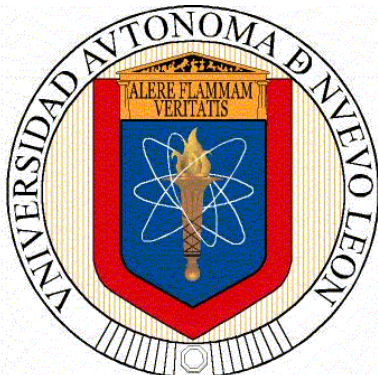


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS



**EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE ELEMENTOS TECNOLÓGICAMENTE
CRÍTICOS EN SUELO URBANO/INDUSTRIAL Y A LA SALUD HUMANA**

POR:

LQI. ERIKA MARIBEL CASTILLO GARCÍA

**Como requisito parcial para obtener el grado de Maestría en Ciencias
con orientación en Química y Tecnología Ambiental.**

Julio de 2025

**EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE ELEMENTOS TECNOLÓGICAMENTE
CRÍTICOS EN SUELO URBANO/INDUSTRIAL Y A LA SALUD HUMANA**

Aprobación de Tesis



DRA. ADRIANA KARINA LEURA VICENCIO

Presidente

DRA. LAURA HINOJOSA REYES

Secretaria

DR. JOSÉ MARTÍN ROSAS CASTOR

Vocal

DRA. MARÍA ELENA CANTÚ CÁRDENAS

Sub- directora de Posgrado

EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE ELEMENTOS TECNOLÓGICAMENTE CRÍTICOS EN SUELO URBANO/INDUSTRIAL Y A LA SALUD HUMANA

Revisión de Tesis

DR. JUAN MANUEL ALFARO BARBOSA
Co- director interno

Benedetto Schiavo

DR. BENEDETTO SCHIAVO
Co- director externo

DRA. LAURA HINOJOSA REYES
Comité Tutorial

DR. JOSÉ MARTÍN ROSAS CASTOR
Comité Tutorial

DRA. MARÍA GUADALUPE SÁNCHEZ ANGUIANO
Comité Tutorial

DRA. MARÍA ELENA CANTÚ CÁRDENAS
Sub- directora de Posgrado

RESUMEN

Erika Maribel Castillo García

Fecha de graduación: Julio de 2025

Universidad Autónoma de Nuevo León

Facultad de Ciencias Químicas

Título de la Investigación:

Evaluación del impacto de elementos tecnológicamente críticos en suelo urbano/industrial y a la salud humana.

Número de páginas:124

Candidata para el grado de Maestro en Ciencias con orientación en Química y Tecnología Ambiental

Propósito y método de estudio: En esta investigación se presenta la evaluación del impacto al ambiente y a la salud de elementos tecnológicamente críticos en suelo de la Zona Metropolitana de Monterrey, las muestras fueron colectadas y caracterizadas por difracción de rayos X y analizadas por espectrometría de masas acoplado inductivamente. Con el propósito de conocer el impacto se evaluaron los índices a la salud y medio ambiente y para inferir las posibles fuentes se aplicó el análisis de componentes principales.

Contribuciones y conclusiones: Los elementos V, Co, Rb, Sb y Nd presentaron concentraciones superiores en la Zona Metropolitana de Monterrey respecto con los niveles de fondo de NL. Ce, La y Th presentaron concentraciones menores o igual a los niveles de fondo. El estudio del análisis de componente principal mostró que V y Sb coinciden en los sitios de muestreo debido a que tienen como una de sus principales aplicaciones el ser ingredientes del acero, por lo que desde su fabricación, manipulación y desgaste de productos donde fueron empleados pudieron ser disipados al ambiente en sitios como avenidas de alto tráfico, zonas industriales y/o habitacionales. Los elementos Nd, Co y Rb coinciden en los sitios muestreados debido a que estos elementos tienen aplicaciones diversas en dispositivos como electrodomésticos y en la industria automotriz, lo que confirma su incidencia en sitios cercanos a zonas habitacionales avenidas y/o carreteras de alto tráfico. Se pudo inferir poca movilidad de los elementos en el suelo debido a las condiciones como su composición principalmente de silicatos, pH neutro, baja conductividad eléctrica y contenido medio de materia orgánica, dichas circunstancias no son favorecedoras para la movilidad de los elementos en suelo. Los elementos han impactado al medio ambiente ya que se encontró

enriquecimiento moderado para Sb, y enriquecimiento mínimo para V, Ce, Nd y Rb, los cuales están asociados a actividades antropogénicas. El índice de geoacumulación mostró contaminación moderada para Sb y Rb y contaminación ligera para V. El índice de riesgo mostró que, de manera integral los elementos representan un peligro moderado al ambiente. El elemento V representó un riesgo a la salud por ingesta en niños para no carcinogénicos y de manera integral los elementos representan un peligro inaceptable a la salud de los niños. En cuanto el riesgo carcinogénico el elemento Co presentó que existe la posibilidad de riesgo de cáncer por inhalación.



Asesor: Dra. Adriana Karina Leura Vicencio

AGRADECIMIENTOS

Mi más sincero agradecimiento a quienes hicieron posible la realización de este trabajo:

A Dios, por acompañarme, protegerme y guiarme en cada uno de mis sueños cumplidos y por cumplir.

A mi mamá por el apoyo incondicional que desde siempre me ha brindado y a mi padre (†), por motivarme a superarme constantemente.

A mis hijas Andrea, Valeria, Erika Isabella, y mi hijo Alberto Flores Castillo por ser mi fuente de inspiración y motor de vida, por su paciencia y compañía.

A mi esposo, Alberto Flores Garza por ser mi cómplice y soporte de vida e impulsarme a cumplir mis propósitos.

A la Dra. Adriana Karina Leura Vicencio, Dr. Juan Manuel Alfaro Barbosa y Dr. Benedetto Schiavo, directora y codirectores de tesis, por sus enseñanzas, su tiempo y dedicación a mi persona y ayudarme a hacer posible este proyecto.

Al comité evaluador: Dra. Laura Hinojosa Reyes, Dra. Guadalupe Sánchez Anguiano, Dr. Antonio López Reyes y Dr. Martín Rosas Castor, por sus valiosas aportaciones, opiniones y sugerencias.

A la Dra. Isabel del Carmen Sáenz Tavera, Dra. Perla Elizondo de Cota, Dra. María del Rayo Camacho, Dra. Ma. Aracely Hernández Ramírez y Dr. Víctor Manual Rosas García por creer en mí y motivarme a realizar los estudios de maestría.

Al LQ. Miguel Ángel Cortina Rangel por la ayuda y entrenamiento en el uso del equipo de espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente.

Al Instituto de Geología de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí (UASLP) por las facilidades otorgadas para para el uso de equipos y la realización de pruebas.

A la Facultad de Ingeniería Civil de la UANL por permitirme realizar los cursos necesarios para la conclusión de mis estudios.

A la Facultad de Ciencias Químicas (FCQ) de la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL) por permitirme el uso de sus equipos e instalaciones y por todas las facilidades que me otorgaron.

A la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI), por el apoyo económico para la realización de este trabajo.

DEDICATORIA

A mis hijos:

Andrea, Valeria, Alberto y Erika Isabella Flores Castillo

A mi esposo:

Alberto Flores Garza

A mi mamá:

María G. García Rodríguez

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	i
AGRADECIMIENTOS.....	iii
DEDICATORIA	v
TABLA DE CONTENIDO	vi
LISTA DE TABLAS	ix
LISTA DE FIGURAS	xii
ACRÓNIMOS	xiv
LISTA DE MATERIALES	xvi
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. ANTECEDENTES	4
3. ANÁLISIS CRÍTICO DE LA LITERATURA.....	7
4. ALCANCE DEL PROYECTO	8
5. MARCO TEÓRICO	9
5.1. Elementos tecnológicamente críticos (ETC)	9
5.1.1. Aplicaciones	11
5.1.2. Afectaciones a la salud humana y al ambiente	12
5.1.2.1. Índices de riesgo a la salud	13
5.1.2.2. Índices de riesgo al ambiente	17
5.1.3. Técnica de análisis: Espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS)	21
5.2. Características, economía y ubicación de la Zona Metropolitana de Monterrey	23
5.2.1. Localización y actividad económica principal	24
5.2.2. Tipos de suelo	25
5.2.2.1. Clima de Nuevo León	27
5.2.2.2. Parámetros fisicoquímicos de los suelos	28
5.2.2.3. Caracterización del suelo por difracción de rayos X	30
5.3. Tratamiento estadístico de datos	31
5.3.1. Análisis de componentes principales	31

6. HIPÓTESIS	32
7. OBJETIVOS	32
7.1. Objetivo general.....	32
7.2. Objetivos específicos	32
8. MATERIALES Y MÉTODOS	33
8.1. Muestreo.....	34
8.1.1. Toma de muestra para niveles de fondo de NL	34
8.1.2. Toma de muestra en el área urbano/industrial de la Zona Metropolitana de Monterrey	36
8.2. Caracterización del suelo.....	38
8.2.1. Evaluación de pH y conductividad eléctrica.....	38
8.2.2. Cuantificación de materia orgánica	38
8.2.3. Caracterización de suelo por difracción de rayos X	40
8.2.4. Análisis de elementos por espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente.....	41
8.2.5. Elaboración de la curva de calibración	42
8.2.6. Validación del método	44
8.2.7. Prueba t de contraste de significación	44
9. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	47
9.1. Caracterización del suelo	47
9.1.1. Análisis de difracción de rayos X	47
9.1.2. pH y conductividad eléctrica	50
9.1.3. Análisis de materia orgánica	51
9.2. Determinación de elementos en suelo de Nuevo León	54
9.2.1. Curva de calibración	55
9.2.2. Validación de método	56
9.3. Evaluación de los elementos en Nuevo León	58
9.3.1. Niveles de fondo	58
9.3.2. Concentración de los elementos en la Zona Metropolitana de Monterrey	60
9.4. Dispersión de los elementos en la Zona Metropolitana de Monte- rrey: análisis estadístico y posibles fuentes	73

9.4.1. Tratamiento de análisis de componentes principales	73
9.5. Índices de impacto al medio ambiente	76
9.5.1. Factor de riesgo ecológico e índice de riesgo ecológico po- tencial	76
9.5.2. Índice de geoacumulación.....	78
9.5.3. Factor de enriquecimiento	81
9.6. Índices de impacto a la salud	84
9.6.1 Cociente de riesgo	85
9.6.2 Índice de riesgo	86
9.6.3 Riesgo carcinogénico	87
10. CONCLUSIONES.....	89
11. REFERENCIAS.....	94
APÉNDICES	106
A: Listado de Elementos Tecnológicamente Críticos por el Departa- mento de Interior de Estados Unidos	107
B: Curvas de calibración	108
C: Ecuación de prueba t usada según resultados de prueba F por ele- mento y punto de muestreo	112
D: Validación del método para cuantificación de Mn	113
E: Valores de dosis diaria promedio y dosis diaria promedio a largo plazo	115
F: Valores de Cociente de Riesgo por elemento y sitio de muestreo	120
D: Gráfico de sedimentación.....	122
RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO	123

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Aplicaciones de ETC implicados en actividad industrial de NL. [2, 16]	
.....	11
Tabla 2. Efectos a la salud de ETC implicados en actividad industrial de Nuevo León. [2, 16]	
.....	12
Tabla 3. Descripción de parámetros y valores predeterminados utilizados en la evaluación de dosis y riesgos a la salud [11, 22].	
.....	15
Tabla 4. Valores de dosis de referencia (RfD) y de factor de pendiente (SF) [10].	
.....	17
Tabla 5. Estimación de contaminación según el valor de I_{geo} [19].	
.....	18
Tabla 6. Factor de respuesta tóxico (Tr) [21].	
.....	19
Tabla 7. Criterios de contaminación para factor de riesgo ecológico (Er) e índice de riesgo ecológico potencial (RI), [36].	
.....	19
Tabla 8. Clasificación de factor de enriquecimiento (EF) [24].	
.....	21
Tabla 9. Coordenadas de los municipios de la ZMM.	
.....	24
Tabla 10. Subsectores de la industria manufacturera más importantes en la ZMM [8,29].	
.....	25
Tabla 11. Tipos de suelo en los principales municipios de ZMM y en suelo de fondo norte y sur, [42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50].	
.....	26
Tabla 12. Clasificación del suelo en cuanto a su valor de pH [31].	
.....	28
Tabla 13. Clasificación del suelo en cuanto a su valor de CE [51].	
.....	29
Tabla 14. Clasificación de materia orgánica, MO, en suelo [51].	
.....	30
Tabla 15. Coordenadas de puntos de muestreo de niveles de fondo.	
.....	35

Tabla 16. Coordenadas de puntos de muestreo en ZMM.	37
Tabla 17. Ajustes de medición en el equipo ICP – MS marca Agilent Technologies, modelo: 7800.	42
Tabla 18. Identificación de muestras examinadas por DRX.	47
Tabla 19. Caracterización mineralógica de muestras de suelos en NL.	48
Tabla 20. Resultados de pH y CE de suelo urbano/industrial de la ZMM [51].	50
Tabla 21. Contenido de MO en suelo urbano/industrial de la ZMM y de fondo norte y sur.	52
Tabla 22. Masas y abundancia de los elementos analizados en ICP-MS. [39]	54
Tabla 23. Parámetros obtenidos de la curva de calibración a partir de estándares del elemento ($\mu\text{g kg}^{-1}$).	55
Tabla 24. Parámetros estadísticos para validación del método usando MCR-2710.	56
Tabla 25. Parámetros estadísticos para validación del método usando MCR-2711a.	57
Tabla 26. Valores evaluados de niveles de fondo norte y sur de NL y de corteza terrestre reportados en bibliografía.	58
Tabla 27. Resultados de los ETC en la ZMM, niveles de fondo y en suelo de otros países.	64
Tabla 28. Matriz de correlación de Pearson de los valores de los ETC en suelo urbano/industrial.	73
Tabla 29. Análisis de componentes principales de ETC en sitios de la ZMM.	75
Tabla 30. Valores de E_r y RI para los ETC en los sitios muestreados de la ZMM.	77

Tabla 31. Valor de I_{geo} de los ETC en sitios de muestreo de la ZMM.	79
Tabla 32. EF de los sitios de muestreo en la ZMM.	82
Tabla 33. Valores de HQ para V por sitio de muestreo	86
Tabla 34. Valores de CR de ingesta e inhalación para los ETC en la ZMM. ...	87
Tabla A 1. Elementos y minerales considerados como críticos por el departamento de interior de los Estados Unidos.	107
Tabla A 2. Curvas de calibración de los elementos V, Co, Sb, Rb, Nd, Th, La y Ce.	108
Tabla A 3. Ecuaciones de la prueba t usadas para cada ETC y punto de muestreo según resultados de la prueba F.	112
Tabla A 4. Datos de validación del método para análisis de Mn.	113
Tabla A 5 Resultados de ADD de ingesta, inhalación y dérmico para niños y adultos por elemento y sitio de muestreo.	115
Tabla A 6. Resultados de ADD de ingesta, inhalación y dérmico para niños y adultos por elemento y sitio de muestreo.	117
Tabla A 7. Valores de HQ de ide ETC en sitios de muestreo de la ZMM.	120

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Representación del ciclo biogeoquímico de los ETC [11].	10
Figura 3. Diagrama de funcionamiento del espectrómetro de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS) [27].....	22
Figura 4. Esquema de la metodología general.	34
Figura 5. Mapa con señalización de los municipios de niveles de fondo de NL [37].....	36
Figura 6. Mapa indicando los sitios de muestreo en el área delimitada de la ZMM.....	38
Figura 7. Clasificación de materia MO en suelo de los sitios de muestreo de la ZMM.....	53
Figura 8. Mapa de concentraciones de V en los sitios muestreados de suelo urbano/industrial. (Elaboración propia, QGIS Desktop. 3.34.11).....	66
Figura 9. Mapa de concentraciones de Co en los sitios muestreados de suelo urbano/industrial. (Elaboración propia, QGIS Desktop. 3.34.11).....	68
Figura 10. Mapa de concentraciones de Rb en los sitios muestreados de suelo urbano/industrial. (Elaboración propia, QGIS Desktop. 3.34.11).....	69
Figura 11. Mapa de concentraciones de Sb en los sitios muestreados de suelo urbano/industrial. (Elaboración propia, QGIS Desktop. 3.34.11).....	71
Figura 12. Mapa de concentraciones de Nd en los sitios muestreados de suelo urbano/industrial. (Elaboración propia, QGIS Desktop. 3.34.11).....	72
Figura 14. Gráfico de dispersión simple de componente 2 (V, Sb) vs componente 1 (Nd, Co, Rb).....	75

Figura 16. Gráfico de valores de E_r de los ETC evaluados en suelo urbano/industrial de la ZMM.	78
Figura 17. Gráfico de valores de I_{geo} por elemento en suelo urbano/industrial de la ZMM.	79
Figura 18. Gráfico de valores de EF por elemento en la ZMM.....	82
Figura 19. Valores de CR en suelo urbano/industrial de la ZMM para Co por sitio de muestreo.	88
Figura A. 1. Curva de calibración para V	106
Figura A.2. Curva de calibración de Co	106
Figura A.3. Curva de calibración de Sb	106
Figura A.4. Curva de calibración de Rb	107
Figura A.5. Curva de calibración de Nd	107
Figura A.6. Curva de calibración de La.....	107
Figura A.7. Curva de calibración de Ce	108
Figura A.8. Curva de calibración de Th.....	108
Figura A.9. Curva de calibración de Mn.....	111
Figura A.10. Gráfico de sedimentación.....	122

ACRÓNIMOS

ETC	Elementos Tecnológicamente Críticos
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía
ZMM	Zona Metropolitana de Monterrey
HQ	Cociente de riesgo
HI	Índice de riesgo
CR	Riesgo de cáncer
E_r	Factor de riesgo
RI	Índice de Peligro
I_{geo}	Índice De Geoacumulación
EF	Factor De Enriquecimiento
ETR	Elementos de Tierras Raras
ICP-MS	Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado-Inductivamente
USEPA	Agencia de protección ambiental de los Estados Unidos
NL	Nuevo León
ADD	Dosis Diaria Promedio
LADD	Dosis Diaria Promedio a Largo Plazo
R_fD	Dosis de Referencia
SF	Factor de la Pendiente
NRCS	Servicio de Conservación de Recursos Naturales
CE	Conductividad eléctrica
MO	Materia Orgánica
DRX	Difracción de Rayos X
ACP	Análisis de Componentes Principales
AB	Abasolo

SH	Sabinas Hidalgo
CR	Cerralvo
MN	Montemorelos
AL	Allende
SN	Santiago
PQ	Estacionamiento Posgrado de la FCQ.
UA	Estacionamiento de Cd. Universitaria, UANL
AU	Av. Universidad/Calle Navarra
SB	Parque Industrial Stiva/Barragán
FG	Estacionamiento Soriana Félix U Gómez
MJ	Av. Miguel Alemán/Blvr. Julián Treviño
LM	Av. López Mateos/Calle Rincón de Ote.
CP	Av. De la Concordia/Calle Valle de las Palmas
OE	Av. Sendero/Outlet Escobedo
CN	Av. De la Concordia/Calle Nicaragua.
SM	Parque Industrial Stiva/Miguel Alemán
FCQ	Facultad de Ciencias Químicas
UANL	Universidad Autónoma de Nuevo León
PTFE	Politetrafluoroetileno
DSR	Desviación Estándar Relativa
CPS	Cuentas por Segundo
LOD	Límite de Detección
LOQ	Límite de Cuantificación
MCR	Material Certificado de Referencia
QGIS	Sistema de Información Geográfica

MATERIALES Y EQUIPOS

El siguiente listado corresponde a los materiales y/o reactivos usados desde el muestreo, digestión ácida y las distintas pruebas para la obtención de parámetros fisicoquímicos.

- Agua ultrapura, conductividad 18.2 MΩ cm, purificada con Mili Q.
- Barrena para muestreo de suelo.
- Bolsa de polietileno.
- Pala de acero inoxidable.
- Mazo de hule, Truper 16 oz.
- Tubos de polipropileno de 15 y 50 mL.
- Tubos de PTFE para digestión de microondas.
- Frascos de PTFE para reflujo.
- Matraces Erlenmeyer 500 mL.
- Bureta 50 mL.
- Pipetas volumétricas de 10 y 25 mL.
- Tamiz No. 25, 710 μm, Tyler.
- Placa de calentamiento Thermo scientific.
- Horno de secado digital, Felisa.
- Membrana de filtro microporoso MCE 47 mm x 0.22 μm.
- HNO₃, ácido nítrico, 67- 70%, Fisher Chemical, grado de análisis trazas.

- HF, ácido fluorhídrico 47 – 51% metales traza, Fisher Chemical.
- HCl, ácido clorhídrico 99%, metales traza, Honeywell.
- $K_2Cr_2O_7$, dicromato de potasio 99% Fermont.
- H_2SO_4 , ácido sulfúrico 95 -98%, JT. Baker.
- H_3PO_4 , ácido fosfórico 85%, VWR chemicals.
- $(C_6H_5)_2NH$, difenilamina 98%, Avantor, VWR.

- Material Certificado de Referencia® 2711a Montana II Soil, concentraciones de elementos traza moderadamente elevados, (MCR 2711).

- Material Certificado de Referencia® 2710 Montana Soil, concentraciones de elementos traza altamente elevados, (MCR 2710).

- Estándar de V en 2% HNO_3 , 10 $\mu g/ mL$, High Purity Standard.
- Estándar de Co en 2% HNO_3 , 10 $\mu g/ mL$, High Purity Standard.
- Estándar de Rb en 2% HNO_3 , 10 $\mu g/ mL$, High Purity Standard.
- Estándar de Sb en 2% HNO_3 , 10 $\mu g/ mL$, High Purity Standard.
- Estándar de La en 2% HNO_3 , 10 $\mu g/ mL$, High Purity Standard.
- Estándar de Ce en 2% HNO_3 , 10 $\mu g/ mL$, High Purity Standard.
- Estándar de Nd en 2% HNO_3 , 10 $\mu g/ mL$, High Purity Standard.
- Estándar de Yb en 2% HNO_3 , 10 $\mu g/ mL$, High Purity Standard.
- Estándar de Th en 2% HNO_3 , 10 $\mu g/ mL$, High Purity Standard.
- Estándar de Mn en 2% HNO_3 , 10 $\mu g/ mL$, High Purity Standard.

- Sistema de digestión de microondas CEM, MARS 6
- Analizador de bolsillo de pH, Hanna Instruments, modelo H198107
- Analizador de bolsillo de conductividad eléctrica TDS and EC Meter.
- Balanza analítica Adventurer OHAUS, modelo SNH083122480074510
- Equipo ICP-MS E-448, Marca: Agilent Technologies, Modelo: 7800
- Analizador portátil XRD-XRF TERRA, Olympus.

1. INTRODUCCIÓN

El incremento del uso de tecnologías que permiten la transición energética de combustibles fósiles a energías renovables como la eólica, solar, y artículos relacionados con la telefonía inteligente, semiconductores, etc., han sido posibles gracias a la aplicación de una variedad de elementos químicos que han llegado a ser imprescindibles por sus características como magnetismo, fosforescencia, catalíticas, entre otras. La Unión Europea y el Departamento de Interior de los Estados Unidos los ha designado como Elementos Tecnológicamente Críticos (ETC) cuya cadena de suministro es vulnerable a interrupciones y que cumple una función esencial en la fabricación de un producto, de quien su ausencia tendría consecuencias significativas para la economía y/o la seguridad nacional. Algunos elementos son: V, Co, Rb, Sb, La, Ce, Nd y Th, sin embargo, se han enlistado alrededor de 35 elementos y minerales (listado completo en Apéndice A) [1,2].

Desde una perspectiva ambiental existe preocupación por los efectos que los ETC pueden ocasionar a la salud y al medio ambiente, ya que pueden ser emitidos al medio ambiente a través de la minería, actividades relacionadas al proceso de los minerales, industria relacionada a la manufactura, así como por sus pérdidas disipativas desde productos automotrices, productos de alta tecnología y varias fuentes no puntuales, y en consecuencia pueden llegar a acumularse en el ambiente [1,3].

Los cambios biogeoquímicos en los que los ETC se ven involucrados llevan a la necesidad de analizar su impacto en el medio ambiente; particularmente en el suelo urbano/industrial donde la actividad humana es más intensa, para lo cual, la determinación de niveles de fondo es una importante referencia. Desde el punto de vista ambiental, el nivel de fondo se puede definir de la siguiente manera: *“Si la atmósfera en un área particular está contaminada por alguna sustancia de una fuente local en específico, entonces el nivel de fondo de la contaminación es la concentración que existiría sin la presencia de la fuente local”* [4]. De acuerdo con la definición anterior, la determinación de niveles de fondo requiere toma de muestras de suelo no impactado por actividad antropogénica y posterior análisis elemental.

Entre las causas que provocan la contaminación ambiental de origen antropogénico son el incremento de la población, el crecimiento industrial, el comercio, la urbanización, las emisiones de los vehículos y entre los naturales son la presión atmosférica, clima, lluvia y velocidad del viento [5]. De acuerdo con datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), en Nuevo León hay una población de 5.7 millones de habitantes y la mayoría está concentrada en la zona metropolitana de Monterrey (ZMM), esta situación ha colaborado al aumento del uso de tecnologías y por ende de ETC. En la ZMM los ETC se encuentran involucrados en actividades de alta importancia industrial como la manufacturera, equipos de cómputo, eléctrico y transporte, dichos factores antropogénicos pueden propiciar la dispersión y acumulación de ETC en el ambiente. Por otro lado, factores naturales como el clima en NL, predominantemente semiseco y muy cálido, y con lluvias

escasas todo el año, es favorecedor a la esparcimiento y acumulación de ETC propiciando un posible impacto en la salud humana y en el ambiente [6,7,8,9]. Algunos ETC involucrados en las actividades industriales en NL son V, Co, Rb, Sb, La, Ce, Nd y Th, quienes están presentes en gestiones como fabricación de acero, vidrio, pigmentos, baterías, catalizadores, metalurgia, componentes automotrices, electrodomésticos, entre otros. Dichos elementos pueden llegar a causar efectos en la salud humana como irritación en ojos y pulmones, vómitos, diarrea, daños al hígado y/o corazón y cáncer. En la Tabla 1 y 2 se especifican sus aplicaciones y daños a la salud respectivamente.

Existe poca información disponible que presente el escenario actual en la ZMM respecto a los ETC; de aquí se genera la importancia de determinar los niveles de fondo de los ETC en NL analizando suelos no impactados por la actividad antropogénica y posteriormente su concentración en suelo urbano/industrial de la ZMM, con el fin de determinar su impacto ambiental y a la salud humana considerando los índices a la salud: cociente de riesgo (HQ, por sus siglas en inglés) índice de riesgo (HI, por sus siglas en inglés), riesgo carcinogénico (CR, por sus siglas en inglés). Los índices de impacto al ambiente a considerar son: factor de riesgo ecológico (E_r , por sus siglas en inglés), índice de riesgo ecológico potencial (RI, por sus siglas en inglés), índice de geoacumulación (I_{geo} , por sus siglas en inglés) y factor de enriquecimiento (EF, por sus siglas en inglés). Los cuales en conjunto nos pueden brindar un panorama general del impacto de los ETC en la ZMM.

2. ANTECEDENTES

Sun *et al.*, 2017 [10] investigaron las concentraciones, características de distribución y riesgos para la salud asociados de 15 elementos de tierras raras (ETR), consideradas como ETC, en polvo urbano de la ciudad industrial Zhuzhou, en China. Para el análisis se empleó un equipo de ICP-MS. La digestión se procedió con 50 mg de muestra, 2 mL de mezcla de ácido concentrado (1:1 v/v HF y HNO₃) a 190 °C durante 24 h. Para la validación del método se analizaron tres materiales de referencia certificados de suelo/sedimento (GBW07305, GBW07405 y GBW070009) simultáneamente con las sesiones analíticas de polvo urbano, la recuperación promedio osciló entre 81.4 y 102.2%, con un valor promedio de 89.1%. Se determinó la concentración media de los ETR de 115.86 mg kg⁻¹, resultado inferior a los niveles de fondo en China de 186.76 mg kg⁻¹. El CR calculado se encontró por debajo de 1×10^{-4} , por lo que, según la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (USEPA, por sus siglas en inglés), se sugirió un entorno relativamente seguro respecto al cáncer.

Nuss & Bleguini, 2018 [11], mostraron la importancia de las interrelaciones entre el análisis del flujo de materiales y el estudio de los ciclos biogeoquímicos ya que, hasta la fecha no existen datos suficientes que logren ilustrar completamente el grado en que la actividad humana ha perturbado el ciclo natural de los elementos. Reportaron que, a nivel mundial, aproximadamente el 53% del flujo de salida de un material se recicla (tasa de reciclaje al final de su vida útil), mientras que el 47% restante se convierte en parte

del flujo de desechos que, en última instancia, puede terminar en vertederos. Las existencias pueden ser muy grandes y eventualmente se convertirán en desechos y emisiones que, si no se gestionan adecuadamente, pueden disiparse en el medio ambiente donde podrían continuar ciclando.

