



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE CIENCIAS

***ROAD EFFECT ZONE*, CONTAMINACIÓN DE SUELOS POR
METALES EN LA AUTOPISTA FEDERAL 95D, MÉXICO**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

BIÓLOGA

P R E S E N T A:

SANDYBELL GUTIÉRREZ CASTILLO



**DIRECTORAS DE TESIS:
DRA. SILKE CRAM HEYDRICH
DRA. MARÍA NORMA OLINDA FERNÁNDEZ BUCES**

CIUDAD UNIVERSITARIA, CDMX, 2019.



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

HOJA DE DATOS DEL JURADO

1 Datos del alumno.

Gutiérrez
Castillo
Sandybell
55 4175 7293
Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Ciencias
Biología
310344193

2 Datos de la tutora.

Dra.
Silke
Cram
Heydrich

3 Datos de la co-tutora.

Dra.
María Norma Olinda
Fernández
Buces

4 Datos del sinodal 1.

Dra.
Christina Désirée
Siebe
Grabach

5 Datos del sinodal 2.

Dr.
Rodolfo Omar
Arellano
Aguilar

6 Datos del sinodal 3.

M. en C.
Manuel
Hernández
Quiroz

7 Datos de la tesis.

Road effect zone, contaminación de suelos por metales en la autopista federal 95D, México.
85 p.
2019

“Sé que mi trabajo es una gota en el océano, pero si no lo hiciera, al océano le faltaría esa gota”.

Madre Teresa de Calcuta.

Agradecimientos académicos.

Agradezco a la UNAM, por brindarme las herramientas necesarias para formar parte de la comunidad universitaria de la máxima casa de estudios de México, que orgullo es pertenecer a una de las mejores universidades del mundo.

Dra. María Norma Olinda Fernández Buces, gracias por la oportunidad de realizar mi trabajo bajo su tutoría, los conocimientos que adquirí con su trabajo me ayudaron a tomar mi camino dentro de la biología. Gracias.

Dra. Silke Cram Heydrich, de igual manera, gracias por aceptar llevar la tutoría de mi trabajo, y por todos los conocimientos brindados en clase y fuera de clase.

A mi comité de titulación: Dra. Christina Désirée Siebe Grabach, Dr. Rodolfo Omar Arellano Aguilar y M. en C. Manuel Hernández Quiroz, gracias por su valioso tiempo invertido en el desarrollo de mi trabajo, tanto en la parte experimental como en la revisión del escrito, sus observaciones y recomendaciones me han sido de gran utilidad.

M. en C. María del Pilar Fernández Lomelín, gracias por todo su apoyo brindado para el desarrollo de inicio a fin de este trabajo, gracias por todos los conocimientos brindados en todo momento. Y también gracias por las facilidades brindadas para llevar a cabo parte de mi trabajo experimental en el Laboratorio de Geografía Física del Instituto de Geografía, UNAM.

Dra. Claudia Alejandra Ponce de León Hill gracias por las facilidades brindadas para llevar a cabo parte de mi trabajo experimental en la Unidad de Análisis Ambiental (UNAAMB) de la Facultad de Ciencias, UNAM.

Ing. José Teodoro Hernández Treviño gracias por las facilidades brindadas para llevar a cabo parte de mi trabajo experimental en el Laboratorio Universitario de Geoquímica Isotópica (LUGIS) del Instituto de Geofísica, UNAM.

Al M. en G. José Mauricio Galeana Pizaña y a todos aquellos profesores de las distintas carreras que ofrece la UNAM, con quienes me acerque con la intención de ampliar mis conocimientos y quienes me lo permitieron sin ninguna objeción.

Agradecimientos personales.

Le doy gracias a mis papas, a Gloria Castillo y Sergio Gutiérrez, quienes han sido mi guía a través de estos 24 años de vida. Papas, gracias por estar conmigo en mis tropiezos y en mis logros, en mis días nublados y en mis días soleados, gracias por escucharme y apoyarme cuando he tomado una buena o mala decisión, gracias por todas las llamadas de atención y por haberme inculcarme los valores que me han llevado a convertirme en la mujer que soy hoy, muchísimas gracias por haberme dado acceso a la educación.

A mis hermanos Frank, Ulises y Dan, gracias por enseñarme lo bueno y lo malo de la vida, gracias por cuidarme y alentarme a ser una mejor versión de mi misma, por motivarme a superarme, gracias por siempre estar dispuestos a ayudarme y gracias por enseñarme a ser fuerte.

A mis sobrinitos, a Alexandra, Yatzry, Jacob y Ramsses, a su corta edad, también han contribuido para convertirme en una mejor versión de mi misma, gracias por hacerme recordar lo que es vivir la niñez, y gracias por enseñarme a abrir mi corazón, espero que algún día se sientan orgullosos de su tía Sandy.

Familia, espero que la vida me permita seguir teniéndolos a mi lado por mucho, muchísimo tiempo más y poder continuar compartiendo mis triunfos con ustedes. Los amo incondicionalmente.

Muchas gracias a las personas que se han vuelto parte importante en mi vida, a las amistades concretadas en mi camino por la UNAM: Carolina Aguilar, sin darme cuenta te volviste mi mejor amiga, como mi hermana. Aunque ya no nos podamos frecuentar tanto como hace algún tiempo, sabes que siempre podrás contar conmigo, que siempre estaré para ti, muchas gracias por las bonitas experiencias que hemos compartido.

A mis amigas Diana Jurado, Paola Mendoza, Paola Munive y Alejandra López, gracias por sus palabras de aliento, y sus muestras de apoyo, gracias por estar ahí, espero que nos permitamos seguir siendo amigas.

A Moisés Reyes, amigo gracias por la ayuda para adentrarme en el mundo de la geografía, me ha sido muy útil y seguramente me seguirá siendo de gran utilidad, gracias por los momentos compartidos.

A Erick García, gracias por el apoyo, por las palabras bonitas, por hacerme sentir especial y por haberte convertido en una mejor versión de ti mismo desde que te conozco, eres una persona muy especial en mi vida, te quiero mucho, mucho.

A mi amigo, mi primo, mi hermano, Christian Zavala gracias por escucharme, por permitirme escucharte, gracias por los buenos y también los malos consejos, de todo he aprendido, gracias por ser mi cómplice en tantas y tantas historias. Aunque el mundo te intente dar la espalda yo estaré ahí para ti, para intentar sacarte una sonrisa o una carcajada. Te quiero tal y como eres, porque al final: *“soy como tú, tú eres igual...”*

Y no menos importante, gracias a todas las personas que en algún momento me dijeron que no podría, ¿qué creen? Sí pude y seguiré pudiendo.

A las personas más importantes en mi vida

Mis padres:

Gloria y Sergio.

Mis hermanos:

Frank, Ulises y Dan.

Mis sobrinos, mis amores:

Ale, Yatzy, Remmy y Jacob.

ÍNDICE

RESUMEN	VII
I. Introducción	9
II. Marco teórico	11
2.1 Los metales.....	11
2.2 Carreteras y autopistas de México. Generalidades y clasificación.....	16
2.3 Ecología de carreteras.	18
2.4 <i>Road effect zone</i>	20
2.5 <i>Road effect zone</i> en México.	22
III. Antecedentes	23
3.1 Polonia	23
3.2 Emiratos Árabes Unidos	26
3.3 Inglaterra	26
3.4 China	26
3.5 India	28
IV. Justificación	29
V. Objetivos	30
5.1 General	30
5.2 Particular	30
VI. Hipótesis	30
VII. Área de estudio	31
7.1 Autopista 95D México-Acapulco; tramo: México-Alpuyeca.	31
VIII. Material y métodos	35
8.1 Trabajo en campo.	35
8.1.1 Visita de reconocimiento.	35
8.1.2 Estrategia de muestreo para cuantificar metales en suelos al pie de lavaderos carreteros.	38
8.2 En laboratorio.....	39
8.2.1 Determinación de pH.	39
8.2.2 Determinación de la conductividad eléctrica.	40
8.2.3 Determinación de Metales: Vanadio, Plomo, Níquel y Bario.	40
IX. Resultados	43
9.1 pH y C.E.....	43

9.2	Metales pesados: Vanadio, Plomo, Níquel y Bario.....	45
X.	Discusión	60
XI.	Conclusiones	65
XII.	Recomendaciones para trabajos futuros	67
XIII.	Referencias	68
XIV.	Anexos	73
14.1	Análisis descriptivos de los sitios de muestreo.	73
14.2	Glosario	80
14.3	Base de datos: Diseño de la estrategia de muestreo, visita de reconocimiento.	82
14.4	Base de datos: pH, C.E. y metales: Vanadio, Plomo, Níquel y Bario.	82
14.5	Formato de muestreo.....	84
14.6	Hoja informativa de material de referencia, <i>Montana Soil, 2711</i>	85

RESUMEN

Uno de los problemas más interesantes, y desafiantes de la conservación biológica es hacer compatibles las acciones que generan un desarrollo económico con las acciones enfocadas en la preservación de los ecosistemas naturales. Un ejemplo claro de esta situación se observa en el caso del desarrollo de la red de carreteras. Cuando están bien planeadas desempeñan un papel fundamental en las estrategias de integración territorial de los países. Sin embargo, la construcción y uso de las carreteras así como de cualquier infraestructura también atrae problemas a los ecosistemas que no siempre resultan tan evidenciados, por ejemplo la contaminación con metales pesados de los suelos, producto de la operación de las carreteras.

El presente trabajo de tesis, aborda un tema poco divulgado e investigado en México: El *Road effect zone*. Este trabajo busca generar y mostrar una estrategia general para delimitar geográficamente el efecto de las carreteras y autopistas sobre los sistemas naturales. Con la cual se puede lograr una integración de la ecología y la planificación de las vías carreteras, definiendo así el área de impacto de las vías de comunicación. Primero se realizó una revisión bibliográfica sobre los efectos de borde y los indicadores que se reportan para su delimitación. Después se seleccionó como indicador del impacto la concentración de los metales pesados Vanadio (V), Plomo (Pb), Níquel (Ni) y Bario (Ba), los cuales se asocian con la operación de autopistas.

Se evaluó la concentración de los metales pesados mencionados, en función de la distancia a la autopista federal 95D; tramo México-Alpuyeca para lo cual se seleccionaron 7 sitios y en cada sitio se muestrearon 3 puntos, ubicados a 7-10, 13-16, 19-21 m de distancia, perpendicularmente a la vía, de donde se extrajeron muestras de las siguientes profundidades: 0-5, 5-10, 10-15 y 15-20 cm. Se colectaron un total de 104 muestras, cada muestra se analizó mediante la técnica de Espectrofotometría de Absorción Atómica (AAS), además de medir el pH y la conductividad eléctrica (C.E.) en extractos acuosos. Los resultados se compararon con la NOM-147 y los niveles geogénicos reportados por Kabata-

Pendias, 2000 y Blume, 2004. Conocer los niveles geogénicos de un sitio es la base de la cual se debe partir para evaluar un proceso de contaminación por metales.

Como uno de los trabajos pioneros en el tema, este trabajo dejó entrevisto la carencia de información con respecto a la composición de nuestros suelos. Al ser un tema con poca divulgación y poco estudiado en nuestro país, se extiende la invitación a conocer más acerca de la ecología de carreteras e interesarse por la realización de este tipo de estudios, pues la práctica común de estos estudios llevará a un manejo más detallado y adecuado del tema en nuestro país.

I. Introducción

El suelo es el soporte de las áreas verdes en zonas urbanas que mejoran la calidad de vida del ser humano, porque reconfortan, dan sombra y oxígeno, refrescan y reducen islas de calor y permiten un sinnúmero de actividades de ocio y deporte. El cuidado y aprovechamiento adecuado del suelo urbano, por lo tanto, debe ser de interés para todos los habitantes de una ciudad (Siebe y Cram, 2015).

Uno de los problemas más interesantes, pero a la vez más desafiantes, de la conservación biológica es hacer compatibles las acciones que generan un desarrollo económico con las acciones enfocadas en la preservación de los ecosistemas naturales. Un ejemplo claro de esta situación se observa en el caso del desarrollo de la red de carreteras. Cuando están bien planeadas desempeñan un papel fundamental en las estrategias de integración territorial de los países (Puc-Sánchez, *et al.* 2013). Sin embargo, la construcción y uso de las vías de comunicación así como de cualquier infraestructura también atrae problemas a los ecosistemas que no siempre resultan tan evidenciados. Un ejemplo es la contaminación de los suelos con metales pesados, producto de la operación de las carreteras.

Una casa se “ensucia” por las acciones de sus habitantes, la atmósfera se “ensucia” porque se emiten hacia ella diferentes sustancias cuando usamos un automóvil, consumimos electricidad, generamos y quemamos basura o destruimos un árbol. Dejar que la suciedad persista en una casa o en la atmósfera implica riesgos para el bienestar de las personas y del ambiente (Arellano-Martín y Andrade, 2016).

Lamentablemente en México existen muy pocos instrumentos de política pública que promuevan la conservación del suelo. Además de pocos, estos instrumentos se aplican de forma desvinculada entre las diferentes instancias de gobierno, y sólo en regiones localizadas. Es imperativo mejorar y ampliar las acciones que promuevan un uso adecuado de este vital recurso. Deberíamos todos estar dispuestos a cooperar no sólo a través de instrumentos de pago por servicios ambientales, sino también por el interés de preservar la salud al ambiente y la humana (Siebe y Cram, 2015).

El presente trabajo de tesis, aborda un tema poco divulgado y poco investigado en nuestro país: El *Road effect zone*, con él que se busca mostrar una estrategia general para delimitar esta zona de impacto en nuestro país.

II. Marco teórico

2.1 Los metales.

La mayor parte de los elementos químicos conocidos son metales. Químicamente, un metal es una sustancia que tiende a ceder su o sus electrones del último orbital, para alcanzar una configuración electrónica más estable. Al ceder su electrón, el metal adquiere una carga positiva, es decir, tienden a formar cationes (Ayala de la Portilla, 2007).

Los metales se encuentran en el medio ambiente; en la atmósfera, suelos, aguas e inclusive, en los seres vivos, aunque normalmente en bajas concentraciones, de manera natural pueden provenir principalmente de rocas, emisiones volcánicas, o meteoritos. Aunque los metales se encuentran en casi todo tipo de rocas, se les puede hallar en mayores concentraciones en las rocas ígneas. Los metales pesados se definen como aquellos que tienen una densidad de al menos cinco veces la del agua, estos metales pesados son llevados a la superficie terrestre de forma natural, principalmente por actividad volcánica, después son liberados por medio de procesos de intemperismo (meteorización) y erosión, o disueltos y arrastrados en ríos y arroyos, en forma de cationes, y terminan depositándose en los sedimentos, para comenzar el ciclo de nuevo (Ayala de la Portilla, 2007).

