelo en el área de estudio.

Primero, se analiza la clasificación de rocas y suelos, relacionando sus composiciones elementales con los tipos litológicos identificados y con los procesos de meteorización y redistribución elemental observados. Después, se estudian los elementos de interés geoambiental detectados (Mn, Cu, Zn y Ba), y se muestra su distribución espacial en mapas para identificar posibles zonas de acumulación natural y comparar sus concentraciones con valores de referencia internacionales, con el objetivo de determinar su relevancia ambiental en el contexto local.

6.6 INTERPRETACIÓN DE LA COMPOSICIÓN ELEMENTAL DE ROCAS Y SUELOS

Las concentraciones elementales obtenidas por FRX muestran diferencias claras entre rocas, suelos superficiales y subsuperficiales, tanto en los niveles de concentración como en las relaciones entre elementos. Estas diferencias se deben a la composición del material original y a los procesos de meteorización, lixiviación y acumulación que ocurren en la zona.

Los diagramas de barras (Figuras 5.10 a 5.18) muestran estas diferencias de forma comparativa, resaltando qué elementos predominan, cuáles disminuyen con la profundidad y cuáles mantienen proporciones estables. Con esta información, se formaron grupos de rocas

y suelos con comportamientos geoquímicos similares, que ayudan a interpretar las tendencias composicionales y su relación con el origen y la transformación de los suelos.

Los elementos Si, Al, Fe, Ca, K, Mg y Na, forman la base de los materiales analizados. Esto refleja tanto la naturaleza del material original como los procesos naturales que han influido en la formación y la transformación de los suelos.

En las rocas, predominan el Si y el Al, con concentraciones del 20 – 25 % y del 6 – 10 %, respectivamente. Este comportamiento es característico del grupo félsico (M1, M3, M4, M8), donde se identifican principalmente fases de feldespatos, cuarzo y zeolitas. En cambio, en las rocas máficas (M2, M5, M6), el Si disminuye (~19 – 23 %) y hay mayores contenidos de Fe, Mg y Ca, lo cual coincide con la presencia de piroxenos, plagioclasas cálcicas y magnetita observados por DRX. La muestra M7, de carácter intermedio, representa una transición composicional en la que coexisten características félsicas y máficas, en concordancia con la mineralogía mixta identificada.

Los elementos traza siguen la misma tendencia litológica. El Mn, Sr y Ba se concentran sobre todo en rocas máficas e intermedias. El Ti muestra valores altos tanto en rocas intermedias como en algunas rocas félsicas alteradas. El Sr está relacionado con las plagioclasas cálcicas, mientras que el Ba y el Rb se asocian con los feldespatos potásicos de las rocas más silíceas. El Zn y el Cu aparecen en bajas concentraciones, lo que sugiere que su presencia es accesorio o proviene de alteraciones secundarias, y no del material parental original.

Las composiciones de las rocas se reflejan directamente en los suelos que se forman sobre ellas. En la superficie (0 a 0,30 m), los suelos ferruginosos o lateríticos (MS1, MS9) provienen de materiales parentales ricos en hierro y magnesio, como las rocas máficas M2 y M5. Estos suelos tienen una alta proporción de hierro (alrededor de 13 a 20 %) y manganeso

(más de 15 000 ppm), lo que muestra que han pasado por una meteorización intensa y la pérdida de elementos móviles como calcio, sodio y potasio. Esto lleva a una acumulación de óxidos e hidróxidos de hierro y manganeso. Este proceso coincide con la pérdida gradual de bases y la formación de horizontes lateríticos, sobre todo en zonas bien drenadas y en ambientes tropicales húmedos. Por otro lado, el cobre y el zinc aparecen en cantidades bajas o moderadas en estos suelos, lo que sugiere que han sido parcialmente arrastrados o movidos a capas más profundas.

Los suelos arcillosos aluminosilicatos (MS3, MS4, MS10, MS12) se forman a partir de rocas félsicas como M1, M3 y M4, que son ricas en silicio y aluminio, y tienen principalmente feldespatos y zeolitas. Estos suelos muestran altos niveles de silicio (más del 30 %) y aluminio (más del 12 %), mientras que el hierro y el calcio están en cantidades moderadas. El potasio y el rubidio son bajos, lo que se debe a la alteración de minerales aluminosilicatos potásicos. Por otro lado, el bario y el estroncio son relativamente altos debido a la descomposición de feldespatos cálcicos. Este patrón indica una meteorización avanzada y una posible transformación de minerales primarios en arcillas secundarias, aunque parte del carácter silíceo del material original se conserva. El titanio permanece bastante estable, lo que muestra su baja movilidad y su carácter residual durante el proceso de alteración.

Los suelos con aporte carbonatado o feldespático (MS2, MS5, MS6, MS8) tienen concentraciones moderadas de Ca (2 – 4 %) y Sr (>800 ppm), lo que indica la influencia de materiales carbonatados o la presencia de fragmentos de feldespatos cálcicos parcialmente alterados. Estas características los relacionan con rocas de composición máfica a intermedia, como M2, M5, M6 y M7, donde predominan plagioclasas cálcicas (anortita y bytownita) y piroxenos. En estos suelos, el grado de meteorización es menor, lo que indica que el proceso de alteración no ha terminado y que todavía hay minerales primarios poco transformados, posiblemente debido a condiciones locales de drenaje más limitado. También mantienen

proporciones notables de Ba y Rb, lo que confirma que provienen directamente de rocas parentales ricas en plagioclasas cálcicas. Por otro lado, el Mn disminuye en comparación con los suelos ferruginosos, lo que sugiere que su acumulación está más relacionada con procesos de oxidación superficial que con la composición original del material parental.