Urrutia-Goyes *et al.*, 2018 [12], caracterizaron el polvo de calles de la ciudad industrial Monterrey, NL, México y valoraron cualquier asociación con fuentes naturales o antropogénicas de metales y su posible riesgo al medio ambiente y la salud humana. Los metales estudiados fueron: As, Ba, Cu, Fe, Mo, Ni, Pb, Ti y Zn. Observaron EF significativo, muy alto o extremadamente alto en el caso de Ba, Cu, Mo, Ni, Pb y Zn. El RI global calculado para la ciudad fue 158.44 lo que significó un riesgo ecológico moderado. Los datos fueron analizados mediante componentes principales y conglomerados para identificar relaciones entre las variables de las muestras de polvo vial. Los resultados sugieren que el Ti podría provenir principalmente del desgaste de las pastillas de freno y emisiones industriales, Zn y Fe se asocian al desgaste de neumáticos, el polvo y el tráfico intenso, Ba, Cu, Fe, Pb y Zr parecen originarse del desgaste de las pastillas de freno. Elementos como As, Cr, Ni y Pb podrían tener diversas fuentes industriales, dada su alta concentración en las muestras.

El método para la determinación de carbono orgánico (CO) recomendado por Enang *et al.* 2018 [13] debido a su simplicidad, rentabilidad y aplicabilidad en distintos suelos, fue el método establecido por Walkley-Black y está descrito en la NOM-021-RECNAT-2000 [51]. El CO es una variable en

el cálculo de la cantidad de materia orgánica, quien es un valor de referencia predecir el comportamiento y la movilidad de los elementos en el suelo. Por otro lado, Ratefinjanahary *et al.* 2025 [14] demostraron la fiabilidad del método Walkley-Black para CO en suelo del desierto de Sahara en África y respecto a otros métodos como el analizador CHN.

Dang *et al.*, 2021 [16], indicaron un total de 30 elementos denominados ETC en 2020 para la Unión Europea y para el Departamento del Interior de los Estados Unidos reportaron 35, en 2018. Por otro lado, destacaron que una parte importante del impacto ambiental es la biodisponibilidad y toxicidad de los ETC.

Soltani-Gerdefaramarzi *et al.* 2021, [21], determinaron concentraciones de metales tóxicos (entre ellos Co), niveles de contaminación y riesgos a la salud humana en suelos urbanos en la ciudad industrial de Yazd en Irán. Las muestras fueron tomadas de suelo superficial, con una profundidad de 0 – 10 cm, en áreas concurridas de vehículos en el centro de la ciudad. Las muestras se secaron a temperatura ambiente y se pasaron a través de un tamiz de 2 mm. La digestión del suelo se realizó tomando 0.25 g, se calentó en una mezcla de ácidos HF-HNO₃-HClO₄ y luego el material residual se disolvió en HCl. Utilizaron ICP-MS para el análisis de elementos. Para Co se reportó una concentración de 4.86 mg kg⁻¹ y un I_{geo} de -1.75, el cual representa un suelo no contaminado por Co. Los resultados de la correlación de Pearson sugirieron una fuente antropogénica para Co.

Filella & Rodushkin, 2018, [53], indicaron la técnica analítica ICP-MS como la más usada para el análisis de ETC en suelo y agua por su

versatilidad, bajos límites de detección (ng kg^{-1}), un amplio rango dinámico lineal, alto rendimiento de muestreo y es multielemental. Sin embargo, deben ser consideradas interferencias isobáricas y espectrales moleculares, las cuales pueden ser eliminadas con técnicas como el uso de celdas de colisión-reacción.

Dat N *et al.*, 2023 [27], evaluaron elementos contaminantes (metales pesados) entre ellos Co, en la ciudad industrial de Ho Chi Minh en Vietnam. La concentración medida de Co fue de 135 mg kg^{-1} . Los resultados obtenidos mediante el análisis de componentes principales sugirieron que las emisiones vehiculares y las operaciones industriales representaban las fuentes primarias de contaminación presentes en el polvo de las carreteras, por otro lado, Chen L. *et al.*, 2024, [36], utilizaron análisis de componentes principales para identificar las fuentes de elementos traza de metales pesados en cuerpos de agua en China. El estudio encontró que los factores humanos contribuyeron principalmente a las fuentes de componentes principales establecidos, entre ellos Sb.

3. ANÁLISIS CRÍTICO DE LA LITERATURA

Los ETC debido a sus aplicaciones en nuevas tecnologías y su dispersión al ambiente están siendo estudiados en ciudades industriales de Europa y Asia, en las cuales se encontró evidencia de aumento en la concentración de los ETC en sitios urbanos. Sin embargo, en Nuevo León no se

encontró evidencia de análisis de los ETC en suelo urbano/industrial, esta situación asociada al continuo crecimiento de la población y al hecho que el ZMM es industrial, genera preocupación por el posible riesgo de acumulación de dichos elementos y por consecuencia probable impacto a la salud y al ambiente. Lo que hace relevante la evaluación de los índices de impacto ambiental y a la salud en la ZMM respecto a los ETC, para lo cual se requiere el análisis de suelo impactado en Nuevo León.

La determinación cuantitativa de los ETC puede llegar a ser un reto debido a sus bajas concentraciones quienes figuran entre mg kg^{-1} y $\mu\text{g kg}^{-1}$, las cuales requieren sensibilidad en el equipo de medición. Se ha encontrado que la técnica analítica más usada para la determinación de los ETC es ICP-MS. Los impactos a la salud se pueden estimar con los índices de riesgo a la salud (HQ, HI y CR) y al ambiente (E_r , RI, I_{geo} , EF).

4. ALCANCE DEL PROYECTO

Contribución en el conocimiento de las afectaciones al ambiente y a la salud humana, asociadas a los ETC en tres de los principales municipios con actividad industrial del ZMM.

5. MARCO TEÓRICO

5.1. Elementos tecnológicamente críticos

Los ETC son un grupo de elementos químicos que se encuentran en concentraciones menores en la corteza terrestre, los cuales desde finales del siglo pasado y en el presente están siendo utilizados en tecnologías en las que gracias a sus características catalíticas, magnéticas, semiconductoras, entre otras, cumplen con funciones clave que los hacen indispensables en sus aplicación en energías renovables como la eólica, solar, entre otras y las relacionadas con vehículos eléctricos, telefonía inteligente, semiconductores, y demás. Instituciones como La Comisión Europea y el Departamento de Interior de los Estados Unidos determinan la criticidad de los elementos, la cual está vinculada a la escasez de suministro, cuya ausencia tendría consecuencias significativas para la economía o la seguridad nacional [2].

El aumento del uso de los ETC en las últimas décadas y por lo tanto su interacción con las distintas esferas ambientales, desde su extracción del subsuelo, procesamiento, uso y disposición final lleva a los ETC a un aumento de concentración en éstas, generando un impacto al ambiente y a la salud humana [14, 15]. En la Figura 1 se presenta un ejemplo de ciclo biogeoquímico en que los ETC se ven involucrados.

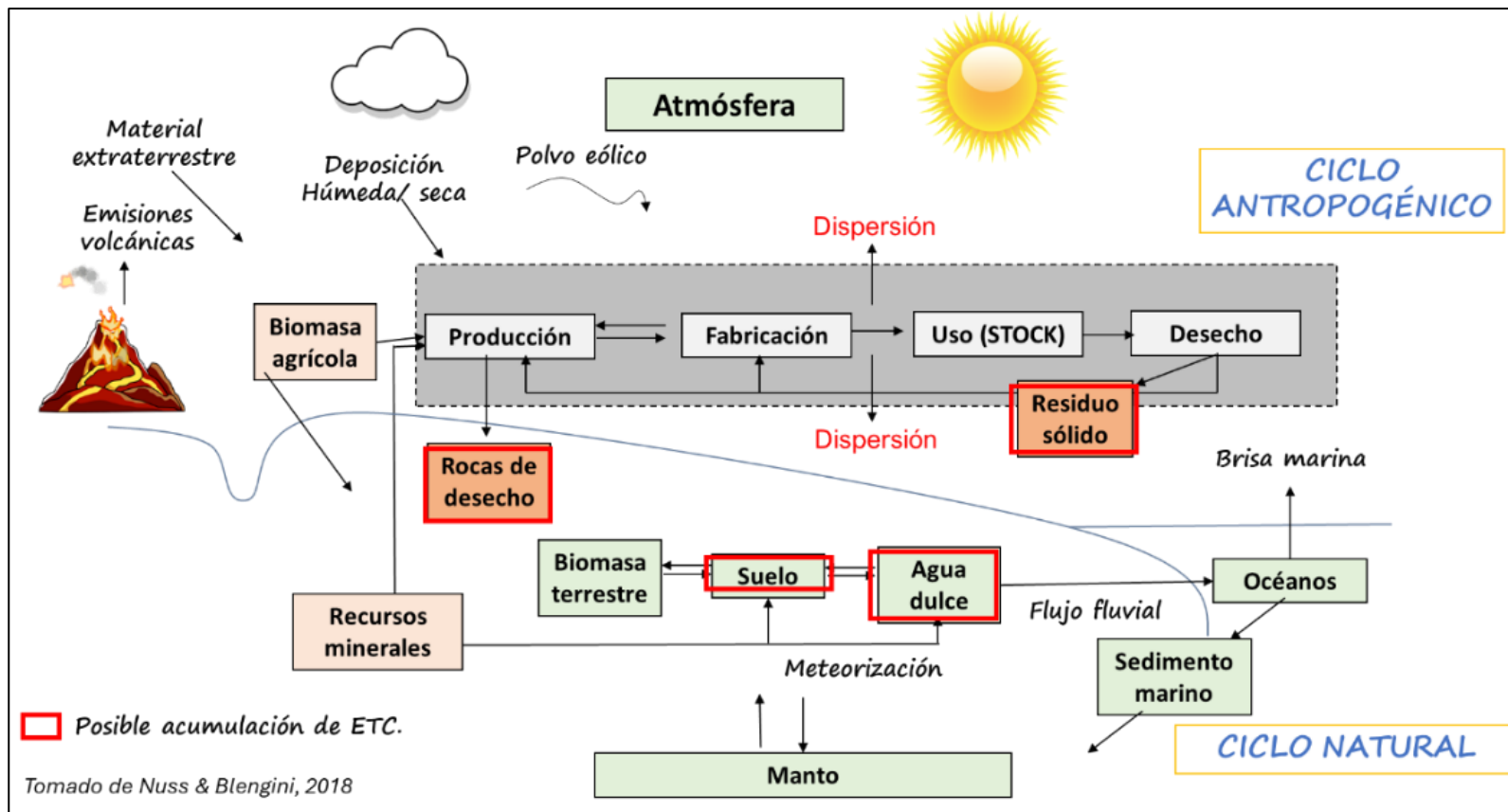


Figura 1. Representación del ciclo biogeoquímico de los ETC [11].

5.1.1. Aplicaciones

Al ser una lista variada de elementos, los ETC tienen diversas aplicaciones como en tecnologías relacionadas a energías renovables, electrónica, transporte, agricultura y salud. Algunos ETC presentes en las distintas actividades involucradas en el tipo de industria predominante en la ZMM según el INEGI (manufacturera, equipos de cómputo, eléctrico y transporte) son V, Co, Rb, Sb, La, Ce, Nd y Th. En la Tabla 1 se muestra las principales aplicaciones de dichos ETC.

Tabla 1. Aplicaciones de ETC implicados en actividad industrial de NL. [2, 16]

Elemento	Aplicaciones
Vanadio (V)	Acero. Automóviles y maquinaria: incorporando en las aleaciones en ejes, cigüeñales, engranajes y otros componentes críticos. Motores a reacción y fuselajes de aviones de alta velocidad.
Cobalto (Co)	Electrodos de baterías recargables, piezas para motores de turbinas de gas, bolsas de aire en automóviles, catalizadores para las industrias petrolera y química, carburos cementados, aleaciones resistentes a la corrosión y al desgaste, agentes secantes para pinturas, barnices y tintas; tintes y pigmentos, capas de base para esmaltes de porcelana, aceros, medios de grabación magnética, imanes y neumáticos radiales con cinturón de acero.
Rubidio (Rb)	Tubos fotomultiplicadores, refrigeración láser industrial, relojes atómicos, vidrios especiales, fotocélulas, medicina nuclear, fibra óptica y fuegos artificiales. Dispositivos de detección de movimiento y de visión nocturna, células fotoeléctricas y tubos fotomultiplicadores. Antidepresivo, tratamiento de la epilepsia y tiroides.
Antimonio (Sb)	Baterías de almacenamiento, soldaduras y otras aleaciones. Formulaciones ignífugas en mercados como la ropa para niños, los juguetes y las fundas para asientos de aviones y automóviles. Como estabilizador y opacificante en la producción de cerámica y vidrio.
Elementos de Tierras raras (ETR), por ej.: Lantano (La), Cerio (Ce) y Neodimio (Nd)	Las REE se utilizan en la fabricación de televisores de pantalla plana. Varios compuestos de REE se encuentran en celulares, chips de silicio, pantallas de monitores, baterías recargables de larga duración, lentes de cámaras, diodos emisores de luz (LED), lámparas fluorescentes compactas, escáneres de equipaje, Imanes de alta resistencia, aleaciones metálicas, medidores de tensión, pigmentos cerámicos, colorantes en cristalería, oxidantes químicos, polvos de pulido, creación de plásticos, como aditivos para reforzar otros metales, convertidores catalíticos de automoción.
Torio (Th)	Agente de aleación del magnesio, catalizador industrial. El torio puede utilizarse como fuente de energía nuclear.

5.1.2. Afectaciones a la salud humana y al ambiente

La contaminación química del medio ambiente es el resultado de la liberación de compuestos tóxicos para los seres humanos. La toxicidad crónica en humanos puede adoptar muchas formas que invariablemente se originan con el deterioro de los procesos bioquímicos normales o con daños genéticos que puede dar lugar a un desarrollo anormal, mutaciones o cáncer [16].

En la Tabla 2 se muestran los efectos a la salud de los ETC: V, Co, Rb, Sb, La, Ce, Nd y Th, los cuales están relacionados con el tipo de actividad industrial en NL.

Tabla 2. Efectos a la salud de ETC implicados en actividad industrial de Nuevo León. [2, 16]

Elemento	Efectos a la Salud
Vanadio (V)	Tos, náusea, diarrea, calambres estomacales, posible carcinogénico.
Cobalto (Co)	En altas concentraciones tiene efectos en asma y pulmonía, vómitos, problemas de visión, corazón y daño a la tiroides.
Rubidio (Rb)	Quemaduras en piel y ojos, problemas para ganar peso, ataxia, hiperirritación, úlceras en la piel y nerviosismo extremo.
Antimonio (Sb)	Irritación en ojos, piel y pulmones. A mayor exposición: problemas de corazón, diarrea, vómitos severos y úlceras estomacales.
Elementos de Tierras Raras (ETR), por ej.: Lantano (La), Cerio (Ce) y Neodimio (Nd)	En exposición larga puede causar embolia pulmonar, daño al hígado.
Torio (Th)	Enfermedades de pulmón y cáncer de pulmón y páncreas, enfermedades del hígado, cáncer de huesos.

La investigación científica proporciona una base sólida para evaluar los riesgos a la salud humana mediante tres enfoques complementarios: la identificación precisa de sustancias químicas peligrosas, el desarrollo de modelos matemáticos que relacionan la dosis de exposición con la gravedad de los efectos adversos a largo plazo, y la estimación de la cantidad de sustancias tóxicas absorbidas por el cuerpo humano a través de diferentes vías de exposición, considerando la variabilidad entre las poblaciones.

La evaluación de riesgos asociados a la exposición a metales tóxicos, tanto carcinógenos como no carcinógenos, se fundamenta en una metodología estandarizada desarrollada por la USEPA. Este proceso multietapa permite una cuantificación rigurosa de los peligros potenciales para la salud humana.

5.1.2.1. Índices de riesgo a la salud

Con el objetivo de cuantificar el riesgo de sufrir efectos adversos para la salud que no sean cáncer, se emplean el cociente de peligro HQ (Hazard Quotient, por sus siglas en inglés) e índice de peligro HI (Hazard Index, por sus siglas en inglés). Estos indicadores permiten evaluar el impacto combinado de la exposición a sustancias tóxicas a través de la ingestión de alimentos, la inhalación del aire contaminado y el contacto directo con la piel,

comparando la dosis real a la que estamos expuestos con un valor de referencia establecido para cada sustancia.

La exposición humana de los ETC en suelo de la ZMM puede inducir riesgos a la salud a través de tres vías:

- a) Ingestión directa de partículas de sustrato (D_{ing})
- b) Inhalación de partículas suspendidas a través de la boca y nariz (D_{inh})
- c) Absorción dérmica de ETC en partículas adheridas a la piel (D_{derm})

La carga corporal en el estado estacionario se denomina dosis diaria promedio, ADD (Average Daily Dose, por sus siglas en inglés) para ingesta inhalación y absorción dérmica es calculada por Ec. 1, Ec. 2 y Ec. 3 respectivamente, para niños y adultos [16, 18]. Los factores y valores predeterminados de las variables se indican en la Tabla 3.

$$ADD_{ing} = C \times \frac{IngR \times ED \times EF}{BW \times AT} \times 10^{-6} \quad (Ec. 1)$$

$$ADD_{inh} = C \times \frac{InhR \times ED \times EF}{PEF \times AT \times AT} \quad (Ec. 2)$$

$$ADD_{derm} = C \times \frac{SL \times SA \times ABF \times ED \times EF}{BW \times AT} \times 10^{-6} \quad (Ec. 3)$$

Tabla 3. Descripción de parámetros y valores predeterminados utilizados en la evaluación de dosis y riesgos a la salud [11, 22].

Factor	Definición	Valor		Unidad
		Niño	Adulto	
C	Concentración del ETC	-		mg kg día ⁻¹
EF	Frecuencia de exposición	180		año
AT	Tiempo de exposición promedio			
	Para no- carcinogénicos	ED x 365		días
	Para carcinogénicos	70 x 365		días
ABS	Factor de absorción dérmica	0.01		Sin unidad
PEF	Factor de emisión de partículas	1.36X10 ⁹		m ³ kg ⁻¹
IngR	Tasa de ingestión	200	100	mg día ⁻¹
InhR	Tasa de inhalación	7.6	20	m ³ día
ED	Duración de la exposición	6	24	años
SA	Área expuesta de piel	2800	5700	cm ²
BW	Peso corporal	15	70	kg
SL	Factor de adherencia en piel	0.2	0.07	mg cm ² día
CR	Tasa de absorción de contacto			
	Ingestion CR = IngR			
	Ingestion CR = InhR			
	Ingestion CR = SA x SL X ABS			

Los índices HQ y HI son calculados por Ec. 4 y Ec. 5 respectivamente [16, 18], Los valores de R_fD se presentan en la Tabla 4.

$$HQ_i = \frac{ADD_i}{R_f D_i} \quad (\text{Ec.4})$$

$$HI = \sum HQ_i = HQ_{ing} + HQ_{inh} + HQ_{dermal} \quad (\text{Ec.5})$$

Donde, RfD_i es la dosis de referencia ($mg\ kg^{-1}\ día^{-1}$), ADD_i es la dosis diaria promedio, HQ_{ing} : cociente de peligro de ingesta, HQ_{inh} : cociente de peligro de inhalación, HQ_{dermal} : cociente de peligro por contacto.

La interpretación de los resultados se explica según los siguientes criterios: $HQ < 1$ indica que el nivel de exposición al contaminante es considerado seguro, $HQ \geq 1$ sugiere que el nivel de exposición al contaminante puede representar un riesgo para la salud. $HI < 1$ establece que el riesgo general para la salud por exposición a todos los contaminantes evaluados es aceptable, $HI \geq 1$ señala que el riesgo general para la salud puede ser inaceptable y se requieren estudios adicionales para evaluar con mayor detalle los riesgos potenciales [10].

Para estimar el riesgo de los ETC carcinogénicos se evaluó la dosis diaria promedio a largo plazo, LADD, (Long Average Daily Dose, por sus siglas en inglés) como primer paso para la evaluación de riesgo de cáncer, se calcula según la Ec. 6 [18].

$$LADD = C \times \frac{EF}{AT} \times \left(\frac{CR_{child} \times ED_{child}}{BW_{child}} + \frac{CR_{adult} \times ED_{adult}}{BW_{adult}} \right) \quad (Ec. 6)$$

La magnitud del riesgo carcinogénico se evalúa con Ec. 7, referente al riesgo carcinogénico, CR, donde SF (Slope Factor, por sus siglas en inglés) es el factor de pendiente y cuyos valores están descritos en la Tabla 4.

$$CR = LADD \times SF \quad (\text{Ec. 7})$$

La interpretación de los resultados: $CR \leq 1 \times 10^{-6} - 1 \times 10^{-4}$, es aceptable o tolerable de riesgo [10].

Tabla 4. Valores de dosis de referencia (RfD) y de factor de pendiente (SF) [10].

Factor	Definición	V	Co	Rb	Sb	La, Ce, Nd.
RfD _{ing}	Dosis de referencia (Ingestión)	7.00E-03	2.00E-02	2.00E-02	4.00E-03	2.00E-02
RfD _{inh}	Dosis de referencia (Inhalación)	7.00E-03	-	-	2.50E-02	2.00E-02
RfD _{dermal}	Dosis de referencia (contacto dérmico)	7.00E-05	1.60E-02	-	3.57E-04	2.00E-02
SF	Factor de pendiente	-	9.8 Inh.	-	-	3.20E-12 Ing. 5.50E-12 Inh.

* RfD: Factor de referencia, Ing.: Ingesta, Inh.: inhalación, Dermal: Dérmico.

5.1.2.2. Índices de riesgo al ambiente

Para medir la contaminación de un elemento se puede calcular el índice de geoacumulación (I_{geo}), el cual es usado para la evaluación de contaminación comparando los valores de los elementos obtenidos a niveles de fondo con los valores analizados en el suelo impactado. Se utiliza la Ec. 8, el resultado se interpreta según la Tabla 5.

$$I_{geo} = \log_2 \left(\frac{C_m}{1.5 \times C_n} \right) \quad (Ec.8)$$

Donde:

C_m es la concentración del elemento en el área de estudio y

C_n es la concentración de fondo del mismo elemento en suelo.

Tabla 5. Estimación de contaminación según el valor de I_{geo} [19].

Valor de I_{geo}	Clasificación
$I_{geo} \leq 0$	No contaminado
$0 < I_{geo} \leq 1$	No contaminado / ligeramente contaminado
$1 < I_{geo} \leq 2$	Moderadamente contaminado
$2 < I_{geo} \leq 3$	Moderadamente contaminado/ fuertemente contaminado
$3 < I_{geo} \leq 4$	Fuertemente contaminado
$4 < I_{geo} \leq 5$	Fuertemente contaminado/ extremadamente contaminado
$I_{geo} > 5$	Extremadamente contaminado

El factor de riesgo ecológico, E_r (Ecological Risk, por sus siglas en inglés), permite evaluar el riesgo ecológico por elemento de manera individual, se calcula según la Ec. 9. Los valores de referencia del factor de respuesta tóxico, T_r , están descritos en la Tabla 6. Los criterios de contaminación para E_r se localizan en la Tabla 7, [20].

$$E_r = \frac{T_r \times C_m}{C_n} \quad (Ec.9)$$

Donde C_m es la concentración del elemento en la zona impactada y C_n es la concentración del fondo de este elemento.

Tabla 6. Factor de respuesta tóxico (T_r) [21].

Elemento	V	Co	Sb	La	Ce	Nd
T_r	2	5	5	1	1	2

El índice de riesgo ecológico potencial, RI (Risk Index, por sus siglas en inglés), es un método integral que combina todos los efectos toxicológicos de los metales pesados y se mide a través de la Ec. 10. Los criterios de contaminación para RI se localizan en la Tabla 7, [20].

$$RI = \sum_1^i E_r \quad (\text{Ec.10})$$

Tabla 7. Criterios de contaminación para factor de riesgo ecológico (E_r) e índice de riesgo ecológico potencial (RI), [36].

Índice	Categoría	Riesgo
Factor de Riesgo Ecológico (E_r)	$E_r < 40$	Bajo
	$40 \leq E_r < 80$	Moderado
	$80 \leq E_r < 160$	Considerable
	$160 \leq E_r < 320$	Alto
	$E_r \geq 320$	Muy alto
Índice de Riesgo Ecológico Potencial (RI)	$RI < 150$	Bajo
	$150 \leq RI < 300$	Moderado
	$300 \leq RI < 600$	Considerable
	$RI \geq 600$	Alto

El factor de enriquecimiento, EF (Enrichment Factor, por sus siglas en inglés), es una herramienta que permite evaluar cuánto ha aumentado la presencia de un elemento en relación con la abundancia natural promedio debido a la actividad humana. Requiere la selección tanto de una composición de fondo como de un elemento de referencia, los elementos de referencia comúnmente usados son Fe, Sn, Mn o Al [22,23]. Se calcula mediante Ec. 11.

$$EF = \frac{\left[\frac{C_n}{C_{ref}} \right]_{muestra}}{\left[\frac{C_n}{C_{ref}} \right]_{fondo}} \quad (Ec.11)$$

Donde C_n es la concentración del elemento (mg kg^{-1}) en la muestra o en el nivel de fondo, $C_{ref.}$ es la concentración del elemento (mg kg^{-1}) de referencia (Fe, Sn, Mn o Al) en la muestra o en el nivel de fondo.

Si el valor del EF se encuentra en el rango de $0.5 \leq EF \leq 1.5$, la concentración del elemento puede provenir de procesos de meteorización natural. $EF > 1.5$ indica que una parte significativa de los elementos fueron adjudicados por otras fuentes, como antropogénicas y/o biota [24]. En la Tabla 8 se muestra el grado de enriquecimiento según su valor de EF.

Tabla 8. Clasificación de factor de enriquecimiento (EF) [24].

EF	Grado de enriquecimiento
< 2	Mínimo o ausente
$2 \leq EF < 5$	Moderado
$5 \leq EF < 20$	Significativo
$20 \leq EF < 40$	Muy alto
$EF > 40$	Extremadamente alto

5.1.3. Técnica de análisis: Espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente

Las concentraciones de los ETC en suelo pueden ser muy bajas a niveles de partes por billón ($\mu\text{g kg}^{-1}$) o menos, por lo que la técnica analítica a utilizar para medir las concentraciones de los elementos requiere ser sensible, en la literatura diversos autores utilizaron para el análisis de los elementos Co, V, Rb, La, Ce, Nd, Sb, La y Th, la técnica ICP-MS [14, 25, 26].

ICP-MS se caracteriza por sus bajos límites de detección para la mayoría de los elementos, su alto grado de selectividad, precisión y exactitud. En la Figura 3 se muestra de manera general, el funcionamiento del equipo [26].

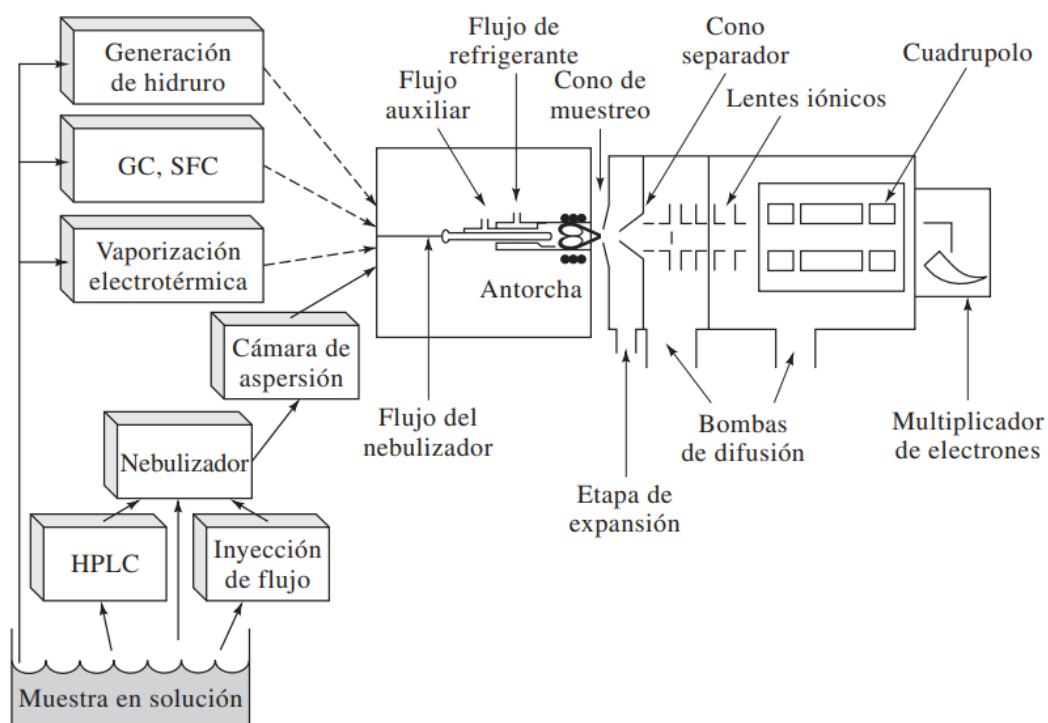


Figura 2. Diagrama de funcionamiento del espectrómetro de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS) [27]

Previamente a la introducción de la muestra en el equipo, esta debe ser sometida a un tratamiento de acidificación y digestión para eliminar la materia orgánica y asegurar la ausencia de sólidos en suspensión [27].

La fuente de ionización del ICP-MS se basa en un plasma de argón generado por inducción electromagnética en una antorcha de cuarzo. La ionización del argón se produce al aplicar una descarga eléctrica de alta tensión, alcanzando temperaturas extremadamente elevadas (aproximadamente 6000 - 10,000 K). La antorcha, compuesta por tres tubos concéntricos, permite un flujo laminar de argón a diferentes velocidades [27].

La óptica de iones, un sistema de lentes electrostáticas tiene como objetivo principal discriminar, enfocar y colimar el haz iónico. Mediante la aplicación de potenciales eléctricos variables, se logra separar los iones de las especies neutras y preparar el haz para su introducción en el analizador de masas.