Es bien sabido que en el petróleo se pueden encontrar cantidades traza de metales pesados, inclusive, muchas veces se encuentran dentro de las estructuras orgánicas, dando origen a compuestos organometálicos. Cuando un combustible se quema y tiene esta clase de compuestos, los metales pesados son liberados al ambiente, donde se añaden en cantidades pequeñas, pero de manera continua, representando un riesgo latente en el medio ambiente (Ayala de la Portilla, 2007). En una carretera, se ven implicados varios factores que derivan como una fuente de metales pesados, si bien la quema de combustibles fósiles podría representar el factor más evidenciado, esta no es la única fuente de metales pesados, pues de igual manera habría que considerar el desgaste de los neumáticos, frenos o del auto en sí, los vertidos de grasas o aceites o incluso los accidentes de vehículos que transportan residuos (Figura 1).

El transporte por carretera alimentado por combustibles fósiles supone la fuente más significativa de contaminación atmosférica relacionada con el transporte. Cada vehículo libera contaminantes procedentes de diversas fuentes.

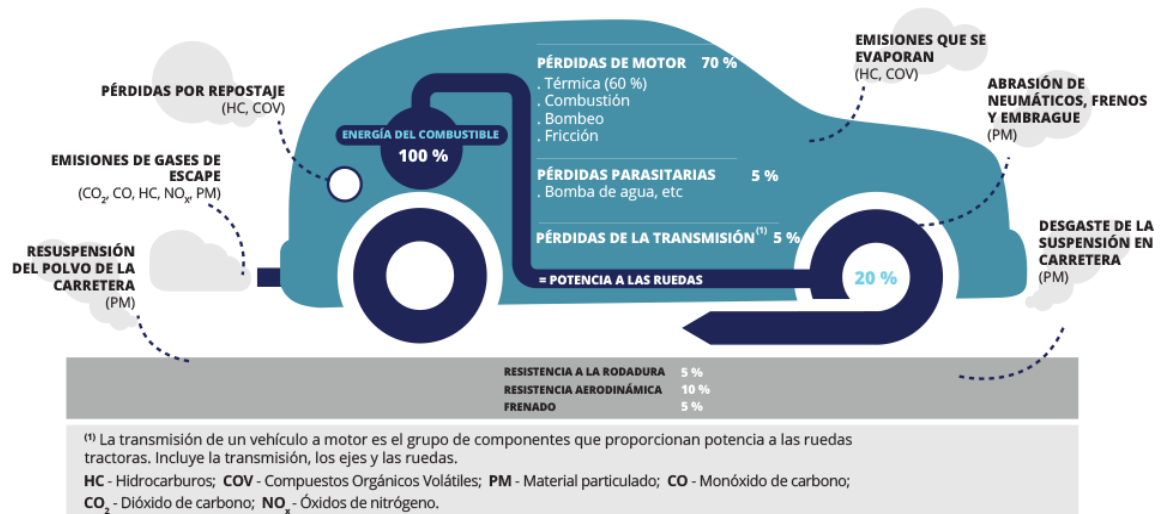


Figura 1: Fuentes emisoras de contaminantes en los vehículos (EEA, 2016).

Así, resultó importante conocer que elementos están involucrados en la fabricación e implementación de la carretera o las partes de los automóviles y por supuesto, también de la gasolina. Considerando lo anterior y contemplando la concurrencia del análisis de estos metales en los antecedentes consultados se decidió realizar el análisis de los siguientes cuatro metales pesados:

- Vanadio (V).

Una de las fuentes más importantes de exposición al vanadio para el hombre son los óxidos de vanadio liberados al quemar combustibles de petróleo, en algunos casos incluso se utilizan como catalizadores de ciertos combustibles.

La mayor parte del vanadio producido se emplea como ferrovanadio, cuyo uso directo más importante son aceros de alta velocidad y la fabricación de herramientas de acero. La adición de un 0,05 a un 5 % de vanadio elimina el oxígeno y el nitrógeno ocluidos en el acero, aumenta la resistencia a la tracción y mejora el módulo de elasticidad y la resistencia a la corrosión de la aleación final... (Nordberg, G. 2001). Esta misma aleación es posible encontrarla en la fabricación de algunas partes automotrices, como por ejemplo los frenos.

Aunque podíamos encontrar vanadio proveniente de varias fuentes emisoras, entre ellas el desgaste de algunas partes automovilísticas, se consideró como la fuente principal de vanadio la quema del combustible gasolina pues al adicionarse como aditivo a ésta, el vanadio sale dispersado a la atmósfera propiciando una depositación atmosférica.

- Plomo (Pb).

El plomo metálico se utiliza como empaste en la industria automovilística. Es un material excelente como protector de radiaciones ionizantes. Se utiliza en los procesos de metalizado para proporcionar recubrimientos protectores, en la fabricación de acumuladores y como baño de termotratamiento en el revenido de hilos metálicos (Nordberg, G. 2001).

El plomo se encuentra en una gran variedad de aleaciones y sus compuestos se preparan y utilizan en grandes cantidades en numerosas industrias. Aproximadamente un 40 % del plomo se utiliza en forma metálica, un 25 % en aleaciones y un 35 % en compuestos químicos. Los óxidos de plomo se utilizan en las placas de las baterías eléctricas y los acumuladores, como agentes de mezcla en la fabricación de caucho y en la fabricación de pinturas y como componentes de barnices, esmaltes y vidrio. Las sales de plomo constituyen la base de muchas pinturas y pigmentos: el carbonato y el sulfato de plomo se utilizan como pigmentos blancos y los cromatos de plomo sirven para obtener amarillo, naranja, rojo y verde de cromo. El sulfato de plomo se utiliza en mezclas de caucho; el naftenato de plomo es un agente secante muy utilizado y el plomo tetraetilo se utiliza como agente antidetonante para la gasolina en aquellos países en que la legislación aún lo permite (Nordberg, G. 2001). En México, fue hasta 1992 que se dejó de comercializar gasolina adicionada con plomo. Desde hace algunos años ya no se utiliza el plomo como aditivo para la gasolina, en su lugar ahora se adiciona vanadio, sin embargo el plomo fue utilizado por muchos años por lo que al ser el *Road effect zone* un proceso acumulativo, esperábamos encontrar plomo en los terrenos aledaños.

- Níquel (Ni).

El acero inoxidable y otras aleaciones de Ni-Cr-Fe se utilizan mucho para la fabricación de equipo resistente a la corrosión.

Para la fabricación de imanes y la producción de catalizadores (por ejemplo, el níquel Raney) se usan aleaciones de Ni-Al. Las aleaciones de Ni-Cr se destinan a elementos de calefacción, turbinas de gas y motores de reacción (Nordberg, G. 2001).

El níquel metálico, sus compuestos y sus aleaciones tienen muchos usos más, como baterías de níquel-cadmio, pigmentos para pinturas (como el amarillo de titanato de níquel) y catalizadores para reacciones de hidrogenación, síntesis orgánica y el paso final de metanización en la gasificación del carbón (Nordberg, G. 2001).

Se consideró como fuente principal de níquel, las distintas aleaciones de níquel que son implementadas en la fabricación de algunas piezas automovilísticas, mismas que al verse involucradas en un proceso de uso y desgaste, se depositan en la carpeta asfáltica para luego ser arrastradas a los terrenos aledaños.

- Bario (Ba).

El bario se utiliza mucho en la fabricación de aleaciones para las piezas de níquel-bario del sistema de encendido de automóviles. La barita (BaSO_4) o sulfato bórico se utiliza principalmente en la producción de litopán, un polvo blanco que contiene un 20 % de sulfato de bario, un 30 % de sulfuro de zinc y menos de un 8 % de óxido de zinc. La litopona se emplea comúnmente como pigmento en las pinturas blancas (Nordberg, G. 2001).

El hidróxido de bario se encuentra en los lubricantes, pesticidas, en la industria azucarera, en los anticorrosivos, en los líquidos de perforación y en los ablandadores de agua. También se utiliza en la fabricación de vidrio, la vulcanización del caucho sintético, el refinado de aceite animal y vegetal y en las pinturas al fresco (Nordberg, G. 2001).

Se consideró como la fuente principal de bario, la pintura blanca y amarilla utilizada para las señalizaciones marcadas en la carpeta asfáltica de la carretera.

Así mismo, los elementos de construcción y reparación de la carretera de una u otra manera contienen los elementos antes mencionados, por lo que de manera indirecta también se estaría dando un aporte de estos metales.

La dispersión de los metales pesados en los terrenos aledaños a una carretera puede darse por medios de la dispersión atmosférica o la dispersión hídrica, suponemos que la dispersión atmosférica podría abarcar un área de afectación mayor, sin embargo el presente trabajo de tesis se enfocara a la dispersión de los metales por depositación hídrica.

2.2 Carreteras y autopistas de México. Generalidades y clasificación.

En México, la red carretera nacional, desarrollada gradualmente a lo largo de varias décadas, comunica a la población en todas las regiones y en más de 25 mil localidades en el país. Es además, la infraestructura más utilizada para trasladar bienes y personas, dada su extensión y la gran flexibilidad de acceso que proporciona a los usuarios; comunicando a casi todas las regiones y comunidades del país a través de más de 333,000 kilómetros de caminos (INEGI, 2015).

La red carretera mexicana se clasifica en: red federal, redes estatales, caminos rurales y brechas mejoradas (Cámara de diputados, *s.f.*).

La red federal de carreteras es atendida en su totalidad por el gobierno federal. Registra la mayor parte de los desplazamientos de pasajeros y carga entre ciudades, canaliza los recorridos relacionados con el comercio exterior y aquellos producidos por los sectores más dinámicos de la economía nacional.

Las redes estatales cumplen una función de gran relevancia para la comunicación regional, enlazan las zonas de producción agrícola y ganadera y aseguran la integración de extensas áreas en diversas regiones del país.

Los caminos rurales y las brechas mejoradas son vías modestas y en general no pavimentadas, su valor es más social que económico, pues proporcionan acceso a comunidades pequeñas que de otra manera estarían aisladas, sin embargo, su efecto en las actividades y la calidad de vida de esas mismas comunidades es de gran trascendencia.

Los tres tipos de vías anteriores, integran una red funcional para la comunicación de los habitantes de este país.

Esta red nacional, adicionalmente a su jurisdicción, se clasifica también en 5 categorías por sus características geométricas, especificaciones de diseño, equipamiento, señalización y número de carriles totales. El nivel más alto corresponde a la denominación de Eje Troncal de Transporte o ET (Figura 2); en segundo lugar se ubica la categoría A destinada a las Autopistas, a la cual sigue la categoría B, asignada a las carreteras de la denominada red

primaria. Estas 3 categorías se subdividen en cada caso, por el número de carriles de circulación de que disponen, ya sean de 2 carriles o bien de 4 o más, por lo que a las letras de cada categoría se adiciona el número 2 o el 4 para identificar esa característica (ET4, ET2, A4, A2, etc.).



Figura 2: Ejes Troncales de Transporte Mexicano. (SCT, 2011).

Las dos categorías restantes corresponden a carreteras de 2 carriles ya sean tipo C (red secundaria) o bien tipo D (red alimentadora). La nomenclatura mencionada se emplea dentro del Reglamento de Peso y Dimensiones que la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) usa para clasificar a las carreteras federales, como base para determinar su capacidad máxima de carga permitida, por clase de unidad integral o de combinaciones articuladas de vehículos de tracción y arrastre, que son empleadas para el transporte de mercancías por el territorio nacional, donde las ET corresponden a las de mayor capacidad, mientras que las D son las que menores tonelajes soportan (Vergara, 2011).

Por otra parte, dentro de la red federal y atendiendo a la densidad del tráfico de mercancías y pasajeros que anualmente registran, así como por la importancia de las zonas metropolitanas, los nodos de producción, los de actividades logísticas y los de consumo que

enlazan, se han identificado 14 corredores carreteros principales, los cuales en conjunto suman casi 20 mil kilómetros a lo largo de diversos ejes longitudinales norte-sur y transversales este-oeste.

Asumiendo el hecho de que las carreteras y autopistas son el factor principal para el desarrollo social, económico y cultural de gran parte de la población mexicana, resulta de gran importancia mantener en óptimas condiciones estas vialidades a fin de mantener calidad en el servicio que brindan, así como prevenir y/o evitar afectaciones a los ecosistemas involucrados; sin embargo, su operación debe insertarse en un marco de sustentabilidad ambiental, por lo que es importante analizar sus efectos negativos hacia el ambiente para proponer soluciones de prevención o mitigación de los mismos.

2.3 Ecología de carreteras.

La ecología es la rama de la biología que estudia las interacciones de los seres vivos con su entorno, contemplando tanto factores bióticos como abióticos. A su vez, la ecología se subdivide en distintas áreas que buscan tener un enfoque más puntual sobre determinado tema o área.

La ecología de carretera es una de las áreas de la ecología, que estudia las interacciones de los elementos lineales ajenos al ecosistema (vías de comunicación) con los factores bióticos del sistema. Lo anterior lo describe Díaz- Pineda (2006) de la siguiente manera: "... en las últimas décadas del siglo XX se empezaron a apreciar los efectos negativos de la mecanización en la construcción de carreteras. A partir de entonces se ensayaron procedimientos que amortiguaran ese impacto y se incorporaron nuevos criterios en la planificación, ejecución y gestión de las infraestructuras. Esta nueva orientación permitió la incorporación de profesionales de distintas áreas de las ciencias biológicas, hasta entonces ajenos a las obras públicas".

Existen centros de estudio de ecología de carreteras en varias universidades en todo el mundo, de entre las que podemos señalar la Graduate School of Design de la Universidad de Harvard, Cambridge, Massachusetts; el Institute of Transportation Studies y el

Departamento de Ecología de Carreteras en la Universidad de Davis, California; el grupo de Ecología de Carreteras en Parks Canada en Alberta, Canadá; y recientemente el Brazilian Road Ecology Center (CBEE) en Lavras Federal University, MG, Brasil; por citar algunos. Asimismo, se han publicado ya varios libros en el tema con algunos resultados de los estudios realizados en otros países, siendo el más conocido el escrito por el Dr. Richard Forman (2003): *Road Ecology: Science and solutions*. No obstante, en México esta rama de la investigación aplicada no cuenta aún con un desarrollo formal. Actualmente aún no existe una institución o dependencia que analice la problemática desde una perspectiva regional e integral, siendo que los efectos más fuertes de las obras de infraestructura ocurren a esta escala, por lo que consideramos importante la creación de un Centro especializado en el tema, para iniciar este tipo de estudios y buscar soluciones con miras a una mejor conservación de nuestros recursos naturales, sin la interrupción del desarrollo; ambas condiciones muy necesarias para nuestro país (Fernández-Buces, 2013).

Aunque en muchas ocasiones no resulta tan evidente a primera instancia, tal como lo muestra la Figura 3, la construcción y el uso de las carreteras acarrea consigo una serie de problemas para el entorno en el que éstas se implanten, pues además de la pérdida de hábitat para las especies, la fragmentación derivada del cambio de uso de suelo para la construcción, la expansión del área de distribución de especies invasoras y de la muerte a causa de atropellamientos sobre la carpeta asfáltica, la construcción de las carreteras altera los patrones de flujo de agua, incrementa el ruido, así como la contaminación de agua, suelo y aire, lo que se traduce en un disturbio que altera la composición de especies de vegetación local y una reducción del hábitat para la fauna silvestre, formando a su vez barreras que impiden el desplazamiento de animales y por lo tanto el flujo génico.