Los suelos mixtos o transicionales (MS7, MS11) presentan características de los grupos anteriores, con cantidades equilibradas de Si, Al y Fe, y un ligero aumento de Ti, Mn y Ba. Esto se debe a la mezcla de materiales con distintos niveles de meteorización y a una movilidad moderada de las bases. Estos suelos se forman en áreas donde el material original ha cambiado debido a procesos de erosión y redeposición, lo que produce composiciones intermedias entre los principales tipos de suelo identificados.

Al comparar los suelos subsuperficiales (0,30 a 0,60 m) con los horizontes superficiales, se observan cambios importantes que evidencian procesos de movilidad vertical de los elementos. En este nivel, varios suelos cambian de grupo geoquímico, lo que indica una redistribución por lixiviación descendente y retención selectiva.

Las muestras MS1, MS7 y MS8, clasificadas como ferruginosas del grupo A en el nivel subsuperficial, presentan concentraciones de Fe aún altas (8–10 %) y un ligero aumento de Ca en comparación con sus horizontes superficiales. Esto sugiere una acumulación secundaria de Fe y que el Ca ha migrado hacia abajo. Además, el Mn y el Ti mantienen valores altos, lo que indica que parte de estos elementos fue transportada desde los horizontes superiores y quedó retenida en profundidad, probablemente por adsorción en óxidos de hierro y de titanio. Por otro lado, el Ba y el Sr tienden a disminuir, lo que indica su pérdida por lixiviación.

En el grupo B subsuperficial, las muestras MS5, MS9, MS10 y MS11 pasan de suelos carbonatados, ferruginosos o mixtos en la superficie a aluminosilicatos arcillosos en

profundidad. Estas muestras muestran una disminución gradual de Ca y Sr, acompañada de un aumento de Al. También se observa un leve incremento de Ba y Rb, probablemente debido a su fijación en las arcillas durante la alteración. Estos cambios sugieren que hay más arcillas en profundidad, aunque en algunas zonas pueden darse variaciones locales debido a la mezcla o al lavado parcial de los horizontes superiores. En general, este patrón indica que los elementos más solubles se pierden por lixiviación y que el material parental está más alterado. Por otro lado, los valores de Cu y Zn siguen siendo bajos, lo que concuerda con su alta movilidad y su tendencia a concentrarse en soluciones o en la materia orgánica.

Las muestras MS2, MS4 y MS6 (grupo C subsuperficial), clasificadas como arenosas con aporte carbonatado o feldespático, conservan proporciones altas de Si, Sr y Ca, similares a sus horizontes superiores, pero presentan descensos en Fe, Mn y Ti. Este comportamiento indica una estrecha relación con rocas poco meteorizadas y una movilidad vertical limitada de los elementos.

Finalmente, las muestras MS3 y MS12 (grupo D subsuperficial) muestran un enriquecimiento de Sr y Ba respecto a sus horizontes superficiales, lo que sugiere una acumulación en profundidad, posiblemente asociada a procesos de retención o a la formación de compuestos secundarios de carbonatos o sulfatos, favorecidos por variaciones locales en pH o humedad.

Además de los elementos principales, se encontraron algunos en concentraciones muy bajas o en muestras aisladas. El vanadio (V) se detectó únicamente en rocas, lo que indica una relación directa con el sustrato geológico y una posible pérdida por lixiviación o dilución en los suelos. El níquel (Ni) y el galio (Ga) se detectaron únicamente en una muestra, con concentraciones muy bajas, sin pruebas claras sobre su origen. Aunque su presencia no permite identificar tendencias ni posibles implicaciones ambientales, estos resultados

muestran la importancia de ampliar el muestreo y los análisis en futuros estudios para confirmar o descartar su presencia en la zona.

Los resultados combinados de FRX y DRX muestran que la composición de los suelos en el sur de Penonomé depende principalmente de la litología local y de los procesos de meteorización. Las rocas félsicas e intermedias forman suelos ricos en Si y Al, mientras que las máficas producen suelos ferruginosos con altos niveles de Fe y Mn. A lo largo del perfil, los elementos se distribuyen verticalmente: el Ca, Na y Mg se lixivian hacia capas más profundas, mientras que el Fe, Al, Ti y Mn se acumulan en la superficie. Este patrón se debe a la meteorización, al movimiento del agua en el suelo y a la estabilidad de los minerales, que, juntos, controlan cómo se redistribuyen los elementos.

Desde el punto de vista geoambiental, los valores elevados de Mn, Ba y Ti en algunos sectores se asocian a acumulaciones naturales derivadas del material parental y de la fuerte alteración tropical, mientras que la baja presencia de Cu y Zn indica concentraciones dentro de niveles de fondo. En conjunto, el comportamiento elemental observado responde a procesos geoquímicos naturales, dominados por la lixiviación y la retención selectiva, que explican la composición actual de los suelos y establecen una base coherente para su interpretación ambiental

Desde el enfoque geoambiental, los altos valores de Mn, Ba y Ti en algunos sectores se deben a acumulaciones naturales del material parental y a la intensa alteración tropical. Por otro lado, la baja presencia de Cu y Zn indica que sus concentraciones se encuentran dentro de los niveles de fondo. En general, el comportamiento de los elementos observados se explica por procesos geoquímicos naturales, principalmente la lixiviación y la retención selectiva, lo que ayuda a comprender la composición actual de los suelos y proporciona una base clara para su interpretación ambiental.