La celda de colisión, por su parte, es un reactor de colisión que permite reducir las interferencias isobáricas (isótopos de distintos elementos con masas iguales en la muestra) y poliatómicas (iones moleculares, elementos o compuestos con la misma relación masa/carga que el isótopo de interés) mejorando la sensibilidad y selectividad del análisis [27].

El detector, es generalmente un multiplicador de electrones, el cual recibe y amplifica una señal de iones que es proporcional a la concentración [27].

5.2. Características, economía y ubicación de la Zona Metropolitana de Monterrey

El estado de NL está comprendido por 51 municipios, 13 de ellos forman la ZMM, los cuales son: Apodaca, Cadereyta Jiménez, El Carmen, García, San Pedro Garza García, General Escobedo, Guadalupe, Juárez, Monterrey, Salinas Victoria, San Nicolás de los Garza, Santa Catarina y Santiago. En la ZMM se encuentra el 86.5% de la población total del estado de NL, es

decir, de los 5,784,442 habitantes en NL, 5,003,597 están concentrados en la ZMM [6]. Los municipios con mayor densidad poblacional con hasta ≥ 80 viviendas por hectárea son San Nicolás de los Garza, Monterrey, Guadalupe, General Escobedo y Apodaca. [28].

5.2.1. Localización y actividad económica principal

El estado de Nuevo León colinda al norte con Coahuila de Zaragoza, Estados Unidos de América y Tamaulipas; al este con Tamaulipas; al sur con Tamaulipas y San Luis Potosí; al oeste con San Luis Potosí, Zacatecas y Coahuila de Zaragoza. Representa el 3.3% de la superficie del país y sus coordenadas geográficas son al norte 27.4757, al sur 23.946 de latitud norte; al este 98.2518, al oeste 101.1224 de longitud oeste. La ubicación geográfica de los municipios de la ZMM se encuentra en la Tabla 9.

Tabla 9. Coordenadas de los municipios de la ZMM.

	Latitud	Longitud
Apodaca	25.4653	-100.1121
El Carmen	25.5556	-100.2151
García	25.4802	-100.3508
Gral. Escobedo	25.4829	-100.1922
Guadalupe	25.4038	-100.1536
Juárez	25.3846	-100.0527
Monterrey	25.3953	-100.1839
Pesquería	25.4700	-100.0313
Salinas Victoria	25.5734	-100.1729
San Nicolás de los Garza	25.4519	-100.1723
Santa Catarina	25.4028	-100.2742
San Pedro Garza García	25.3955	-100.2409
Santiago	25.2538	-100.0911

Los sectores más importantes en la economía de Nuevo León son la industria manufacturera, el comercio, la construcción, servicios inmobiliarios, transportes, entre otros. En la Tabla 10 se muestran los subsectores destacados de la ZMM [8], [29].

Tabla 10. Subsectores de la industria manufacturera más importantes en la ZMM [8,29]

Tipo de industria	Descripción
Fabricación	Maquinaria y equipo
	Computación
	Comunicación
	Componentes y accesorios electrónicos
	Generación de energía eléctrica
	Transporte
	Derivados del petróleo y carbón
	Industria química
Alimentaria	Bebidas
	Tabaco
Otras	Textil, papel, impresión, otras.

5.2.2. Tipos de suelo

Los tipos de suelo predominantes de la ZMM y de algunos municipios del norte y sur del estado de NL, de acuerdo con la descripción del Servicio de Conservación de Recursos Naturales, NRCS (Natural Resources Conservation Service) [17], se presentan en la Tabla 11.

Tabla 11. Tipos de suelo en los principales municipios de ZMM y en suelo de fondo norte y sur, [42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50].

Municipio	Edafología
ZMM	
Monterrey	No aplicable (64.8), Leptosol (24.0%), Phaeozem (7.5%), Calcisol (3.5%), Chernozem (0.1%) y Fluvisol (0.1%).
General Escobedo	Calcisol (22.10%), Chernozem (20.64%), Leptosol (16.57%) y Phaeozem (2.03%).
Apodaca	Kastañozem (28.79%), Leptosol (15.33%), Phaeozem (9.37%), Vertisol (7.40%), Chernozem (4.58%) y Fluvisol (1.38%).
San Nicolás de los Garza	No aplicable (96.1%), Leptosol (2.8%) y Phaeozem (1.1%).
Fondo norte	
Abasolo (AB)	Leptosol (69.18%) y Phaeozem (27.57%).
Sabinas Hidalgo (SH)	Leptosol (49.3%), Kastañozem (20.4%), Luvisol (11.6%), Phaeozem (6.9%), Calcisol (5.7%), Vertisol (2.3%), Fluvisol (1.9%), Chernozem (1.3%), No aplicable (0.5%) y Regosol (0.5%).
Cerralvo (CR)	Leptosol (40.63%), Chernozem (21.42%), Kastañozem (16.43%), Calcisol (10.82%), Vertisol (7.16%), Fluvisol (2.23%) y Regosol (0.36%).
Fondo sur	
Montemorelos (MN)	Leptosol (41.5%), Vertisol (31.4%), Luvisol (15.6%), Regosol (4.7%), Chernozem (2.5%), Fluvisol (1.1%), Kastañozem (1.0%), Phaeozem (1.0%), Cambisol (0.8%) y Calcisol (0.4%).
Allende (AL)	Vertisol (33.69%), Leptosol (25.42%), Luvisol (19.33%), Phaeozem (9.53%), Regosol (2.77%), Chernozem (0.20%) y Fluvisol (0.04%).
Santiago (SN)	Leptosol (64.8%), Phaeozem (27.4%), Vertisol (5.6%), No aplicable (1.2%), Fluvisol (0.8%) y Regosol (0.2%).

La descripción del tipo de los tipos de suelo predominantes en Nuevo León es la siguiente:

Leptosoles: representan suelos con menos de 25 cm de espesor o con más de 80% de su volumen ocupado por piedras o gravas, suelen tener un contenido de MO relativamente bajo.

Phaeozems: Del griego phaios, oscuro, y del ruso zemlja, tierra. Suelos de clima semiseco y subhúmedo, de color superficial pardo a negro,

fértiles en magnesio, potasio y sin carbonatos en el subsuelo. Pueden tener alto contenido de MO.

Calcisoles: Suelos con más del 15% de carbonato de calcio en por lo menos una capa de 15 cm de espesor, pueden presentar una capa cementada. Tienen bajo contenido de MO.

Vertisoles: Suelos llamados pesados, se crean bajo condiciones alternadas de saturación-sequía, se forman grietas anchas, abundantes y profundas cuando están secos y con más de 30% de arcillas expandibles. Poseen alto contenido de materia orgánica.

Regosoles: Son suelos muy jóvenes, generalmente resultado del depósito reciente de roca y arena acarreadas por el agua; de ahí que se encuentren sobre todo al pie de las sierras, donde son acumulados por los ríos que descienden de la montaña cargados de sedimentos. Son pobres en materia orgánica.

5.2.2.1. Clima de Nuevo León

El INEGI informa que el clima de Nuevo León se distribuye de la siguiente manera: la mayor porción del estado (68%) es de tipo seco o semi-seco, un 20% es cálido subhúmedo y se ubica en la llanura costera del Golfo norte, un 7% es templado subhúmedo en las zonas altas de las sierras, y el 5% restante es muy seco en la región de la Sierra Madre Occidental. En

cuanto a las temperaturas, el promedio anual es de 20°C, con máximas de 32°C durante el verano y mínimas de 5°C en invierno. La precipitación promedio anual es de 650 mm, con la mayor cantidad de lluvia registrada en los meses de agosto y septiembre [30].

5.2.2.2. Parámetros fisicoquímicos de los suelos

En los suelos se presentan distintas interacciones entre los elementos químicos y los componentes mismos del suelo que pueden favorecer o no la movilidad de los ETC.

El pH es una de las propiedades más importantes en el crecimiento de las plantas, así como para entender la rapidez con la que ocurren las reacciones entre los elementos en el suelo. Los suelos generalmente tienen un rango de pH de 4 a 10, la Tabla 12 muestra la clasificación del suelo en cuanto a su valor de pH, según la NOM-021-RECNAT-2000 [51].

Tabla 12. Clasificación del suelo en cuanto a su valor de pH [31].

pH	Categorización
< 5.0	Fuertemente ácido
5.1 - 6.5	Moderadamente ácido
6.6 - 7.3	Neutro
7.4 - 8.5	Medianamente alcalino
> 8.5	Fuertemente alcalino

La conductividad eléctrica del suelo (CE) es la capacidad del agua del suelo para conducir corriente eléctrica, la cual está relacionada con la cantidad de sales disueltas y nutrientes. Uno de los factores que influyen en la CE son la naturaleza de los minerales del suelo. La CE se expresa en mili-Siemens/cm (mS cm^{-1}) o deciSiemens por metro (dS m^{-1}), [32]. En la Tabla 13 se muestra la clasificación del suelo en cuanto a su valor de CE, según la NOM-021-RECNAT-2000 [51].

Tabla 13. Clasificación del suelo en cuanto a su valor de CE [51].

CE (dS m^{-1}, 25° C)	Efectos
< 1.0	Despreciables de salinidad
1.1 - 2.0	Muy ligeramente salino
2.1 - 4.0	Moderadamente salino
4.1 - 8.0	Salino
8.1 - 16.0	Fuertemente salino
> 16.0	Muy fuertemente salino

La MO incluye desde organismos vivos hasta humus, está formada principalmente por compuestos de carbono e hidrógeno. La disposición de estos elementos dentro de la estructura de la materia orgánica determina su capacidad para interactuar con contaminantes y su retención [33]. La clasificación de MO para suelos no volcánicos de acuerdo con la NOM-021-RECNAT-2000 [51] se encuentra en la Tabla 14.

Tabla 14. Clasificación de materia orgánica, MO, en suelo [51].

Clase	MO (%)
	<i>Suelo no volcánico</i>
Muy bajo	< 0.5
Bajo	0.6 – 1.5
Medio	1.6 – 3.5
Alto	3.6 – 6.0
Muy Alto	> 6.0

5.2.2.3. Caracterización del suelo por difracción de rayos X

La difracción de rayos X (DRX) es una técnica analítica fundamental para la caracterización de materiales cristalinos. Al interactuar con la red cristalina, los rayos X generan un patrón de difracción característico que sirve como una firma única para cada sustancia, facilitando su identificación y cuantificación [26].

La muestra se pulveriza para obtener un polvo fino y homogéneo para asegurarse que los numerosos cristalitos que la componen estén orientados de forma aleatoria. Esta condición es esencial para que, al incidir un haz de rayos X, se cumpla la ley de Bragg en una amplia variedad de planos cristalinos, generando así un patrón de difracción completo y representativo [26].

La identificación de especies a partir de su diagrama de difracción de polvo cristalino se basa en la posición de las líneas (en términos de θ o 2θ), y en sus intensidades relativas [26].

La información del tipo de suelo, sus características fisicoquímicas y mineralogía proporcionan información para el entendimiento del comportamiento y movilidad de los contaminantes, en este caso, los ETC en suelo.

5.3. Tratamiento estadístico de datos

5.3.1. Análisis de componentes principales

El análisis de componentes principales (ACP) es una técnica estadística común para identificar y volver a referenciar los datos mediante un mapeo lineal, que transforma una cantidad de variables posiblemente correlacionadas en una cantidad menor de variables no correlacionadas conocidas como componentes principales.

El ACP reduce el número de dimensiones de grandes conjuntos de datos a componentes principales que conservan la mayor parte de la información original. Esto se logra transformando variables potencialmente correlacionadas en un conjunto más pequeño de variables, llamadas componentes principales [54].

Autores como Chen L *et al.*, 2024 y Dat N *et al.*, 2023, utilizaron ACP para encontrar las posibles fuentes de contaminación de Sb, Co y metales pesados, [34, 25].

6. HIPÓTESIS

La actividad industrial desarrollada dentro del ZMM ha generado un incremento estadísticamente significativo ($P= 0.05$) en los niveles de ETC en suelo respecto a los niveles de fondo, lo que representa un riesgo a la salud ambiental y humana.

7. OBJETIVOS

7.1. Objetivo general

Evaluar el impacto de los ETC en suelo urbano/ industrial y a la salud humana.

7.2. Objetivos específicos

- Valorar los niveles de pH y conductividad eléctrica en las muestras de suelo.
- Caracterizar mineralógicamente las muestras de suelo por DRX.
- Determinar el contenido de materia orgánica en suelo.
- Determinar los niveles de fondo en suelo de los ETC, seleccionando sitios no urbanizados fuera del ZMM y los niveles de ETC en suelos de la ZMM considerando los municipios de Apodaca, San Nicolás de los Garza, Monterrey y General Escobedo, NL. empleando ICP-MS.

- Evaluar resultados por análisis de componentes principales.
- Calcular los índices de impacto/ daño ambiental y a la salud humana atribuidos a los ETC.

8. MATERIALES Y MÉTODOS

En la Figura 4 se muestra un esquema de la metodología general del proyecto. Como primera etapa del estudio, se procedió a la toma de muestras de suelo en localidades ubicadas en la zona norte y sur del estado, fuera de la ZMM para el análisis de niveles de fondo de Nuevo León. Para el análisis de ETC en suelo urbano/industrial se tomó muestra en sitios seleccionados por su ubicación dentro de la ZMM, los cuales se suponen impactados por consecuencia de la densidad demográfica, de alto tránsito vehicular y la intensa actividad industrial. Se acondicionó las muestras de suelo para ser evaluadas, una parte se determinó los parámetros fisicoquímicos (pH, CE, MO y caracterización mineralógica por DRX), y la otra parte, junto con los MCR 2710 y MCR 2711_a se sometió a digestión ácida para ser analizadas por la técnica ICP-MS. De los resultados obtenidos se seleccionó aquellos ETC que cumplen con los criterios de validación de método (desviación estándar relativa, prueba t y porcentaje de recuperación) y se calcularon los índices de impacto al ambiente E_r , RI, I_{geo} y EF, así como los índices de riesgo a la salud HQ, HI y CR.

Los datos obtenidos de concentraciones de los ETC se procesaron por las metodologías estadística multivariante.

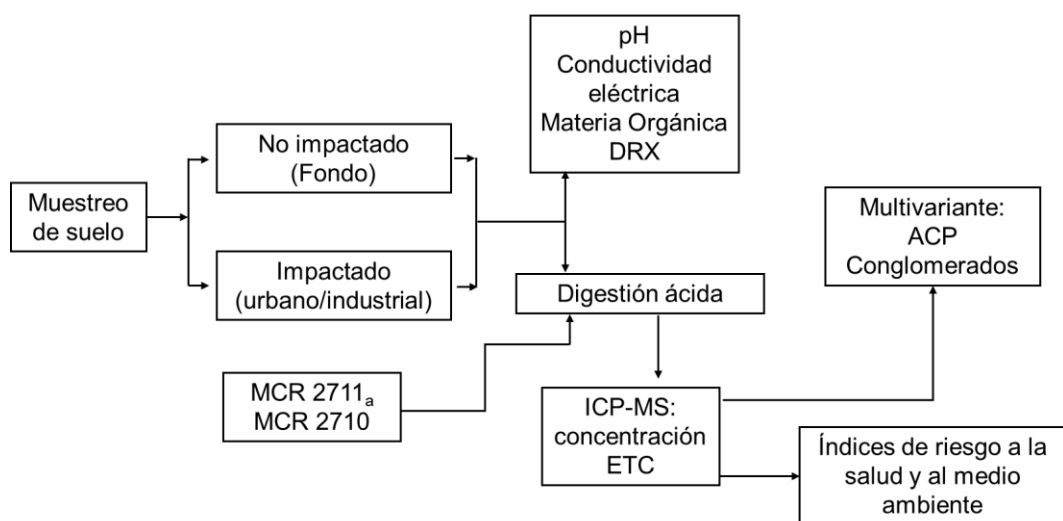


Figura 3. Esquema de la metodología general.

8.1. Muestreo

8.1.1. Toma de muestra para niveles de fondo de Nuevo León

El muestreo para niveles de fondo se llevó a cabo fuera de la ZMM, tanto en el norte como en el sur del estado de NL, en sitios fuera de posibles causas de contaminación por fuentes antropogénicas. En la zona norte se tomó muestra en Abasolo, Sabinas Hidalgo y Cerralvo; en la zona sur el muestreo se llevó a cabo en Montemorelos, Allende y Santiago. La

recolección de muestra para niveles de fondo se realizó en base la NMX-AA-132-SCFI-2006 [52], el método de muestreo seleccionado fue el dirigido o a juicio de experto, donde se consideraron áreas alejadas de carreteras y/o avenidas, de industria y de zonas habitacionales. Se recolectó una muestra compuesta de tres muestras simples para cada punto de muestreo, la profundidad del muestreo varió de 8 a 20 cm de profundidad.

En la Tabla 15 se indican las coordenadas y claves de los puntos de muestreo y en la Figura 5 se señala la ubicación de los municipios muestreados de niveles de fondo norte y sur de NL.

Tabla 15. Coordenadas de puntos de muestreo de niveles de fondo.

Punto de muestreo	Clave	Latitud	Longitud
Abasolo	AB	25.94422	-100.38664
Sabinas Hidalgo	SH	26.57492	-100.15503
Cerralvo	CR	26.07037	-99.61276
Montemorelos	MN	25.18889	-99.87724
Allende	AL	25.28082	-100.01579
Santiago	SN	25.38891	-100.26153

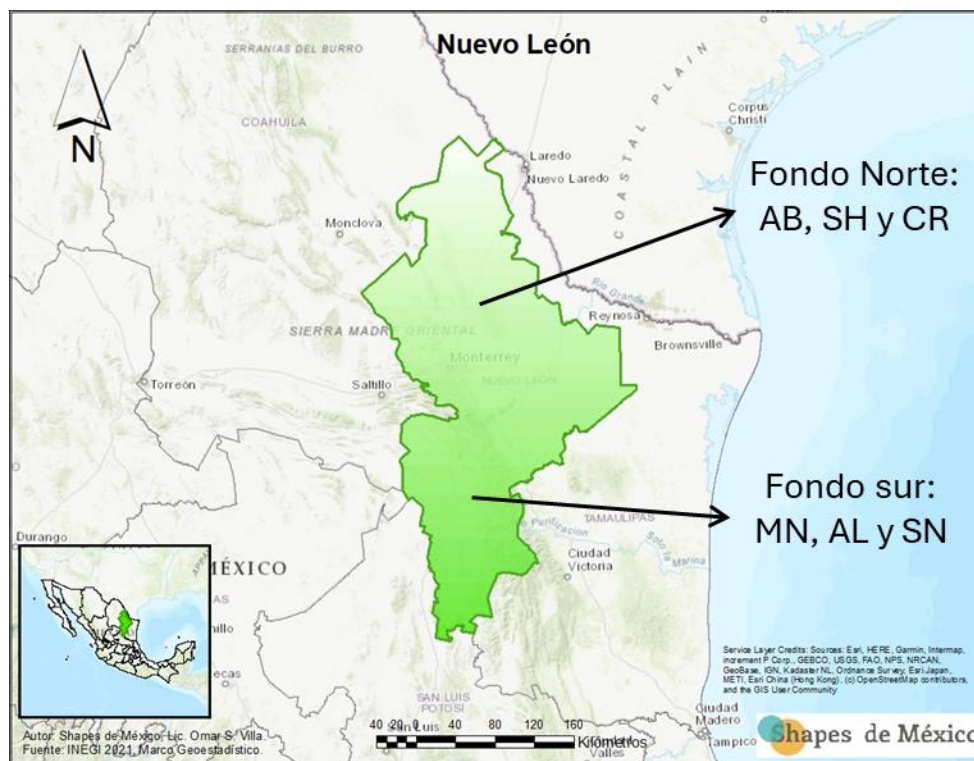


Figura 4. Mapa con señalización de los municipios de niveles de fondo de NL [37]

8.1.2. Toma de muestra en el área urbano/industrial de la Zona Metropolitana de Monterrey

Las muestras fueron tomadas en base a la NMX-AA-132-SCFI-2006, el método de muestreo seleccionado fue el dirigido o a juicio de experto [52]. La primera etapa del muestreo de la ZMM se delimitó del área a muestrear considerando sitios en la ZMM con alta actividad industrial, densidad de población urbana y alto tráfico vehicular [3]. Los municipios considerados que cumplen con las consideraciones mencionadas y que se encuentran conurbados, fueron: Monterrey, San Nicolás de los Garza, General Escobedo y

Apodaca, NL., las muestras fueron tomadas por avenidas Miguel Alemán, Universidad, Carretera Monterrey-Laredo, López Mateos, Concordia, Juan Pablo II y dentro del área urbana definida. En la Figura 6 se presenta el mapa indicándose los municipios correspondientes a los puntos de muestreo en la ZMM.

Para la toma de muestra en cada sitio, se estableció un área de 1 m², dentro del cual se retiró basura, troncos, piedras y objetos de tamaño grade. Posteriormente se tomó muestra de una profundidad de 0 – 5 cm en cinco puntos, con ayuda de una pala de acero inoxidable, después se recolectó en bolsas de polietileno y se conservó a temperatura ambiente para su análisis.

En la Tabla 16 se indican las coordenadas y claves de los puntos de muestreo.

Tabla 16. Coordenadas de puntos de muestreo en ZMM.

Punto de muestreo	Clave	Latitud	Longitud
Estacionamiento Posgrado FCQ.	PQ	25.69177	-100.31111
Estacionamiento Cd. Universitaria, UANL.	UA	25.72315	-100.31584
Av. Universidad - Calle Navarra.	AU	25.75520	-100.29888
Parque industrial Stiva/Barragán	SB	25.75652	-100.30819
Estacionamiento Soriana-Félix U Gómez	FG	25.70791	-100.28256
Av. Miguel Alemán- Blvr. Julián Treviño.	MJ	25.74925	-100.20914
Av. López Mateos- Calle Rincón de Ote.	LM	25.73162	-100.24995
Av. De la Concordia- Calle Valle de las Palmas.	CP	25.78573	-100.26755
Av. Sendero- Outlet Escobedo.	OE	25.77038	-100.29897
Av. De la Concordia- Calle Nicaragua.	CN	25.78444	-100.25181
Parque industrial Stiva/Miguel Alemán	SM	25.78698	-100.15418

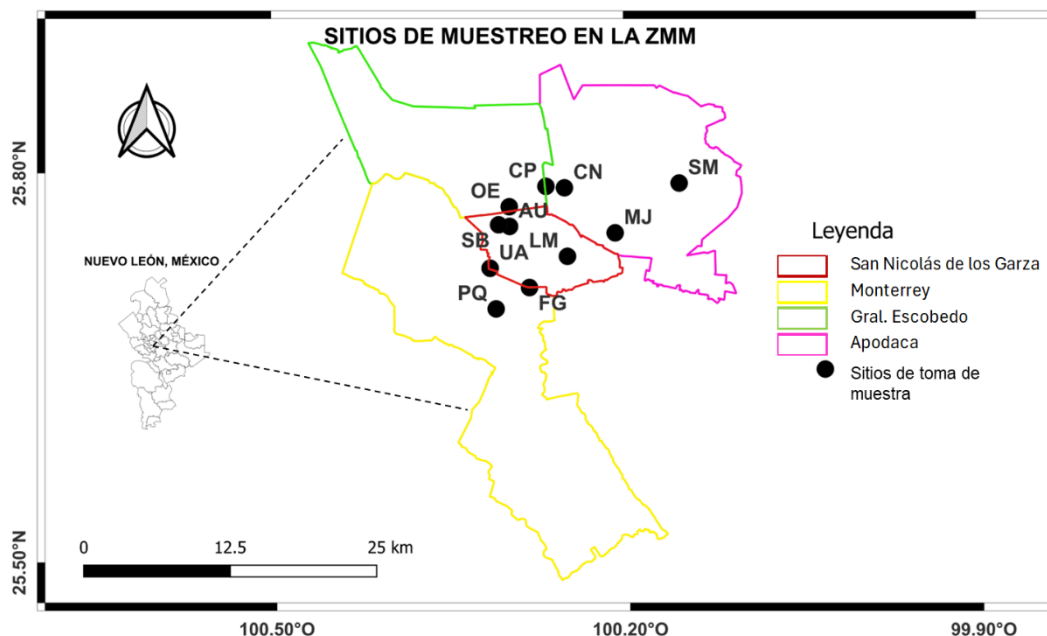


Figura 5. Mapa indicando los sitios de muestreo en el área delimitada de la ZMM.
(Elaboración propia QGIS 3.34.11)

8.2. Caracterización del suelo

8.2.1. Evaluación de pH y conductividad eléctrica

La medición y clasificación del suelo según su pH y conductividad eléctrica (CE) se realizó por el procedimiento descrito en la NOM-147-SEMAR-NAT/SSA1-2004 [36], para lo cual se pesaron 7g de suelo, previamente tamizado en malla 25 (710 μm) y fue llevado a sequedad, se adicionaron 14 mL de agua desionizada (18.2 $\text{M}\Omega\text{ cm}$), se agitó por 5 min, se midió CE con analizador de bolsillo de CE, TDS and EC Meter y finalmente el pH con el equipo Hanna Instruments, modelo H198107.

8.2.3. Cuantificación de materia orgánica

La cuantificación de la MO se realizó según la NOM-021-RECNAT-2000 [51], para lo cual se pesaron 0.5 g de suelo previamente en malla 25 (710 μm) y fue llevado a sequedad, se trasvasó cuantitativamente a un matraz Erlenmeyer de 500 mL, se adicionaron 10 mL de dicromato de potasio ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) 1 N y 20 mL de ácido sulfúrico (H_2SO_4) concentrado. Se dejó en reposo por 30 min en campana de extracción, se adicionaron 200 mL de agua destilada, 5 mL de ácido fosfórico (H_3PO_4) concentrado, 10 gotas de indicador de difenilamina ($(\text{C}_6\text{H}_5)_2\text{NH}$) y se tituló con sulfato ferroso heptahidratado ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) 1 M. Se procesó un blanco por triplicado. La MO se calculó según la ecuación (11).

$$\text{MO (\%)} = \%C_{\text{orgánico}} \times 1.724 \quad (\text{Ec. 11})$$

Donde MO (%) es el porcentaje de materia orgánica, $\%C_{\text{orgánico}}$ es el porcentaje de carbono orgánico calculado según la Ec. 12, 1.724 es el factor de Benmelen (factor de corrección que supone que el método solo oxida el 77 por ciento de carbono).

$$\%C_{\text{orgánico}} = \left(\frac{B-T}{g} \right) (N)(0.39)(mcf) \quad (\text{Ec. 12})$$

Donde B es el volumen en mL de $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ gastado para valorar el blanco del reactivo, T es el volumen en mL de $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ gastado para valorar la muestra, N es la Normalidad valorada del $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, g es el peso de la muestra en gramos, mcf es el factor de corrección de humedad, $0.39 =$ resulta de la siguiente ecuación: $(12 / 4000) * (1 / 0.77) * (100) = 0.39$; donde: $12 / 4000$ es el peso miliequivalente del carbono; $1 / 0.77$ es el factor de corrección, que considera el supuesto que el método oxida en promedio el 77% del C orgánico; se multiplica por 100 para convertir a porcentaje.

8.2.3. Caracterización de suelo por difracción de rayos X

Para determinar la composición mineral del suelo, se recogieron tres muestras diferentes, la primera de suelo de fondo norte de NL, la segunda de fondo sur de NL y para la tercera se preparó una muestra compuesta de los suelos de la ZMM. Los suelos seleccionados se pulverizaron y homogenizaron con ayuda de un mortero de ágata hasta un tamaño de partícula apropiado (< 250 micrómetros). La determinación de la mineralogía realizó en un analizador portátil XRD - XRF TERRA, Olympus. En el caso de XRD, la medición se realizó en un intervalo angular de 5° a 55° con un escaneo mínimo de 25 exposiciones con una fuente de radiación de cobalto en las instalaciones de Laboratorio Nacional de Geoquímica y Mineralogía (LANGEM), Estación Regional del Noroeste del Instituto de Geología Laboratorio de Ciencias Ambientales, UNAM. La identificación se llevó a cabo con ayuda

del software Xpowder Versión 2010.01.35 PRO con una base de datos PDF2 (ICDD) en el Laboratorio de Ciencias Ambientales de LANGEM.

8.2.4. Análisis de elementos por espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente

Las muestras destinadas a determinar la concentración de ETC en el suelo de fondo y la ZMM se acondicionaron en las instalaciones del Laboratorio de Química Analítica Ambiental (LQAA), perteneciente a la Facultad de Ciencias Químicas (FCQ) de la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL). Como primer paso se desintegraron los terrones de tierra en las muestras de suelo por acción mecánica con ayuda de un mazo de hule, luego se llevaron a sequedad a peso constante (70 °C, por 36 h) en horno FELISA, posteriormente se pasaron por tamiz No. 25 (710 µm marca Tyler), las muestras se reservaron en bolsas de polietileno.