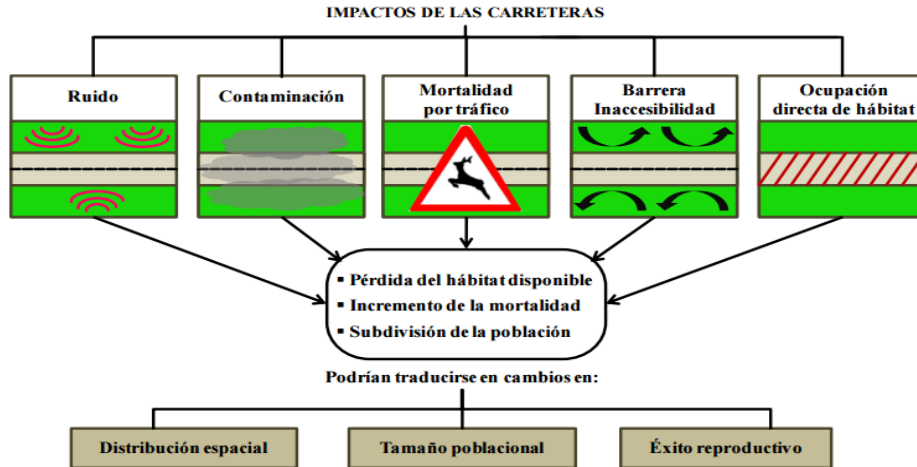


Figura 3: Representación esquemática de los principales efectos negativos asociados a las carreteras. Jaeger *et al.* 2005 en Torres-Moreno, 2010.

2.4 Road effect zone.

Road effect zone se refiere a la delimitación geográfica del efecto de las carreteras y autopistas sobre los sistemas naturales. El término fue acuñado por el Dr. Richard Forman en 2003 y a partir de éste, se busca integrar la ecología con la planificación de las vías carreteras, definiendo bajo este concepto, el área de impacto para los distintos factores ambientales en los que las carreteras pudieran incidir.

El *Road effect zone*, busca determinar las distancias dentro de la que inciden las afectaciones ambientales derivadas de una carretera (Figura 4). Lo complejo de ello es que la zona de impacto varía en función de los tipos de carreteras, nivel de tránsito y complejidad topográfica del sitio; además de distinta vulnerabilidad según cada factor ambiental, lo que da como resultado diferentes distancias en las que se manifiestan los efectos negativos sobre los parámetros ambientales.

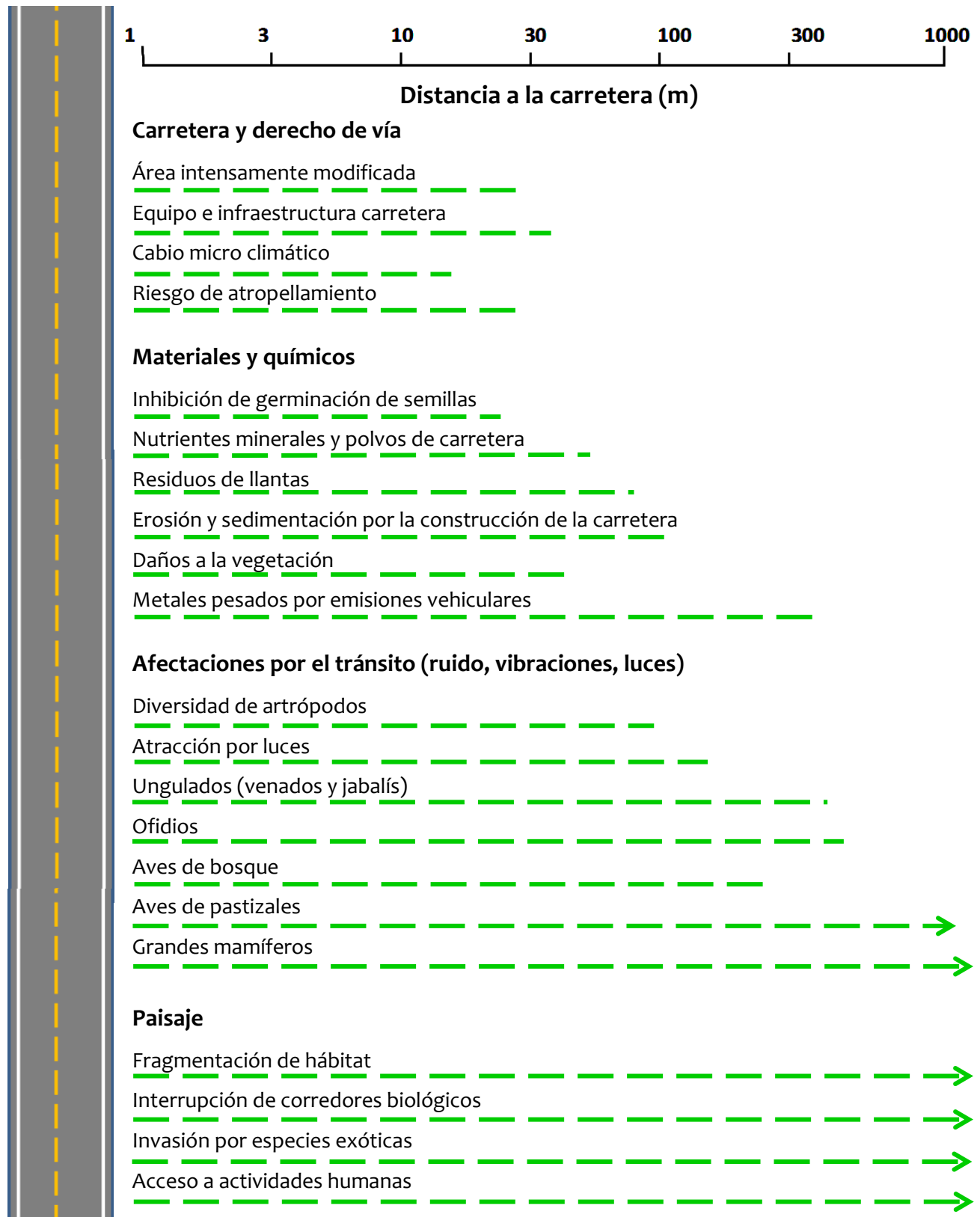


Figura 4: Modelo de ejemplificación de *Road effect zone* para distintos factores. Modificado de Forman *et al*, 2003.

2.5 *Road effect zone* en México.

No es difícil entender que la construcción de la infraestructura vial implica un cambio del espacio natural que atraviesa. Ese cambio puede suponer una ruptura total con el entorno, pero también, en función de las soluciones técnicas adoptadas, puede llegar a constituir un conjunto en el que ambos elementos, vía y naturaleza, se unan y complementen, dando lugar a un nuevo paisaje (Díaz-Pineda, 2006). Por ello, es necesario implementar medidas que faciliten la integración de ambos elementos, por lo que impulsar el desarrollo de investigaciones relacionadas con esta materia, resulta de suma importancia. El conocimiento de las distancias a las cuales ocurren los efectos de una carretera sobre los diferentes componentes de los ecosistemas es fundamental para mejorar su diseño y proponer medidas que permitan evitar y reducir el impacto de la infraestructura sobre los sistemas naturales; de ahí la importancia de poder determinar el *Road effect zone* de una vialidad. No obstante, a pesar de la importancia que implica la ecología de carreteras su estudio y difusión al parecer no ha sido la suficiente en nuestro país. En México los estudios y la información referente al tema del efecto a distancias de las carreteras sobre los diferentes componentes del entorno resultan escasos.

En este contexto podemos señalar que en México los únicos trabajos relacionados al *Road effect zone* son aquellos que analizan la mortandad de la fauna silvestre como resultado de atropellos viales y el efecto de pasos de fauna, como por ejemplo los publicados y presentados por Fernández-Buces, *et al.* (2009), Fernández-Buces, *et al.* (2011) y Puc-Sánchez, *et al.* (2013). En estos estudios se evidencian las altas tasas de mortandad que sufre la fauna silvestre, en especial los individuos de mediano y pequeño tamaño. También se demuestran las bondades de diseñar y construir carreteras con pasos de fauna adecuados a nuestras especies, además de evidenciar a su vez la poca información que se tiene sobre el tema, al menos en México. Puc-Sánchez, *et al.* 2013, señalan textualmente: “...hasta la fecha la mayor parte de los estudios del efecto de las carreteras se han realizado en Estados Unidos y Australia, mientras que prácticamente no existen en aquellos países que destacan por su alta diversidad de especies de vertebrados como México, Brasil, Ecuador o Indonesia”.

Es clara la necesidad de afrontar el rezago existente en nuestro país sobre la magnitud y características del impacto que los desarrollos carreteros tienen en la biodiversidad en general, y en la fauna silvestre en particular, sobre todo bajo una óptica regional y sinérgica, más que como el estudio del efecto puntual de las carreteras. La información que se genere de estos estudios será esencial para diseñar estrategias de mitigación específicas que sean efectivas en los distintos ecosistemas de nuestro país. Esta necesidad es particularmente urgente dado el importante crecimiento en la red de carreteras en nuestro país durante las últimas décadas (Puc-Sánchez, *et al.* 2013).

III. Antecedentes

Como se señaló previamente, el estudio del *Road effect zone* es una rama de la ecología de carreteras relativamente nueva, que como se ha explicado se puede subdividir en varias ramas de acuerdo con la afectación que trate. En general, esta ciencia aún no cuenta con una buena divulgación en México, mucho menos con investigaciones enfocadas a analizar la contaminación de suelos por metales derivados de la operación de carreteras. No se identifican al momento, trabajos de esta índole en México por lo que, para la realización de este trabajo, no se pudo contar con antecedentes de trabajos nacionales; sin embargo como punto de referencia para la presente tesis se analizaron algunos trabajos internacionales similares de los que a continuación se presentan sus características y resultados generales.

3.1 Polonia.

- i. Roj-Rojewski y Klimaszewska, 2014. Realizaron un estudio analizando Ni, Cu, Cr, Cd, Pb y Co en muestras de suelo de Grajewo, una pequeña comunidad al nordeste de Polonia. El estudio fue realizado con un total de 21 muestras de suelo, mismas que fueron colectadas a lo largo de todas las rutas carreteras que atraviesan la comunidad. Las muestras fueron colectadas en 2010 de manera superficial (0-20 cm) sin distinción a profundidad ni distancia, analizando textura, pH con potenciómetro y C orgánico mediante el método de Tiurin. Los metales analizados (antes mencionados) fueron analizados mediante el método AAS. Los resultados obtenidos se compararon con la

guía del Instituto de la Ciencia del Suelo y Cultivo (IUNG) y la Regulación del Ministro del Medio Ambiente del 9 de septiembre de 2002 sobre los estándares de calidad del suelo.

El rango de los resultados correspondientes a Pb de las muestras analizadas se encontró entre los 7.41 a 47.63 mg/kg⁻¹ con una media de 21.01 mg/kg⁻¹, resultados que de acuerdo a la guía de la IUNG fueron cercanos a los niveles de fondo en casi todos los sitios.

Los resultados de Ni, estuvieron entre el rango de 7.09 a 20.31 mg/kg⁻¹ con una media de 12.38 mg/kg⁻¹ valor que era ligeramente más alto que el contenido promedio en los suelos polacos.

- ii. Ciazela y Siepak, 2016 determinaron los niveles de Cd, Cr, Cu, Ni, Pb y Zn en un total de 96 muestras de suelo colectadas de ocho localidades en los límites de Poznań, Polonia entre marzo y abril de 2010. Las localidades fueron diferenciadas a profundidad (0-20 y 20-40 cm) y a distancia (1, 5 y 10 m) en ambos lados de la carretera. Los metales mencionados se analizaron mediante el método AAS; también se realizó el análisis granulométrico de las muestras, diferenciando 7 fracciones (S1-S7, en orden ascendente).

Las concentraciones de Ni fueron en promedio más altos en la fracción más pequeña registrada (S1), mientras que la más baja se registró en la fracción S4. Las concentraciones de Pb más altas registradas, estuvieron en la fracción S1, mientras que la más baja registrada estuvo en la fracción S5.

En general, las concentraciones de metales registradas decrecieron a mayor distancia desde el hombro de la carretera, lo cual es consistente con estudios previos considerados para la investigación de Ciazela y Siepak (2016) (Ver referencias: Bojakowska, I., *et. al.* 2009; Chen, X., *et. al.* 2010; Earon, R., *et. al.* 2012).

Ambos metales mostraron un comportamiento de mayor acumulación en los primeros 5 m de distancia a la carretera.

- iii. Modrzewska y Wyszowski, 2014. Analizaron un total de 24 muestras de suelos colectadas de 6 localidades situadas entre la carretera estatal 51 (State Road 51) en el

nordeste de Polonia. De cada uno de los sitios se tomó una muestra en el hombro de la carretera, a 5, 50 y 100 m respectivamente. Los metales analizados fueron: Pb, Cd, Cr, y Ni.

Las concentraciones de metales registradas presentaron un comportamiento dependiente de la distancia de la carretera a la localidad seleccionada, es decir las máximas concentraciones se registraron en las muestras más cercanas a la carretera.

La máxima concentración de Pb registrada fue de 96.9 mg/kg mientras que la mínima fue de 21.3 mg/kg, por su parte, la máxima concentración de Ni fue de 153.3 mg/kg mientras que la menor fue de 30.7 mg/kg. Y aunque los autores no realizaron análisis de pH, reconocen la importancia de esta variable para determinar el comportamiento de los metales.

- iv. Radziemska y Fronczyk, 2015. Analizaron muestras de suelo para determinar las concentraciones de Cd, Cu, Ni, Pb, y Zn, también se obtuvieron registros de pH y C.E.

Las muestras fueron colectadas de manera vertical y horizontal a lo largo de un tramo de carretera de 50 m, a 0.5, 4.5 y 25 m (sección A, B y C, respectivamente) desde el hombro de la carretera y diferenciadas a cinco profundidades: 0-10, 20-30, 45-55, 70-80 y 90-100 cm

Si bien, no se presentan las concentraciones de cada metal, los autores concluyeron que el contenido de los metales dependía del sitio del que se tomaron las muestras, así como de la distancia desde la carretera.

En cuanto a los resultados de profundidad, las concentraciones de las muestras superficiales representaron el efecto del material parental y de la actividad del tráfico, mientras que las muestras más profundas representaron únicamente las concentraciones del material parental.

Por otra parte, los resultados a distancia mostraron que en los suelos más cercanos a la carretera las concentraciones de metales fueron las más altas, observándose una tendencia a disminuir a mayor distancia

3.2 Emiratos Árabes Unidos.

- i. Aslam, *et al.* 2011. Determinaron las concentraciones de Cd, Pb, Cu, Ni, Fe, Mn y Zn en un total de 22 sitios en distintas áreas de Dubái, diferenciadas por el número de señales de tráfico, siendo a) 6 sitios con más de dos señales, b) 5 sitios con una señal de tráfico y c) 11 sitios sin señales de tráfico. De cada punto de muestreo se tomaron cuatro muestras (réplicas) de suelo superficial a una distancia de 5 m del hombro de la carretera. Los resultados obtenidos fueron Pb (259.66 – 2,784.45 mg/kg⁻¹), Ni (13.31 – 98.13 mg/kg⁻¹) para las muestras con más de dos señales; Pb (145.95 – 308.09 mg/kg⁻¹), Ni (18.29 – 59.36 mg/kg⁻¹) para las muestras con una señal, y Pb (8.34 – 113.26 mg/kg⁻¹), Ni (No detectado – 73.80 mg/kg⁻¹) para las muestras de sitios sin señales.
No se realizaron pruebas de pH ni C.E.