6.7 ELEMENTOS DE INTERÉS GEOAMBIENTAL

A partir de los patrones ya descritos, se analizaron los mapas de distribución elemental para identificar zonas donde se acumulan elementos de interés ambiental, como Mn, Cu, Zn y Ba. Estos mapas muestran cómo varían las concentraciones según la litología, la topografía y las condiciones superficiales del terreno. Por lo general, las áreas elevadas son fuentes de elementos liberados por la meteorización, mientras que las zonas bajas o de poca pendiente favorecen la deposición de materiales finos. Este enfoque espacial combina la información geoquímica con las características del relieve y ayuda a interpretar los procesos que controlan la movilidad de los elementos en distintos niveles del suelo.

6.3.4 MANGANESO

El manganeso (Mn) se distribuye de manera muy heterogénea en el área de estudio, debido a la composición de las rocas y los procesos de meteorización. Las concentraciones más altas se encuentran en el noreste, cerca de los cerros Divisa y Posada. En esta zona hay rocas félsicas (M1, M3, M4, M8), intermedias (M7) y máficas (M2), lo que indica que el enriquecimiento de Mn no depende solo de un tipo de roca, sino también de la mezcla de minerales ferromagnesianos y de condiciones que favorecen la oxidación. Las rocas máficas e intermedias aportan gran parte del Mn en minerales como piroxenos y magnetita, mientras que las félsicas, aunque contienen menos Mn, pueden ayudar a retenerlo en fases oxidadas. Hacia Cerro El Gago y Pan de Azúcar (M5, M6), las concentraciones son intermedias y disminuyen gradualmente hacia el noroeste-sureste, lo que refleja cambios locales en la meteorización y en la alteración mineral.

En los suelos superficiales, el patrón es diferente y destaca una anomalía en Las Guabas (MS9), con cerca de 17 000 ppm, un valor muy alto en comparación con el resto del área. Esta acumulación se observa en suelos ferruginosos formados sobre materiales máficos

(relacionados con M5) y sugiere un ambiente muy oxidante que favorece la formación de óxidos e hidróxidos de Fe y Mn. El relieve suave y la vegetación densa pueden ayudar a retener estos compuestos en la superficie, lo que explicaría la alta concentración observada. En lugares como El Gago, el Mn presenta valores intermedios (alrededor de 8 000 ppm), probablemente debido a la erosión de rocas máficas y a su fijación en capas de arcilla ricas en óxidos.

En los suelos subsuperficiales, las concentraciones más altas se encuentran cerca de Cerro Divisa, donde se encuentra la muestra MS1, próxima a rocas intermedias y máficas (M2, M3, M7). Esto indica que el sustrato influye directamente en la distribución del Mn y que existe una migración parcial hacia abajo. A diferencia de los suelos superficiales, la distribución en profundidad es más uniforme, con valores por lo general inferiores a 1 200 ppm, probablemente debido a condiciones menos oxidantes y a la menor movilidad del Mn en ausencia de oxígeno.

En resumen, el manganeso se comporta como es típico en los procesos de meteorización: se acumula principalmente en la superficie en ambientes oxidantes, especialmente en suelos provenientes de rocas máficas. En los niveles subsuperficiales, su movilidad es baja y depende de la composición del sustrato. En general, la distribución del Mn muestra la relación entre litología, relieve y procesos del suelo, en la que la oxidación superficial y la lixiviación determinan el patrón final de concentración.

6.3.5 COBRE

Los mapas de distribución del cobre muestran que su presencia está fuertemente influida por la litología. Las concentraciones más altas se encuentran en el centro del área de estudio, entre Cerro Pan de Azúcar, Cerro Divisa y el norte de Cerro El Gago, donde se encuentran rocas máficas e intermedias (M2, M5, M6 y M7). En esta zona, los valores en roca

alcanzan 460 ppm, con un núcleo bien definido cerca de la muestra M2 (Cerro Divisa). Hacia los cerros Posada, donde predominan rocas félsicas (M3, M4 y M8), las concentraciones disminuyen de forma gradual, lo que indica una transición hacia materiales más ricos en sílice. Este patrón muestra que la litología controla directamente la distribución del cobre, que se asocia principalmente con minerales ferromagnesianos en las rocas máficas. Cuando estas rocas se alteran, liberan cobre hacia los suelos cercanos.

En los suelos superficiales, el patrón sigue igual: las concentraciones más altas se registran en el Cerro Divisa y disminuyen hacia el oeste (El Gago) y el este (El Coco). Los suelos ferruginosos (MS1 y MS9) de esta zona muestran una leve retención de cobre, mientras que en los suelos mixtos (MS7 y MS11), ubicados en zonas de transición más alejadas, los valores son bajos y uniformes. Esta distribución indica que el cobre se desplaza poco en la superficie y que depende en gran medida del material de origen.

En los suelos subsuperficiales, la distribución es muy similar, aunque las zonas con mayor cobre se desplazan ligeramente hacia el suroeste. Esta similitud en profundidad indica que no hay señales claras de que el cobre migre hacia abajo, sino que se mantiene estable a lo largo del perfil del suelo.

En resumen, la distribución del cobre muestra un comportamiento geoquímico estable, controlado principalmente por la litología local y la meteorización tropical. No se observan patrones que sugieran influencias externas, por lo que se interpreta que el cobre está presente debido a procesos naturales de alteración y retención en el área.

6.3.6 ZINC

La distribución del zinc en la zona estudiada muestra una relación entre la composición de las rocas, el tipo de suelo y los procesos naturales que afectan su movilidad. Las rocas con las mayores concentraciones de zinc (más de 245 ppm) se encuentran en Cerro Pan de Azúcar

y en Cerro El Gago, donde predominan las rocas máficas (M5 y M6). Estas rocas contienen minerales ferromagnesianos y feldespatos cálcicos, que pueden liberar zinc de forma natural durante la meteorización. Por otro lado, en Cerro Divisa y Cerro Posada, donde predominan rocas félsicas (M1, M3, M4 y M8), las concentraciones son más bajas (menos de 170 ppm), lo que indica que estas rocas contienen menos zinc desde su origen.