Las muestras fueron sometidas a un proceso de digestión ácida según el método EPA 3052 en el Laboratorio de Geoquímica del Instituto de Geología de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí. En un frasco de PTFE se pesaron 0.2 g de muestra, se adicionaron 5 mL HNO₃ y 3 mL HF. La digestión se llevó a cabo empleando un equipo de microondas marca CEM, modelo MARS 6, bajo las siguientes condiciones: Temperatura 180 °C, rampa de 5 min 30 s, se mantuvo por 9 min 30 s, a 400 psi y 300 W. Terminado el proceso, la muestra se trasvasó a frascos de PTFE de 5 mL y

se llevó a sequedad. Se adicionó 1 mL de HNO₃, 1 mL de agua desionizada y se reflujo por 8 h. Se filtró por filtro de nitrocelulosa 0.45 micras, a vacío, se trasvasó a tubo de polietileno de 50 mL y se aforó a 50 g con agua desionizada y se llevó a medición en equipo ICP-MS E-448, Marca: Agilent Technologies, Modelo: 7800. En la Tabla 17 se indican las condiciones de medición. Se siguió el mismo procedimiento de digestión para los materiales certificados Montana Soil 2710 y Montana Soil 2711_a y se procesó un blanco por corrida bajo las mismas condiciones de la muestra.

Tabla 17. Ajustes de medición en el equipo ICP – MS marca Agilent Technologies, modelo: 7800.

Condición	Dato
Verificación de calibración de masas	⁷ Li, ¹¹⁵ In, ²³⁸ U.
Estándar interno	¹¹⁵ In, ¹⁶⁹ Tu
Curva de calibración	0.1 a 100 ppb
Control de análisis	Cada de 10 muestras con estándar multielemental de curva de 20 ppb
Celda de colisión	He
Tiempo de purga	50 s
Tiempo de estabilización	50 s
Réplicas	3

8.2.5. Elaboración de la curva de calibración

Los elementos V, Co, Rb, Sb, La, Ce, Nd y Th, presentes en la curva de calibración multielemental, fueron seleccionados al considerarse que pueden estar involucrados en actividades industriales y de tráfico vehicular

en la ZMM, además de ser reportados en los materiales certificados de referencia (Montana Soil 2710 y Montana Soil 2711_a). Cada elemento se trabajó en un rango de concentración de 0.1 a 100 µg kg⁻¹. De los datos obtenidos se graficó en el eje de la variable dependiente (y) la respuesta del equipo expresado en cuentas por segundo (CPS), y en el eje de las ordenadas (x), la concentración del elemento (µg kg⁻¹). Los datos fueron procesados por la herramienta estadística de Regresión en Excel y se obtuvo la ecuación de la gráfica (Ec. 13), coeficiente de correlación (R²), límite de detección, LOD (Limit of detection, por sus siglas en inglés), (Ec. 14), límite de cuantificación, LOQ (Limit of quantification, por sus siglas en inglés), (Ec. 15) y rango lineal para cada elemento. (las curvas de calibración para V, Co, Rb, Sb, La, Ce, Nd, y Th se encuentran en el apéndice B)

$$y = mx + b \quad (\text{Ec. 13})$$

Donde y es la respuesta del equipo (CPS), m es el valor de la pendiente, x es la concentración del elemento en µg kg⁻¹ y b es la ordenada.

$$\text{LOD} = \frac{(3)(s_{y/x})}{b} \quad (\text{Ec. 14})$$

$$\text{LOQ} = \frac{(10)(s_{y/x})}{b} \quad (\text{Ec. 15})$$

Donde $s_{y/x}$ es el error estándar obtenido por el análisis de regresión y b es el valor de la pendiente.

8.2.6. Validación del método

Para la validación del método se analizaron por duplicado, bajo el mismo procedimiento de digestión de las muestras, cada uno de los materiales certificados de referencia MCR Montana Soil 2710 y MCR Montana Soil 2711_a y se midieron en el equipo ICP–MS, con los resultados obtenidos se evaluaron precisión y exactitud con el cálculo de la media ($\bar{X}$), la desviación estándar (s), la desviación estándar relativa (DSR), con un valor de aceptación es de 5% máximo y la prueba t .

Para evaluar si existe diferencia significativa entre el promedio de la muestra y el valor de referencia, se aplica la prueba t (Ec. 16). Se establece como hipótesis nula, $H_0: \mu = \bar{X}$: no existe diferencia significativa entre el valor reportado en el certificado del material de referencia y el valor obtenido en el análisis. El valor de $t_{\text{crítica}} = 12.71$, $n=2$, con 95% de confianza [38].

$$t = \frac{(\bar{x} - \mu)\sqrt{n}}{s} \quad (\text{Ec. 16})$$

Donde t es la prueba t , $\bar{x}$ es el promedio de los resultados de la muestra, μ es valor del MCR reportado en el certificado correspondiente, n es el tamaño de la muestra y s es la desviación estándar.

8.2.7. Prueba t de contraste de significación

Para establecer si los resultados de concentración de los ETC en la ZMM y los niveles de fondo presentaron diferencia estadísticamente significativa se calculó la prueba t . Como primer paso se evaluó a si ambas poblaciones estudiadas tuvieron distribuciones normales, mediante la prueba de Fisher (F), (Ec. 17).

$$F = \frac{S_1^2}{S_2^2} \quad (\text{Ec. 17})$$

Donde F es la prueba de Fisher, S_1^2 es la varianza del tratamiento 1 (valor mayor) y S_2^2 es la varianza del tratamiento 2 (valor menor).

Se estableció la hipótesis nula, $H_0: \sigma_1^2 = \sigma_2^2$: no existe diferencia significativa entre las dos varianzas muestrales. En el caso que se aceptó la

H_0 , se utilizó la Ec. 18 para la prueba t y Ec. 19 para la estimación de la varianza.

$$t = \frac{(\bar{x}_1) - (\bar{x}_2)}{s \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} \quad (\text{Ec.18})$$

Donde t es la prueba t , $\bar{x}_1$ es la media de nivel de fondo y $\bar{x}_2$ es la media de la concentración de ETC en la ZMM, s es la desviación estándar a partir de la ecuación (20) y n es el tamaño de la muestra. La prueba t para la ecuación (19) tiene $n_1 + n_2 - 2$ grados de libertad.

$$s^2 = \frac{(n_1-1)s_1^2 + (n_2-1)s_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \quad (\text{Ec. 19})$$

Cuando la H_0 se rechazó, es decir que, si existió diferencia significativa entre las varianzas, las ecuaciones utilizadas fueron la Ec. 20 para el cálculo la prueba t y la Ec. 21 para los grados de libertad.

$$t = \frac{(\bar{x}_1 - \bar{x}_2)}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}} \quad (\text{Ec. 20})$$

Los grados de libertad para la prueba t de la Ec. 21 se calculan según Ec. 22.

$$\text{Grados de libertad} = \frac{\left(\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2} \right)^2}{\left(\frac{s_1^4}{n_1^2(n_1-1)} + \frac{s_2^4}{n_2^2(n_2-1)} \right)} \quad (\text{Ec. 21})$$

9. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

9.1. Caracterización del suelo

Para determinar las características fisicoquímicas de los suelos de fondo norte, fondo sur y de la ZMM, una vez tomada la muestra se llevó a peso constante (70 °C por 36 h), se pasó por tamiz No. 25 (710 micras), se procedió a realizar el análisis correspondiente para la valoración por DRX, de pH, CE y MO.

9.1.1. Análisis de difracción de rayos X

Con la finalidad de conocer la composición mineralógica de los suelos de fondo norte, fondo sur y ZMM de NL, las muestras seleccionadas se examinaron mediante un analizador portátil XRD-XRF TERRA, Olympus. La identificación de las muestras se localiza en la Tabla 18.

Tabla 18. Identificación de muestras examinadas por DRX.

Muestra	Clave	
	Interna	Externa
ZMM	ZM	JI-2
Fondo norte NL	SH	NI-2
Fondo sur NL	SN	SI-2

Los resultados de la identificación mineralógica se encuentran en la Tabla 19.

Tabla 19. Caracterización mineralógica de muestras de suelos en NL.

Muestra		Fases minerales identificadas	Fórmula	Relativo en fase cristalina (%)
Clave externa	Clave Interna			
JI-2	ZMM	Cuarzo	SiO_2	41.8
		Calcita magnesiana	$\text{Ca}_{0.936}\text{Mg}_{0.064}(\text{CO}_3)$	15.5
		Esmectitas (Montmorillonita)	$(\text{Na,Ca})_{0.33}(\text{Al,Mg})_2(\text{Si}_4\text{O}_{10}) (\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	4.8
		Plagioclasas (Albita)	$(\text{Ca,Na})(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$	10.6
		Micas (Muscovitas)	$\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10}) (\text{OH})_2$	27.3
NI-2	SH	Cuarzo	SiO_2	40
		Calcita magnesiana	$\text{Ca}_{0.936}\text{Mg}_{0.064}(\text{CO}_3)$	12.2
		Esmectitas (Montmorillonita)	$(\text{Na,Ca})_{0.33}(\text{Al,Mg})_2(\text{Si}_4\text{O}_{10}) (\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	13.4
		Plagioclasas (Albita)	$(\text{Ca,Na})(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$	12.2
		Micas (Muscovitas)	$\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10}) (\text{OH})_2$	22.2
SI-2	SN	Cuarzo	SiO_2	38.7
		Calcita magnesiana	$\text{Ca}_{0.936}\text{Mg}_{0.064}(\text{CO}_3)$	2.1
		Esmectitas (Montmorillonita)	$(\text{Na,Ca})_{0.33}(\text{Al,Mg})_2(\text{Si}_4\text{O}_{10}) (\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	10.8
		Plagioclasas (Albita)	$(\text{Ca,Na})(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$	13.5
		Micas (Muscovitas)	$\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10}) (\text{OH})_2$	34.9

Los resultados evidenciaron que el suelo de la ZMM está compuesto en su mayoría por silicatos ya que contiene principalmente cuarzo (41.8%) y micas (27.3%), además de plagioclasas (15.5%), calcita magnesiana (10.6%) y esmectitas (4.8%).

Por otro lado, el suelo de fondo norte de NL está compuesto especialmente por silicatos ya que contiene principalmente cuarzo (40%) y micas (22.2%), además tiene esmectitas (13.4%), plagioclasas (12.2%) y calcita magnesiana (12.2%).

Para el caso del suelo de fondo sur de NL, está compuesto fundamentalmente por silicatos ya que contiene especialmente cuarzo (38.7%) y micas (34.9%), además tiene plagioclasas (13.5%) esmectitas (10.8%), y calcita magnesiana (2.1%).

El suelo de la ZMM, de fondo norte y fondo sur de NL presentan mineralogía similar, ya que los componentes minerales identificados en los suelos analizados son cuarzo (SiO_2), calcita magnesiana ($\text{Ca}_{0.936}\text{Mg}_{0.064}(\text{CO}_3)$), esmectitas $((\text{Na},\text{Ca})_{0.33}(\text{Al},\text{Mg})_2(\text{Si}_4\text{O}_{10}) (\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O})$, plagioclasas, $((\text{Ca},\text{Na})(\text{AlSi}_3\text{O}_8))$ y micas $(\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10}) (\text{OH})_2)$, demostrándose de esta manera, que los silicatos son el componente mayoritario.

9.1.2. pH y conductividad eléctrica

En la Tabla 20 se presentan los resultados de pH y CE de las muestras de suelo analizadas de la ZMM y de los suelos de fondo norte y sur.

Tabla 20. Resultados de pH y CE de suelo urbano/industrial de la ZMM [51].

Clave de muestra	pH	Descripción	CE, dS m ⁻¹	Descripción
ZMM				
PQ	7.3	Neutro	0.16	Efectos despreciables de salinidad
UA	7.0	Neutro	0.27	
AU	7.0	Neutro	0.20	
SB	7.0	Neutro	0.18	
FG	7.0	Neutro	0.26	
MJ	6.9	Neutro	0.22	
LM	7.0	Neutro	0.17	
CP	7.6	Medianamente alcalino	0.15	
OE	7.1	Neutro	0.18	
CN	7.2	Neutro	0.35	
SM	7.4	Medianamente alcalino	0.22	
Fondo norte				
AB	6.9	Neutro	0.20	Efectos despreciables de salinidad
SH	7.1	Neutro	0.21	
CR	7.3	Neutro	0.13	
Fondo sur				
MN	7.0	Neutro	0.15	Efectos despreciables de salinidad
AL	7.0	Neutro	0.19	
SN	6.6	Neutro	0.23	

El pH de los suelos es en su mayoría neutro, para los puntos CP y SM el pH es moderadamente alcalino. La CE en términos de salinidad es

considerada con efectos despreciables de salinidad. Lo anterior es congruente con la mineralogía, ya que los suelos analizados están principalmente compuestos por silicatos (> 70% de las fases minerales identificadas corresponden a silicatos).

9.1.3. Análisis de materia orgánica

La mayoría de los sitios de muestreo, tanto de la ZMM como de niveles de fondo: PQ, FG, MJ, LM, CP, CN y SM, presentaron contenido medio de MO, las zonas que tuvieron contenido alto fueron: UA, AU, SB y OE, los cuales están cercanos al cerro del Topo Chico, el cual es una zona natural protegida. Solo el punto de muestreo CR, que pertenece al nivel de fondo norte, dio contenido bajo de MO. En el mapa de la Figura 6 se muestra la distribución de la MO de los sitios muestreados en la ZMM.

Los resultados de MO en los suelos analizados se encuentran en la Tabla 21.

Tabla 21. Contenido de MO en suelo urbano/industrial de la ZMM y de fondo norte y sur.

Clave de muestra	MO (%)	Clasificación
ZMM		
PQ	2.0	Medio
UA	4.8	Alto
AU	4.7	Alto
SB	4.3	Alto
FG	2.9	Medio
MJ	1.9	Medio
LM	2.1	Medio
CP	1.9	Medio
OE	4.0	Alto
CN	1.9	Medio
SM	2.5	Medio
Fondo norte		
AB	3.2	Medio
SH	1.7	Medio
CR	1.1	Bajo
Fondo sur		
MN	2.1	Medio
AL	3.1	Medio
SN	1.9	Medio

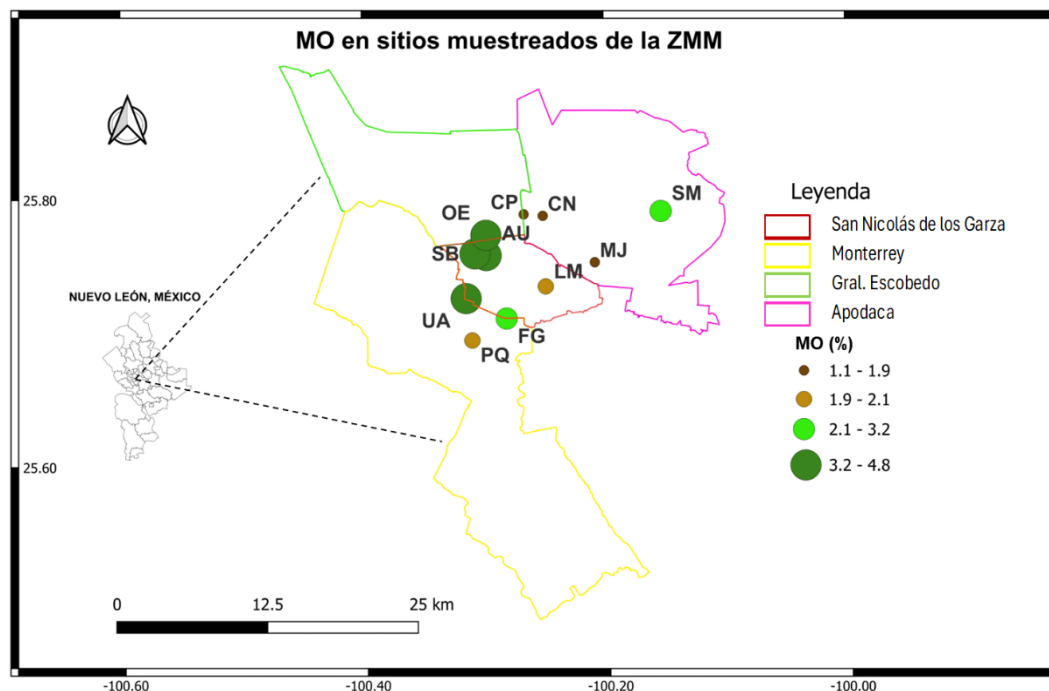


Figura 6. Clasificación de materia MO en suelo de los sitios de muestreo de la ZMM
(Elaboración propia en QGIS 3.34.11)

La cantidad de MO analizada en los sitios se debió a que los tipos de suelo de las zonas muestreadas están clasificados como Leptosol, Phaeozem, Vertisol y Calcisol, los cuales tienen contenidos de MO entre bajo y alto. Se pronostica que la movilidad de los ETC en suelos con MO alta o media sea poca, ya que al haber interacciones entre los elementos y los grupos funcionales (carbonilos -COOH y/o hidroxilos -OH) de los materiales orgánicos, los ETC se pueden retener y dificultar su tránsito a través del suelo.

9.2. Determinación de elementos en suelo de Nuevo León

Las muestras de suelo de la ZMM y de los niveles de fondo norte y sur, así como los MCR 2710 y MCR 2711_a, fueron sometidos a digestión ácida por el método EPA 3052 para posteriormente ser analizados por ICP-MS. Para la cuantificación se estableció una curva de calibración para cada elemento y se validó el método mediante parámetros estadísticos (correlación (R^2), LOD, LOQ, recuperación (%) y prueba t.

Con la finalidad de descartar interferencias isobáricas se seleccionaron isótopos que no producen interferencias, además se utilizó celda de colisión. En la Tabla 22 se muestran las masas de isótopos de los elementos utilizadas en el análisis con el equipo de ICP-MS, las cuales son distintas entre sí.

Tabla 22. Masas y abundancia de los elementos analizados en ICP-MS. [39]

Elemento	Masa (z)	Abundancia (%)
⁵¹ V	50.94	99.75
⁵⁹ Co	58.93	100
⁸⁵ Rb	84.911	72.17
¹²¹ Sb	120.90	57.21
¹³⁹ La	138.91	99.91
¹⁴⁰ Ce	139.91	88.45
¹⁴⁷ Nd	146.91	14.99
²³² Th	232.04	100

9.2.1. Curva de calibración

Para la elaboración de la curva de calibración se utilizaron estándares de cada elemento seleccionado (V, Co, Rb, Sb, La, Ce, Nd y Th) y se diluyeron para obtener una curva en concentraciones de 0.1, 0.5, 1.0, 5.0, 10, 20, 50, 80 y 100 mg kg⁻¹. Los resultados de la curva de calibración, ecuación de la gráfica, valor de R², LOD, LOQ y rango lineal se encuentran en la Tabla 23. Los elementos analizados presentaron valores de correlación R² superiores a 0.998 en los rangos de concentración establecidos, lo que confirma la linealidad de la curva.

Tabla 23. Parámetros obtenidos de la curva de calibración a partir de estándares del elemento (µg kg⁻¹).

ETC	Ecuación de la gráfica	R ²	LOD	LOQ	Rango Lineal
V	y = 3250x + 41.023	0.99999	0.32	1.07	0.10 - 97.32
Co	y = 9216.3x + 3819.1	0.99830	4.95	16.51	0.10 - 98.54
Rb	y = 1376.7x + 146.77	0.99994	0.96	3.18	0.10 - 100.60
Sb	y = 3472.2x - 391.54	0.99995	0.86	2.87	0.10 - 101.05
La	y = 15310x + 5731.5	0.99929	3.27	10.91	0.10 - 100.75
Ce	y = 19963x + 3738.4	0.99988	1.34	4.47	0.10 - 101.46
Nd	y = 3922x + 619.56	0.99996	0.82	2.73	0.10 - 100.86
Th	y = 36604x + 11611	0.99995	0.82	2.74	0.10 - 100.34

9.2.2. Validación de método

Se evaluaron los parámetros estadísticos con el tratamiento de datos de los materiales certificados MCR 2710 y MCR 2711_a, los cuales se encuentran en la Tabla 24 y 25 respectivamente.

Tabla 24. Parámetros estadísticos para validación del método usando MCR-2710.

	Resultado	DSR	Certificado	Prueba t
Elemento	mg kg ⁻¹ ± S	%	mg kg ⁻¹	n = 2, P = 0.05
V	84.13 ± 0.09	0.11	76.60 ± 2.30	> t _{crítica}
Co	9.55 ± 0.14	1.42	9.89	3.60
Rb	131.48 ± 0.00	0.00	120.00	> t _{crítica}
Sb	38.23 ± 0.29	0.76	38.40 ± 3.0	0.85
La	36.77 ± 0.43	1.18	34.00	9.10
Ce	68.97 ± 0.94	1.38	57.00	> t _{crítica}
Nd	25.23 ± 0.30	1.18	23.00	10.60
Th	14.77 ± 0.06	0.42	13.00	> t _{crítica}

Valor de t_{crítica} = 12.71

Tabla 25. Parámetros estadísticos para validación del método usando MCR-2711_a.

	Resultado	DSR	Certificado	Prueba t
Elemento	mg kg ⁻¹ ± S	%	mg kg ⁻¹ ± S	n = 2, P = 0.05
V	90.78 ± 2.28	2.50	80.70 ± 5.7	6.20
Co	10.14 ± 0.09	0.92	9.89 ± 0.18	3.80
Rb	74.11 ± 7.75	10.46	120.00 ± 3.0	8.40
Sb	20.71 ± 0.31	1.50	23.80 ± 1.4	> t _{crítica}
La	30.39 ± 1.86	6.11	38.00 ± 1.0	5.80
Ce	63.65 ± 2.5	3.99	70.00	3.50
Nd	25.82 ± 0.99	3.83	29.00 ± 2.0	4.60
Th	12.59 ± 0.46	3.63	15.00 ± 1.0	7.40

Valor de t_{crítica} = 12.71

Los elementos V, Co, Rb, Sb, La, Ce, Nd y Th obtuvieron valores de DSR < 5% para el MCR 2710. V, Co, Sb, Ce, Nd y Th obtuvieron DSR < 5% para MCR 2711_a, por lo que el método se considera con buena precisión.

Para determinar si existen diferencias significativas entre el valor reportado por los materiales certificados y los obtenidos por la metodología seguida, se estableció la hipótesis nula H₀: $\mu = \bar{X}$, no existe diferencia significativa entre el valor reportado en el certificado del material de referencia y el valor obtenido en el análisis. La hipótesis nula fue aceptada para Co, Sb, La y Nd para el MCR 2710. En el caso del MCR 2711_a se aceptó la hipótesis nula para V, Co, Rb, La, Ce, Nd y Th. De esta manera se evidenció buena exactitud del método.

9.3. Evaluación de elementos en Nuevo León

Una vez validado el método, se procedió a la determinación de los ETC (V, Co, Rb, Sb, Nd, La, Ce y Th) en las muestras digeridas (EPA 3052) de suelos de fondo norte, sur y de la ZMM, por el equipo ICP-MS, para posteriormente evaluar si existe diferencia significativa entre los niveles de fondo de los elementos y las concentraciones en la ZMM.

9.3.1. Niveles de fondo

Para seleccionar los niveles de fondo norte y sur de NL, se tomó como criterio el sitio con menor concentración del elemento y con DSR $\leq 5\%$. Los niveles de fondo norte (correspondiente a los sitios SH y CR) se establecieron para V, Co, Sb, Rb, Nd y Th. Los de fondo sur para (acorde al sitio SN) para La y Ce. Los resultados y las concentraciones de los elementos en la corteza terrestre reportadas en bibliografía se encuentran en la Tabla 26.

Tabla 26. Valores evaluados de niveles de fondo norte y sur de NL y de corteza terrestre reportados en bibliografía.

Elemento	Sitio	Concentración, mg kg ⁻¹ $\pm$ S	DSR, % (n=2)	Corteza terrestre, mg kg ⁻¹ [19]	Otros países, mg kg ⁻¹	Referencia
Fondo norte						
V	SH	245.74 $\pm$ 4.44	1.81	138.0	108.0	[60]
Co	SH	4.36 $\pm$ 0.03	0.67	26.6	6.9	[21]

Sb	SH	0.82 ± 0.01	0.99	0.5	1.0	[57]
Rb	CR	323.72 ± 23.72	3.41	49.0	-	-
Nd	CR	9.25 ± 0.39	4.18	8.0	26.4	[10]
Th	CR	5.2 ± 0.58	0.39	5.6	-	-
Fondo sur						
La	SN	21.79 ± 0.57	2.6	31.0	39.7	[10]
Ce	SN	46.93 ± 2.07	4.41	63.0	68.4	[10]

Sb con nivel de fondo evaluado en NL de $0.82 \pm 0.01 \text{ mg kg}^{-1}$, es mayor al de la corteza terrestre de 0.5 mg kg^{-1} y es similar al reportado por Jabłońska-Czapla *et al.*, 2022 [57], quien indicó un nivel de fondo menor a 1 mg kg^{-1} en Lublin, Polonia.

Nd con nivel de fondo valorado en NL de $9.25 \pm 0.39 \text{ mg kg}^{-1}$ es mayor al de la corteza terrestre de 8.0 mg kg^{-1} , y es menor al reportado por Sun *et al.* [10], 2017 en suelo de China de 26.4 mg kg^{-1} .

La con nivel de fondo analizado en NL de $21.8 \pm 0.57 \text{ mg kg}^{-1}$ es menor al de la corteza terrestre de 31.0 mg kg^{-1} y es menor al reportado por Sun *et al.* [10], 2017 en suelo de China de 39.7 mg kg^{-1} .

El nivel de fondo de Th evaluado en NL fue de $5.20 \pm 0.58 \text{ mg kg}^{-1}$, el cual es similar al valor de la corteza terrestre de 5.6 mg kg^{-1} .

El nivel de fondo de Co analizado de $4.36 \pm 0.03 \text{ mg kg}^{-1}$ fue menor al de la corteza terrestre de 26.6 mg kg^{-1} y al nivel de fondo de China reportado por Soltani-Gerdefaramarzi *et al.* [21], 2021 de 6.9 mg kg^{-1} .

El nivel de fondo para Ce en NL fue de $46.9 \pm 2.07 \text{ mg kg}^{-1}$, el cual es menor al de la corteza terrestre de 63 mg kg^{-1} y del reportado para China por Sun *et al.* [10], 2017 de 68.4 mg kg^{-1} .

El nivel de fondo de NL analizado para V de $245.7 \pm 4.4 \text{ mg kg}^{-1}$, fue mayor que el de la corteza terrestre de 138 mg kg^{-1} y que el valor medio estimado para el mundo de 108 mg kg^{-1} reportado por Chen *et al.*, 2021.

Rb tuvo un nivel de fondo de $323.72 \pm 23.72 \text{ mg kg}^{-1}$, el cual es mayor que el de la corteza terrestre de 40.0 mg kg^{-1} .

9.3.2. Concentración de los elementos en la Zona Metropolitana de Monterrey

Los resultados de las concentraciones de los ETC en la ZMM, niveles de fondo y resultados reportados en bibliografía en suelos de otros países, se encuentran en la Tabla 27.

Chen *et al.*, 2020 [60], reportaron que la concentración de V en suelo circundante a instalación de fundición en la ciudad industrial Sichuan, China fue de 532.1 mg kg^{-1} , el cual se encontró en el rango de concentraciones de V en suelos de la ZMM ($400.74 \pm 28.77 - 824.98 \pm 4.07 \text{ mg kg}^{-1}$). Dicha concentración estuvo por encima de la de nivel de fondo de NL ($245.74 \pm 4.40 \text{ mg kg}^{-1}$) y de la corteza terrestre (138.0 mg kg^{-1}).

Co tuvo concentraciones en los sitios muestreados de la ZMM en el rango de $4.31 \pm 0.00 - 7.85 \pm 0.38 \text{ mg kg}^{-1}$, el cual se encontró en el rango reportado por Soltani-Gerdefaramarzi *et al.*, 2021 [21], en suelos de ciudades industriales de Irán y Siria ($4.86 - 13 \text{ mg kg}^{-1}$), excepto para el sitio AU ($4.31 \pm 0.00 \text{ mg kg}^{-1}$) el cual estuvo por debajo del rango de Irán y Siria. Los valores mencionados estuvieron por encima de los niveles de fondo de NL ($4.36 \pm 0.03 \text{ mg kg}^{-1}$).

Croffie *et al.*, 2022 [56], reportó en suelo de Irlanda concentraciones de Rb en el rango de $5.21 - 248 \text{ mg kg}^{-1}$, el cual estuvo por debajo del rango de concentraciones de Rb en suelo de los sitios muestreados de la ZMM ($218.60 \pm 2.75 - 573.70 \pm 29.33 \text{ mg kg}^{-1}$) y del nivel de fondo de NL ($323.72 \pm 23.72 \text{ mg kg}^{-1}$).

Sb en sitios de muestreo en suelo de la ZMM, se encontró en el rango de $1.68 \pm 0.01 - 6.07 \pm 0.28 \text{ mg kg}^{-1}$, el cual se estuvo dentro del rango de concentraciones de Sb en suelo industrial de Polonia ($2.5 - 175 \text{ mg kg}^{-1}$) reportado por Jabłońska-Czapla *et al.*, 2022 [57], excepto en los sitios AU ($1.68 \pm 0.01 \text{ mg kg}^{-1}$) y CN ($1.91 \pm 0.11 \text{ mg kg}^{-1}$), los cuales presentaron concentraciones menores a las evaluadas en dicho país. Los suelos tanto de la ZMM como de los sitios muestreados de Polonia fueron superiores en concentración de Sb respecto a los niveles de fondo de NL ($0.82 \pm 0.01 \text{ mg kg}^{-1}$).