3.3 Inglaterra.

- i. Akbar, *et al.* 2006. Determinaron las concentraciones de Cd, Cu, Pb y Zn en un total de 233 muestras compuestas colectadas de 35 sitios al borde de la carretera al norte y oeste de Yorkshire, Inglaterra, carreteras de clase A y B. Cada sitio fue seleccionado de manera aleatoria y las muestras fueron colectadas contemplando “... las cuatro zonas arbitrarias en las que un borde de carretera se puede dividir: limite (*border*), borde (*verge*), pendiente (*slope*) y zanja (*ditch/hedge*)” con una profundidad entre los primeros 10-15 cm de suelo.

El contenido de Pb varió de 25 a 1,198 µg/g con un valor medio de 232.7 µg/g, observándose una pronunciada disminución en el contenido de plomo desde la primera hasta la última zona, siendo mucho más pronunciada esta disminución entre la primera y la segunda zona, lo que indica que hay una gran disminución en el contenido de plomo a una corta distancia de la carretera. Los resultados fueron comparados con niveles de fondo reportados en Alloway 1995.

3.4 China.

- i. Jian-Hua, *et al.* 2009. Realizaron un estudio similar, determinando concentraciones de Ni, Pb, Cr, Zn, Cu y Cd en muestras de suelos aledaños al lado sur del ferrocarril

Longxi-Haizhou en China, entre la sección de las ciudades Zhengzhou y Putian. Las muestras fueron muestras compuestas colectadas el 13 de abril de 2004 en una sección de muestreo de 500 m de largo, perpendicular al ferrocarril a distancia 0, 10, 20, 30, 50, 100, 200, 300 y un sitio control a 500 m desde la vía del ferrocarril, la profundidad de cada muestra fue de 0-15 cm.

Se realizaron pruebas de pH, materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico (CEC) y textura además del análisis de metales mediante la técnica AAS.

Las concentraciones de Pb se registraron en un rango de 52-146 mg/kg⁻¹, lográndose observar un comportamiento de mayor acumulación en los suelos cercanos a la vía del ferrocarril, disminuyendo a distancia e incrementándose nuevamente en un segundo pico de acumulación para después disminuir nuevamente la concentración a distancia.

Las concentraciones de Ni estuvieron entre los 11 y 23 mg/kg⁻¹ registrando un comportamiento a aumentar.

Las concentraciones registradas en este estudio fueron comparadas con los niveles de fondo señalados en el Central Station of Environmental Monitoring of China (CSEMC), 1990.

- ii. Hui, *et al.* 2017. Realizaron un estudio para determinar concentraciones de Pb, Cu, Cd, Ni y Zn en suelos aledaños a la carretera Shenyang-Dalian la cual atraviesa cinco ciudades principales de la provincia de Liaoning, China: Shenyang, Liaoyang, Anshan, Yingkou y Dalian.

Se seleccionaron 20 sitios para llevar a cabo el muestreo. Tomando como punto de partida el hombro de la carretera, en julio de 2013 se tomaron muestras compuestas a 5, 25, 50, 100, 200 y 300 m de distancia en ambos lados de la carretera; las muestras se tomaron de los primeros 5 cm.

El análisis de los metales se llevó a cabo mediante la técnica de AAS.

La concentración media de Pb fue de 43.5, mientras que la de Ni fue de 65 mg/kg, estos valores resultaron ser más altos que los valores de fondo registrados para la provincia de Liaoning.

En general, los sitios en el lado este presentaron mayores concentraciones que aquellos en el lado oeste debido a que los metales se dispersaron y acumularon en la dirección de sotavento (este).

También se realizó una comparación entre las concentraciones reportadas en este estudio (Hui, *et al.* 2017), con las registradas en un estudio realizado en 2008, demostrando así que las concentraciones de metales aumentaron con el tiempo en el suelo de la carretera.

3.5 India.

- i. Dasgupta, *et al.* 2017. Realizaron un estudio a lo largo de la carretera Manali-Leh, al noroeste del Himalaya, India, recolectando muestras de suelo de cuatro sitios (de norte a sur: Kothi, Jispa, Killingsarai y Rumtse) a lo largo de dicha autopista.

En cada sitio, se recolectaron muestras de un transecto perpendicular a la carretera, tomando las muestras a 6 distancias: 0, 2, 5, 10, 20 y 150 m, desde el hombro de la carretera. Las muestras fueron colectadas a profundidades de 3, 9 y 15 cm.

Los análisis realizados en este estudio fueron: concentración de 10 metales (Al, Fe, Cr, Cu, Pb, Ni, Co, Zn, V y Ba), azufre total, carbono orgánico total (COT) y la concentración de 16 hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) a 2 m de la carretera.

Las concentraciones de Pb estuvieron entre los 10 y los 40 mg/kg, Ni entre 42 y 136 mg/kg, Ba entre 384 y 795 mg/kg, y V entre 21 y 94 mg/kg. Las concentraciones medias de los metales se encuentran dentro de los niveles de referencia locales en Kothi y Killingsarai pero por encima de los niveles de fondo locales en Jispa.

Los autores no mencionaron las referencias correspondientes a los niveles de fondo.

IV. Justificación

El estudio del *Road effect zone* es un área de investigación relativamente nueva, que tiene sus inicios en las Montañas Rocosas, en Canadá. Al momento no se identifican trabajos científicos en México relacionados al estudio de estos efectos, por lo que en México no se tiene conocimiento del impacto a diferentes distancias que tienen las carreteras sobre nuestro entorno natural. Por ello, se estima necesario empezar a generar información sobre el *Road effect zone* sobre diferentes componentes ambientales en nuestro país para poder diseñar de mejor manera las estrategias de mitigación de los impactos que generan las carreteras.

Por otro lado al ser un área con poca divulgación, la práctica común de está podrá abrir un campo laboral que beneficiaría al área científica, por lo tanto el presente trabajo cuenta con varios factores que ameritan el término de un trabajo innovador.

V. Objetivos

5.1 General

Evaluar el comportamiento a distancia de los metales pesados sobre el suelo, derivados de la operación de la autopista federal 95D; tramo México-Alpuyeca.

5.2 Particular

- Diseñar una estrategia de muestreo para el análisis de la contaminación del suelo a diferentes distancias por metales, provenientes del lavado de la carpeta de una autopista tipo A4.
- Cuantificar horizontal y verticalmente, las concentraciones de algunos de los metales presentes en la operación carretera (V, Pb, Ni y Ba), que se han reportado en la literatura en relación con el efecto carretero a diferentes distancias.

VI. Hipótesis

Si el suelo actúa como sitio de acumulación de contaminantes y dado que la autopista federal 95D, México-Acapulco, inaugurada en 1952 y ampliada en 1993, es considerada como una de las principales autopistas de México, con un tránsito promedio diario (TPD) de 40,906 vehículos (CAPUFE, 2017); entonces se espera encontrar concentraciones elevadas de los metales bajo estudio a diferentes distancias en los suelos aledaños a ésta, que permitan identificar el *Road effect zone* para este impacto ambiental en autopistas con características similares.

VII. Área de estudio

7.1 Autopista 95D México-Acapulco; tramo: México-Alpuyeca.

El área de estudio para el presente trabajo fue la autopista federal 95D, con una longitud total de 367 km. Es la opción de peaje paralela a la carretera federal 95 y ambas comunican la Ciudad de México con el puerto de Acapulco en Guerrero.

El tramo México-Cuernavaca fue construido e inaugurado en 1952. Posteriormente comenzando en el kilómetro 95 y finalizando en el punto kilométrico (pk) 368+800”, el tramo Cuernavaca-Acapulco, mejor conocido como autopista del sol “inició su construcción el 30 de agosto de 1989, finalizando en 1993 y siendo inaugurada por el entonces presidente de la República, Carlos Salinas de Gortari” (Mendoza-Díaz, *et al.* 2013).

“La construcción de esta gran obra se llevó a cabo inicialmente con fondos privados, no obstante, actualmente CAPUFE (Caminos y Puentes Federales de Ingresos y Servicios Conexos - Organismo descentralizado del Gobierno Federal) se encarga de su operación y mantenimiento, formando parte del conjunto de caminos y puentes del Fideicomiso de Apoyo para el Rescate de Autopistas de Cuota (FARAC)” (Mendoza-Díaz, *et al.* 2013).



Figura 5: Mapa de la autopista 95D, ruta México-Acapulco (CAPUFE, 2017).

La autopista 95D (México-Acapulco) fue seleccionada porque reúne varias características que la hacían óptima para realizar el presente trabajo de investigación, dichas características se explican a continuación:

- Antigüedad.

El factor antigüedad resultó ser un factor a considerar pues cayendo en el supuesto inicial de un efecto acumulativo de contaminación por metales pesados en el suelo, la edad de la carretera resultaba un dato importante a considerar, pues entre más antigua la carretera, mayores probabilidades de encontrar acumulación de elementos a diferentes distancias que permitieran delimitar el *Road effect zone* en la zona.

- Variedad de ecosistemas a lo largo de la carretera.

La autopista 95D atraviesa varios tipos de ecosistemas y al no contar con un estudio de este tipo en México, resultó interesante comparar varios factores que pudiera estar influyendo en los resultados por lo que el tipo de ecosistema y tipo de suelo de cada muestra podría influir.

- Cercanía a la Ciudad de México.

La autopista 95D parte del sur de la ciudad de México. Por su cercanía a la Ciudad, trabajar en ella resultaba factible.

- Tránsito promedio diario (TPD).

La autopista 95D es una de las autopistas más usadas en México. Al tener un tránsito promedio diario importante, las posibilidades de delimitar un *Road effect zone* definido por acumulación de contaminantes en el suelo aumentaban.

Como referencia de lo anterior se señala que en 2013, el TPD registrado fue de 35,600 vehículos (CAPUFE, 2013), mientras que el registrado en 2016 fue de 40,906 vehículos (SCT, 2017), conformando una de las autopistas más transitadas del país.

- Presencia de obras de drenaje que fluyen al terreno natural.

Los sitios elegidos para realizar el muestreo fueron los lavaderos de la autopista, los cuales son obras de drenaje que sirven para movilizar el agua de la carretera hacia los terrenos o cuerpos de agua aledaños, para brindar seguridad a los usuarios. La autopista 95D cuenta con dichas estructuras distribuidas a lo largo de todo el tramo.

- Alejado de actividad antrópica.

Lo que se buscó en la presente investigación fue evaluar el efecto de la autopista por lo que se debían de seleccionar áreas de muestreo que estuvieran fuera de la influencia de áreas urbanas, para que de esta manera los resultados no se vieran alterados por otras actividades antrópicas, asegurando que la concentración de metales encontrada se atribuyera exclusivamente al uso de la carretera.

Como anteriormente se mencionó, los puntos de muestreo corresponden a las obras de drenaje lateral conocidas como: lavaderos. En la figura 6 se ubican geográficamente los sitios que cubrieron las características para el presente estudio (*ver materiales y métodos*) y por ende que fueron considerados.



Figura 6: Sitios de muestreo sobre la autopista federal 95D.

VIII. Material y métodos

8.1 Trabajo en campo.

8.1.1 Visita de reconocimiento.

Debido a que no se reportan estudios previos de metales pesados en suelos aledaños, atribuidos al uso de carreteras en México, se decidió llevar a cabo un muestreo preliminar a partir de una visita de reconocimiento que permitiera diseñar una estrategia para evaluar la contaminación por metales en los suelos al pie de los lavaderos de la carretera.

Los lavaderos carreteros son canales que conducen y descargan el agua de lluvia sobre la carpeta asfáltica, recolectada por cunetas y contracunetas, dirigiéndola hacia lugares donde no causen daño a la estructura del terraplén. Los lavaderos pueden ser de mampostería, concreto hidráulico y generalmente tiene sección triangular con el propósito de lograr una depresión en su intersección con el acotamiento, para facilitar la entrada del agua al lavadero (SCT, 2000). Es decir, los lavaderos carreteros constituyen un punto de acumulación de sustancias lavadas del asfalto, objetos arrojados sobre la cuneta y sobre la carpeta, así como derrames de grasas y aceites sobre la carpeta y acotamiento en vehículos averiados o accidentado, por ello se optó por seleccionar estos sitios como puntos de concentración y acumulación de contaminantes en el suelo aledaño a la autopista 95D.

Para realizar los muestreos en zona federal fue importante solicitar el permiso correspondiente a Caminos y Puentes Federales (CAPUFE), garantizando la aplicación de medidas y señalamientos de seguridad para los usuarios. El muestreo de suelos aledaños a la autopista implicó circular a baja velocidad para estar en posibilidad de ubicar sitios accesibles, además de dejar estacionado el vehículo en el acotamiento por lo que fue importante seguir todas las reglas de seguridad pertinentes (el uso de chalecos antirreflejantes en todo momento, conos de señalización ubicados a distancias según la normatividad de la SCT, así como la selección del sitio de estacionamiento del vehículo en un lugar apropiado, con amplia visibilidad para los demás vehículos). Una vez aprobada la solicitud pertinente, la visita de reconocimiento se llevó a cabo el día 25 de junio de 2016.

Al no contar con un mapa de ubicación de los lavaderos, el muestreo preliminar consistió en recorrer la autopista para identificarlos, revisar sus características generales y

seleccionarlos para el presente estudio con base en ellas. Algunas de las características que se tomaron en cuenta en campo para la selección de los lavaderos fueron:

a) Lavadero.

Se seleccionaron aquellos lavaderos que desembocaran en suelo, omitiendo así, los lavaderos que desembocaban en cuerpos de agua, drenajes o pendientes muy pronunciadas. Condiciones estructurales del lavadero que permitían una adecuada manipulación para la toma de muestras.

b) Distancia de asentamientos urbanos.

Se contempló una distancia mayor a 100 m y aguas arriba de algún tipo de asentamiento urbano, a fin de evitar en la medida de lo posible la presencia de contaminantes en el suelo por efecto de dichos asentamientos.

c) Área disponible para muestrear.

Se trabajó en aquellos lavaderos que además de desembocar en terrenos naturales, aledaños a la carretera, tuvieran una superficie perpendicular a la vialidad, con espacio suficiente para la toma de muestras en un gradiente de longitud a diferentes distancias.

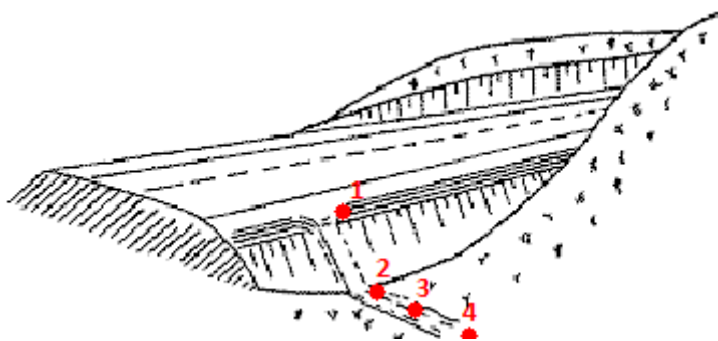
d) Zona disponible para estacionarse.