En los suelos superficiales, el zinc disminuye de noroeste a sureste, pero hay una zona con mayores concentraciones en Las Guabas y Pan de Azúcar, donde las concentraciones superan los 150 ppm. Allí predominan suelos ferruginosos (MS9) provenientes de rocas máficas muy meteorizadas. El alto contenido de óxidos de hierro y de materia orgánica en estos suelos ayuda a retener el zinc en la superficie y a reducir su pérdida por lixiviación.

En El Coco, donde predominan suelos arcillosos y aluminosilicatos (MS10, MS12), las concentraciones de zinc disminuyen a menos de 100 ppm, lo que coincide con su bajo contenido de óxidos metálicos y con el predominio de materiales silíceos. En Cerro Posada, la muestra MS2 corresponde a suelos con aporte de carbonato y feldespato, en los que el zinc presenta concentraciones intermedias. Esto puede deberse al calcio y al estroncio liberados al alterarse los feldespatos cálcicos en las rocas originales, lo que influye en la fijación del zinc en el suelo. En Cerro Divisa y El Gago, donde los suelos presentan composición intermedia, las concentraciones de zinc se mantienen entre 110 y 150 ppm, lo que corresponde a un entorno químicamente mixto.

En Cerro El Gago y sus alrededores, las concentraciones de zinc son mucho menores (menos de 70 ppm), lo que coincide con la presencia de rocas máficas (M5, M6) y suelos carbonatados-feldespáticos (MS5 y MS6). En estos lugares, la abundancia de calcio y estroncio en los minerales originales puede limitar la adsorción del zinc, lo que facilita su movilidad y su pérdida por lixiviación. Además, el bajo contenido de óxidos de hierro y manganeso reduce la capacidad de retención, lo que explica la baja acumulación de zinc.

En los suelos subsuperficiales, el zinc suele disminuir en casi toda el área (menos de 100 ppm), aunque hay un leve aumento en el extremo occidental, en Cerro Zuela, donde predominan suelos mixtos (MS7). Allí, el zinc podría acumularse en profundidad debido a materiales ricos en titanio y manganeso. Por el contrario, en Las Guabas, Pan de Azúcar y Cerro Divisa, el zinc disminuye con la profundidad, lo que sugiere poca migración vertical y una fuerte fijación en los niveles superficiales, probablemente debido a la presencia de óxidos metálicos y minerales arcillosos.

En resumen, el zinc presenta una movilidad moderada y su distribución parece estar controlada por la litología original y la composición geoquímica de los suelos. Las concentraciones encontradas coinciden con un aporte natural, principalmente de rocas máficas e intermedias, aunque también influyen en la alteración de rocas félsicas y en la retención en suelos ricos en óxidos y arcillas. No se observan indicios de fuentes externas, por lo que el comportamiento del zinc parece determinado por procesos normales de meteorización y retención en ambientes tropicales.

6.3.7 BARIO

La distribución del bario (Ba) en el área estudiada muestra que tanto el tipo de roca parental como los procesos del suelo influyen en su acumulación en la superficie. En las rocas, las concentraciones varían de moderadas a altas (~700 a 2 200 ppm) y siguen un patrón bastante uniforme. En Cerro Divisa y Cerro Posada, donde predominan rocas máficas (M2) y félsicas (M1, M4, M8), los valores son intermedios, entre 1 200 y 1 700 ppm. En Pan de Azúcar y El Gago, donde hay rocas máficas (M5, M6), las concentraciones suelen ser menores (< 1 000 ppm), lo que refleja diferencias en la composición de las unidades volcánicas. El Ba se encuentra principalmente en la estructura de feldespatos potásicos y en minerales accesorios, como la barita, y su liberación durante la meteorización es limitada.

En los suelos superficiales, el patrón de distribución es más variable y no depende directamente del tipo de roca. En Las Guabas (MS9, suelos ferruginosos), se observa una anomalía con valores cercanos a 2 800 ppm, probablemente relacionada con la fijación del Ba en óxidos de hierro y manganeso, y también en materia orgánica. Este enriquecimiento local evidencia la importancia de los procesos del suelo, más allá del sustrato rocoso.

En Cerro Divisa, las concentraciones son intermedias (~1 100 a 1 600 ppm), lo que coincide con la composición de las rocas M1 y M2 y con la capacidad de los suelos ferruginosos (MS1) para retener el elemento. En El Gago, los valores son menores (< 1 100 ppm), lo que sugiere una relación con suelos aluminosilicatos (MS3, MS4) y feldespático-carbonatados (MS5), donde la menor cantidad de óxidos de Fe/Mn y el buen drenaje pueden favorecer la pérdida parcial de Ba por lixiviación.

En El Coco, las concentraciones de Ba son bajas (< 600 ppm), lo que corresponde a suelos arcillosos-aluminosilicatos (MS10 y MS12) y mixtos (MS11) formados sobre materiales más silíceos y con escaso feldespato potásico. En Cerro Zuela también se registran valores bajos (< 600 ppm), lo que concuerda con un entorno pobre en óxidos metálicos y, posiblemente, con buen drenaje, factores que limitan la retención del elemento.

El bario (Ba) tiene un origen litológico claro, pero su concentración en la superficie está controlada principalmente por los procesos del suelo. Los suelos con muchos óxidos de hierro y manganeso retienen más Ba, mientras que los suelos silíceos o con aporte carbonatado muestran valores más bajos. No hay datos de suelos subsuperficiales, pero la diferencia entre las concentraciones en rocas y en suelos indica que el Ba se enriquece por adsorción superficial y presenta poca movilidad vertical.