El rango de concentraciones de Nd en la ZMM ($0.74 \pm 0.01 - 20.93 \pm 0.58 \text{ mg kg}^{-1}$) y el nivel de fondo de NL ($9.25 \pm 0.39 \text{ mg kg}^{-1}$), no exceden

con el rango de concentraciones de Nd en suelo analizado en la ciudad Zhuzhou, China ($8.97 - 39.2 \text{ mg kg}^{-1}$), reportado por Sun *et al.*, 2017 [10]. Los sitios UA ($2.13 \pm 0.18 \text{ mg kg}^{-1}$), AU ($4.60 \pm 0.03 \text{ mg kg}^{-1}$), FG ($0.74 \pm 0.01 \text{ mg kg}^{-1}$) y SM ($1.40 \pm 0.00 \text{ mg kg}^{-1}$) estuvieron por debajo del rango de concentraciones de Nd de Zhuzhou y del nivel de fondo de Nd en NL.

El rango de concentraciones que presentó La en la ZMM fue de $1.00 \pm 0.1 - 31.66 \pm 1.66 \text{ mg kg}^{-1}$ y el nivel de fondo en NL de $21.79 \pm 0.57 \text{ mg kg}^{-1}$, los cuales no exceden con el rango de concentraciones de La en suelo analizado en la ciudad Zhuzhou, China ($12.7 - 48.6 \text{ mg kg}^{-1}$) reportado por Sun *et al.*, 2017 [10]. Los sitios UA ($3.35 \pm 0.22 \text{ mg kg}^{-1}$), AU ($5.75 \pm 0.32 \text{ mg kg}^{-1}$), FG ($1.00 \pm 0.10 \text{ mg kg}^{-1}$) y SM ($1.40 \pm 0.00 \text{ mg kg}^{-1}$) de la ZMM estuvieron por debajo del rango de concentraciones de La en Zhuzhou.

El rango de concentraciones que presentó Ce en la ZMM fue de $2.32 \pm 0.05 - 42.65 \pm 2.32 \text{ mg kg}^{-1}$ y el nivel de fondo en NL de $46.93 \pm 2.07 \text{ mg kg}^{-1}$, los cuales no exceden con el rango de concentraciones de Ce en suelo analizado en la ciudad Zhuzhou, China ($23.9 - 98.3 \text{ mg kg}^{-1}$) reportado por Sun *et al.*, 2017 [10]. Los sitios de la ZMM: UA ($3.35 \pm 0.22 \text{ mg kg}^{-1}$), AU ($5.75 \pm 0.32 \text{ mg kg}^{-1}$), LM ($1.00 \pm 0.10 \text{ mg kg}^{-1}$) y SM ($1.40 \pm 0.00 \text{ mg kg}^{-1}$), estuvieron por debajo del rango de concentraciones de Ce en Zhuzhou.

Escareño-Juárez *et al.*, 2021, evaluaron Th en sitios de la zona urbana de Zacatecas quien tuvo un rango de concentración de $7.62 - 9.45 \text{ mg kg}^{-1}$ y el nivel de fondo en Zacatecas estudiado fue de $13.6 \pm 7.6 \text{ mg kg}^{-1}$. Nascimento *et al.*, 2019 reportaron concentraciones de Th suelo en distintos

países, las cuales estuvieron en el rango de $5.9 - 80 \text{ mg kg}^{-1}$, el cual correspondió a Francia (5.9 mg kg^{-1}), India (6.9 mg kg^{-1}), España (17.7 mg kg^{-1}), Brasil (28.5 mg kg^{-1}) y Malasia (80 mg kg^{-1}). En la ZMM, Th fue evaluado en los puntos CN y LM, siendo 0.43 ± 0.03 y $4.55 \pm 0.03 \text{ mg kg}^{-1}$ respectivamente, dichos resultados no exceden de las concentraciones de Th en otros países ni de Zacatecas, México. De manera similar, el nivel de fondo de NL ($5.20 \pm 0.58 \text{ mg kg}^{-1}$) presentó valores menores que el nivel de fondo de los sitios analizados en distintos países y de Zacatecas.

Tabla 27. Resultados de los ETC en la ZMM, niveles de fondo y en suelo de otros países.

	V	Co	Rb	Sb	Nd	La	Ce	Th	
Nivel de fondo (mg kg ⁻¹ ± S),	245.74 ± 4.40	4.36 ± 0.03	323.72 ± 23.72	0.82 ± 0.01	9.25 ± 0.39	21.79 ± 0.57	46.93 ± 2.07	5.20 ± 0.58	
Concentración en suelo en otros países, (mg kg ⁻¹)	532.1	4.86 - 13	5.21 - 248	2.5 – 175	8.97 – 39.2	12.7 – 48.6	23.9 – 98.3	7.62 - 9.45	
País	China, [60]	Irán, [21]	Irlanda, [56]	Polonia, [57]	China, [10]	China, [10]	China, [10]	México, [58]	
Sitio de mues- treo en la ZMM	PQ	545.03 ± 36.92	7.66 ± 0.44	398.81 ± 9.70	6.07 ± 0.28	13.49 ± 0.67	19.38 ± 0.62	36.00 ± 2.22	< LOQ
	UA	824.98 ± 4.07	< LOQ	218.60 ± 2.75	3.71 ± 0.05	2.13 ± 0.18	3.35 ± 0.22	4.18 ± 0.35	< LOQ
	AU	501.89 ± 35.11	4.31 ± 0.00	386.06 ± 3.16	1.68 ± 0.01	4.60 ± 0.03	5.75 ± 0.32	8.07 ± 0.26	< LOQ
	SB	574.40 ± 4.84	7.85 ± 0.38	497.76 ± 17.79	2.47 ± 0.02	16.78 ± 0.37	21.48 ± 0.69	< LOQ	< LOQ
	FG	805.29 ± 61.04	5.97 ± 0.38	146.67 ± 1.35	5.83 ± 0.59	0.74 ± 0.01	1.00 ± 0.10	< LOQ	< LOQ
	MJ	549.47 ± 2.86	< LOQ	573.70 ± 29.33	< LOQ	< LOQ	< LOQ	41.20 ± 7.55	< LOQ
	LM	607.65 ± 11.95	< LOQ	549.73 ± 18.27	< LOQ	< LOQ	< LOQ	16.49 ± 9.29	4.55 ± 0.03
	CP	< LOQ	5.30 ± 0.02	< LOQ	2.14 ± 0.17	13.56 ± 0.11	19.67 ± 0.59	< LOQ	< LOQ
	OE	< LOQ	7.70 ± 0.13	502.26 ± 26.49	4.30 ± 0.18	20.93 ± 0.58	31.63 ± 1.66	< LOQ	< LOQ
	CN	469.51 ± 7.95	6.67 ± 0.05	454.47 ± 2.23	1.91 ± 0.11	17.27 ± 1.32	22.22 ± 0.46	42.65 ± 2.34	0.43 ± 0.03
SM	400.74 ± 28.77	< LOQ	219.50 ± 6.69	< LOQ	1.40 ± 0.00	1.66 ± 0.16	2.32 ± 0.05	< LOQ	

Las concentraciones de los elementos fueron cotejadas con los niveles de fondo correspondientes para corroborar si existe diferencia estadísticamente significativa, por lo que se establecieron las siguientes hipótesis:

H_0 : No existe diferencia significativa entre la media del ETC analizado y el nivel de fondo.

H_A : Existe diferencia significativa entre la media del ETC analizado y el nivel de fondo.

Se aplicó la prueba t a los elementos V, Co, Rb, Sb y Nd quienes mostraron concentraciones superiores a los niveles de fondo.

En la primera etapa se evaluó si las poblaciones muestran desviaciones estándar iguales con la prueba F. Según los resultados de la prueba F se aplicó la Ec. 19 para desviaciones estándar iguales, o bien, la Ec. 21 para desviaciones estándar diferentes, en el Apéndice C se indica la ecuación de la prueba t usada en cada caso.

Para V se rechazó la H_0 : no existe diferencia significativa entre la valor de V y el nivel de fondo ($245.74 \pm 4.4 \text{ mg kg}^{-1}$), con 95% de confianza y $n=2$, para los sitios: PQ (545.03 ± 36.92), UA ($824.98 \pm 4.07 \text{ mg kg}^{-1}$), AU ($501.89 \pm 35.11 \text{ mg kg}^{-1}$), SB ($574.40 \pm 4.84 \text{ mg kg}^{-1}$), FG ($805.29 \pm 61.04 \text{ mg kg}^{-1}$), MJ ($549.47 \pm 2.86 \text{ mg kg}^{-1}$), LM ($607.65 \pm 11.95 \text{ mg kg}^{-1}$), CN ($469.51 \pm 7.95 \text{ mg kg}^{-1}$) y SM ($400.74 \pm 28.77 \text{ mg kg}^{-1}$); determinándose que existe un aumento estadísticamente significativo de V en la ZMM respecto a los niveles de fondo.

En la Figura 8 se encuentra el mapa con los sitios de muestreo indicando las concentraciones de V correspondientes. Las zonas con resultados mayores fueron: UA, FG, LM y SB, dichos puntos se encuentran próximos entre sí y están cercanos a la zona industrial donde se fabrica y procesan materiales de acero, el cual tienen entre sus componentes al V [40]. El resto de los sitios (PQ, AU, MJ, CN y SM) se encuentran cercanos a avenidas y carreteras de alto tráfico vehicular e industria manufacturera que procesan acero, por lo que el desgaste de los componentes automotrices y el tipo de industria donde es aplicado, pueden estar contribuyendo al aumento de concentración del elemento [3].

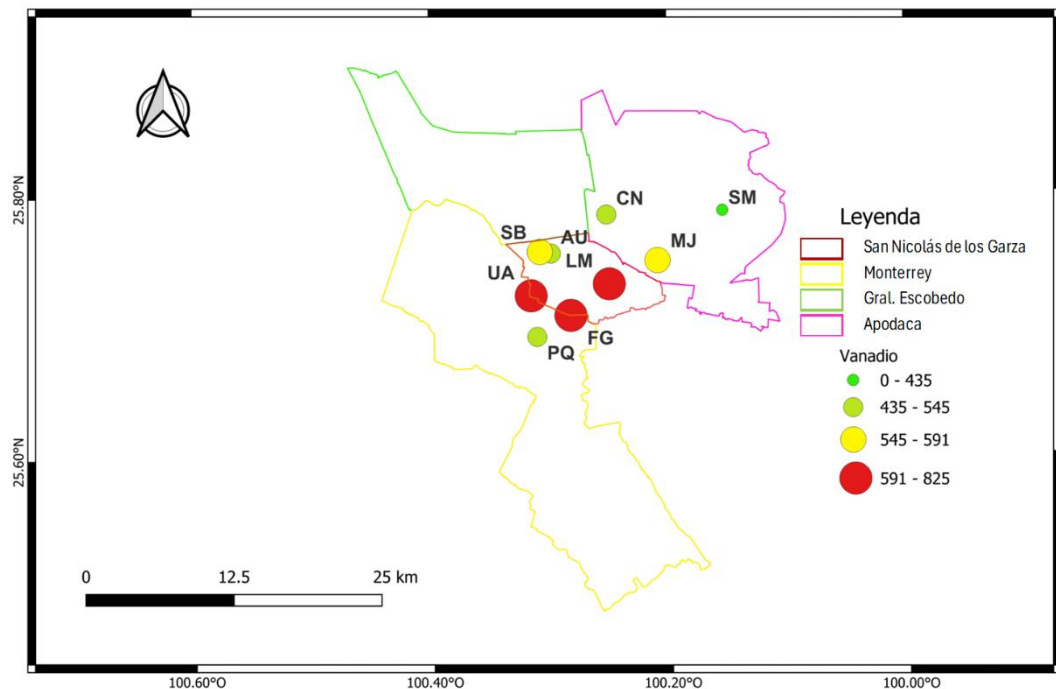


Figura 7. Mapa de concentraciones de V en los sitios muestreados de suelo urbano/industrial. (Elaboración propia, QGIS Desktop. 3.34.11)

Para Co se rechazó la H_0 : no existe diferencia significativa entre el valor de Co y el nivel de fondo ($4.36 \pm 0.03 \text{ mg kg}^{-1}$), con 95% de confianza y $n=2$, para los sitios: PQ ($7.66 \pm 0.44 \text{ mg kg}^{-1}$), SB ($7.85 \pm 0.38 \text{ mg kg}^{-1}$), FG ($5.97 \pm 0.38 \text{ mg kg}^{-1}$), CP ($5.30 \pm 0.02 \text{ mg kg}^{-1}$), OE ($7.70 \pm 0.13 \text{ mg kg}^{-1}$) y CN ($6.67 \pm 0.05 \text{ mg kg}^{-1}$). Comprobándose que existe un aumento estadísticamente significativo de Co en la ZMM respecto a los niveles de fondo.

En la Figura 9 se encuentra el mapa con los sitios de muestreo indicando las concentraciones de Co correspondientes. Las áreas con resultados mayores son SB, OE y PQ, en estos puntos se encuentra industrias relacionadas a pigmentos, y al ser el Co un ingrediente usado en pinturas y pigmentos, este tipo de actividad industrial puede ser un factor de aumento de concentración del elemento en el sitio. En los puntos CN, FG, CP y AU la acumulación de Co puede ser debido al desgaste automotriz por el intenso tráfico vehicular en la zona por su uso en industria relacionada a componentes automotrices.

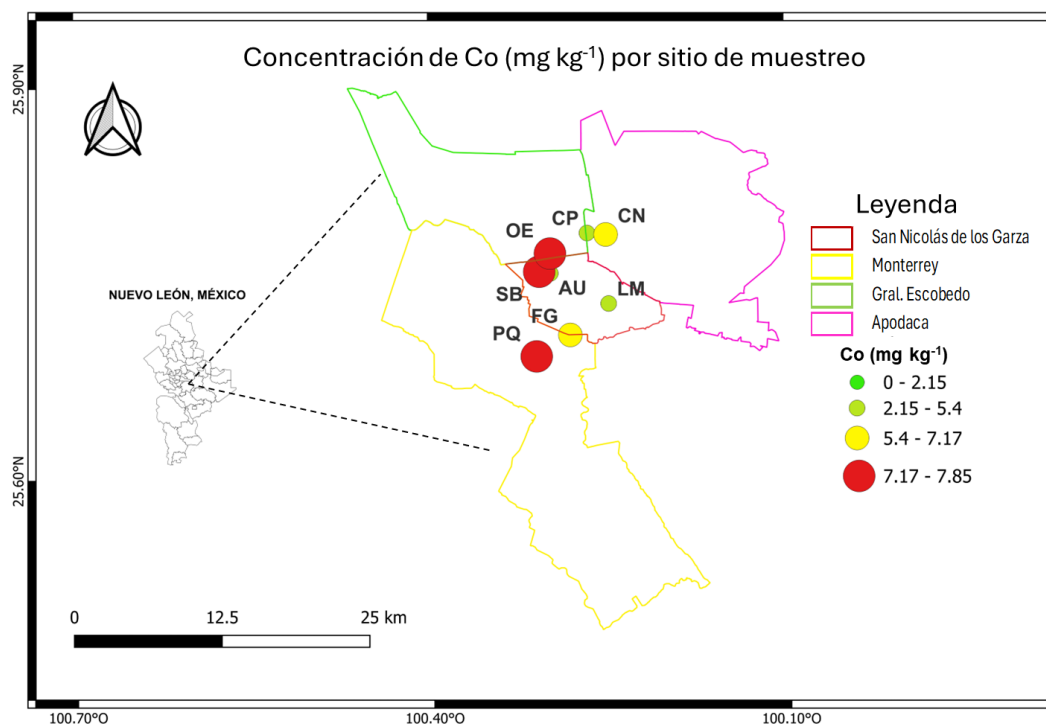


Figura 8. Mapa de concentraciones de Co en los sitios muestreados de suelo urbano/industrial. (Elaboración propia, QGIS Desktop. 3.34.11)

Para Rb se rechazó la H_0 : no existe diferencia significativa entre el valor de Rb y el nivel de fondo ($323.72 \pm 23.72 \text{ mg kg}^{-1}$), con 95% de confianza y $n=2$, para los sitios: PQ ($398.81, \pm, 9.70 \text{ mg kg}^{-1}$), SB ($497.76 \pm 17.79 \text{ mg kg}^{-1}$), MJ ($573.70 \pm 29.33 \text{ mg kg}^{-1}$), LM ($549.73 \pm 18.27 \text{ mg kg}^{-1}$), OE ($502.26 \pm 26.49 \text{ mg kg}^{-1}$) y CN ($454.47 \pm 2.23 \text{ mg kg}^{-1}$); determinándose que existe un aumento estadísticamente significativo de Rb en la ZMM respecto a los niveles de fondo.

En la Figura 10 se encuentra el mapa con los sitios de muestreo indicando las concentraciones de Rb correspondientes. Los puntos con mayor concentración de Rb fueron MJ, LM, OE y SB en los cuales se encuentra

industria manufacturera relacionada con metales y dispositivos electrónicos, el Rb se utiliza en láseres con diferente aplicación como refrigeración láser para máquinas de corte, el cual es ampliamente usado, por lo que dicha actividad industrial puede ser un factor de dispersión del elemento al ambiente.

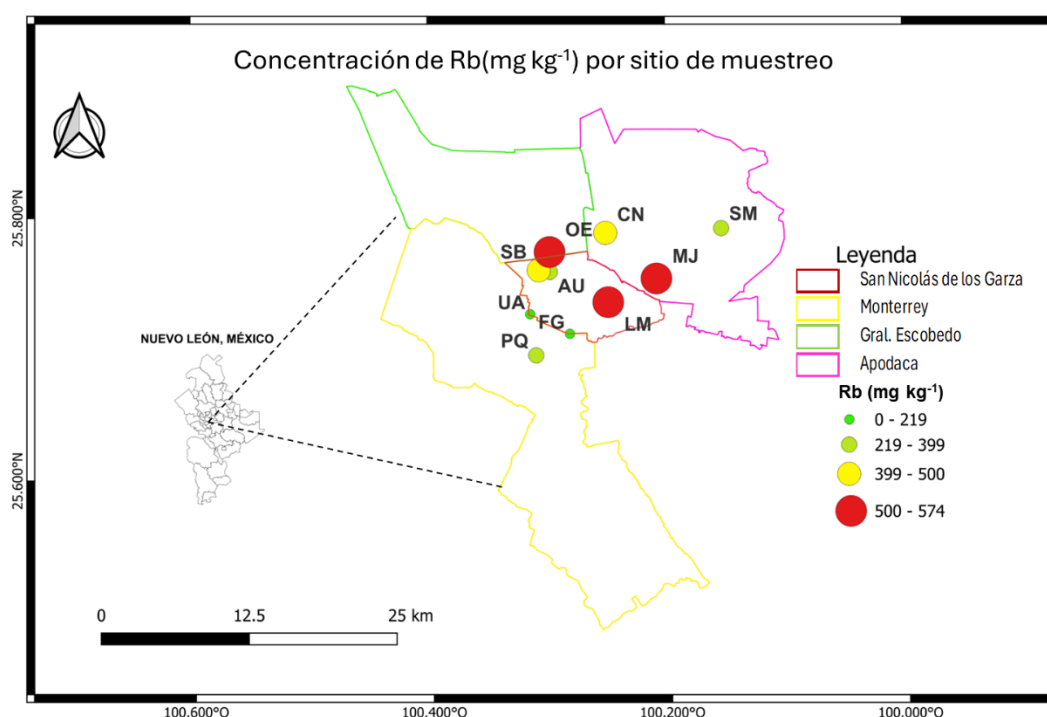


Figura 9. Mapa de concentraciones de Rb en los sitios muestreados de suelo urbano/industrial. (Elaboración propia, QGIS Desktop. 3.34.11).

Para Sb se rechazó la H_0 : no existe diferencia significativa entre el valor de Sb y el nivel de fondo (0.82 ± 0.01 mg kg⁻¹), con 95% de confianza y $n=2$, para los sitios: PQ (6.07 ± 0.28 mg kg⁻¹), UA (3.71 ± 0.05 mg kg⁻¹), AU (1.68 ± 0.01 mg kg⁻¹), SB (2.47 ± 0.02 mg kg⁻¹), OE (4.30 ± 0.18 mg kg⁻¹),

¹), FG ($5.83 \pm 0.59 \text{ mg kg}^{-1}$) y CN ($1.91 \pm 0.11 \text{ mg kg}^{-1}$); determinándose que existe un aumento estadísticamente significativo de Sb en la ZMM respecto a los niveles de fondo.

En la Figura 11 se encuentra el mapa con los sitios de muestreo indicando las concentraciones de Sb correspondientes. Los sitios de mayor concentración fueron PQ y FG, en la zona cercana de estos puntos existe industria relacionada con la fabricación de vidrio y el Sb es un componente del vidrio, por lo que este tipo de actividad industrial puede estar dispersando Sb al ambiente, el sitio OE, UA y el resto de los puntos (SB, CP, CN y AU) son sitios cercanos a avenidas, carreteras de intenso flujo vehicular y actividad industrial relacionada a la metalurgia, estos factores pueden estar dispersando Sb al entorno por sus aplicaciones en aleaciones y baterías de almacenamiento.

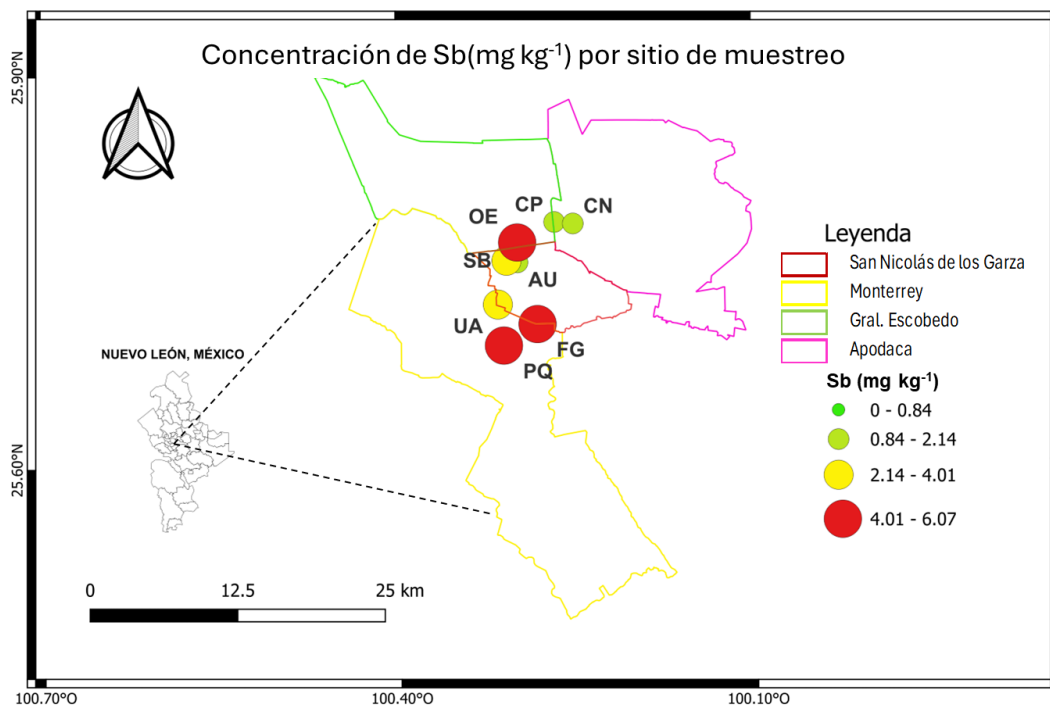


Figura 10. Mapa de concentraciones de Sb en los sitios muestreados de suelo urbano/industrial. (Elaboración propia, QGIS Desktop. 3.34.11)

Para Nd se rechazó la H_0 : no existe diferencia significativa entre el valor de Nd y el nivel de fondo ($9.25 \pm 0.39 \text{ mg kg}^{-1}$), con 95% de confianza y $n=2$, para los sitios: PQ ($13.49 \pm 0.67 \text{ mg kg}^{-1}$), SB ($16.78 \pm 0.37 \text{ mg kg}^{-1}$), CP ($13.56 \pm 0.11 \text{ mg kg}^{-1}$), OE ($20.93 \pm 0.58 \text{ mg kg}^{-1}$) y CN ($17.27 \pm 1.32 \text{ mg kg}^{-1}$); determinándose que existe un aumento estadísticamente significativo de Nd en la ZMM respecto a los niveles de fondo.

En la Figura 12 se encuentra el mapa con los sitios de muestreo indicando las concentraciones de Nd correspondientes. Los sitios de mayor concentración son OE y CN, seguidos por SN, CP y PQ, dichos sitios están localizados cerca de avenidas con alto tráfico vehicular, zonas residenciales y parques industriales. Una de las principales aplicaciones de Nd es en los

imanes de alta resistencia, los cuales tienen una amplia variedad de aplicaciones como en electrodomésticos, dispositivos en maquinaria industrial y automotriz, entre otros [40], por lo que el desgaste y fabricación de estos objetos pueden estar contribuyendo a la acumulación de Nd al ambiente.

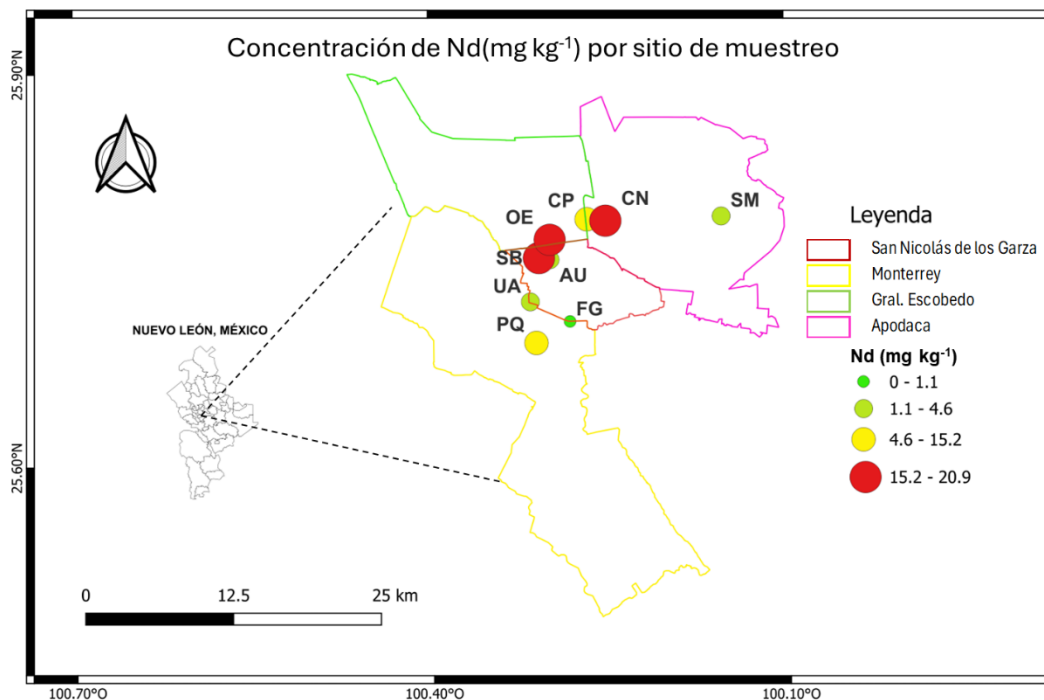


Figura 11. Mapa de concentraciones de Nd en los sitios muestreados de suelo urbano/industrial. (Elaboración propia, QGIS Desktop. 3.34.11)

La, Ce y Th tuvieron concentraciones igual o menor a los niveles de fondo correspondientes (Tabla 27), al no haber un aumento de concentración en suelo urbano/industrial respecto al nivel de fondo correspondiente, no se evaluaron mediante la prueba t para analizar si existe diferencia significativa entre el valor del elemento (La, Ce y Th) y su respectivo nivel de fondo en NL. Sin embargo, los resultados de las concentraciones analizadas pueden

ser una referencia para futuros análisis, ya que su uso en nuevas tecnologías, catalizadores, entre otras, está en aumento [11] y se puede esperar que exista un incremento en las concentraciones de dichos elementos en suelo.

9.4. Dispersión de los elementos en la Zona Metropolitana de Monterrey: análisis estadístico y posibles fuentes.

9.4.1. Tratamiento de análisis de componentes principales

Con la finalidad de comprobar las interrelaciones de los ETC en los puntos de muestreo, los resultados de los elementos presentes en la ZMM que tuvieron diferencia estadísticamente significativa respecto a su nivel de fondo (V, Co, Rb, Sb y Nd) fueron analizados por el estadístico multivariante ACP, el software utilizado fue IBM SPSS. Los resultados de la correlación de Pearson se muestran en la Tabla 28.

Tabla 28. Matriz de correlación de Pearson de los valores de los ETC en suelo urbano/industrial.

	V	Co	Rb	Sb
Co	-0.208			
Rb	-0.088	0.510		
Sb	0.269	0.571	-0.060	
Nd	-0.603	0.838	0.431	0.220

Se encontró una alta correlación entre Co y Nd (0.838), la cual pudiera estar asociada al tráfico vehicular y una correlación moderada negativa entre Nb y V, debido a sus aplicaciones en distintos rubros industriales, ya que V se asocia principalmente al procesamiento y manipulación de acero en múltiples aplicaciones y el Nd a imanes de alta resistencia y aplicaciones en electrodomésticos y en la industria automotriz. Co tuvo una moderada correlación con Sb (0.571) y Rb (0.510), la cual pudiera deberse a sus aplicaciones en los componentes de la industria automotriz.