El aspecto más importante a considerar para la selección final de los lavaderos en este estudio fue, garantizar la seguridad de quienes realizarían el muestreo.

Se seleccionaron aquellos lavaderos que contaran con acotamiento suficiente para estacionar el auto, así como también se tomó en cuenta la ubicación del lavadero a fin de que el auto resultara visible para el tráfico vehicular que en ese momento transitaba por la autopista, de tal manera que se omitieron aquellos lavaderos que estuvieran en curva y/o pendientes pronunciadas a fin de evitar cualquier accidente.

Tomando como punto de partida el hombro de la carretera, se estandarizaron las distancias para los muestreos, siendo: 6.5m, 16.5m y 27m (Figura 7) los puntos de toma de muestra, según la distancia disponible de cada lavadero. En cada uno de los puntos de muestreo se tomaron datos generales del lavadero mediante un formato de campo (elaboración propia,

ver anexo 14.5). Las muestras se tomaron con la ayuda de una barrena y se separaron en bolsas individuales diferenciando por horizontes de acuerdo a características físicas (color, pedregosidad y textura), en los casos en los que se obtuvo una mínima cantidad de alguno de los horizontes se repetía el proceso, así, se obtuvieron muestras compuestas por varios barrenos para cada horizonte (superficial) identificado en el sitio.



1: Hombro de la carretera, bordillo del lavadero.

2: Muestra a 6.5m de distancia, tomando como inicio el hombro de la carretera.

3: Muestra a 16.5m de distancia, tomando como inicio el hombro de la carretera.

4: Muestra a 27m de distancia, tomando como inicio el hombro de la carretera.

Figura 7: Esquema de las áreas de muestreo a diferentes distancias al pie de los lavaderos.

Una vez diferenciados los horizontes, las muestras se guardaron en bolsas individuales de plástico atadas con una liga de goma y etiquetadas según lo siguiente:

$L_n M_n$	L_n: Número correspondiente de lavadero muestreado.
___ - ___ cm.	M_n: Número correspondiente de muestra colectada sobre el mismo lavadero.
	___ - ___ cm: Profundidad del horizonte en cm.

Una vez etiquetada cada muestra se colocaron en una caja de cartón y se transportaron hacia el laboratorio para realizar los análisis correspondientes.

A partir de los resultados obtenidos en este primer muestreo, se diseñó la estrategia de muestreo para cuantificar metales, misma que se describe a continuación.

8.1.2 Estrategia de muestreo para cuantificar metales en suelos al pie de lavaderos carreteros.

Los días 28 y 29 de enero de 2017 se llevó a cabo el muestreo para esta tesis, el cual fue diseñado a partir de los resultados obtenidos del análisis de pH y C.E. realizados a las muestras preliminares (25 de Junio de 2016); con base en ello se definieron las condiciones del muestreo.

Tomando como punto de partida el bordillo del lavadero, se estandarizaron las distancias para los puntos de toma de muestra, siendo estas a: 7-10, 13-16, 19-21m, según las condiciones del terreno a muestrear en cada lavadero. En cada uno de los puntos de muestreo se tomaron datos generales del lavadero mediante un formato de campo (elaboración propia, *ver anexo 14.5*). Las muestras se tomaron con la ayuda de una barrena y se separaron en bolsas individuales diferenciando por profundidad a: 0-5, 5-10, 10-15 y 15-20 cm, respectivamente. Las muestras tomadas fueron muestras compuestas en las que cada una de las muestras estuvo conformada por 8-12 muestras según la cantidad de suelo recabado en cada toma. Siguiendo el mismo proceso de recolección, se buscó un sitio que estuviera fuera de la corriente del lavadero para que este sirviera como sitio control del lavadero.



Figura 8: Proceso de toma de muestra. a) Selección del sitio de muestreo (lavadero), b) Toma de medidas desde el bordillo del lavadero y ubicación de puntos de muestreo, c) Toma de muestras con barrena, d) Distinción de profundidades en la toma de muestras.

8.2 En laboratorio.

Una vez en el laboratorio, las muestras se registraron en la bitácora; se colocó cada una de las muestras en una charola de plástico, conservando la etiqueta de campo y la nueva, correspondiente al laboratorio. Cada muestra se dejó secar a la intemperie por una semana.

Una vez secas las muestras, éstas se tamizaron con una malla de 2mm, a fin de homogeneizar las muestras. Se conservaron en bolsas de plástico con las etiquetas originales.

Se pesaron 5g de cada una de las muestras y se pulverizaron en un mortero de ágata a fin de obtener muestras finas y homogéneas para los análisis de metales.

8.2.1 Determinación de pH.

Para la prueba correspondiente a pH se depositaron 10g de suelo tamizado en tubos limpios de 50ml, se agregaron 25ml de agua desionizada y los tubos se colocaron en un agitador mecánico durante 3 horas a 240 rpm. Después de haberse agitado cada una de las muestras, éstas se dejaron sedimentar.

Se utilizó un equipo HANNA-H199121N para la medición de pH, calibrando el potenciómetro con solución buffer de pH 4 y 7.

Para la medición de pH, se introdujo el potenciómetro a la muestra hasta que el sensor estuviera completamente cubierto por el sobrenadante, se obtuvo el dato de medición y se registró en la bitácora correspondiente.

El proceso de medición de pH se llevó a cabo por duplicado para cada una de las muestras y se verificó la calibración del equipo cada 5 muestras con un buffer de pH 7.

8.2.2 Determinación de la conductividad eléctrica.

Para la determinación de la Conductividad Eléctrica (C.E.) se trabajó con las muestras previamente agitadas y sedimentadas en las que se midió el pH. Cada una de las muestras se filtró, desechando el material retenido por el filtro para trabajar únicamente con el sobrenadante.

Se utilizó un equipo HANNA-H199121N para la medición de la C.E., calibrando conductímetro con una solución buffer de 1,413 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Para la medición de la C.E., se introdujo el conductímetro en la muestra hasta que el sensor estuviera completamente cubierto por el sobrenadante, se obtuvo el dato de medición y este se registró en la bitácora correspondiente.

Al igual que para el pH, el proceso de medición de la C.E. se llevó a cabo por duplicado en cada una de las muestras y se calibró el equipo cada 7 muestras con un buffer de 1,413 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

8.2.3 Determinación de Metales: Vanadio, Plomo, Níquel y Bario.

La medición de las concentraciones de metales en las muestras de suelo se realizó utilizando la Espectrofotometría de Absorción Atómica (AAS), para lo cual fue necesario hacer un tratamiento previo (digestión) a las muestras, mediante el método EPA SW-3052 modificado para la determinación de metales (USEPA, 1996) propuesto por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de América (USEPA, por sus siglas en inglés).

Se utilizó un equipo MAE (Microondas de suelo-sedimento) en CEM, MARS-X®, con carrusel de 14 tubos de teflón. En cada ronda de lectura se colocaron 11 muestras distintas y los controles de calidad: 1 duplicado de una muestra aleatoria para estimar la precisión de la lectura, 1 muestra de material de referencia (2711, Montana Soil, *ver anexo 14.6*) para evaluar la exactitud del método y las variaciones entre cada ronda de lectura, y un blanco de reactivo para descartar la contaminación de los reactivos empleados y la limpieza del equipo. El total de las muestras se trabajó en un total de 10 rondas de lectura.

Como proceso de pre-digestión, se pesaron 0.2 gramos de muestra molida, adicionando 4.5ml de HNO₃ y 1.5ml de HF a cada frasco. Estos se agitaron cada 15 minutos por una hora, después de la cual se llevó a cabo la digestión estandarizada en el equipo, con el siguiente rampeo de parámetros para horno de microondas:

Tabla 1: Parámetros del método PETA SED.

STAGE	POWER		TIME	PSI	°C	HOLD
	Max	%				
1	1200W	100	15:00	0120	170	00:00
2	1200W	100	05:00	0120	185	05:00
3	1200W	000	05:00	0120	185	01:00
4	1200W	100	10:00	0120	185	00:00
5	1200W	100	07:00	0120	195	15:00

Terminado el proceso de digestión, se neutralizó el HF con 1.5 mL de ácido bórico saturado, cada muestra procesada se guardó en un frasco de polipropileno para posteriormente filtrarlas con un filtro de 0.22 µm de nitrocelulosa (Millipore), las muestras filtradas se colocaron en tubos de polipropileno de 50 ml.

La determinación de las concentraciones de metales, se llevó a cabo mediante un equipo Perkin Elmer 800 A-Analyst; específicamente para los metales Pb, Ni y V, se utilizó la técnica de flama (mezcla aire-acetileno para Pb y Ni y acetileno-óxido nitroso para V). El vanadio se determinó directamente en las muestras filtradas y para el caso del plomo y níquel, fue necesario realizar diluciones 1:10, por lo que se tomaron 0.5 ml de la muestra filtrada y se aforo a 5 ml con HNO₃ al 15%.

Para el caso del Ba, se utilizó un Horno de grafito, por lo que fue necesario hacer la dilución 1:100 de cada muestra, tomando 0.5 ml de la dilución previa de 1:10 y aforando a 5 ml con HNO₃ al 2%.

Los límites de detección (LD), así como los porcentajes de recuperación (%REC) considerados para cada metal al momento de hacer el análisis de las muestras, se presentan en la tabla 2.

Tabla 2: Limite de Detección (LD) y porcentaje de recuperación (%REC) considerados para cada metal.

	LD (mg/kg)	%REC
V	4.45	100 - 130.
Pb	0.05	90 - 105.
Ni	0.07	80 - 125.
Ba	4.00	90 - 110.

A continuación se presenta a manera de resumen el diagrama de flujo del procedimiento llevado a cabo para el análisis de laboratorio de las muestras.

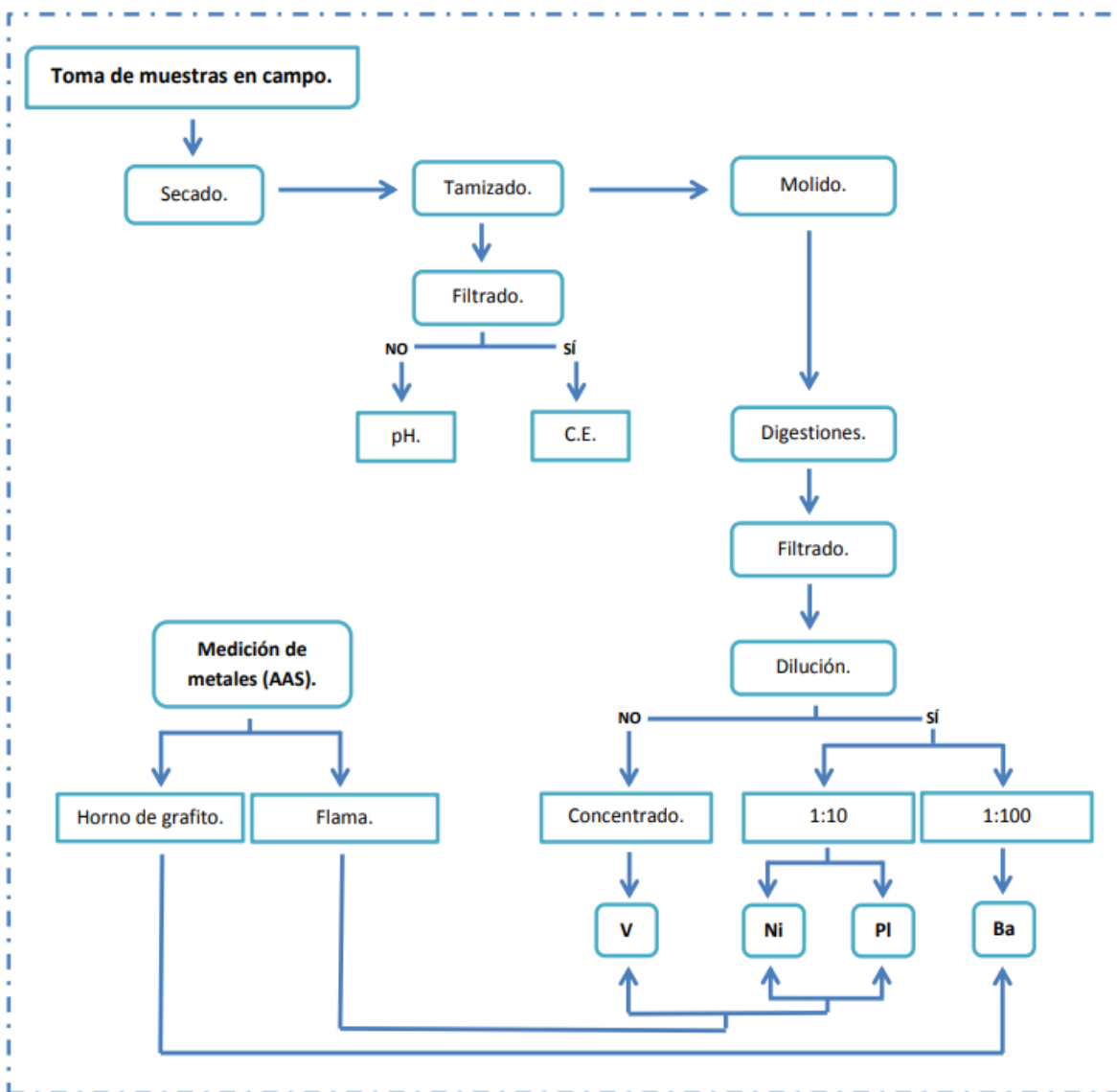


Figura 9: Diagrama de flujo del método de laboratorio.

IX. Resultados.

9.1 pH y C.E.

Los resultados de las pruebas de pH y C.E. realizadas a las muestras se presentan en las figuras 10 y 11, respectivamente. Considerando que en la autopista federal 95D es posible observar distintos tipos de vegetación y por ende distintos tipos de suelo, además de las observaciones realizadas en campo así como el análisis descriptivo de los sitios de muestreo (ver *Anexo 14.1*) se optó por hacer una diferenciación en las muestras, pues en campo fue posible distinguir los sitios de muestreo que se encontraban en una zona húmeda (L1, L2, L6 y L7) o en una zona seca (L3, L4 y L5) (distintos ecosistemas), de esta manera, en las figuras 12 y 13, respectivamente, se presentan los resultados de pH y C.E. diferenciados por zona húmeda y zona seca.