6.8 COMPARACIÓN CON NORMAS AMBIENTALES

El análisis geoquímico muestra que las concentraciones de Mn, Cu, Zn y Ba en los suelos del área estudiada se deben, sobre todo, a procesos naturales de meteorización y a las condiciones geológicas. Para entender mejor estos resultados en un contexto ambiental más amplio, es importante compararlos con valores de referencia reconocidos a nivel internacional.

No existe un estándar global que fije concentraciones máximas permitidas de metales en suelos, ya que cada país o agencia establece sus propios criterios según sus condiciones geológicas, climáticas y el uso del suelo. Panamá no cuenta con normativas específicas sobre este tema. Por eso, se utilizaron criterios de referencia de agencias reconocidas, como la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (USEPA), el Consejo Canadiense de Ministros de Medio Ambiente (CCME), el Ministerio de Salud y Protección del Medio Ambiente de los Países Bajos (NMHPPE) y el Sistema Costarricense de Información Jurídica (SCIJ).

La Tabla 10 resume los valores normativos y de referencia utilizados para cada elemento. Estos valores servirán de base para poner en contexto las concentraciones encontradas en los suelos del área estudiada.

Tabla 10

Valores de referencia y normativos para metales seleccionados en suelos (mg/kg, peso seco) según diferentes agencias y países

Elemento	Rango detectado	RSL US EPA	Eco-SSL US EPA	CCME	NMHPPE	SCIJ
Mn	200 – 17 100	1 800	220 – 4 000	–	–	–
Cu	56 – 322	3 100	28 – 80	63	36 – 190	20 – 50
Zn	53 – 152	23 000	46 – 160	250	140 – 720	450 – 1 000
Ba	212 – 2 930	15 000	330 – 2000	500 – 750	160 – 625	300 – 500

Nota. Adaptado de USEPA (2024), USEPA (2007), CCME (2025), NMHPPE (2000) y SCIJ (2013)

Los resultados de las muestras de suelo reflejan diferencias claras respecto de los valores de referencia y normativos. Para el manganeso (Mn), las concentraciones van de 200 a 17 100 mg/kg, superando los valores establecidos por la USEPA (RSL = 1 800 mg/kg; Eco-SSL = 220 – 4 000 mg/kg). Esto puede deberse a la geología local, con rocas máficas y suelos ferruginosos ricos en óxidos metálicos, que favorecen la acumulación natural de Mn en las capas superficiales. Aunque este elemento no es prioritario por su toxicidad en la mayoría de las normativas, sus niveles elevados justifican estudios adicionales sobre su movilidad y su posible efecto en la retención o liberación de otros metales.

Para el cobre (Cu), los valores encontrados (56 – 322 mg/kg) superan los criterios del CCME (63 mg/kg), el rango de protección ecológica de la Eco-SSL de la EPA (28 – 80 mg/kg) y, en algunos casos, el límite superior del NMHPHE (190 mg/kg). Estas concentraciones pueden estar relacionadas con la meteorización de rocas volcánicas ricas en minerales de cobre, más que con fuentes externas. Sin embargo, la persistencia del Cu en ambientes tropicales y su tendencia a fijarse en óxidos de Fe/Mn indican que su disponibilidad ambiental probablemente es baja.

El zinc (Zn) presenta concentraciones de 53 a 152 mg/kg, valores que están dentro o muy cerca del rango ecológico de la Eco-SSL EPA (46 – 160 mg/kg) y por debajo de los límites del CCME (250 mg/kg) y del NMHPPE (140 – 720 mg/kg). Este comportamiento coincide con una retención superficial en suelos ricos en óxidos y materia orgánica, y con una baja movilidad vertical, lo que sugiere un origen principalmente natural, relacionado con la alteración de los minerales del sustrato y no con fuentes externas.

Para el bario (Ba), las concentraciones varían entre 212 y 2 930 mg/kg, superando, en algunos casos, los valores del CCME (500–750 mg/kg) y el límite superior del Eco-SSL de la EPA (2 000 mg/kg). Estos valores pueden deberse a la presencia de minerales baríticos o

feldespatos potásicos en las rocas, más que a contaminantes. Sin embargo, debido a su baja movilidad y a su posible toxicidad en algunos compuestos derivados a altos niveles, se recomienda considerarlo en futuras evaluaciones geoambientales.

En general, las diferencias entre los valores detectados y los de referencia evidencian la fuerte influencia de la geología local y de los procesos de acumulación en el suelo. Los altos niveles de Mn, Cu y Ba parecen formar parte de los fondos geoquímicos naturales de las rocas máficas e intermedias de la zona. Aunque no hay valores de fondo locales para una interpretación definitiva, el comportamiento geoquímico de los suelos y las rocas sirve como referencia preliminar para distinguir entre concentraciones naturales y posibles anomalías. Las concentraciones actuales no evidencian riesgo inmediato ni indican aportes humanos, pero sí destacan la importancia de un monitoreo geoquímico constante, considerando la dinámica del entorno y la posible redistribución de elementos por erosión y lixiviación.

CONCLUSIONES

Este estudio evaluó la composición elemental de rocas y suelos en el sur de Penonomé mediante espectrometría de fluorescencia de rayos X (FRX), con enfoque en elementos traza de interés geoambiental. El muestreo y el análisis garantizaron resultados representativos y confiables para la interpretación geoquímica.

Los resultados en las rocas permitieron identificar composiciones máficas, intermedias y félsicas, que definen el marco geoquímico del área. En los suelos, las concentraciones de elementos principales, secundarios y de traza evidencian la influencia directa de la roca madre y su transformación por la meteorización. La acumulación superficial de Mn, Fe y Ba se asocia con una alteración intensa en condiciones oxidantes. Los análisis mineralógicos mediante DRX confirmaron la presencia de minerales que contienen dichos elementos en las rocas estudiadas.