El método de ACP mostró que dos componentes explican el 77.91% del total de las variables (Tabla 29), lo cual se comprueba con el gráfico de sedimentación, quien muestra que dos variables presentaron autovalor mayor a 1 (Figura A.10, apéndice G). El primer componente explicó el 50.11% de la varianza y estuvo constituido por Nd (0.942), Co (0.940) y Rb (0.601), estos elementos tienen aplicaciones diversas en dispositivos como electrodomésticos y en la industria automotriz, por lo que su uso fomentó su incidencia en sitios cercanos a zonas habitacionales, avenidas y/o carreteras de alto tráfico. El segundo componente explicó el 27.81% de la varianza y fue compuesto por Sb (0.845) y V (0.739), estos elementos tienen entre otras aplicaciones en acero, el cual debido a la fabricación, manipulación y desgaste de productos donde fueron empleados, pueden disipar los elementos al ambiente en sitios como avenidas de alto tráfico, zonas industriales y/o habitacionales.

Tabla 29. Análisis de componentes principales de ETC en sitios de la ZMM.

Elemento	Componente	
	1	2
V	-0.474	0.739
Co	0.940	0.287
Rb	0.601	-0.123
Sb	0.386	0.845
Nd	0.942	-0.183
Varianza (%)	50.106	27.810

La Figura 14 muestra la gráfica de dispersión simple del componente 1 vs componente 2, en la cual se observó la dispersión de los sitios de muestreo que los puntos UA y FG predominan los elementos V y Sb, los cuales representan al componente 2, en dichos sitios se encuentran zonas industriales de acero y de alto tráfico. El componente 1 el cual representa a Nd, Co y Rb, se localizan principalmente en los puntos PQ, SB, OE y CN, los cuales son sitios cercanos a zonas habitacionales y de tráfico vehicular.

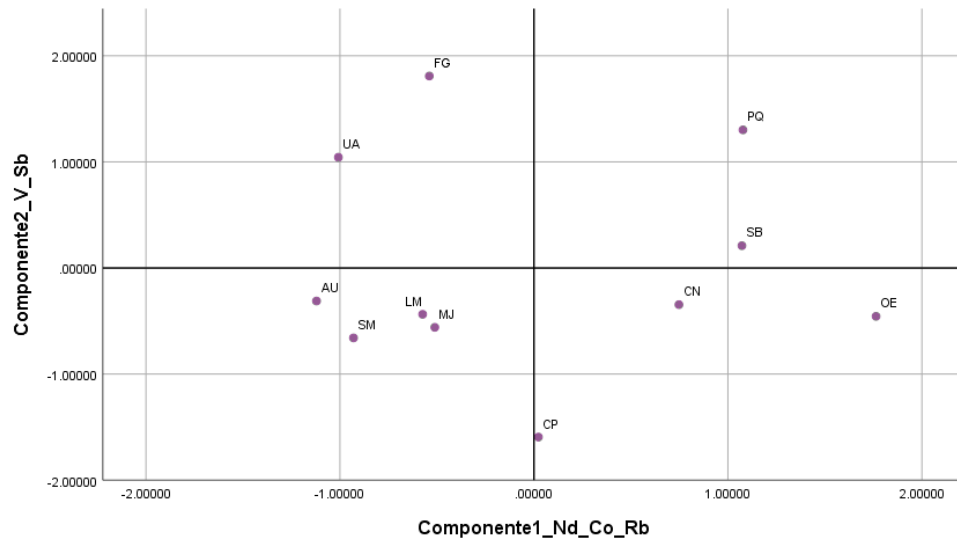


Figura 12. Gráfico de dispersión simple de componente 2 (V, Sb) vs componente 1 (Nd, Co, Rb)

9.5. Índices de impacto al medio ambiente

La presencia de los ETC en el suelo de la ZMM puede representar una amenaza para el medio ambiente. Para evaluar la magnitud de este impacto, se pueden utilizar índices como el riesgo ecológico, potencial, de geoacumulación y el factor de enriquecimiento.

9.5.1. Factor de riesgo ecológico e índice de riesgo ecológico potencial

Con la finalidad de valorar el riesgo ecológico de cada elemento se evaluó el factor de riesgo ecológico (E_r) y para valorar de manera integral la contaminación de los ETC evaluados, se calculó el índice de riesgo ecológico potencial (RI). Se consideraron los elementos V, Co, Sb, La, Ce y Nd cuyos valores de factor de respuesta tóxico (T_r) fueron reportados en bibliografía (Tabla 5). Los resultados se encuentran en la Tabla 30.

Tabla 30. Valores de E_r y RI para los ETC en los sitios muestreados de la ZMM.

Sitio	E_r						RI
	V	Co	Sb	La	Ce	Nd	-
PQ	3.04	2.93	26.39	0.89	0.77	1.90	-
UA	4.60	-	16.14	0.15	0.09	0.30	-
AU	2.80	1.65	7.29	0.26	0.17	0.65	-
SB	3.21	3.00	10.76	0.99	-	2.36	-
FG	4.49	2.28	25.35	0.05	-	0.10	-
MJ	3.07	-	-	-	0.88	-	-
LM	3.39	2.07	-	-	0.35	-	-
CP	-	2.03	9.29	0.90	-	1.91	-
OE	-	2.94	18.73	1.45	-	2.94	-
CN	2.62	2.55	8.29	1.02	0.91	2.43	-
SM	2.24	-	-	0.08	0.05	0.20	-
<i>Suma</i>	<i>29.46</i>	<i>57.01</i>	<i>122.25</i>	<i>5.79</i>	<i>3.22</i>	<i>12.78</i>	<i>230.51</i>

Los elementos V, Co, Sb, La, Ce y Nd presentaron valores de $E_r < 40$, lo que se interpreta como riesgo ecológico bajo. El RI de los elementos evaluados fue de 230.51, el cual se ajusta en el rango de $150 \leq RI < 300$, lo que se expresa como riesgo moderado de contaminación.

La Figura 16 muestra el gráfico de E_r para los elementos estudiados por sitio de muestreo.

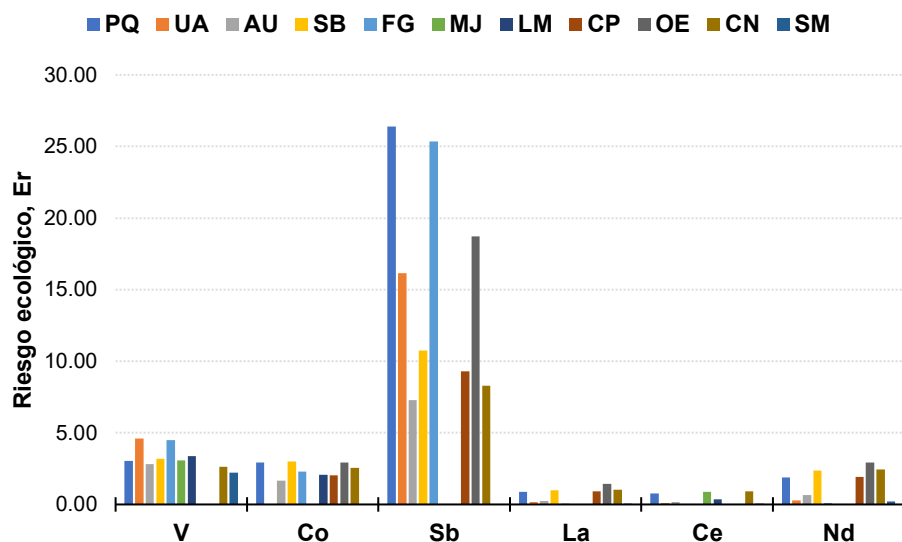


Figura 13. Gráfico de valores de E_r de los ETC evaluados en suelo urbano/industrial de la ZMM.

Sb tuvo valores de E_r más altos entre los elementos evaluados, destacándose los puntos PQ y FG, los cuales están cercanos a industria de fabricación de vidrio y metalurgia, donde el Sb es aplicado. Sb representa más del 50% del valor de RI.

9.5.2. Índice de geoacumulación

Con el objetivo de valorar la contaminación en los sitios de muestreo de la ZMM, se contrastaron las concentraciones de los ETC en la ZMM con los niveles de fondo, mediante la evaluación del índice de geoacumulación, I_{geo} , de los elementos. Los resultados se encuentran en la Tabla 31 y la

Figura 17 muestra el gráfico con los valores de I_{geo} por elemento para cada sitio de muestreo.

Tabla 31. Valor de I_{geo} de los ETC en sitios de muestreo de la ZMM.

Sitio	V	Co	Rb	Sb	La	Ce	Nd	Th
PQ	0.02	-0.48	-0.30	1.81	-0.75	-0.97	-0.66	-
UA	0.62	-	-1.16	1.11	-3.29	-4.07	-3.33	-
AU	-0.10	-1.31	-0.34	-0.04	-2.51	-3.13	-2.21	-
SB	0.10	-0.45	0.02	0.52	-0.61	-	-0.35	-
FG	0.58	-0.84	-1.74	1.76	-5.02	-	-4.84	-
MJ	0.03	-	0.23	-	-	-0.77	-	-
LM	0.18	-0.99	0.17	-	-	-2.09	-	-0.78
CP	-	-1.02	-	0.31	-0.73	-	-0.65	-
OE	-	-0.48	0.04	1.32	-0.05	-	-0.03	-
CN	-0.20	-0.68	-0.11	0.14	-0.56	-0.72	-0.31	-4.17
SM	-0.42	-	-1.16	-	-4.30	-4.92	-3.93	-

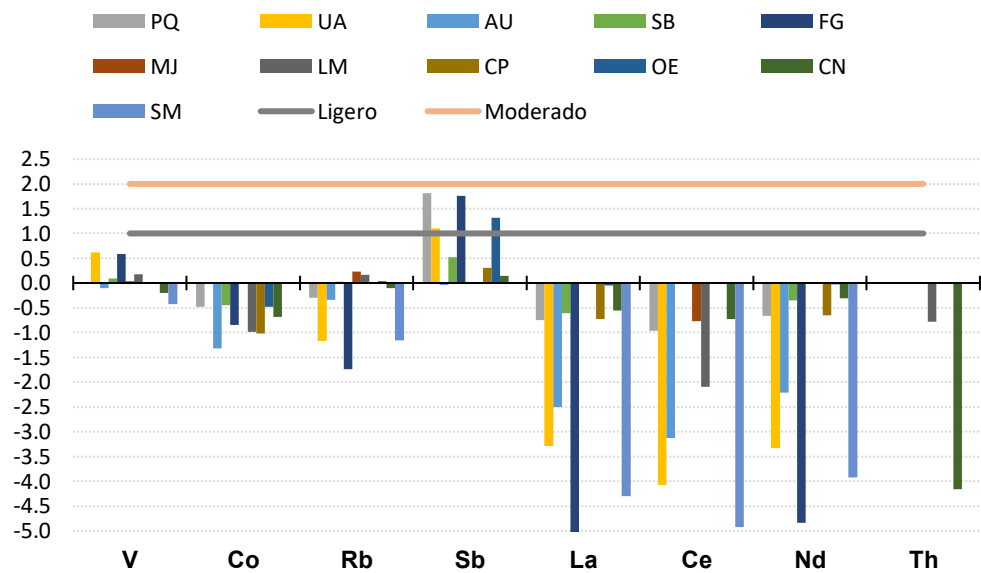


Figura 14. Gráfico de valores de I_{geo} por elemento en suelo urbano/industrial de la ZMM. Ligero: $0 < I_{geo} \leq 1$, ligeramente contaminado. Moderado: $1 < I_{geo} \leq 2$ moderadamente contaminado

El suelo de los sitios PQ, UA, FG y OE para Sb tuvieron I_{geo} en el rango de $1 < I_{geo} \leq 2$, por lo que se consideraron moderadamente contaminados. Los sitios SB, CP y CN se encontraron en el rango de $0 < I_{geo} \leq 1$, por lo que sugieren como ligeramente contaminados. Estos resultados demostraron que el uso del Sb en actividades industriales relacionadas al vidrio y la metalurgia, así como el desgaste de componentes automotrices, han generado acumulación en el suelo contribuyendo de esta manera a contaminación de ligera a moderada. Los sitios MJ, AU, LM y SM se evaluaron como no contaminados al tener $I_{geo} \leq 0$.

Rb en los puntos SB, MJ, LM y OE presentó valores de I_{geo} en el rango de $0 < I_{geo} \leq 1$, por lo que estos sitios se consideran ligeramente contaminados. De esta manera se evidencia que la industria relacionada a dispositivos electrónicos y la metalurgia generó contaminación en el suelo. Los sitios restantes se calificaron como no contaminados al tener $I_{geo} \leq 0$.

V en los puntos PQ, UA, SB, FG, MJ y LM presentó valores de I_{geo} en el rango de $0 < I_{geo} \leq 1$, por lo que estos sitios se consideran ligeramente contaminados, lo que demuestra que la actividad industrial relacionada al acero y el uso del elemento en diversas aplicaciones genera contaminación ligera en el suelo cercano a la industria concerniente y en carreteras y/o avenidas de alto tráfico.

En el caso del Co y Nd, aunque presentaron concentraciones superiores a los niveles de fondo en algunos sitios muestreados, este diferencial en las concentraciones no representa contaminación de acuerdo con el valor

obtenido de I_{geo} el cual fue menor a cero, por lo tanto, se consideraron como no contaminados.

La, Ce y Th, en todos los sitios muestreados presentaron valor de $I_{geo} \leq 0$, por lo que se consideraron suelos no contaminados, debido a que las concentraciones halladas de estos elementos estuvieron igual o menores a los niveles de fondo.

9.5.3. Factor de enriquecimiento

Con el propósito de valorar el incremento de los ETC en la ZMM debido a actividades antropogénicas en relación con el nivel de fondo, se evaluó el factor de enriquecimiento (EF). El elemento de referencia utilizado fue Mn (los datos de validación del método para Mn se encuentran en el Apéndice D). Los resultados se encuentran en la Tabla 32 y la Figura 18 muestra el gráfico con los valores de EF para cada elemento por sitio de muestreo.

Tabla 32. EF de los sitios de muestreo en la ZMM.

Sítio	V	Co	Rb	Sb	La	Ce	Nd	Th
PQ	1.1	0.8	0.9	6.2	0.5	0.9	0.7	-
UA	1.5	-	0.4	3.4	0.1	0.1	0.1	-
AU	1.5	0.6	1.3	2.4	0.2	0.3	0.3	-
SB	0.2	0.2	0.2	0.5	0.1	-	0.2	-
FG	0.9	0.3	0.2	3.1	0.0	-	0.0	-
MJ	1.3	-	1.5	-	-	1.2	-	-
LM	1.5	0.7	1.5	-	-	0.5	-	0.8
CP	-	0.9	-	3.5	0.9	-	1.2	-
OE	-	1.0	1.4	5.5	1.1	-	1.4	-
CN	1.5	1.1	1.6	3.0	0.9	1.7	1.4	0.1
SM	0.2	-	0.1	-	0.0	0.0	0.0	-

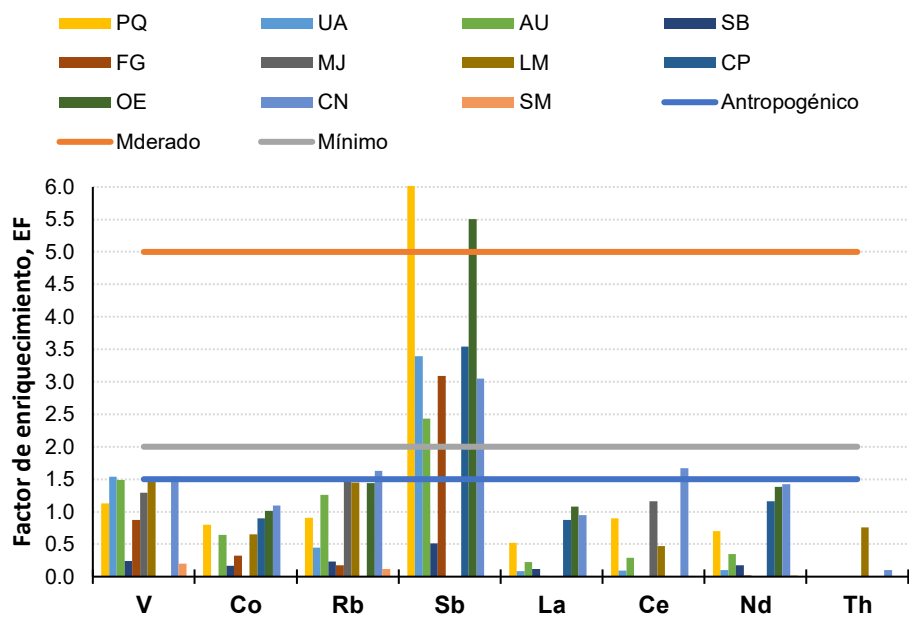


Figura 15. Gráfico de valores de EF por elemento en la ZMM. Ligero: $EF > 1.5$, enriquecimiento por causas antropogénicas. Mínimo: $2 < EF \leq 5$ enriquecimiento moderado. Moderado: $5 < EF \leq 20$ enriquecimiento moderado.

El aumento de concentración de Sb en los sitios PQ, UA, AU, FG, MJ, LM, CP, OE, CN y SM fue debido a actividades antropogénicas relacionadas a su aplicación en la industria del vidrio y la metalurgia ya que presentaron valores de EF superiores a 1.5. El valor de EF para Sb para los puntos PQ y OE se encuentra en el rango $5 \leq EF < 20$, lo que indica enriquecimiento significativo. Sb en los puntos UA, AU, FG, CP y CN presentó un enriquecimiento moderado ya que tuvieron valores en el rango $2 \leq EF < 5$. En el caso del sitio SB, el EF fue menor a 2, por lo que se considera enriquecimiento mínimo, además de ser un proceso natural al tener valor menor a 1.5.

Se considera que el aumento de la concentración de V en los sitios UA, AU, LM y CN es debido a actividades antropogénicas involucradas en su uso en la industria del acero, maquinaria y desgaste automotriz, ya que presentaron valor de $EF > 1.5$. Para los puntos PQ, UA, AU, SB, FG, MJ, LM, CN Y SM se considera enriquecimiento mínimo al tener $EF < 2$.

Rb en los sitios MJ, LM y CN tuvo un valor de $EF \geq 1$ lo que indica que el incremento en la concentración en estos sitios fue principalmente por actividades antropogénicas implicadas en dispositivos electrónicos y maquinaria. Rb en los sitios PQ, UA, AU, SB, FG y OE presentó $EF < 2$, por lo que se valora con enriquecimiento mínimo.

Ce en el sitio CN tuvo un valor de $EF > 1.5$, lo que indica que el incremento en la concentración en este punto, el cual es cerca de zona residencial y avenida de alto tráfico, se debe a actividad antropogénica por su uso

en catalizadores. En los sitios PQ, UA, AU, MJ, LM, CN y SM presentó un valor de EF < 2, por lo que se consideran con enriquecimiento mínimo.

Nd en los sitios OE y CN presentó un valor de EF de 1.4, el cual es muy cercano al valor criterio de 1.5 para ser considerado enriquecimiento antropogénico, sin embargo, cabe destacar que está muy próximo a que el incremento en la concentración de Nd en estos puntos sea por actividades humanas, debido a su aplicación en imanes de alta resistencia en zonas cercanas a alto tráfico vehicular. Se considera que el enriquecimiento en los sitios PQ, UA, AU, SB, FG, CP, OE, CN y SM es mínimo por su valor de EF < 2.

La, Co y Th presentaron en los sitios muestreados valores de EF < 2, por lo que se consideran con enriquecimiento mínimo. Además, al ser valores menores a 1.5, la presencia de los elementos se atribuye a fuentes naturales.

9.6. Índices de impacto a la salud

La presencia de los ETC en el suelo de la ZMM puede representar una amenaza para la salud, por lo que para evaluar la magnitud de este impacto se pueden utilizar índices como cociente de riesgo, índice de riesgo y riesgo carcinogénico.

9.6.1. Cociente de riesgo

Para determinar el riesgo que puede existir de que los ETC no carcinogénicos expuestos vía ingestión, inhalación y/o contacto, se puede medir el cociente de riesgo (HQ). Los elementos Co, Rb, Sb, Nd, Ce y La presentaron valores de $HQ \leq 1$, por lo que se consideran que la presencia del contaminante en suelo no representa un riesgo a la salud por ingesta, inhalación o contacto en niños y/o adultos. Los resultados para dichos elementos se encuentran en el Apéndice F. Los valores de ADD para el cálculo de los índices, se encuentran en el Apéndice E.

Los resultados de HQ para V se encuentran en la Tabla 33. V en los sitios UA, FG, LM, SB, MJ y PQ tuvo valores $HQ \geq 1$ de ingesta en niños, lo que sugiere que el nivel de exposición al contaminante puede representar un riesgo para la salud para niños por dicha vía de exposición. Dichos puntos son principalmente zonas industriales y con alto tráfico. Los sitios UA, PQ y FG además de estar cercanos a la industria de acero y alto tráfico se encuentran cercana de zonas habitacionales y escuelas, lo que incrementa el riesgo de exposición de V en niños. En los sitios AU, CN y SM, los resultados fueron $HQ < 1$ en ingesta para niños, lo que muestra que el nivel de exposición al contaminante (V) es considerado seguro, sin embargo, estuvieron próximos a 1, lo que apunta que la exposición podría estar cerca del comienzo de efectos adversos. Por otro lado, los puntos AU y CN están contiguos a zonas habitacionales, parques y escuelas.

Tabla 33. Valores de HQ para V por sitio de muestreo

Sitio	<i>HQ_{ing child}</i>	<i>HQ_{ing adult}</i>	<i>HQ_{inh child}</i>	<i>HQ_{inh adult}</i>	<i>HQ_{derm child}</i>	<i>HQ_{derm adult}</i>
V						
PQ	1.02	0.14	2.86E-05	1.29E-05	0.29	0.04
UA	1.54	0.21	4.33E-05	1.95E-05	0.43	0.06
AU	0.94	0.13	2.64E-05	1.19E-05	0.26	0.04
SB	1.08	0.14	3.02E-05	1.36E-05	0.30	0.04
FG	1.51	0.20	4.23E-05	1.90E-05	0.42	0.06
MJ	1.03	0.14	2.89E-05	1.30E-05	0.29	0.04
LM	1.14	0.15	3.19E-05	1.44E-05	0.32	0.05
CN	0.88	0.12	2.47E-05	1.11E-05	0.25	0.04
SM	0.75	0.10	2.11E-05	9.48E-06	0.21	0.03

9.6.2. Índice de riesgo

Para la evaluación del riesgo de los ETC no carcinogénicos se calculó el índice de riesgo (HI), el cual es una estimación integral de los efectos de los elementos en la salud para niños y adultos. El valor calculado de HI para niños fue de 15.61, es decir, $HI \geq 1$, por lo que el riesgo de los ETC para la salud en niños se consideró inaceptable. En el caso de los adultos el valor de HI fue de 0.41, es decir, $HI < 1$, por lo que el riesgo de los ETC para la salud en adultos se consideró aceptable.

9.6.3. Riesgo carcinogénico

Con la finalidad de valorar el riesgo carcinogénico de los ETC se evaluó el índice de riesgo carcinogénico (CR) para los elementos Co, La, Ce y Nd, cuyo valor de SF se encontró reportado en bibliografía (Tabla 4). Los resultados se encuentran en la Tabla 34 y la Figura 19 muestra la gráfica con los resultados de CR para Co vs sitio de muestreo. Los valores de LADD para el cálculo de los índices, se localizan en el Apéndice E.

Tabla 34. Valores de CR de ingesta e inhalación para los ETC en la ZMM.

Sitio	Co	Nd		Ce		La	
	CR _{inh}	CR _{ing}	CR _{inh}	CR _{ing}	CR _{inh}	CR _{ing}	CR _{inh}
PQ	5.62	3.74E-11	5.55E-12	9.98E-11	1.48E-11	5.37E-11	7.97E-12
UA	-	5.89E-12	8.74E-13	1.16E-11	1.72E-12	9.29E-12	1.38E-12
AU	3.16	1.28E-11	1.89E-12	2.24E-11	3.32E-12	1.59E-11	2.37E-12
SB	5.75	4.65E-11	6.90E-12	-	-	5.95E-11	8.84E-12
FG	4.37	2.06E-12	3.06E-13	-	-	2.78E-12	4.13E-13
MJ	-	-	-	1.14E-10	1.69E-11	-	-
LM	3.96	-	-	4.57E-11	6.78E-12	-	-
CP	3.88	3.76E-11	5.58E-12	-	-	5.45E-11	8.09E-12
OE	5.64	5.80E-11	8.61E-12	-	-	8.77E-11	1.30E-11
CN	4.89	4.79E-11	7.10E-12	1.18E-10	1.75E-11	6.16E-11	9.14E-12
SM	-	3.89E-12	5.77E-13	6.44E-12	9.56E-13	4.60E-12	6.82E-13

*CR_{inh}: Riesgo carcinogénico de inhalación, CR_{ing}: riesgo carcinogénico de ingesta.

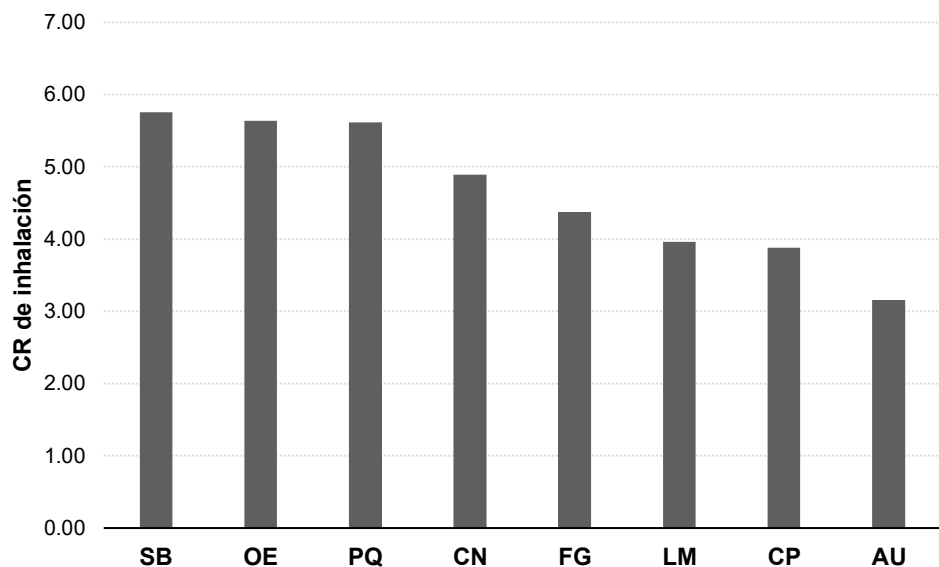


Figura 16. Valores de CR en suelo urbano/industrial de la ZMM para Co por sitio de muestreo.

El elemento Co presentó valores de CR de inhalación por encima del rango $1 \times 10^{-6} - 1 \times 10^{-4}$, por lo que se considera que existe la posibilidad de riesgo de cáncer por inhalación en los sitios SB, OE, PQ, CN, FG, LM, CP y AU. En dichos sitios existe tráfico vehicular intenso, industria relacionada a pigmentos y zonas residenciales, al haber una importante densidad demográfica, la inhalación de Co puede poner en riesgo de cáncer y afectar la salud humana.

Los elementos Nd, Ce y La presentaron valores de CR de ingesta y/o de inhalación por debajo del rango $1 \times 10^{-6} - 1 \times 10^{-4}$, por lo que se considera sin riesgo de posibilidad de cáncer en los sitios muestreados de la ZMM.

10. CONCLUSIONES

- Se establecieron los niveles de fondo norte para V, Co, Rb, Sb, Nd y Th, y fondo sur para La y Ce. Los resultados se obtuvieron con buena precisión al tener DSR entre 0.39 y 4.41% (n=2). Respecto a los valores de la corteza terrestre reportados en bibliografía, los elementos Sb, Nd y Th presentaron valores similares o ligeramente menores, Co, La y Ce tuvieron concentraciones menores y los elementos V y Rb presentaron valores mayores. En cuanto a los valores de concentración reportados en otros países como China y Polonia, Nd, Co, La y Ce tuvieron valores de nivel de fondo menores, Sb fue similar y V resultó superior.

- En el suelo urbano/industrial de la ZMM, los elementos V, Co, Rb, Sb y Nd presentaron valores de concentración superiores a los niveles de fondo de NL, ya que se encontró diferencia significativa entre las concentraciones de los ETC evaluados respecto a los niveles de fondo, con n=2 y un 95% de confianza. Ce, La y Th tuvieron concentraciones (mg kg^{-1}) menores o igual a los niveles de fondo.

- Los sitios de suelo urbano/industrial con mayores valores de V se encontraron principalmente en puntos cercanos a industria relacionada con elaboración y manufactura de acero debido a su uso como materia prima en dicho rubro; además se halló en concentraciones elevadas en lugares cercanos a alto tráfico vehicular debido al desgaste de componentes

automotrices. Co se halló principalmente en zonas industriales relacionadas con pigmentos y colorantes, además de avenidas de alto tráfico, debido a su aplicación en la elaboración de pinturas y por el desgaste de artículos que utilizan pigmentos con Co. Rb se localizó en sitios cercanos a la industria manufacturera relacionada con metales y dispositivos electrónicos a consecuencia de su uso en dispositivos usados en este tipo de actividad. Sb se encontró en sitios cercanos a industria del vidrio y del acero debido a su empleo como aditivo de dichos rubros. Nd se identificó en zonas cercanas a avenidas y áreas residenciales a consecuencia de su uso en aparatos y equipos electrónicos que utilizan imanes de Nd. Lo anterior indica que la industria relacionada al acero, alto tráfico vehicular y las aplicaciones de los ETC en equipos y aparatos electrónicos de uso cotidiano, han provocado un incremento de los elementos en el suelo.