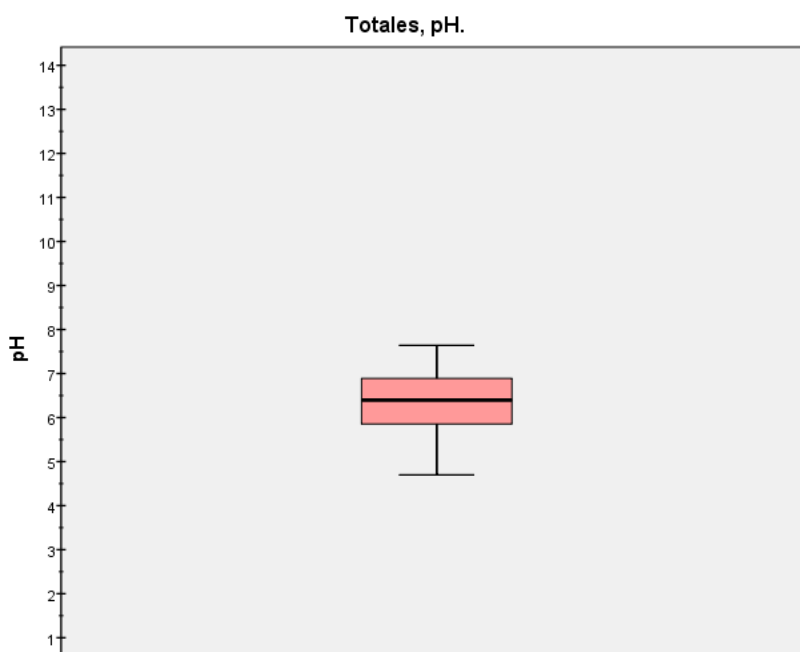


Figura 10: Diagrama de caja para los resultados de pH.

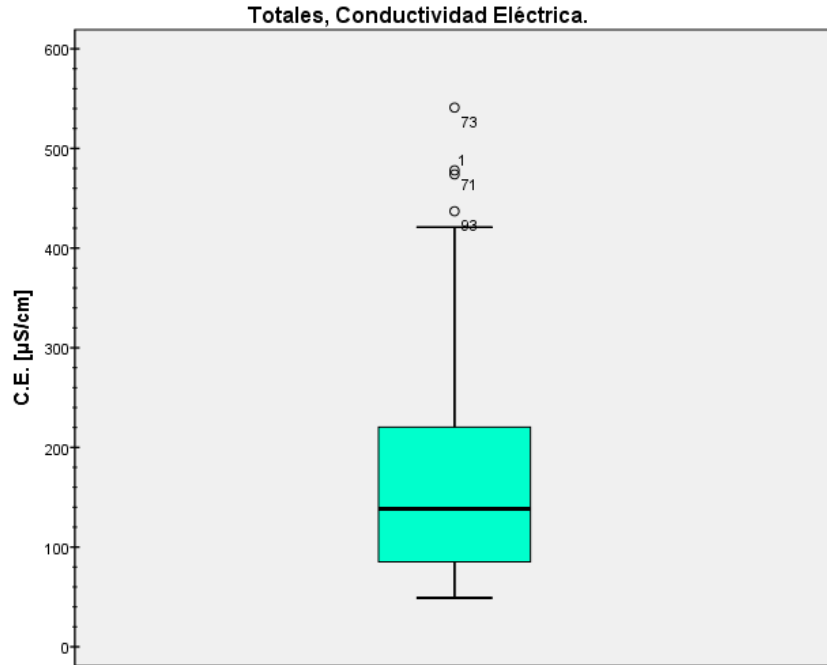


Figura 11: Diagrama de caja para los resultados de C.E.

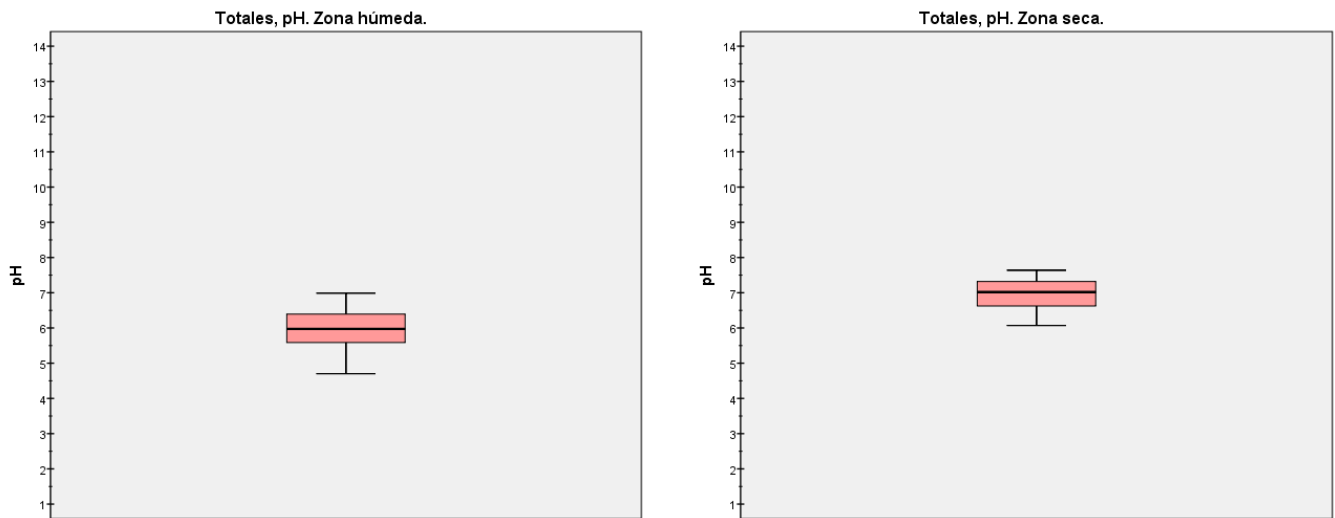


Figura 12. Diagramas de caja para los resultados correspondientes a pH en los 7 lavaderos, diferenciados en zona húmeda y zona seca.

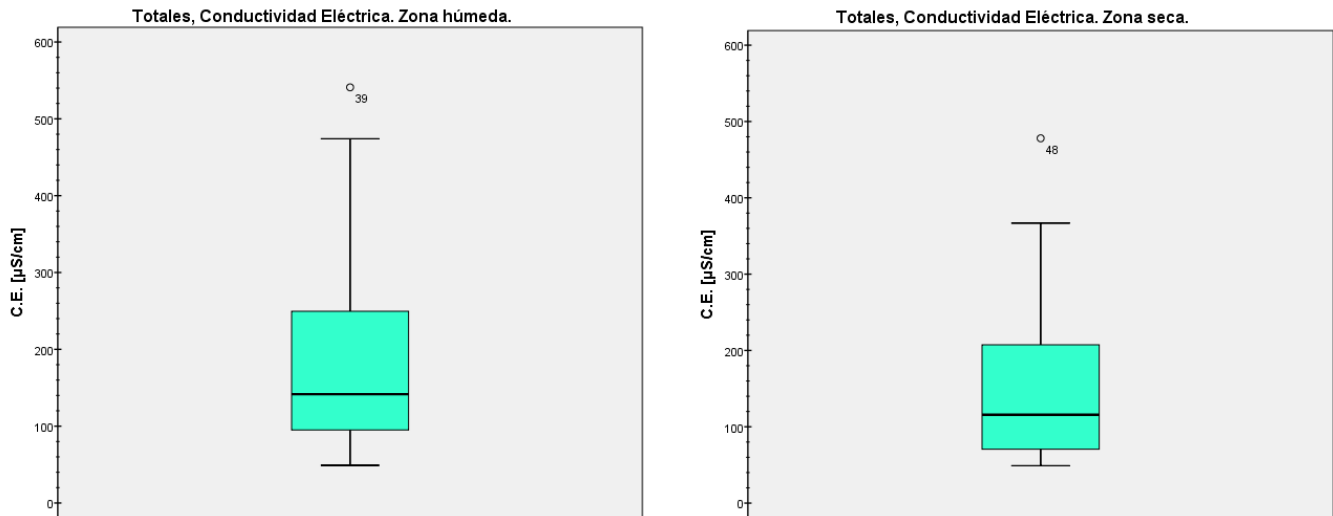


Figura 13: Diagramas de caja para los resultados correspondientes a C.E. en los 7 lavaderos, diferenciados en zona húmeda y zona seca.

9.2 Metales pesados: Vanadio, Plomo, Níquel y Bario.

Como bien se mencionó anteriormente, en nuestro país resulta escasa la información referente al tema de *Road effect zone*, por lo que al no contar con información nacional, los resultados se compararon con la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004-PROFEPA, la cual establece los criterios para determinar las concentraciones máximas permisibles para la remediación de suelos contaminados por arsénico, **bario**, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, **níquel**, plata, **plomo**, selenio, talio y/o **vanadio**; por lo que al ser la Norma Oficial Mexicana más cercana a indicar los límites máximos permisibles de contaminantes en suelos, las concentraciones registradas en el presente estudio se compararon con dicha norma.

De la misma manera, al no contar con rangos de valores que dieran pauta para determinar si una muestra de suelo está o no contaminada, resultó importante conocer los niveles de fondo o niveles geogénicos de la zona, y es que los metales se encuentran presentes en el suelo de manera natural, por lo que es importante conocer las concentraciones naturales, mismas que no representan un riesgo para el ambiente o para la población en sí.

“En México prácticamente no se cuenta con información disponible sobre las concentraciones de fondo en los suelos, lo que ha llevado a utilizar datos de otros países con condiciones geoquímicas y climáticas diferentes” (Gutiérrez-Ruiz, *et. al.* 2009). Al no

contar con niveles geogénicos nacionales, se tomaron como referencia los señalados en Kabata-Pendias, 2000, en donde se hace una recopilación y análisis de las concentraciones geogénicas de varios países; también los señalados por Blume, 2004, en donde se establecen los *niveles normales* de contaminantes para suelos alemanes.

En la tabla 3 se presentan los resultados obtenidos en el presente estudio, contrastados con los datos de referencia correspondiente al trabajo de Kabata-Pendias, 2000; al realizado por Blume, 2004 y a la NOM-147.

Los valores señalados en la NOM-147 se diferencian por tipo de uso de suelo pero de acuerdo a las especificaciones de la norma, para el presente análisis se contemplaron los niveles referentes a tipo de uso de suelo agrícola, residencial o comercial. Así mismo se contemplaron los valores correspondientes a la media de cada metal señalados en el trabajo de Kabata-Pendias, 2000 y al valor máximo señalado por Blume, 2004.

Tabla 3: Resultados contrastados con niveles geogénicos (Kabata-Pendias, 2000 y Blume, 2004) y NOM-147.

Metal	Resultados obtenidos.			Contenido de metales en suelos superficiales de diferentes países (Kabata-Pendias, 2000).			Niveles normales de cotaminantes en el suelo (Blume, 2004).		Concentraciones de referencia totales (CRT) por tipo de uso de suelo. NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004.	
	Conc. Totales (mg/kg) Media	Conc. Totales (mg/kg) Mediana	Conc. Totales (mg/kg) Maxima	Conc. Totales (mg/kg) Media	Conc. Totales (mg/kg) Minima	Conc. Totales (mg/kg) Maxima	Conc. Totales (mg/kg) Minima	Conc. Totales (mg/kg) Maxima	Uso agrícola/residencial/comercial (mg/kg)	Uso industrial (mg/kg)
Plomo	87.3	27.9	750.3	24	10	50	0.1	20	400	800
Niquel	42.6	37.4	98.5	12	5	50	2	50	1,600	20,000
Bario	399.1	334.3	1,510.5	265	10	700	--	--	5,400	67,000
Vanadio	115.6	123.7	170.8	38	7	150	0.01	200	78	1,000

En las figuras 14 a 17 se presentan los diagramas de caja correspondientes a los resultados de cada metal analizado en el presente estudio. Las referencias correspondientes a la NOM-147, al trabajo de Kabata-Pendias, 2000 y al de Blume, 2004 se indican en cada diagrama.

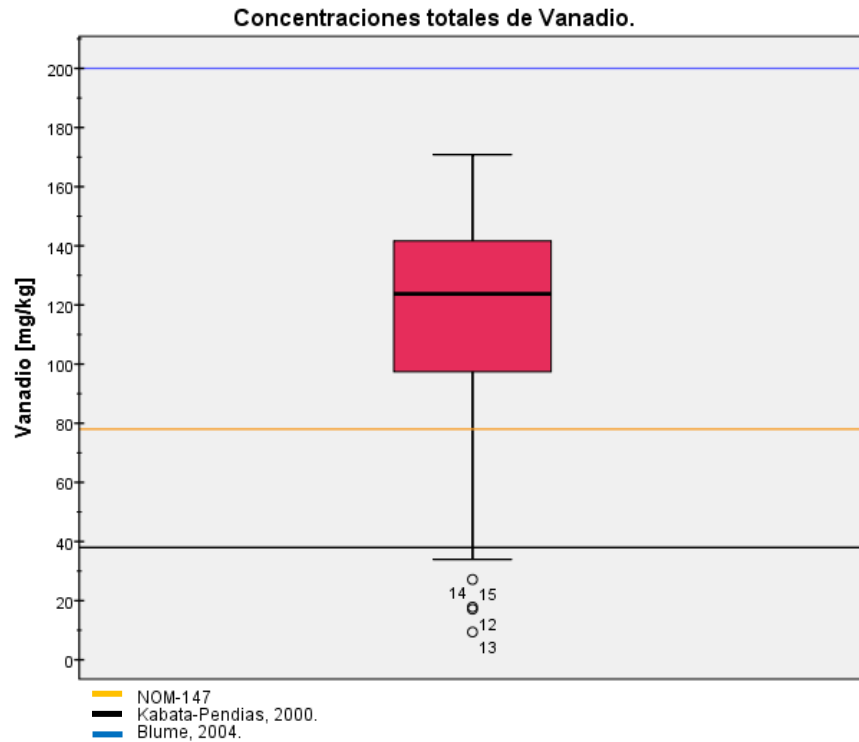


Figura 14: Diagrama de caja para los resultados correspondientes a las concentraciones totales de Vanadio en los 7 lavaderos.

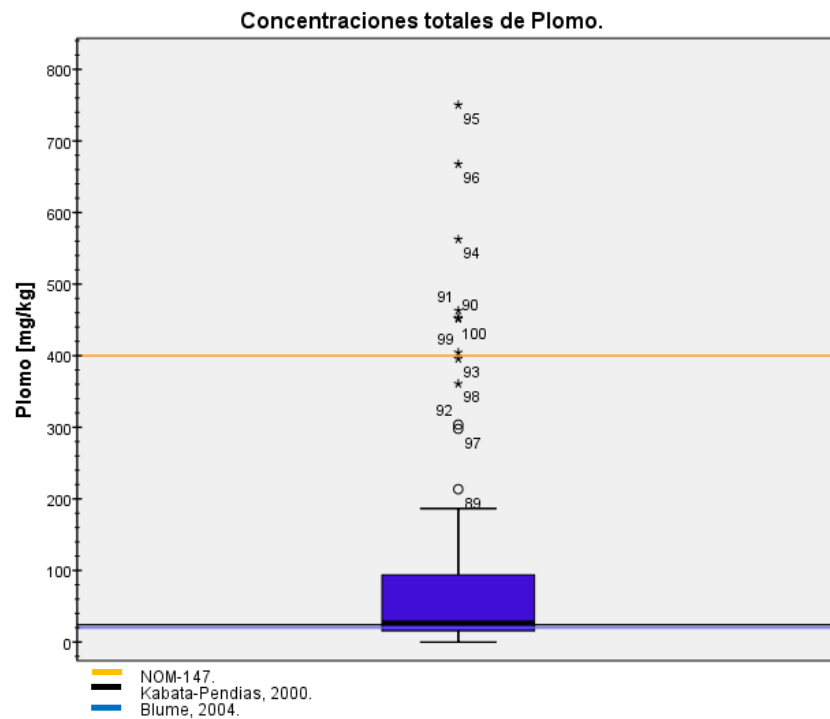


Figura 15: Diagrama de caja para los resultados correspondientes a las concentraciones totales de Plomo en los 7 lavaderos.