La comparación entre los suelos superficiales y subsuperficiales mostró poca movilidad vertical. Se observó un enriquecimiento de elementos poco solubles en la superficie y una disminución parcial de elementos más móviles como Ca, Na y Sr. Esto apoya la idea de que la meteorización y la lixiviación controlan la evolución del perfil del suelo en el área.

Los mapas de distribución espacial mostraron un patrón variado de los elementos, con mayores concentraciones de Mn, Cu, Zn y Ba en áreas cercanas a afloramientos de rocas volcánicas y en zonas de acumulación superficial de óxidos metálicos. Al considerar factores topográficos, del suelo y geológicos, se explicó que estos patrones se deben a procesos naturales y a una baja dispersión lateral, no a agentes externos.

La comparación con valores guía internacionales mostró que la mayoría de las concentraciones se encuentran dentro de los rangos aceptados para la protección ambiental. Sin embargo, los niveles elevados de Mn, Cu y Ba en algunos lugares, aunque acordes con la

geología local, justifican un monitoreo periódico para evaluar su biodisponibilidad y sus implicaciones a largo plazo.

La composición elemental y su distribución en la zona muestran cómo el clima tropical húmedo influye en la transformación del sustrato rocoso. La acumulación superficial de óxidos metálicos y la pérdida de elementos móviles indican una meteorización intensa, típica de ambientes tropicales, y una evolución avanzada del suelo en comparación con el sustrato rocoso.

Los resultados muestran que el área no presenta señales de contaminación antrópica en los elementos evaluados. Sin embargo, como no existen valores de fondo geoquímico establecidos para Panamá, este trabajo es importante como referencia para monitorear posibles cambios que puedan afectar la calidad ambiental.

En resumen, los resultados mostraron que el uso de FRX, junto con el análisis espacial de los elementos, es una herramienta eficaz para identificar áreas con mayor susceptibilidad a acumulaciones naturales de metales. Este trabajo establece una línea base regional y aporta información clave sobre la relación entre la litología, la evolución del suelo y la distribución elemental, útil para futuros programas de monitoreo y gestión ambiental en la zona.

RECOMENDACIONES

- Realizar el análisis elemental más localizado en las zonas que presentan concentraciones elevadas, con el fin de confirmar los patrones espaciales identificados y aportar información detallada para la gestión ambiental en el área de estudio.
- Extender el muestreo a zonas adyacentes y de mayor influencia antrópica, con el fin de comparar patrones naturales con posibles aportes externos.
- Incorporar análisis mineralógicos, como Difracción de Rayos X, para establecer la relación entre la mineralogía y la retención o movilidad de los metales detectados.
- Realizar muestreos y análisis de suelos en diversas regiones y condiciones del país para determinar rangos naturales de concentración de elementos mayoritarios, minoritarios y traza. Utilizar esta información como referencia para definir límites de calidad de suelos adaptados al contexto local,
- Para una evaluación más precisa, enfocada en riesgo ambiental al ecosistema y salud, se recomienda complementar estos resultados con estudios de biodisponibilidad y evaluaciones ecológicas específicas, como posibles rutas de exposición.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abou Seeda M.A., El-Sayed A.A., Yassen A.A., Zaghloul S. M., & Khater A. (2019). Heavy metals, Sources, Chemistry, risks and best applicable approach for remediation of contaminated soils: A review. *Middle East Journal of Applied Sciences*, 9(4), 850-865.
- Acquafredda, P. (2019). XRF technique. *Physical Sciences Reviews*, 4(8), 20180171.
- Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades. (ATSDR). 2012. *Reseña Toxicológica del Manganeso (en inglés)*. Atlanta, GA: Departamento de Salud y Servicios Humanos de los EE. UU., Servicio de Salud Pública.
- Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades. (ATSDR). 2004. *Reseña Toxicológica del Cobre (en inglés)*. Atlanta, GA: Departamento de Salud y Servicios Humanos de EE. UU., Servicio de Salud Pública.
- Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades (ATSDR). 2005. *Reseña Toxicológica del Cinc (versión actualizada) (en inglés)*. Atlanta, GA: Departamento de Salud y Servicios Humanos de EE. UU., Servicio de Salud Pública
- Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades. (ATSDR). 2007. *Reseña Toxicológica del Bario y Compuestos de Bario (versión actualizada) (en inglés)*. Atlanta, GA: Departamento de Salud y Servicios Humanos de EE. UU., Servicio de Salud Pública.
- Alloway, B. J. (2012). *Heavy metals in soils: trace metals and metalloids in soils and their bioavailability (Vol. 22)*. Springer Science & Business Media.
- Alonso, M., & Finn, E. J. (1971). *Física volumen III, fundamentos cuánticos y estadísticos*.
- Avendañ, E. (2003). *Análisis multielemental en muestras acuosas mediante la técnica de Fluorescencia de Rayos X*. (Tesis de Grado). Universidad de Panamá.
- Barrio, N. (2017). *Metales pesados en suelos y sus efectos sobre la salud*.