- La, Ce y Th, aun cuando si se hallaron en suelo de la ZMM, sus concentraciones estuvieron iguales o menores a las encontradas en los niveles de fondo, a pesar de ello los datos obtenidos son una referencia para su futuro análisis y revisión de posible acumulamiento en suelo urbano/industrial debido a su amplio y creciente uso en nuevas tecnologías.

- El estudio del ACP mostró que V y Sb (componente 2) coinciden en los puntos UA y FG, debido a que tienen como una de sus principales aplicaciones el ser materias primas en la elaboración de acero, por lo que desde su fabricación, manipulación y desgaste de productos donde fue empleado el acero, los elementos pudieron ser disipados al ambiente en sitios

como avenidas de alto tráfico, zonas industriales y/o habitacionales similares. Los elementos Nd, Co y Rb (componente 1) coinciden en los sitios PQ, SB, OE y CN, debido a tienen aplicaciones en dispositivos como electrodomésticos y en la industria automotriz, lo que confirma su incidencia en sitios cercanos a zonas habitacionales avenidas y/o carreteras de alto tráfico.

- Los suelos de la ZMM, de fondo norte y fondo sur de NL presentaron pH neutro y baja CE (salinidad despreciable), estos resultados son derivación del tipo de mineralogía encontrada por DRX, la cual fue similar entre los suelos de niveles de fondo y de la ZMM, y estuvo compuesta principalmente por silicatos como cuarzo, calcita magnesia, esmectitas, plagioclasas y micas. Por otro lado, el contenido de MO en los sitios analizados fue entre medio y alto, los cuales corresponden a los tipos de suelo de las áreas muestreadas y en conjunto con el pH neutro, puede no favorecer a la movilidad de los ETC en el suelo.

- El efecto del aumento de las concentraciones de los ETC presentó repercusiones ambientales en el suelo urbano/industrial de la ZMM, como se puede ver con el índice EF, para el cual Sb tuvo desde enriquecimiento mínimo, significativo y moderado en algunos sitios, asociado a actividades antropogénicas y naturales. V, Ce, Nd y Rb mostraron enriquecimiento mínimo, debido a actividades naturales y antropogénicas. Los elementos La, Co y Th presentaron enriquecimiento mínimo debido a actividades naturales. Según el valor de I_{geo} , los elementos Sb y Rb tuvieron sitios no contaminados, ligera y moderadamente contaminados, V mostró sitios considerados

como ligeramente contaminados. La, Ce, Th, Co y Nd presentaron valores considerados como no contaminado. Los ETC mostraron de manera individual, según el valor de Er, riesgo ecológico bajo, a pesar de ello, de manera integral el valor de RI mostró riesgo ecológico moderado. Comprobándose de esta manera que las actividades antropogénicas relacionadas con los ETC en este estudio representan un riesgo al ambiente.

- El riesgo a la salud por exposición de los ETC para no carcinogénicos mostró que el valor de HQ de ingesta en niños por V, puede resultar en efectos adversos a la salud. De manera integral, el índice HI para la salud en niños se consideró inaceptable. En adultos el valor de HI se consideró aceptable. En cuanto el riesgo carcinogénico de los ETC el elemento Co presentó valores de CR fuera del rango de criterio por lo que se considera que existe la posibilidad de riesgo de cáncer por Co por inhalación.

- Se establecieron las curvas de calibración y ecuaciones de la recta para los elementos V, Co, Rb, Sb, La, Ce, Nd y Th, con rango lineal entre 0.1 y 100.86 $\mu\text{g kg}^{-1}$, LOD entre 0.32 y 3.27 $\mu\text{g kg}^{-1}$, LOQ entre 1.07 y 16.51 $\mu\text{g kg}^{-1}$ y $R^2 = 0.9999$.

- El método se validó con los materiales certificados MCR 2710 y MCR 2711_a para los elementos V, Co, Rb, Sb, La, Ce, Nd y Th encontrándose precisión con %DSR menores a 5% para ambos materiales de referencia. La exactitud se confirmó con porcentajes de recuperación para MCR 2710, los cuales fueron entre 99.50 y 113.90% para los elementos V, Co, Rb, Sb, La, Ce, Nd y Th. El MCR 2711_a presentó recuperaciones entre 79.97

y 112.50% para los elementos V, Co, Sb, La, Ce, Nd y Th. La prueba t comprobó que no existió diferencia significativa entre el valor reportado en el certificado del material de referencia MCR 2711_a, y el valor obtenido en el análisis de los elementos V, Co, Rb, La, Ce, Nd y Th, con $n=2$ y 95% de confianza. Por lo que el método se considera con especificidad, precisión y exactitud.

11. REFERENCIAS

- [1] A. Romero-Freire, J. Santos-Echeandía, P. Neira, and A. Cobelo-García. **(2019)**. Less-studied technology-critical elements (Nb, Ta, Ga, In, Ge, Te) in the marine environment: Review on their concentrations in water and organisms, *Frontiers Media S.A.* 6:532. <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00532>.
- [2] USGS (United States Geological Survey). Recuperado el 10/04/2025 de <https://www.usgs.gov/news/national-news-release/us-geological-survey-releases-2022-list-critical-minerals>.
- [3] N. Nawrot, E. Wojciechowska, S. Rezanía, J. Walkusz-Miotk, and K. Pazdro. **(2020)**. The effects of urban vehicle traffic on heavy metal contamination in road sweeping waste and bottom sediments of retention tanks, *Science of the Total Environment*, vol. 749. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141511>.
- [4] J. Matschullat, R. Ottenstein, and C. Reimann. **(2000)**. Geochemical background can we calculate it? *Environmental Geology Springer-Verlag*, Vol.39 (9), 990 -1000. <https://doi.org/10.1007/s002549900084>.
- [5] T. Nakyai, M. Santasnachok, A. Thetkathuek, and N. Phatrabuddha. **(2025)** Influence of meteorological factors on air pollution and health risks: A comparative analysis of industrial and urban areas in Chonburi Province, Thailand. *Environmental Advances*, vol. 19. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2024.100608>.

- [6] INEGI (*Instituto Nacional de Estadística y Geografía*). Recuperado el 10/03/23 de <https://cuentame.inegi.org.mx/>.
- [7] INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). **(2022)**. Encuesta nacional sobre disponibilidad y uso de tecnologías de la información de los hogares. *ENDUTIH_21 Comunicado de Prensa*. Num. 350, 1-19. Recuperado el 10/03/23 https://www.inegi.org.mx/contenidos/salade-prensa/boletines/2022/OtrTemEcon/ENDUTIH_21.pdf.
- [8] INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). **(2016)**. *Estructura económica de Nuevo León, en síntesis*. Vol. 2, 1- 25. Recuperado el 12/05/23 de https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_es-truc/702825090029.pdf.
- [9] INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). **(2010)**. *Compendio de información geográfica, Monterrey, N.L.* Recuperado el 15/05/24 de https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/19/19039.pdf.
- [10] G. Sun, Z. Li, T. Liu, J. Chen, T. Wu, and X. Feng. **(2017)**. Rare earth elements in street dust and associated health risk in a municipal industrial base of central China. *Environ Geochem Health*, vol. 39, no. 6, pp. 1469–1486. <https://doi.org/10.1007/s10653-017-9982-x>.
- [11] P. Nuss and G. A. Blengini. **(2018)**. Towards better monitoring of technology critical elements in Europe: Coupling of natural and anthropogenic

- cycles. *Science of The Total Environment*, vol. 613–614, pp. 569–578. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.117>.
- [12] R. Urrutia-Goyes, N. Hernandez, O. Carrillo-Gamboa, K. D. P. Nigam, and N. Ornelas-Soto. **(2018)**. Street dust from a heavily populated and industrialized city: Evaluation of spatial distribution, origins, pollution, ecological risks and human health repercussions. *Ecotoxicol Environ Saf*, vol. 159, pp. 198–204, <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.04.054>
- [13] R. K. Enang, B. P. K. Yerima, G. K. Kome, and E. Van Ranst. **(2018)** Assessing the Effectiveness of the Walkley-Black Method for Soil Organic Carbon Determination in Tephra Soils of Cameroon. *Commun Soil Sci Plant Anal*, vol. 49, no. 19, pp. 2379–2386. <https://doi.org/10.1080/00103624.2018.1510948>.
- [14] I. Ratefinjanahary, R. MacKenzie, S. Sharma, H. Razakamanarivo, V. Razafintsalama, K. Ravelosamiariniriana, A. Welti, N. Ramifehiarivo. **(2025)**. Development of soil organic carbon quantification model and comparison based on CHN analyser, Loss on Ignition, and Walkley-Black methods for mangrove soils in Madagascar. *Estuar Coast Shelf Sci*, vol. 317, p. 109182. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2025.109182>.
- [15] Cobelo-García, A., Filella, M., Croot, P. **(2015)**. COST action TD1407: network on technology critical elements (NOTICE) from environmental processes to human health threats. *Environmental Science and Pollution*

Research, vol. 22, no. 19, pp. 15188–15194.
<https://doi.org/10.1007/s11356-015-5221-0>.

- [16] D. H. Dang, M. Filella, and D. Omanović. **(2021)**. Technology Critical Elements: An Emerging and Vital Resource that Requires more In-depth Investigation. *Archives Environment Contamination and Toxicology*, vol. 81, no. 4, pp. 517–520. <https://doi.org/10.1007/s00244-021-00892-6>.
- [17] USDA, Natural Resources Conservation Service, U.S. Department of Agriculture. *Soil Health. Recuperado el 23/06/24 de* <https://www.nrcs.usda.gov/conservation-basics/natural-resourcesconcerns/soils/soil-health>.
- [18] Bleam F. William. **(2012)**. Risk Assessment. En *Soil and Environmental Chemistry* (pp. 409 – 444) Academic Press.
- [19] White M. William, Casey H. William, Marty Bernard. **(2018)**. *Encyclopedia a comprehensive reference source on the chemistry of the earth geochemistry* Associate Editors.” [Online]. Available: <http://www.springerlink.com/reference-works/>
- [20] Jangirh, R., Mondal, A., Yadav, P. *et al.* **(2024)**. Characterization of Road Dust in Delhi: Heavy Metal Analysis, Health Risks, and Sustainability Implications. *Aerosol Science and Eng.* 8, 414–425. <https://doi.org/10.1007/s41810-024-00231-x>.
- [21] S. Soltani-Gerdefaramarzi, M. Ghasemi, and M. Gheysouri. **(2021)** Pollution, human health risk assessment and spatial distribution of toxic metals

- in urban soil of Yazd City, Iran. *Environ Geochem Health*, vol. 43, no. 9, pp. 3469–3484. <https://doi.org/10.1007/s10653-021-00844-y>.
- [22] R. J. Rakib, M. B. Hossain, Y. N. Jolly, S. Akther, and S. Islam. (2022). “EDXRF Detection of Trace Elements in Salt Marsh Sediment of Bangladesh and Probabilistic Ecological Risk Assessment. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, 31 (2), 220–239. <https://doi.org/10.1080/15320383.2021.1923644>.
- [23] A. Saha, B. Sen Gupta, S. Patidar, and N. Martínez-Villegas (2022). Evaluation of Potential Ecological Risk Index of Toxic Metals Contamination in the Soils. *Chemistry Proceedings*, 10(1), 59. <https://doi.org/10.3390/IOCAG2022-12214>.
- [24] G. Sappa, M. Barbieri, and F. Andrei. (2020). Assessment of trace elements natural enrichment in topsoil by some Italian case studies. *SN Appl Sci*, vol. 2, no. 8. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-03214-y>.
- [25] A. I. Ivaneev, A. S. Brzhezinskiy, V. K. Karandashev, M. S. Ermolin, and P. S. Fedotov. (2023). Assessment of sources, environmental, ecological, and health risks of potentially toxic elements in urban dust of Moscow megacity, Russia. *Chemosphere*, vol. 321. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138142>.
- [26] Barbieri, M. (2016). The Importance of Enrichment Factor (EF) and Geoaccumulation Index (Igeo) to Evaluate the Soil Contamination. *Journal of*

Geology & Geophysics, vol. 5, no. 1. <http://dx.doi.org/10.4172/2381-8719.1000237>.

- [27] Dat, N. D., Nguyen, L. S. P., Vo, T. D., Van Nguyen, T., Do, T. T. L., Tran, A. T. K., & Hoang, N. T. **(2023)**. Pollution characteristics, associated risks, and possible sources of heavy metals in road dust collected from different areas of a metropolis in Vietnam. *Environmental geochemistry and health*, 45(11), 7889–7907. <https://doi.org/10.1007/s10653-023-01696-4>.
- [28] Skoog, D. A., Holler, F. J. and Crouch, S. R. **(2008)**. *Principios de análisis instrumental*. (6ta. Ed.) Cengage Learning.
- [29] Ríos-Lugo. M. A., Hernández-Mendoza, H. **(2020)** Fundamentos teóricos de ICP-MS y su importancia en el análisis de elementos tóxicos en agua subterránea. *Glosa, Revista de Divulgación*. Año 8. No 14, 4-15.
- [30] Lozano, J.L., Vilchis, J. S., Torres, P. T. **(2020)** S. Estudio del impacto de la urbanización en la Zona Metropolitana de Monterrey sobre la calidad del aire. *Centro Mario Molina para estudios estratégicos sobre energía y medio ambiente*. Recuperado el 25/03/25 de https://aire.nl.gob.mx/docs/reportes/Impacto_de_la_urbanizaci%C3%B3n.pdf.
- [31] INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). **(2016)**. *Estructura económica de Nuevo León, en síntesis*. Vol. 2, 1- 25. Recuperado el 12/05/23 de

https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/702825090029.pdf.

- [32] INEGI (*Instituto Nacional de Estadística y Geografía*). Recuperado el 10/03/23 de <https://cuentame.inegi.org.mx/>.
- [33] Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. **(2004)**. Norma Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-200. Criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Diario Oficial de la Federación, México. 2 de marzo de 2007.
- [34] USDA, National Resources Conservation Service. **(2011)**. Soil Quality Indicators Soil Electrical Conductivity. Recuperado el 28/01/25 de <https://www.nrcs.usda.gov/sites/default/files/202210/Soil%20Electrical%20Conductivity.pdf>.
- [35] Sparks, D.L. **(2019)**. Fundamentals of Soil Chemistry. In Encyclopedia of Water, P. Maurice (Ed.). <https://doi.org/10.1002/9781119300762.wsts0025>.
- [36] L. Chen, B. Ren, X. Deng, W. Yin, Q. Xie, and Z. Cai. **(2024)**. Potential toxic heavy metals in village rainwater runoff of antimony mining area, China: Distribution, pollution sources, and risk assessment. *Science of*

the Total Environment, vol. 920, <https://doi.org/10.1016/j.sci-totenv.2024.170702>.

- [37] INEGI (*Instituto Nacional de Estadística y Geografía*). (2021). Mapa del Estado de Nuevo León. *Shapes de México*. Recuperado el 27/03/25 de <https://shapesdemexico.wixsite.com/shapes/galeria?pgid=l6d3zszw-e1422429-61aa-4ff7-821f-342d0b686828>.
- [38] Miller, N.J. and Miller, J.C. (2005). Statistics and chemometrics for analytical chemistry. (5ta. Ed.). Pearson/Prentice Hall.
- [39] Agilent Technologies. (2016). *Tabla de Abundancia Isotópica Relativa*. Recuperado el 16/02/25 de <https://www.duratec.de/images/produkte-neu/spektroskopie/elementaranalyse/AGILENT-ICP-MS-Table.pdf>.
- [40] Liu, Z., Lv, Y., Wang, S., Liu, B. (2024). A facile process for the efficient extraction of vanadium from vanadium slag via iron (III) oxide–assisted mechanochemical activation coupled with alkaline leaching. *Separation and Purification Technology*, vol. 347, p. 127484, <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.127484>.
- [41] Yadav, J., Sarker, K., Bruckard, W., Veeriah Jegatheesan, V. (2024). Greening the supply chain: Sustainable approaches for rare earth element recovery from neodymium iron boron magnet waste. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 12, no. 4. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.113169>

- [42] INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). **(2010)**. *Compendio de información geográfica, Abasolo, NL*. Recuperado el 15/05/24 de https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/19/19001.pdf.
- [43] INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). **(2010)**. *Compendio de información geográfica, Sabinas Hidalgo, NL*. Recuperado el 15/05/24 de https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/19/19044.pdf.
- [44] INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). **(2010)**. *Compendio de información geográfica, Cerralvo, NL*. Recuperado el 15/05/24 de https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/19/19011.pdf.
- [45] INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). **(2010)**. *Compendio de información geográfica, Montemorelos, NL*. Recuperado el 15/05/24 de https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/19/19038.pdf.
- [46] INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). **(2010)**. *Compendio de información geográfica, Allende, NL*. Recuperado el 15/05/24 de https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/19/19004.pdf.
- [47] INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). **(2010)**. *Compendio de información geográfica, Santiago, NL*. Recuperado el 15/05/24 de

https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/19/19049.pdf.

- [48] INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). **(2010)**. *Compendio de información geográfica, General Escobedo, NL*. Recuperado el 15/05/24 de https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/05/05008.pdf.
- [49] INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). **(2010)**. *Compendio de información geográfica, Apodaca, NL*. Recuperado el 15/05/24 de https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/19/19006.pdf.
- [50] INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). **(2010)**. *Compendio de inf. geográfica, San Nicolás de los Garza, NL*. Recuperado el 15/05/24 de https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/19/19046.pdf.
- [51] Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. **(2002)**. Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000. Especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Diario Oficial de la Federación, México. 31 de diciembre de 2002.
- [52] Secretaría de Economía **(2016)**. Norma Mexicana NMX-AA-132-SCFI-2016. Especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Muestreo de suelos para la identificación y la cuantificación de metales y

metaloides, y manejo de la muestra. Secretaría de Economía. Diario Oficial de la Federación, México. 6 de marzo de 2017.

- [53] Filella, M., & Rodushkin, I. **(2018)**. A concise guide for the determination of less-studied technology-critical elements (Nb, Ta, Ga, In, Ge, Te) by inductively coupled plasma mass spectrometry in environmental samples. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 141, 80–84. <https://doi.org/10.1016/j.sab.2018.01.004>
- [54] IBM **(2023)**. *¿Qué es un análisis de componentes principales?* Recuperado el 05/05/2025 de <https://www.ibm.com/mx-es/think/topics/principal-component-analysis>.
- [55] Li, Z., Liang, T., Li, K., & Wang, P. **(2020)**. Exposure of children to light rare earth elements through ingestion of various size fractions of road dust in REEs mining areas. *Science of the Total Environment*, 743. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140432>
- [56] Croffie, M.E.T., Williams, P.N., Fenton, O. *et al.* **(2022)**. Rubidium measured by XRF as a predictor of soil particle size in limestone and siliceous parent materials. *Journal of Soils and Sediments* 22, 818–830 <https://doi.org/10.1007/s11368-021-03109-4>.
- [57] Jabłońska-Czapla, M., Grygoyć, K., & Rachwał, M. **(2022)**. Antimony speciation in soils in areas subjected to industrial anthropopressure. *Archives of Environmental Protection*, 48(2), 42–52. <https://doi.org/10.24425/aep.2022.140765>.

- [58] Escareño-Juarez, E., Jiménez-Barredo, F., Gascó-Leonarte, C., Barrado-Olmedo, A. I., & Vega, M. **(2021)**. Baseline thorium concentration and isotope ratios in topsoil of Zacatecas State, Mexico. *Chemosphere*, 268. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128915>.
- [59] Huang, Y., Long, Z., Zhou, D., Wang, L., He, P., Zhang, G., Hughes, S. S., Yu, H., & Huang, F. **(2021)**. Fingerprinting vanadium in soils based on speciation characteristics and isotope compositions. *Science of the Total Environment*, 791. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148240>.
- [60] Chen, L., Liu, J. Rong, Hu, W. Fang, Gao, J., & Yang, J. Yan. **(2021)**. Vanadium in soil-plant system: Source, fate, toxicity, and bioremediation. In *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 405. Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124200>.
- [61] Nascimento, R.C., da Silva, Y.J.A.B., do Nascimento, C.W.A. *et al.* **(2019)**. Thorium content in soil, water and sediment samples and fluvial sediment-associated transport in a catchment system with a semiarid-coastal interface, Brazil. *Environmental Science Pollution Research* 26, 33532–33540 <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06499-8>.

APÉNDICES

APÉNDICE A

Listado de Elementos Tecnológicamente Críticos por el Departamento de Interior de Estados Unidos

La Ley de Energía de 2020 establece que un "mineral o elemento crítico" es aquel mineral o material mineral no combustible, que es fundamental para la seguridad económica o nacional de los Estados Unidos, y cuya cadena de suministro enfrenta riesgos de interrupción y tendría repercusiones significativas en la economía o la seguridad del país. La Tabla A 1 muestra el listado de los elementos y minerales denominados "Elementos Tecnológicamente Críticos" [16].

Tabla A 1. Elementos y minerales considerados como críticos por el departamento de interior de los Estados Unidos.

1	Aluminio	16	Galio	31	Paladio	46	Vanadio
2	Antimonio	17	Germanio	32	Platino	47	Iterbio
3	Arsénico	18	Grafito	33	Praseodimio	48	Itrio
4	Barita	19	Hafnio	34	Rodio	49	Zinc
5	Berilio	20	Holmio	35	Rubidio	50	Circonio
6	Bismuto	21	Indio	36	Rutenio		
7	Cerio	22	Iridio	37	Samario		
8	Cesio	23	Lantano	38	Escandio		
9	Cromo	24	Litio	39	Tantalio		
10	Cobalto	25	Lutecio	40	Telurio		
11	Disprobio	26	Magnesio	41	Terbio		
12	Erbio	27	Manganeso	42	Tulio		
13	Europio	28	Neodimio	43	Estaño		
14	Fluorita	29	Níquel	44	Titanio		
15	Gadolinio	30	Niobio	45	Tungsteno		

APÉNDICE B

Curvas de calibración

Las curvas de calibración se obtuvieron a partir de soluciones estándar del elemento, se realizaron en el rango de 0.1 a 100 $\mu\text{g kg}^{-1}$, y se midieron en el equipo ICP-MS, bajo las condiciones del equipo descritas en la Tabla 17. La respuesta del equipo para cada concentración específica se encuentra en la Tabla A 2 y las curvas de calibración y ecuación de la recta se encuentran en las Figura A1 – A 8 para V, Co, Sb, Rb, Nd, Th, La y Ce respectivamente.

Tabla A 2. Curvas de calibración de los elementos V, Co, Sb, Rb, Nd, Th, La y Ce.

V		Co		Rb		Sb	
$\mu\text{g kg}^{-1}$	CPS	$\mu\text{g kg}^{-1}$	CPS	$\mu\text{g kg}^{-1}$	CPS	$\mu\text{g kg}^{-1}$	CPS
0.10	250.28	0.10	914.38	0.10	153.51	0.10	390.45
0.49	1541.82	0.49	4609.29	0.50	750.86	0.51	1842.19
0.98	3120.5	0.99	9460.48	1.02	1485.08	1.02	3414.31
4.79	15472.69	4.85	46637.61	4.95	6849.4	4.98	16913.01
9.71	31845.66	9.83	93354.49	10.04	13592.12	10.08	33954.77
19.44	63087.63	19.68	187862.14	20.09	28177.59	20.18	69561.3
48.64	158788.28	49.24	470823.57	50.27	70123.7	50.50	174683.35
77.87	252756.59	78.85	755993.39	80.50	111220.84	80.86	278576.55
97.32	316465.19	98.54	884709.01	100.60	138033.08	101.05	352138.29

La		Ce		Nd		Th	
$\mu\text{g kg}^{-1}$	CPS	$\mu\text{g kg}^{-1}$	CPS	$\mu\text{g kg}^{-1}$	CPS	$\mu\text{g kg}^{-1}$	CPS
0.10	1131.32	0.10	1244.81	0.10	266.97	0.10	236.95
0.50	7824.46	0.51	10389.06	0.51	1915.63	0.50	3938.37
1.02	16181.71	1.02	21381.63	1.02	3878.24	1.01	30736.03
4.96	78718.64	5.00	104329.51	4.97	18861.22	4.94	174129.84
10.05	159631.3	10.12	208047.16	10.06	38152.06	10.01	346817.48
20.12	320979.51	20.26	425381.62	20.14	78476.99	20.04	724475.87
50.35	813004.3	50.70	1008312.98	50.40	195571.73	50.14	1803148.89
80.62	1218461.67	81.18	1614562.12	80.70	314696.15	80.29	2929925.94
100.75	1546117.75	101.46	2037131.25	100.86	396709.66	100.34	3669898.07

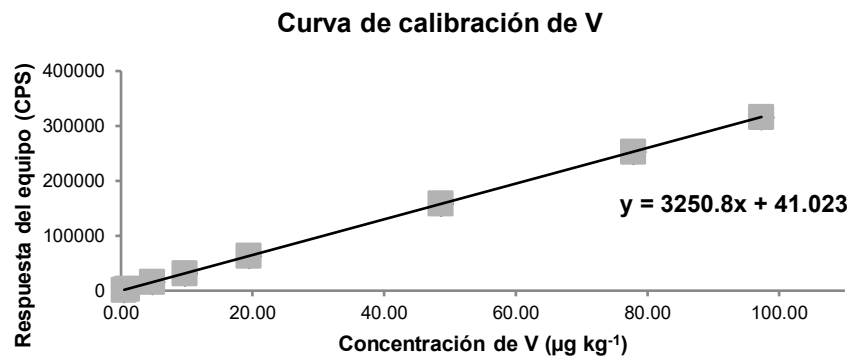


Figura A. 1. Curva de calibración para V en el rango de 0.99 – 97.32 $\mu\text{g kg}^{-1}$

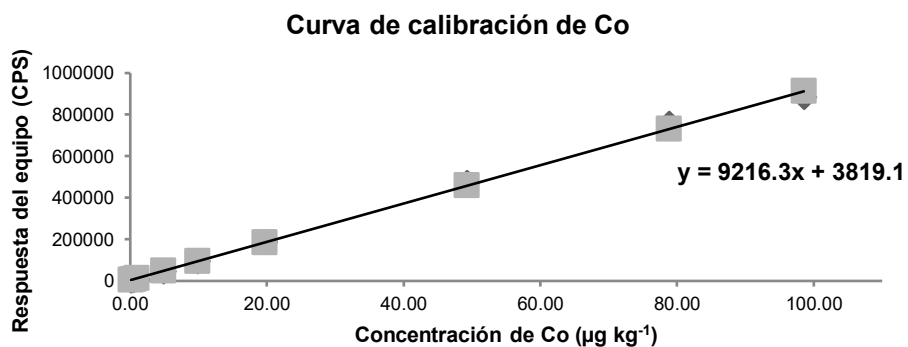


Figura A. 2. Curva de calibración para Co en el rango de 0.1 – 98.54 $\mu\text{g kg}^{-1}$

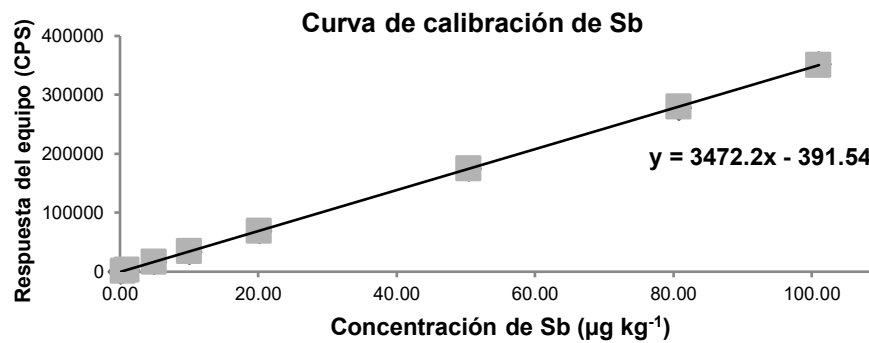


Figura A. 3. Curva de calibración para Sb en el rango de 0.1 – 100 $\mu\text{g kg}^{-1}$

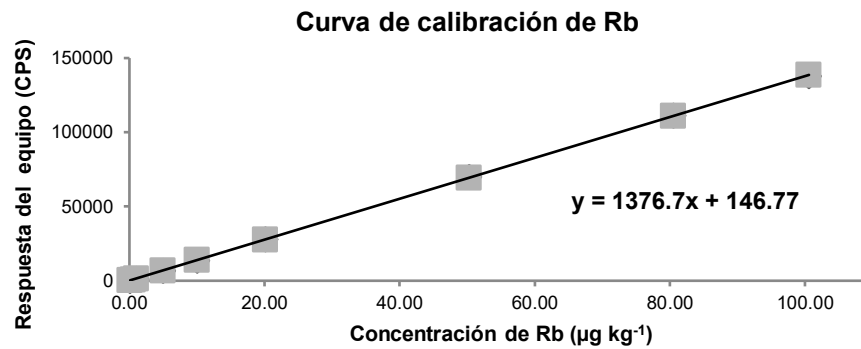


Figura A. 4. Curva de calibración para Rb en el rango de 0.1 – 100.6 $\mu\text{g kg}^{-1}$