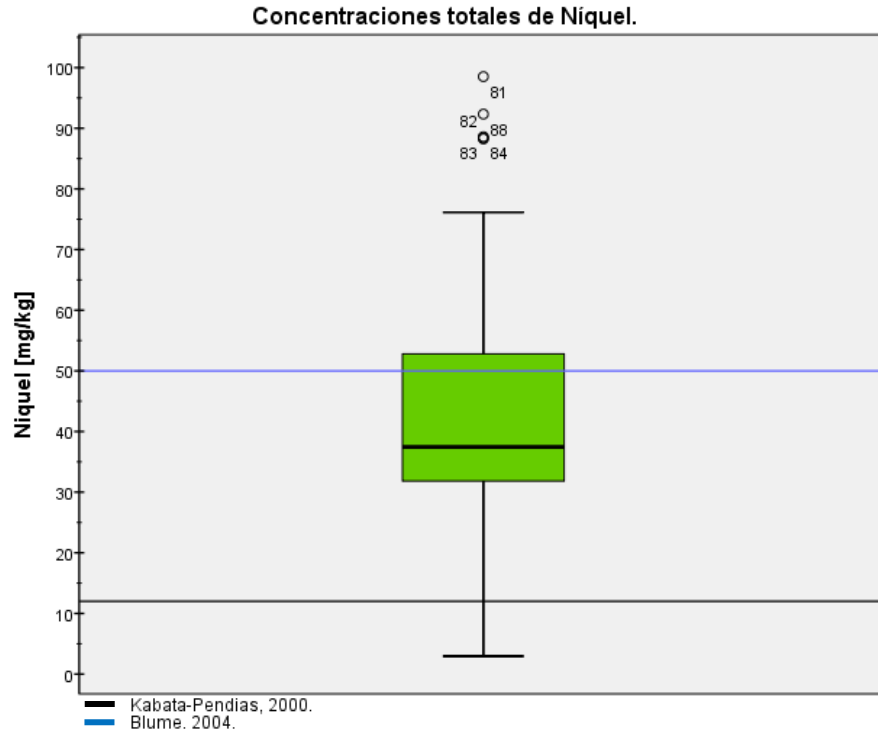


Figura 16: Diagrama de caja para los resultados correspondientes a las concentraciones totales de Níquel en los 7 lavaderos. El valor correspondiente a la NOM-147 sale de la gráfica: 1,600 mg/kg.

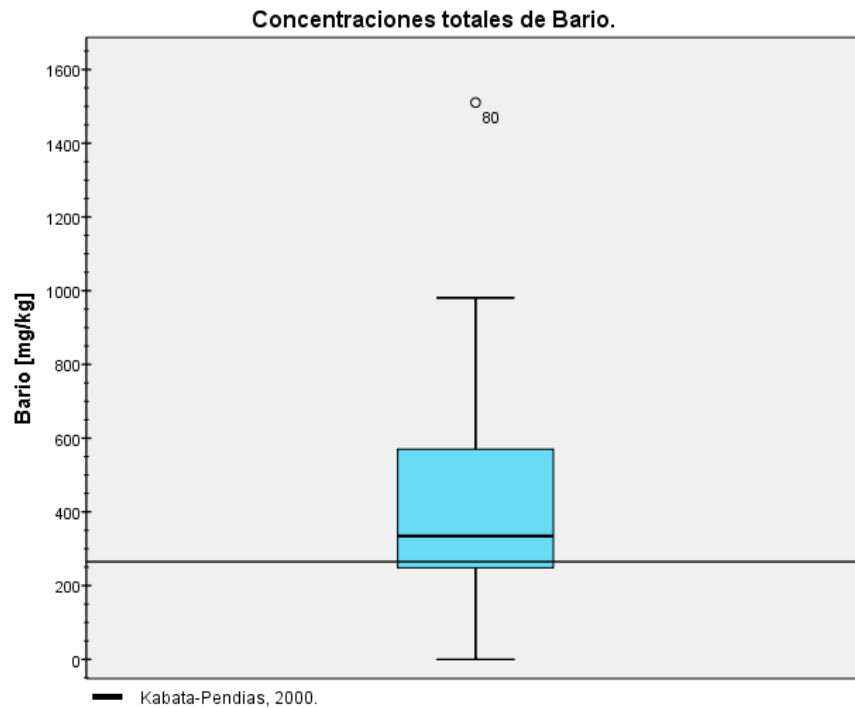


Figura 17: Diagrama de caja para los resultados correspondientes a las concentraciones totales de Bario en los 7 lavaderos. La referencia de Blume, 2004 no contempla este metal. El valor correspondiente a la NOM-147 sale de la gráfica: 5,400 mg/kg.

Contemplando que el trabajo de Blume, 2004 señala valores sobre suelos alemanes (suelos europeos sin especificación de tipo de suelo), a partir de ahora se contemplara únicamente el trabajo de Kabata-Pendias, 2000 como referencia de niveles geogénicos.

Como anteriormente se explicó, la recolección de las muestras consistió en la distinción de tres sitios diferenciados por distancia, más un sitio control (SC), en cada sitio, las muestras se colectaron diferenciándose a en cuatro profundidades. En las figuras 18 a 21 se muestran los diagramas de caja de cada metal, mostrando la diferenciación en cada distancia de muestreo y el SC; resultó aún más importante realizar esta distinción para poder comparar los resultados obtenidos de los SC con los datos de referencia (Kabata-Pendias, 2000), pues aunque estos SC fueron elegidos a juicio propio se consideró que los resultados de estos sitios correspondían por lo menos cercanamente a los valores o concentraciones geogénicas. La referencia de Kabata-Pendias, 2000, se señala en los diagramas.

Así mismo, en las figuras 22 a 25 se muestran los diagramas de caja de cada metal, mostrando la diferenciación a profundidad. Aunque la referencia de las concentraciones geogénicas no hace distinción por profundidad, al realizar esta comparación se espera poder identificar la o las profundidades que más se asemejan a las concentraciones geogénicas de referencia, lo que nos indicaría en que profundidad se estaría acumulando la mayor concentración de cada metal. De igual manera, la referencia de Kabata-Pendias, 2000, se señala en cada diagrama.

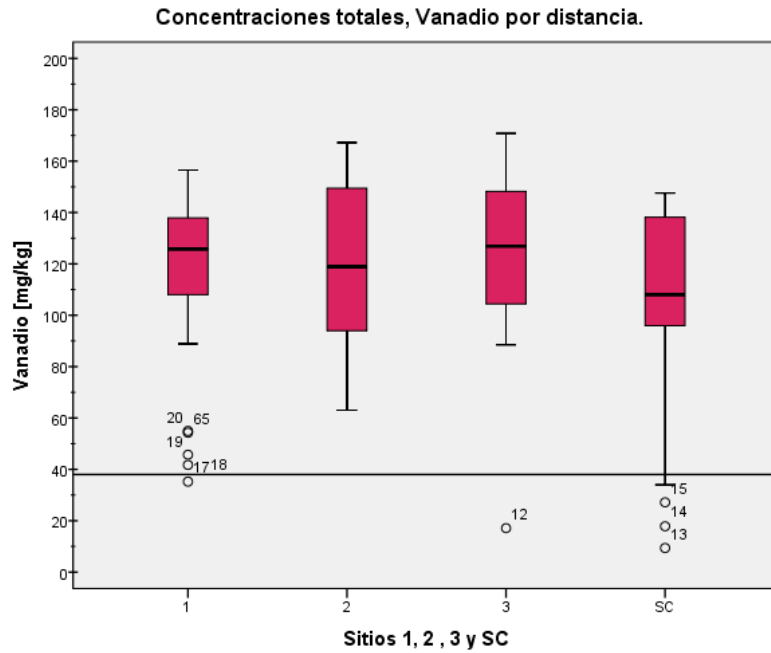


Figura 18: Diagrama de caja para los resultados correspondientes a las concentraciones totales de Vanadio en los 7 lavaderos, diferenciados por las distancias de muestreo y el SC.

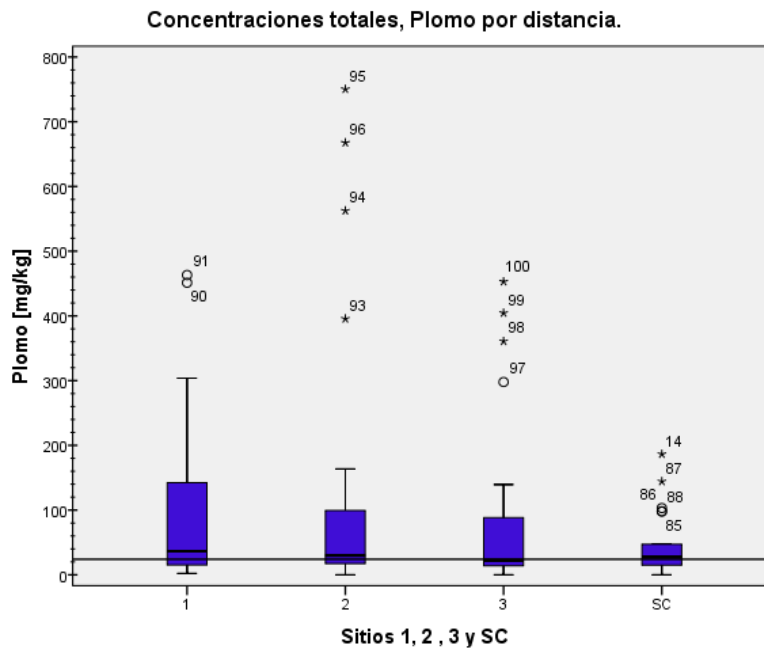


Figura 19: Diagrama de caja para los resultados correspondientes a las concentraciones totales de Plomo en los 7 lavaderos, diferenciados por las distancias de muestreo y el SC.

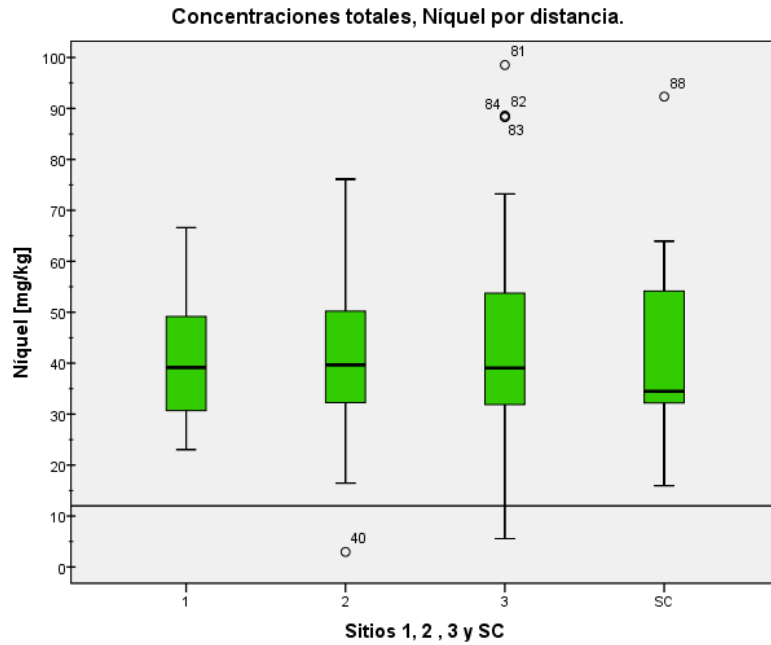


Figura 20: Diagrama de caja para los resultados correspondientes a las concentraciones totales de Niquel en los 7 lavaderos, diferenciados por las distancias de muestreo y el SC.

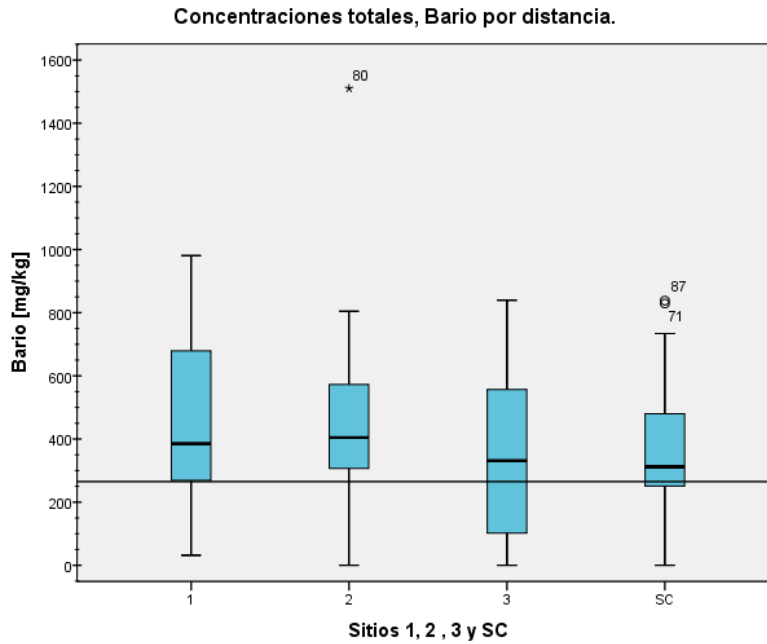


Figura 21: Diagrama de caja para los resultados correspondientes a las concentraciones totales de Bario en los 7 lavaderos, diferenciados por las distancias de muestreo y el SC.

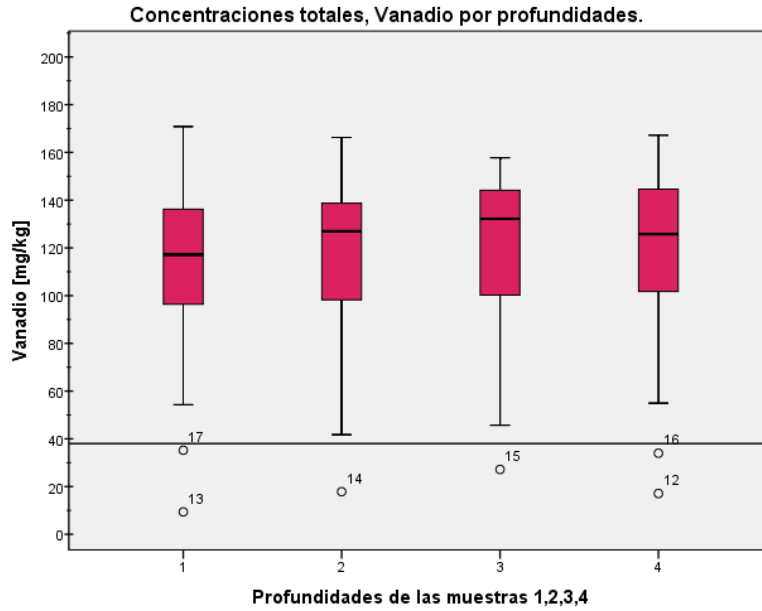


Figura 22: Diagrama de caja para los resultados correspondientes a las concentraciones totales de Vanadio en los 7 lavaderos, diferenciados por profundidad.