- Barrón, H. (s.f.) *Contaminación por metales pesados en suelo y agua de la zona chinampera de San Nicolás Tetelco, Tláhuac, Distrito Federal* (Doctoral dissertation, Universidad Autónoma Metropolitana. Unidad Xochimilco).
- Beckhoff, B., Kanngießer, B., Langhoff, N., Wedell, R., & Wolff, H. (2007). *Handbook of practical X-ray fluorescence analysis*. Springer Science & Business Media.
- Bendaña, G. (2021). Nacimiento y Cambios geológicos del Istmo Centroamericano. *TEMAS NICARAGÜENSES*, 26.
- Brikiatis, L. (2021). *Evidence for a Recent Formation of the Isthmus of Panama 0.6 Mya*.
- Brouwer, P. (2010). *Theory of XRF: Getting Acquainted with the Principles*. PANalytical B.V., Almelo, the Netherlands
- Bueno, A., Meza, D. & Villegas, J. (2018). *Evaluación de la presencia de metales pesados (Cd, Pb, Ni y Hg) en suelo y material vegetal de la Universidad Tecnológica de Pereira*.
- Canadian Council of Ministers of the Environment (CCME). (2025). *Tabla Resumen de las Directrices Canadienses de Calidad Ambiental*.
- Coates, A. G., McNeill, D. F., Aubry, M.-P., Berggren, W. A., & Collins, L. S. (2005). An introduction to the geology of the Bocas del Toro Archipelago, Panama. *Caribbean Journal of Science*
- DCroz, L. (2002). La aparición del istmo de panamá y su influencia en la biodiversidad del mar caribe y del océano pacífico oriental tropical. *El mar como fuente de moléculas bioactivas*, 15.
- Domínguez, A. L., González Valoys, A. C., & Rodríguez, R. (2023). *Estudio hidrogeoquímico de la calidad de las aguas subterráneas para consumo humano en San Juan de Dios, Pajonal y Caballero de Coclé (Proyecto SENACYT APY-NI-2023A-11)*. Panamá: Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (SENACYT).

- Drake, B. L., & MacDonald, B. L. (2023). *Advances in portable X-ray Fluorescence spectrometry: instrumentation, application and interpretation*. Royal Society of Chemistry.
- Dziunikowski, B. (1989). *Energy dispersive x-ray fluorescence analysis*.
- Edward, H. (2021). *Propiedades geofísicas del subsuelo de la zona sur de Penonomé con fines hidrogeofísicos*. (Tesis de maestría). Universidad Tecnológica de Panamá.
- Eisberg, R., & Resnick, R. (1985). *Quantum physics of atoms, molecules, solids, nuclei, and particles*.
- Empresa de Transmisión Eléctrica, S.A. (ETESA). (1999). *Mapa Hidrológico de Panamá escala 1:1000000*.
- Empresa de Transmisión Eléctrica, S.A. (ETESA). (2025). Empresa de Transmisión Eléctrica, S.A. *Datos históricos suministrados de la estación meteorológica Antón*. Provincia de Coclé, Distrito Penonomé. Panamá, Panamá, Panamá.
- Flores, J., Santana, L., Delgado, M., Rivera, Y., Torres, J., & Corral, A. (2014). Determinación de cadmio, cromo, plomo y arsénico en suelos superficiales urbanos de Ciudad Juárez, Chihuahua, México. *CULCyT: Cultura Científica y Tecnológica*, 11(54), 18.
- Galán, E., & Romero, A. (2008). *Contaminación de suelos por metales pesados" Departamento de Cristalografía, Mineralogía y Química Agrícola*. Facultad de Química. Apartado 553. Universidad de Sevilla. Sevilla 41071
- García, M. (2023). *Evaluación de la concentración de metales pesados en la subcuenca del río caño quebrado*. Facultad de Ciencias Agropecuarias. (Doctoral dissertation, Universidad de Panamá).
- Gómez, J. A. Á., Henar, J. A., & Díaz, J. J. M. (2019). Evolución Tectónica de Centroamérica. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 27(3), 350-355.

- González, A. (2022). *Impacto ambiental sobre suelos y plantas por actividades extractivas en los contenidos de metales pesados y cianuro en la zona minera de Romance, Panamá* (Tesis doctoral, Universidad Autónoma de Madrid).
- González, V., Urriola, L., Carrera, B., & Mora, F. (2023). Evaluación del estado de contaminación por plomo en suelos de Panamá ubicados a orilla de carreteras. *Revista Semilla del Este*, 3(2), 170-185.
- González-Flores, E., Tornero-Campante, M. A., Sandoval-Castro E., Pérez-Magaña, A., & Gordillo-Martínez, A. J. (2011). Biodisponibilidad y fraccionamiento de metales pesados en suelos agrícolas enmendados con biosólidos de origen municipal. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 27(4), 290-301
- Instituto de Innovación Agropecuaria de Panamá (IDIAP). (2006). Zonificación de suelos de Panamá por niveles de nutrientes. *Proyecto de determinación de la viabilidad del agronegocio en las principales cuencas hidrográficas de Panamá*.
- Instituto Geográfico Nacional Tommy Guardia (IGNTG). (2012). *Mapa topográfico de Panamá*.
- Jaén Prado, J. E. (2009). *Determinación de arsénico y calidad de las aguas en el área de la Reserva Minera Romance, franja aurífera de Veraguas*. (Tesis de Maestría). Universidad de Panamá.
- Jenkins, R. (1995). *Quantitative X-ray spectrometry*. CRC Press.
- Jenkins, R. (1999). *X-ray fluorescence spectrometry (Vol. 2)*.
- Jiménez Ballesta, R. (2017). *Introducción a la contaminación de suelos*. Ediciones Mundi-Prensa.
- Kabata-Pendias, A. (2011). *Trace elements in soils and plants (4th ed.)*. CRC Taylor and Francis Group, Boca Raton, 505.
- Lago, M. (2018). *Biodisponibilidad de metales pesados en suelos contaminados* (Doctoral dissertation, Universidade de Vigo).