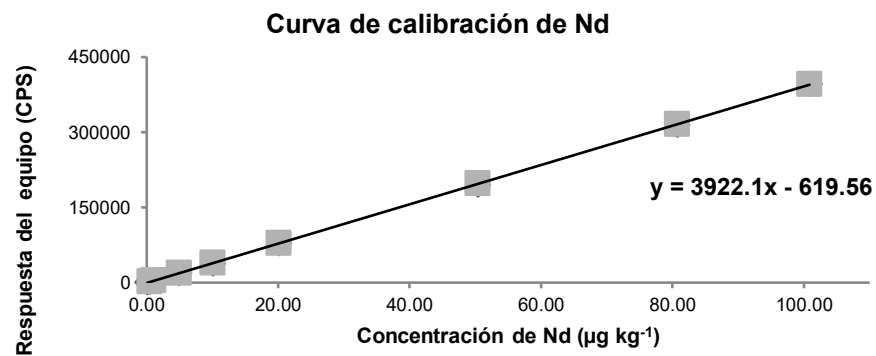


Figura A. 5. Curva de calibración para Nd en el rango de 0.1 – 100.9 $\mu\text{g kg}^{-1}$

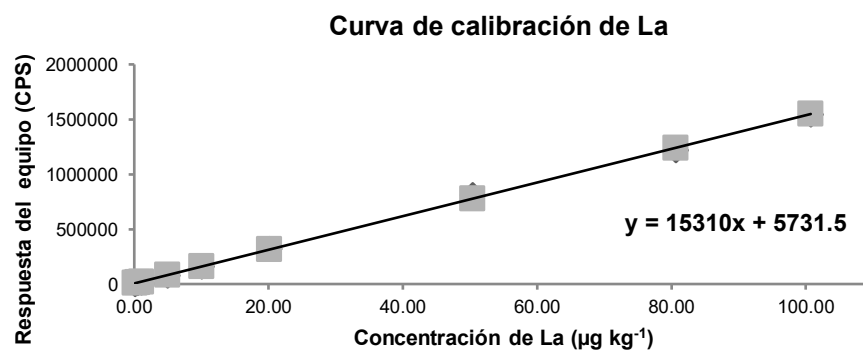


Figura A. 6 Curva de calibración para La en el rango de 0.1 – 100.8 $\mu\text{g kg}^{-1}$

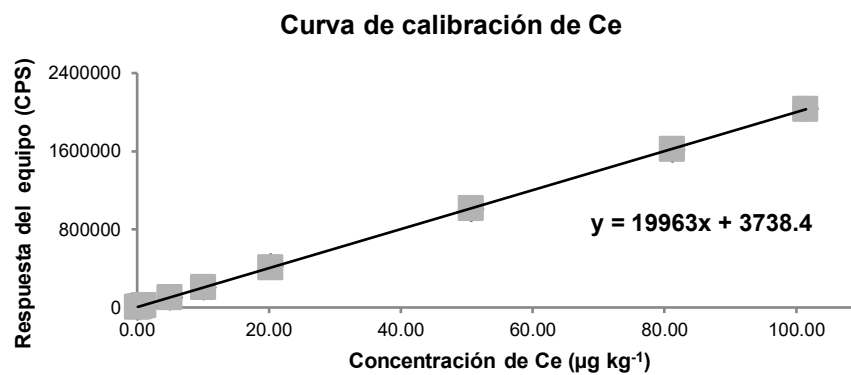


Figura A. 7. Curva de calibración para Ce en el rango de $0.1 - 101.45 \mu\text{g kg}^{-1}$

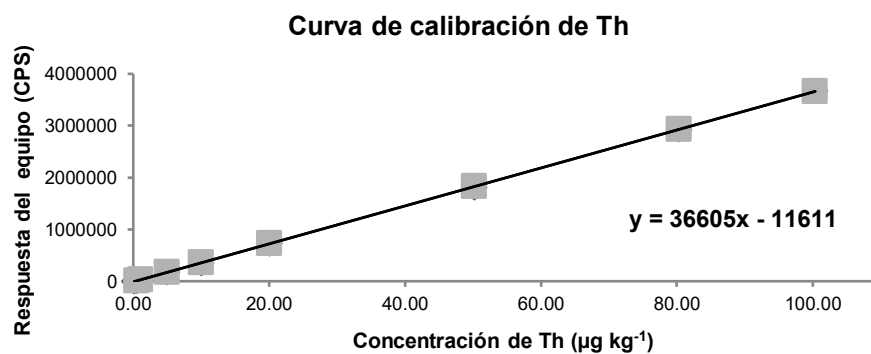


Figura A. 8. Curva de calibración para Th en el rango de $0.10 - 100.34 \mu\text{g kg}^{-1}$

APÉNDICE C

Ecuación de prueba t usada según resultados de prueba F por elemento y punto de muestreo

La prueba t que se utilizó para comprobar si existe diferencia significativa entre el nivel de fondo y la ZMM, si la desviación estándar es igual entre las poblaciones, se aplicó la Ec. 19, en el caso de ser distinta, se aplicó la Ec. 2. En la Tabla A 2 se indica la ecuación usada en cada caso.

Tabla A 3. Ecuaciones de la prueba t usadas para cada ETC y punto de muestreo según resultados de la prueba F.

Sitio de muestreo	Ec. 19	Ec. 21
PQ	V, Co, Rb, Nd	Co, Sb
UA	V, Rb, Sb, Nd	
AU	V, Rb, Sb, Nd	
SB	V, Rb, Sb, Nd	Co
FG		V, Co, Rb, Sb, Nd
MJ	V, Rb, Nd	
LM	V, Rb, Nd	
CP	Co, Nd	Sb
OE	Co, Rb, Nd	Sb
CN	V, Co, Rb, Nd	Sb
SM	V, Rb	Nd

APÉNDICE D

Validación del método para cuantificación de Mn.

La concentración de Mn en suelo de niveles de fondo y en la ZMM fue determinada para la evaluación del índice de riesgo ambiental EF, por lo que se evaluó la validación del elemento usando el MCR 2711_a, el cual se sometió a digestión ácida por el método EPA 3052 y se analizó por el equipo ICP-MS. La Tabla A 2 muestra los datos de validación, los cuales presentaron recuperación de 100.55% y una DSR de 1.42%. La Figura A 1 muestra la curva de calibración la cual obtuvo un R^2 de 0.9999. La prueba t mostró que no existe diferencia significativa entre el valor reportado en el certificado del material de referencia y el resultado.

Tabla A 4. Datos de validación del método para análisis de Mn.

MCR 2711 _a	
mg kg ⁻¹ ± S	656.69 ± 9.30
Certificado (mg kg ⁻¹)	675.00
Recuperación (%)	100.55
DSR (%)	1.42
LOD	0.37
LOQ	1.23
Rango linear (mg kg ⁻¹)	0.10 - 97.53
R^2	0.9999
$H_0 = \mu = \bar{X}$	No existe diferencia significativa entre el valor reportado en el certificado del MCR y el valor obtenido en el análisis.
$t_{calculada} =$	2.78
$t_{critica} =$	12.71
(n=2, P=0.05)	

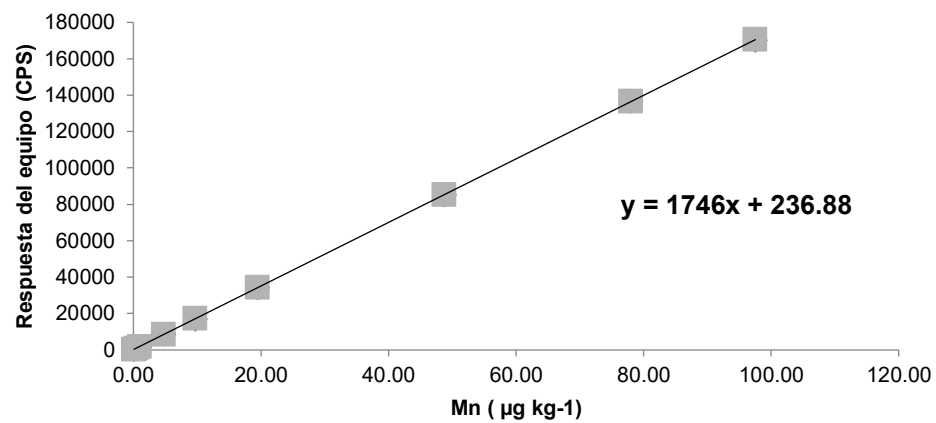


Figura A. 9. Curva de calibración de Mn en el rango de 0.1 a 97.53 µg kg⁻¹

APÉNDICE E

Valores de dosis diaria promedio y dosis diaria promedio a largo plazo

La evaluación de los índices de riesgo a la salud para no carcinogénicos, HQ y HI, requiere el cálculo de ADD de ingesta (ADD_{ing}), inhalación (ADD_{inh}) y por contacto (ADD_{derm}) para niños y adultos, de acuerdo con Ec. 1, Ec. 2 y Ec. 3. La Tabla A 5 muestra los resultados de ADD por sitio de muestreo y elemento analizado.

Tabla A 5 Resultados de ADD de ingesta, inhalación y dérmico para niños y adultos por elemento y sitio de muestreo.

Sitio de muestreo	ADD_{ing}		ADD_{inh}		ADD_{dermal}	
	Niños	Adultos	Niños	Adultos	Niños	Adultos
V						
PQ	7.14E-03	9.59E-04	2.00E-07	9.02E-08	2.00E-05	2.92E-06
UA	1.08E-02	1.45E-03	3.03E-07	1.37E-07	3.03E-05	4.42E-06
AU	6.58E-03	8.83E-04	1.85E-07	8.31E-08	1.84E-05	2.69E-06
SB	7.53E-03	1.01E-03	2.11E-07	9.51E-08	2.11E-05	3.08E-06
FG	1.06E-02	1.42E-03	2.96E-07	1.33E-07	2.96E-05	4.31E-06
MA	7.20E-03	9.66E-04	2.02E-07	9.10E-08	2.02E-05	2.94E-06
LM	7.97E-03	1.07E-03	2.23E-07	1.01E-07	2.23E-05	3.25E-06
CN	6.15E-03	8.26E-04	1.73E-07	7.77E-08	1.72E-05	2.51E-06
SM	5.25E-03	7.05E-04	1.47E-07	6.63E-08	1.47E-05	2.15E-06
Co						
PQ	1.00E-04	5.02E-03	2.82E-09	1.27E-09	2.81E-07	4.10E-08
AU	5.65E-05	2.82E-03	1.58E-09	7.13E-10	1.58E-07	2.31E-08
SB	1.03E-04	5.15E-03	2.89E-09	1.30E-09	2.88E-07	4.20E-08
FG	7.82E-05	3.91E-03	2.19E-09	9.88E-10	2.19E-07	3.20E-08
LM	7.08E-05	3.54E-03	1.99E-09	8.94E-10	1.98E-07	2.89E-08
CP	6.94E-05	3.47E-03	1.95E-09	8.77E-10	1.94E-07	2.84E-08

OE	1.01E-04	5.04E-03	2.83E-09	1.27E-09	2.82E-07	4.12E-08
CN	8.74E-05	4.37E-03	2.45E-09	1.10E-09	2.45E-07	3.57E-08

Rb

PQ	5.23E-03	7.01E-04	1.47E-07	6.60E-08	1.46E-05	2.14E-06
UA	2.87E-03	3.84E-04	8.04E-08	3.62E-08	8.02E-06	1.17E-06
AU	5.06E-03	6.79E-04	1.42E-07	6.39E-08	1.42E-05	2.07E-06
SB	6.52E-03	8.75E-04	1.83E-07	8.24E-08	1.83E-05	2.67E-06
FG	1.92E-03	2.58E-04	5.39E-08	2.43E-08	5.38E-06	7.86E-07
MA	7.52E-03	1.01E-03	2.11E-07	9.50E-08	2.11E-05	3.07E-06
LM	7.21E-03	9.67E-04	2.02E-07	9.10E-08	2.02E-05	2.94E-06
OE	6.58E-03	8.83E-04	1.85E-07	8.31E-08	1.84E-05	2.69E-06
CN	5.96E-03	7.99E-04	1.67E-07	7.52E-08	1.67E-05	2.43E-06
SM	2.88E-03	3.86E-04	-	3.63E-08	8.06E-06	1.18E-06

Sb

PQ	7.95E-05	1.07E-05	2.23E-09	1.00E-09	2.23E-07	3.25E-08
UA	4.86E-05	6.53E-06	1.36E-09	6.14E-10	1.36E-07	1.99E-08
AU	2.20E-05	2.95E-06	6.16E-10	2.77E-10	6.15E-08	8.98E-09
SB	3.24E-05	4.35E-06	9.10E-10	4.10E-10	9.08E-08	1.33E-08
FG	7.64E-05	1.02E-05	2.14E-09	9.65E-10	2.14E-07	3.12E-08
CP	2.80E-05	3.76E-06	7.86E-10	3.54E-10	7.84E-08	1.14E-08
OE	5.64E-05	7.57E-06	1.58E-09	7.13E-10	1.58E-07	2.31E-08
CN	2.50E-05	3.35E-06	7.01E-10	3.15E-10	6.99E-08	1.02E-08

Nd

PQ	1.77E-04	2.37E-05	4.96E-09	2.23E-09	4.95E-07	7.22E-08
UA	2.79E-05	3.74E-06	7.81E-10	3.52E-10	7.80E-08	1.14E-08
AU	6.03E-05	8.09E-06	1.69E-09	7.62E-10	1.69E-07	2.46E-08
SB	2.20E-04	2.95E-05	6.17E-09	2.78E-09	6.16E-07	8.99E-08
FG	9.75E-06	1.31E-06	2.74E-10	1.23E-10	2.73E-08	3.99E-09
CP	1.78E-04	2.39E-05	4.99E-09	2.25E-09	4.98E-07	7.26E-08
OE	2.74E-04	3.68E-05	7.70E-09	3.47E-09	7.68E-07	1.12E-07
CN	2.26E-04	3.04E-05	6.35E-09	2.86E-09	6.34E-07	9.25E-08
SM	1.84E-05	2.47E-06	5.16E-10	2.32E-10	5.15E-08	7.51E-09

Ce

PQ	4.72E-04	6.33E-05	1.32E-08	5.96E-09	1.32E-06	1.93E-07
UA	5.48E-05	7.36E-06	1.54E-09	6.92E-10	1.54E-07	2.24E-08
AU	1.06E-04	1.42E-05	2.97E-09	1.34E-09	2.96E-07	4.32E-08
MA	5.40E-04	7.25E-05	1.51E-08	6.82E-09	1.51E-06	2.21E-07
LM	2.16E-04	2.90E-05	6.06E-09	2.73E-09	6.05E-07	8.83E-08
CN	5.59E-04	7.50E-05	1.57E-08	7.06E-09	1.57E-06	2.28E-07
SM	3.05E-05	4.09E-06	8.55E-10	3.85E-10	8.53E-08	1.24E-08

La

PQ	2.54E-04	3.41E-05	7.13E-09	3.21E-09	7.11E-07	1.04E-07
UA	4.39E-05	5.89E-06	1.23E-09	5.55E-10	1.23E-07	1.79E-08
AU	7.54E-05	1.01E-05	2.12E-09	9.53E-10	2.11E-07	3.08E-08

SB	2.82E-04	3.78E-05	7.90E-09	3.56E-09	7.89E-07	1.15E-07
FG	1.32E-05	1.77E-06	3.69E-10	1.66E-10	3.69E-08	5.38E-09
CP	2.58E-04	3.46E-05	7.23E-09	3.26E-09	7.22E-07	1.05E-07
OE	4.15E-04	5.56E-05	1.16E-08	5.24E-09	1.16E-06	1.69E-07
CN	2.91E-04	3.91E-05	8.17E-09	3.68E-09	8.16E-07	1.19E-07
SM	2.17E-05	2.92E-06	6.10E-10	2.75E-10	6.09E-08	8.88E-09
Th						
LM	5.96E-05	8.00E-06	1.67E-09	7.53E-10	1.67E-07	2.44E-08
CN	5.70E-06	7.64E-07	1.60E-10	7.19E-11	1.60E-08	2.33E-09

La evaluación del índice de riesgo a la salud para carcinogénicos, CR, requiere el cálculo de LADD de ingesta (LADD_{ing}), inhalación (LADD_{inh}) y por contacto (LADD_{derm}) de acuerdo con Ec. 6. La Tabla A 6 muestra los resultados de LADD por sitio de muestreo y elemento analizado.

Tabla A 6. Resultados de ADD de ingesta, inhalación y dérmico para niños y adultos por elemento y sitio de muestreo.

Sitio de muestreo	LADD_{ing}	LADD_{inh}	LADD_{derm}
V			
PQ	1.41E+03	1.22E+02	1.63E+01
UA	2.14E+03	1.84E+02	2.47E+01
AU	1.30E+03	1.12E+02	1.50E+01
SB	1.49E+03	1.28E+02	1.72E+01
FG	2.09E+03	1.80E+02	2.41E+01
MA	1.42E+03	1.23E+02	1.64E+01
LM	1.57E+03	1.36E+02	1.82E+01
CN	1.22E+03	1.05E+02	1.40E+01
SM	1.04E+03	8.96E+01	1.20E+01
Co			
PQ	1.98E+01	5.73E-01	2.29E-01
AU	1.12E+01	3.22E-01	1.29E-01
SB	2.03E+01	5.87E-01	2.35E-01
FG	1.55E+01	4.46E-01	1.78E-01

LM	1.40E+01	4.04E-01	1.62E-01
CP	1.37E+01	3.96E-01	1.58E-01
OE	1.99E+01	5.76E-01	2.30E-01
CN	1.73E+01	4.99E-01	1.99E-01
Rb			
PQ	1.03E+03	8.92E+01	1.19E+01
UA	5.66E+02	4.89E+01	6.53E+00
AU	1.00E+03	8.63E+01	1.15E+01
SB	1.29E+03	1.11E+02	1.49E+01
FG	3.80E+02	3.28E+01	4.38E+00
MA	1.49E+03	1.28E+02	1.71E+01
LM	1.42E+03	1.23E+02	1.64E+01
OE	1.30E+03	1.12E+02	1.50E+01
CN	1.18E+03	1.02E+02	1.36E+01
SM	5.68E+02	4.91E+01	6.56E+00
Sb			
PQ	1.57E+01	1.36E+00	1.81E-01
UA	9.61E+00	8.30E-01	1.11E-01
AU	4.34E+00	3.75E-01	5.01E-02
SB	6.41E+00	5.53E-01	7.40E-02
FG	1.51E+01	1.30E+00	1.74E-01
CP	5.53E+00	4.78E-01	6.39E-02
OE	1.11E+01	9.63E-01	1.29E-01
CN	4.93E+00	4.26E-01	5.70E-02
Nd			
PQ	1.17E+01	1.01E+00	3.37E-02
UA	1.84E+00	1.59E-01	5.31E-03
AU	3.98E+00	3.44E-01	1.15E-02
SB	1.45E+01	1.26E+00	4.19E-02
FG	6.44E-01	5.56E-02	1.86E-03
CP	1.17E+01	1.01E+00	3.39E-02
OE	1.81E+01	1.57E+00	5.23E-02
CN	1.50E+01	1.29E+00	4.32E-02
SM	1.21E+00	1.05E-01	3.50E-03
Ce			
PQ	3.12E+01	2.69E+00	9.00E-02
UA	3.62E+00	3.13E-01	1.05E-02
AU	6.99E+00	6.03E-01	2.02E-02
MA	3.57E+01	3.08E+00	1.03E-01
LM	1.43E+01	1.23E+00	4.12E-02
CN	3.69E+01	3.19E+00	1.07E-01
SM	2.01E+00	1.74E-01	5.81E-03
La			
PQ	1.68E+01	1.45E+00	4.84E-02

UA	2.90E+00	2.51E-01	8.37E-03
AU	4.98E+00	4.30E-01	1.44E-02
SB	1.86E+01	1.61E+00	5.37E-02
FG	8.70E-01	7.51E-02	2.51E-03
CP	1.70E+01	1.47E+00	4.92E-02
OE	2.74E+01	2.37E+00	7.91E-02
CN	1.92E+01	1.66E+00	5.55E-02
SM	1.44E+00	1.24E-01	4.14E-03
		Th	
LM	3.94E+00	3.40E-01	1.14E-02
CN	3.76E-01	3.25E-02	1.09E-03

APÉNDICE F

Valores de Cociente de Riesgo por elemento y sitio de muestreo

Los valores de los índices HQ de ingesta, inhalación y dérmico para niños y adultos por punto de muestreo se encuentran en la Tabla A 3, para los elementos V, Co, Rb, Sb, Nd, Ce y La, cuyos valores de RfD se encontraron reportados en bibliografía.

Tabla A 7. Valores de HQ de ingesta ETC en sitios de muestreo de la ZMM.

Sitio	HQ _{ing child}	HQ _{ing adult}	HQ _{inh child}	HQ _{inh adult}	HQ _{derm child}	HQ _{derm adult}
V						
PQ	1.02	0.14	2.86E-05	1.29E-05	0.29	0.04
UA	1.54	0.21	4.33E-05	1.95E-05	0.43	0.06
AU	0.94	0.13	2.64E-05	1.19E-05	0.26	0.04
SB	1.08	0.14	3.02E-05	1.36E-05	0.30	0.04
FG	1.51	0.20	4.23E-05	1.90E-05	0.42	0.06
MJ	1.03	0.14	2.89E-05	1.30E-05	0.29	0.04
LM	1.14	0.15	3.19E-05	1.44E-05	0.32	0.05
CN	0.88	0.12	2.47E-05	1.11E-05	0.25	0.04
SM	0.75	0.10	2.11E-05	9.48E-06	0.21	0.03
Co						
PQ	5.02E-03	6.74E-04	-	-	1.76E-05	2.57E-06
AU	2.82E-03	3.79E-04	-	-	9.89E-06	1.44E-06
SB	5.15E-03	6.90E-04	-	-	1.80E-05	2.63E-06
FG	3.91E-03	5.25E-04	-	-	1.37E-05	2.00E-06
LM	3.54E-03	4.75E-04	-	-	1.24E-05	1.81E-06
CP	3.47E-03	4.66E-04	-	-	1.22E-05	1.77E-06
OE	5.04E-03	6.77E-04	-	-	1.77E-05	2.58E-06
CN	4.37E-03	5.87E-04	-	-	1.53E-05	2.23E-06
Rb						
PQ	2.61E-01	3.51E-02	-	-	-	-
UA	1.43E-01	1.92E-02	-	-	-	-
AU	2.53E-01	3.39E-02	-	-	-	-
SB	3.26E-01	4.38E-02	-	-	-	-
FG	9.61E-02	1.29E-02	-	-	-	-
MJ	3.76E-01	5.05E-02	-	-	-	-

LM	3.60E-01	4.83E-02	-	-	-	-
OE	3.29E-01	4.42E-02	-	-	-	-
CN	2.98E-01	4.00E-02	-	-	-	-
SM	1.44E-01	1.93E-02	-	-	-	-
Sb						
PQ	1.99E-02	2.67E-03	8.92E-08	4.02E-08	6.24E-04	9.10E-05
UA	1.22E-02	1.63E-03	5.46E-08	2.46E-08	3.81E-04	5.57E-05
AU	5.49E-03	7.37E-04	2.47E-08	1.11E-08	1.72E-04	2.51E-05
SB	8.11E-03	1.09E-03	3.64E-08	1.64E-08	2.54E-04	3.71E-05
FG	1.91E-02	2.56E-03	8.57E-08	3.86E-08	5.99E-04	8.74E-05
CP	7.00E-03	9.39E-04	3.14E-08	1.41E-08	2.20E-04	3.20E-05
OE	1.41E-02	1.89E-03	6.33E-08	2.85E-08	4.43E-04	6.46E-05
CN	6.24E-03	8.38E-04	2.80E-08	1.26E-08	1.96E-04	2.86E-05
Nd						
PQ	8.84E-03	1.19E-03	2.48E-07	1.12E-07	2.47E-05	3.61E-06
UA	1.39E-03	1.87E-04	3.91E-08	1.76E-08	3.90E-06	5.69E-07
AU	3.02E-03	4.05E-04	8.46E-08	3.81E-08	8.44E-06	1.23E-06
SB	1.10E-02	1.48E-03	3.09E-07	1.39E-07	3.08E-05	4.49E-06
FG	4.88E-04	6.54E-05	1.37E-08	6.16E-09	1.37E-06	1.99E-07
CP	8.89E-03	1.19E-03	2.49E-07	1.12E-07	2.49E-05	3.63E-06
OE	1.37E-02	1.84E-03	3.85E-07	1.73E-07	3.84E-05	5.61E-06
CN	1.13E-02	1.52E-03	3.18E-07	1.43E-07	3.17E-05	4.62E-06
SM	9.19E-04	1.23E-04	2.58E-08	1.16E-08	2.57E-06	3.75E-07
Ce						
PQ	2.36E-02	3.17E-03	6.62E-07	2.98E-07	6.61E-05	9.64E-06
UA	2.74E-03	3.68E-04	7.69E-08	3.46E-08	7.68E-06	1.12E-06
AU	5.29E-03	7.09E-04	1.48E-07	6.68E-08	1.48E-05	2.16E-06
MJ	2.70E-02	3.62E-03	7.57E-07	3.41E-07	7.56E-05	1.10E-05
LM	1.08E-02	1.45E-03	3.03E-07	1.36E-07	3.03E-05	4.42E-06
CN	2.80E-02	3.75E-03	7.84E-07	3.53E-07	7.83E-05	1.14E-05
SM	1.52E-03	2.04E-04	4.27E-08	1.92E-08	4.27E-06	6.22E-07
La						
PQ	1.27E-02	1.70E-03	3.56E-07	1.60E-07	3.56E-05	5.19E-06
UA	2.20E-03	2.95E-04	6.16E-08	2.77E-08	6.15E-06	8.97E-07
AU	3.77E-03	5.06E-04	1.06E-07	4.76E-08	1.06E-05	1.54E-06
SB	1.41E-02	1.89E-03	3.95E-07	1.78E-07	3.94E-05	5.75E-06
FG	6.58E-04	8.83E-05	1.85E-08	8.31E-09	1.84E-06	2.69E-07
CP	1.29E-02	1.73E-03	3.62E-07	1.63E-07	3.61E-05	5.27E-06
OE	2.07E-02	2.78E-03	5.82E-07	2.62E-07	5.81E-05	8.47E-06
CN	1.46E-02	1.95E-03	4.09E-07	1.84E-07	4.08E-05	5.95E-06
SM	1.09E-03	1.46E-04	3.05E-08	1.37E-08	3.04E-06	4.44E-07

APÉNDICE G

Gráfico de sedimentación

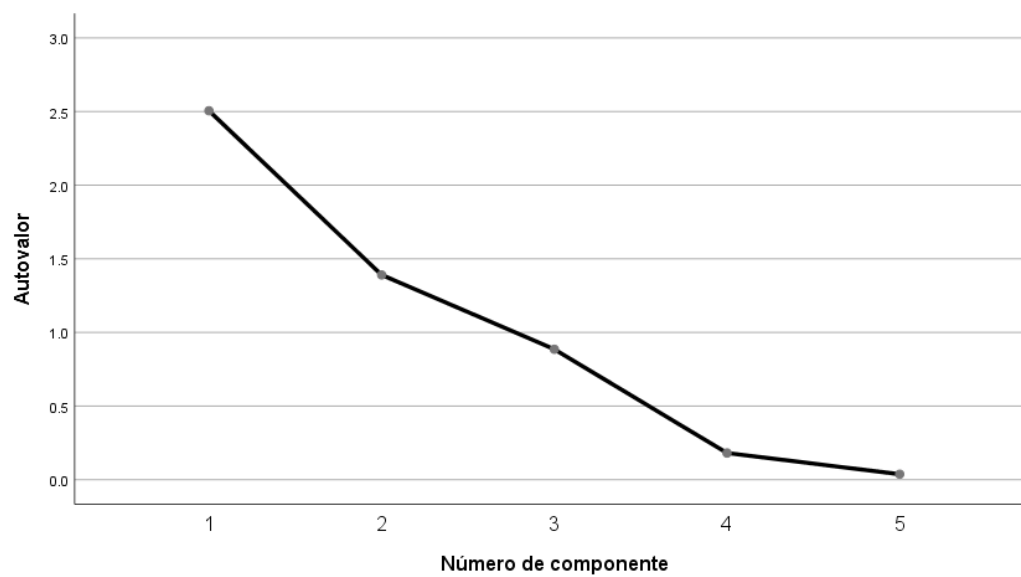


Figura A. 10 Gráfico de sedimentación

RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO

Erika Maribel Castillo García

Candidata para grado de

Maestría en Ciencias con Orientación en Química y Tecnología Ambiental,
UANL.

Tesis: EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE ELEMENTOS TECNOLÓGICA-
MENTE CRÍTICOS EN SUELO URBANO/INDUSTRIAL Y A LA SALUD HU-
MANA.

Edad: 46 años

Biografía:

Datos Personales: nacida en Monterrey, Nuevo León el 13 de enero de
1979, hija de Teodoro Castillo Rangel y María G. García Rodríguez.

Educación:

Egresada de la Universidad Autónoma de Nuevo León, grado obtenido
Licenciada en Química Industrial en 2000.

Experiencia Profesional:

- Desarrollo de Nuevos Productos, en el departamento de Investiga-
ción y Desarrollo de Harinas para Pastel, Comercial Téifaros. 2012 -
2016.

- Investigador de productos de competencia, en el departamento de Investigación y Desarrollo, Industrias AlEn. (2007 – 2009).
- Coordinador de Investigación y Desarrollo de aditivos alimentarios y premezclas vitamínicas, en Grupo Trophe. (2005 – 2007).
- Investigador Jr. de Detergentes y Blanqueadores, en el departamento de Investigación y Desarrollo, Industrias AlEn. (2004 – 2005).
- Aux. de Laboratorio de Aseguramiento de Calidad, Agricel. (2001 – 2003).
- Prácticas profesionales en el departamento de Análisis de Control de Calidad en Cervecería Cuauhtémoc Moctezuma. (2000).