- Lara González, D. O. (2019). *Factores asociados a la enfermedad renal crónica de causas no tradicionales*. Clínica renal, hospital Aquilino Tejeira, Coclé 2017 (Disertación doctoral, Universidad de Panamá. Vicerrectoría de Investigación y Postgrado).
- Lenoir, C., Tornari, G., & Campos, L. M. (2004). *Contaminación y tratamiento de suelo*. Buenos Aires, Argentina.
- MacDonald, C. (2017). *An Introduction to X-Ray Physics, Optics, and Applications*. Princeton University Press.
- Mejía, F. A. R., & O'Dea, A. (2015). *Historia natural del Istmo de Panamá*. SENACYT.
- Ministerio de Ambiente (MiAmbiente). (2010). *Atlas Ambiental de la República de Panamá*. Panamá: Novo Art, S.A.
- Ministerio de Comercio e Industrias (MICI). (1991). *Mapa de la Geología de la República de Panamá*. Instituto Geográfico Nacional Tommy Guardia.
- Miras, J. R. (2009). *Estudio de la contaminación por metales pesados y otros procesos de degradación química en los suelos en los invernaderos del poniente almeriense (Vol. 133)*. Universidad Almería.
- Montero, W., Camacho, E., Espinosa, A. F., & Boschini, I. (1994). Sismicidad y marco neotectónico de Costa Rica y Panamá. *Revista geológica de América central*.
- Moreno, M. (2019) *Aplicación de Análisis de Componentes Principales y Conglomerados a datos de Fluorescencia de Rayos X (FRX) en suelos*.
- Netherlands Ministry of Housing, Physical Planning and Environment (NMHPPE). (2000). *Dutch Target and Intervention Values*.
- O'Dea, A., Lessios, H. A., Coates, A. G., Eytan, R. I., Restrepo-Moreno, S. A., Cione, A. L., ... & Jackson, J. B. (2016). *Formation of the Isthmus of Panama*. *Science advances*, 2(8), e1600883.

- Oses, E., Navarro, X., Villarreal, J., & Ramos, I. (2023). Evaluación de la concentración de metales pesados en la cuenca del río Santa María. *Revista investigaciones agropecuarias*, 5(2), 98-112.
- Potts, P. J., & West, M. (2008). *Portable X-ray Fluorescence Spectrometry: Capabilities for In Situ Analysis*. Royal Society of Chemistry Cambridge.
- Reyes, Y., Vergara, I., Torres, O., Lagos, M. D., & Jimenez, E. E. G. (2016). Contaminación por metales pesados: Implicaciones en salud, ambiente y seguridad alimentaria. *Ingeniería Investigación y Desarrollo: I2+ D*, 16(2), 66-77.
- Rousseau, R. (2013). How to apply the fundamental parameters method to the quantitative X-ray fluorescence analysis of geological materials. *Journal of Geosciences and Geomatics*, 1(1), 1-7.
- Rousseau, R. M. (2009). The quest for a fundamental algorithm in X-ray fluorescence analysis and calibration. *Open Spectroscopy Journal*, 3, 31-42.
- Sagel, D., Astigarrabía, E. C., & Serrano, I. (2025). Tomografía sísmica del Volcán Barú y alrededores, provincia de Chiriquí, sur occidente de Panamá. *Tecnociencia*, 27(1), 174-195.
- Sarmiento, G. A. (2020). *Identificación y caracterización de la contaminación de suelos por metales pesados en el área agrícola del anexo de Secocha, distrito de Mariano Nicolás Valcárcel, provincia de Camaná, región de Arequipa, 2018-2019*.
- Seyfarth, A., & Skelly, E. (2014). X-Ray Spectroscopy. In *Undergraduate Instrumental Analysis* (p. 595-704). CRC Press.
- Sistema Costarricense de Información Judicial (SCIJ). (2013). *Decreto N.° 37847-MINAE-SALUD*.
- Terzano, R., Denecke, M. A., Falkenberg, G., Miller, B., Paterson, D., & Janssens, K. (2019). Recent advances in analysis of trace elements in environmental samples by X-ray

- based techniques (IUPAC Technical Report). *Pure and Applied Chemistry*, 91(6), 1029-1063.
- Torres-Rodríguez, D., Marcó, L. M., Gómez, C., & García-Orellana, Y. (2022). Fluorescencia total de rayos X como método alternativo para la determinación de microelementos en suelos de la depresión de Quíbor (Venezuela). *TecnoLógicas*, 25(53).
- Touriño, A. (1976). Procesos morfogenéticos plio-cuaternarios en las llanuras de Coclé. Panamá.
- United States Environmental Protection Agency (USEPA). (2024). *Resident Soil Screening Level*.
- United States Environmental Protection Agency (USEPA). (2007). *Ecotoxicological Soil Screening Level*.
- Valdés, B., Montero, V., Siebecker, M., Zimmerman, A., Vega, M., Ulate, S., y Rovira, D. (2024). Risk Assessment of Nephrotoxic Metals in Soil and Water in Areas with High Prevalence of Chronic Kidney Disease in Panama. *Geosciences*, 14(8), 221.
- Van Grieken, R., & Markowicz, A. (2002). *Handbook of X-ray Spectrometry*. CRC press.
- Villarreal, J., Santo, A., Villalaz, J., Ballesteros, N., & Ramos, I. (2018). Metales pesados en suelos y sedimentos en la cuenca del río La Villa-Panamá. *Ciencia Agropecuaria*, (29), 41-64.
- Wuana, R. A., & Okieimen, F. E. (2011). Heavy metals in contaminated soils: a review of sources, chemistry, risks, and best available strategies for remediation. *International Scholarly Research Notices*, 2011(1), 402647.
- Zúñiga, F. B. (1999). *Introducción al estudio de la contaminación del suelo por metales pesados (Vol. 1)*.