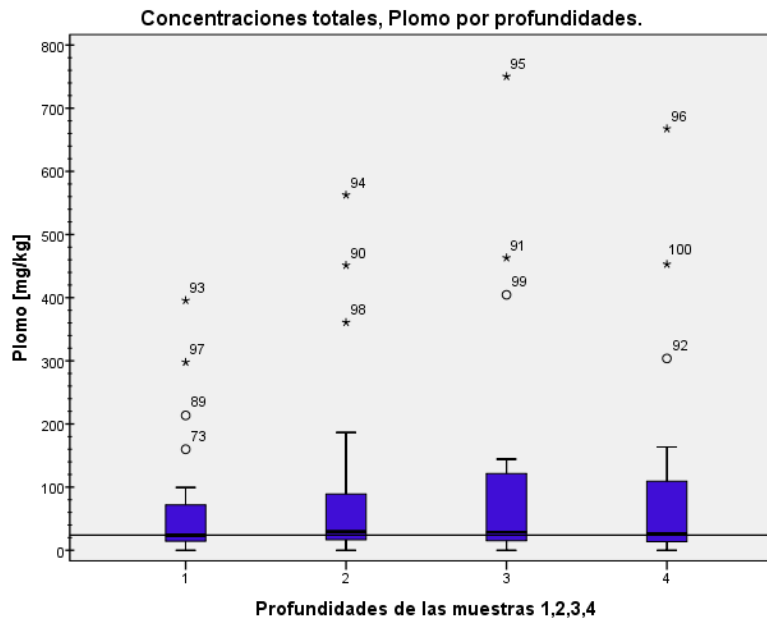


Figura 23: Diagrama de caja para los resultados correspondientes a las concentraciones totales de Plomo en los 7 lavaderos, diferenciados por profundidad.

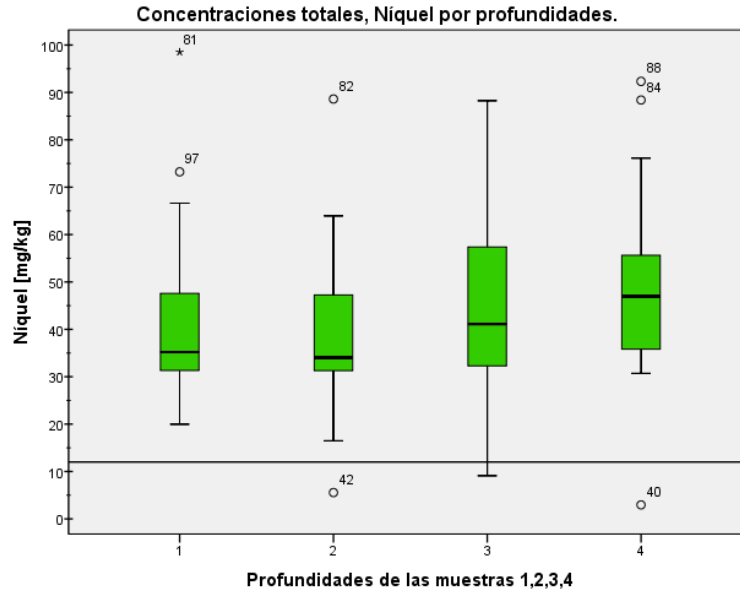


Figura 24: Diagrama de caja para los resultados correspondientes a las concentraciones totales de Níquel en los 7 lavaderos, diferenciados por profundidad.

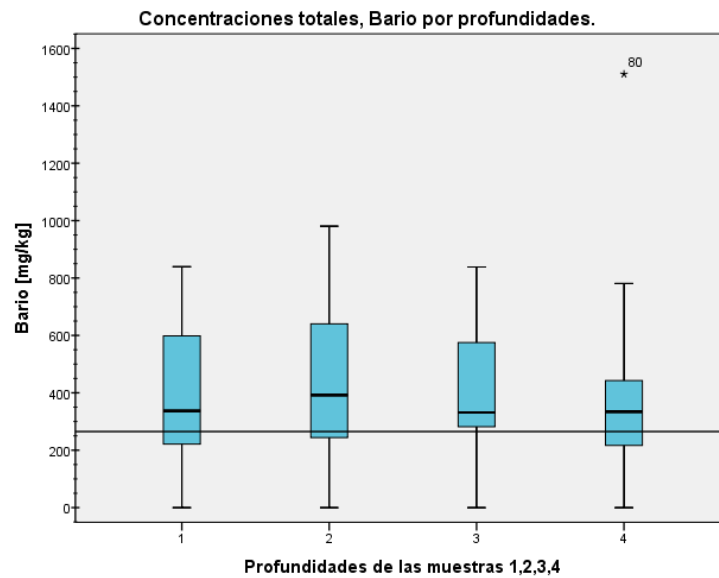


Figura 25: Diagrama de caja para los resultados correspondientes a las concentraciones totales de Bario en los 7 lavaderos, diferenciados por profundidad.

De igual manera que los resultados de pH y C.E., se realizó una comparación de los resultados obtenidos entre la zona húmeda y la zona seca, esta comparación se presente en las figuras 26 a 29.

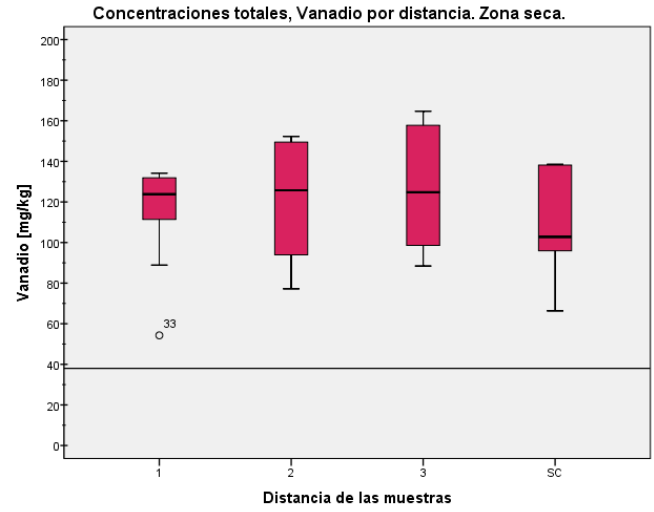
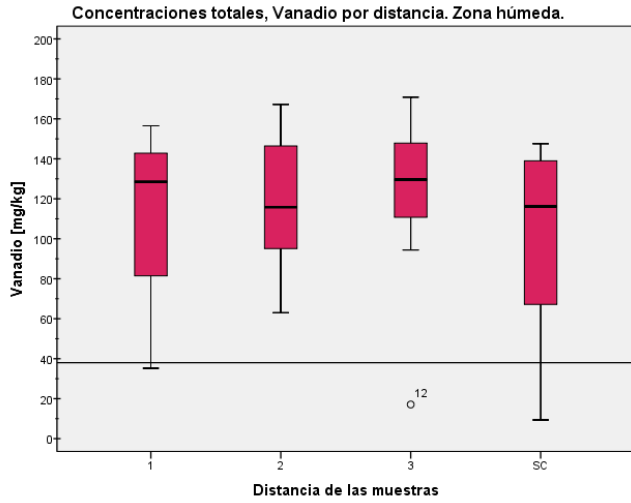


Figura 26: Diagramas de caja para los resultados correspondientes a las concentraciones totales de Vanadio en los 7 lavaderos, diferenciados por las distancias de muestreo y el SC en zona húmeda y zona seca.

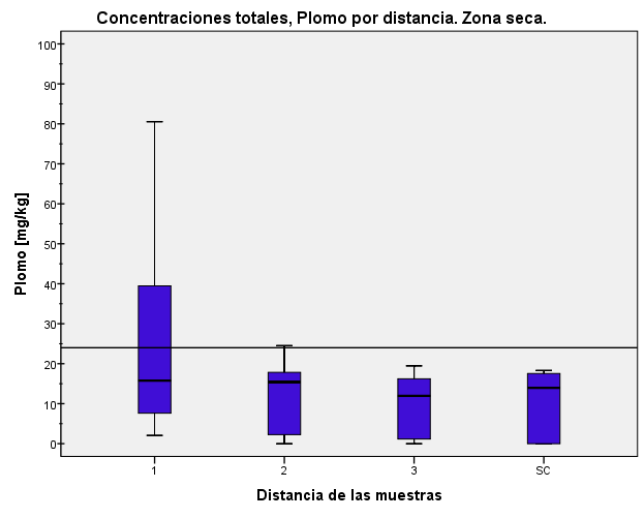
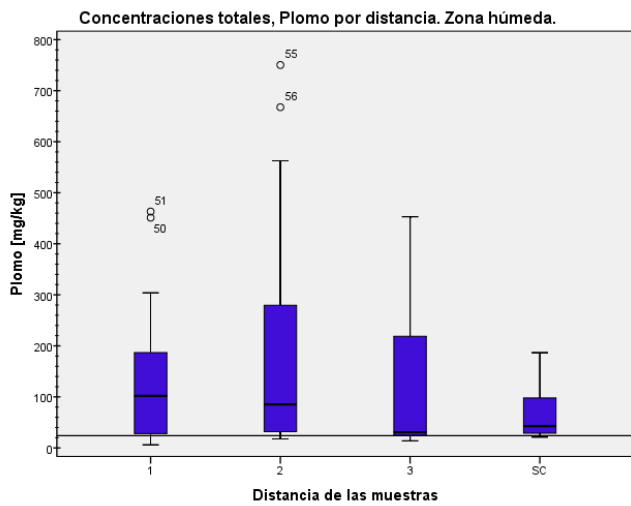


Figura 27: Diagramas de caja para los resultados correspondientes a las concentraciones totales de Plomo en los 7 lavaderos, diferenciados por las distancias de muestreo y el SC en zona húmeda y zona seca. Se presenta un cambio de escala en el diagrama correspondiente a la zona seca.

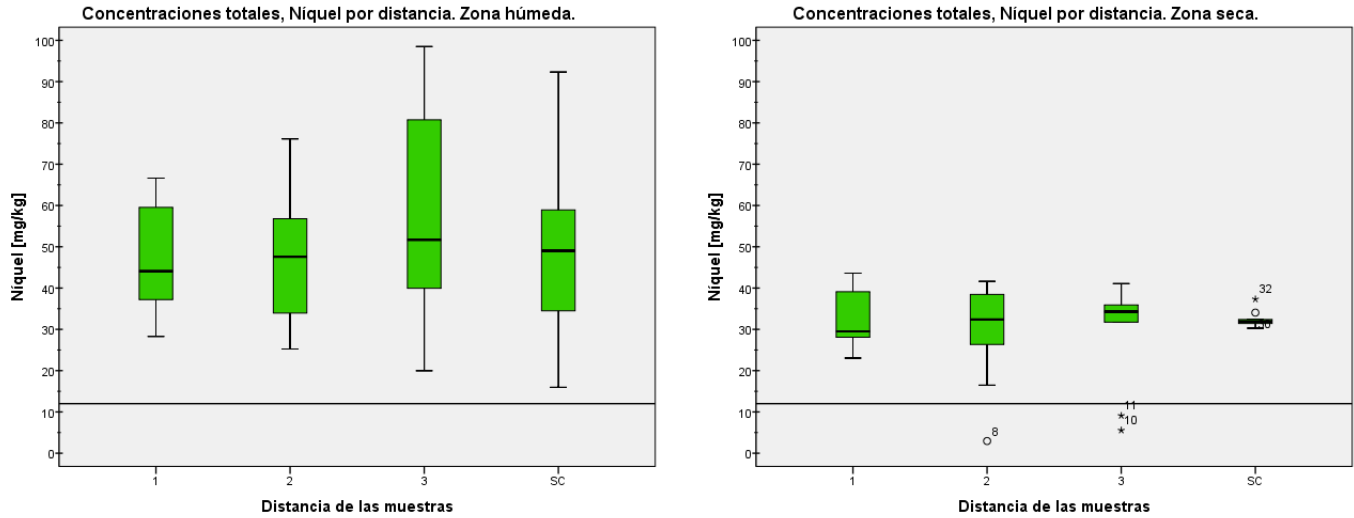


Figura 28: Diagramas de caja para los resultados correspondientes a las concentraciones totales de Níquel en los 7 lavaderos, diferenciados por las distancias de muestreo y el SC en zona húmeda y zona seca.

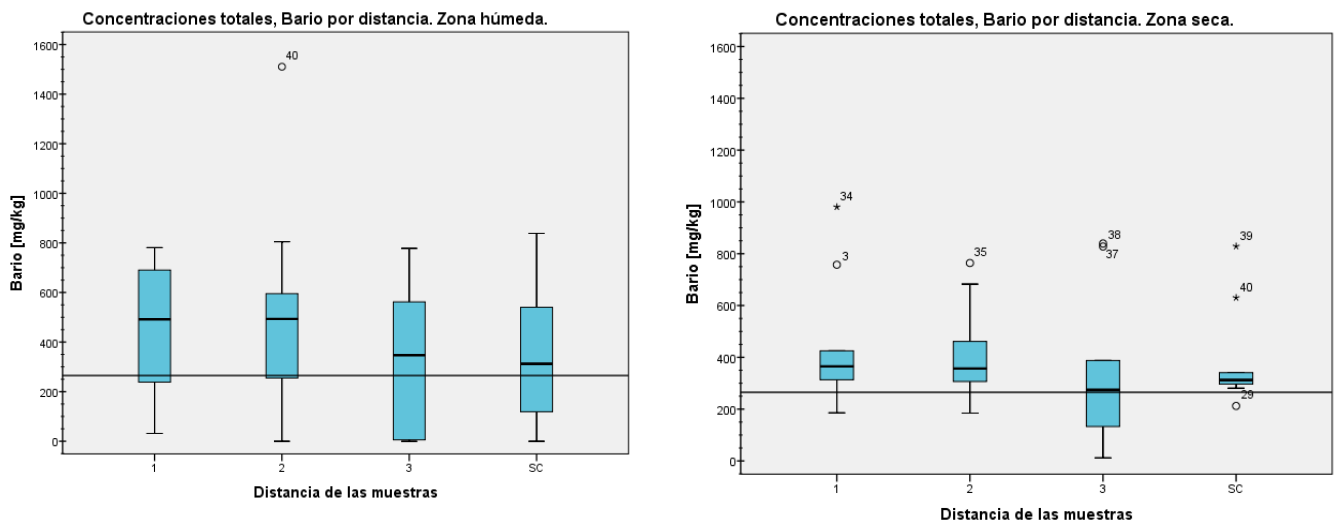


Figura 29: Diagramas de caja para los resultados correspondientes a las concentraciones totales de Bario en los 7 lavaderos, diferenciados por las distancias de muestreo y el SC en zona húmeda y zona seca.

Para poder ejemplificar de manera más clara la dispersión de los metales en cada lavadero, en las Figuras 30 a 33 se muestran las gráficas de barra correspondientes a cada metal por lavadero.

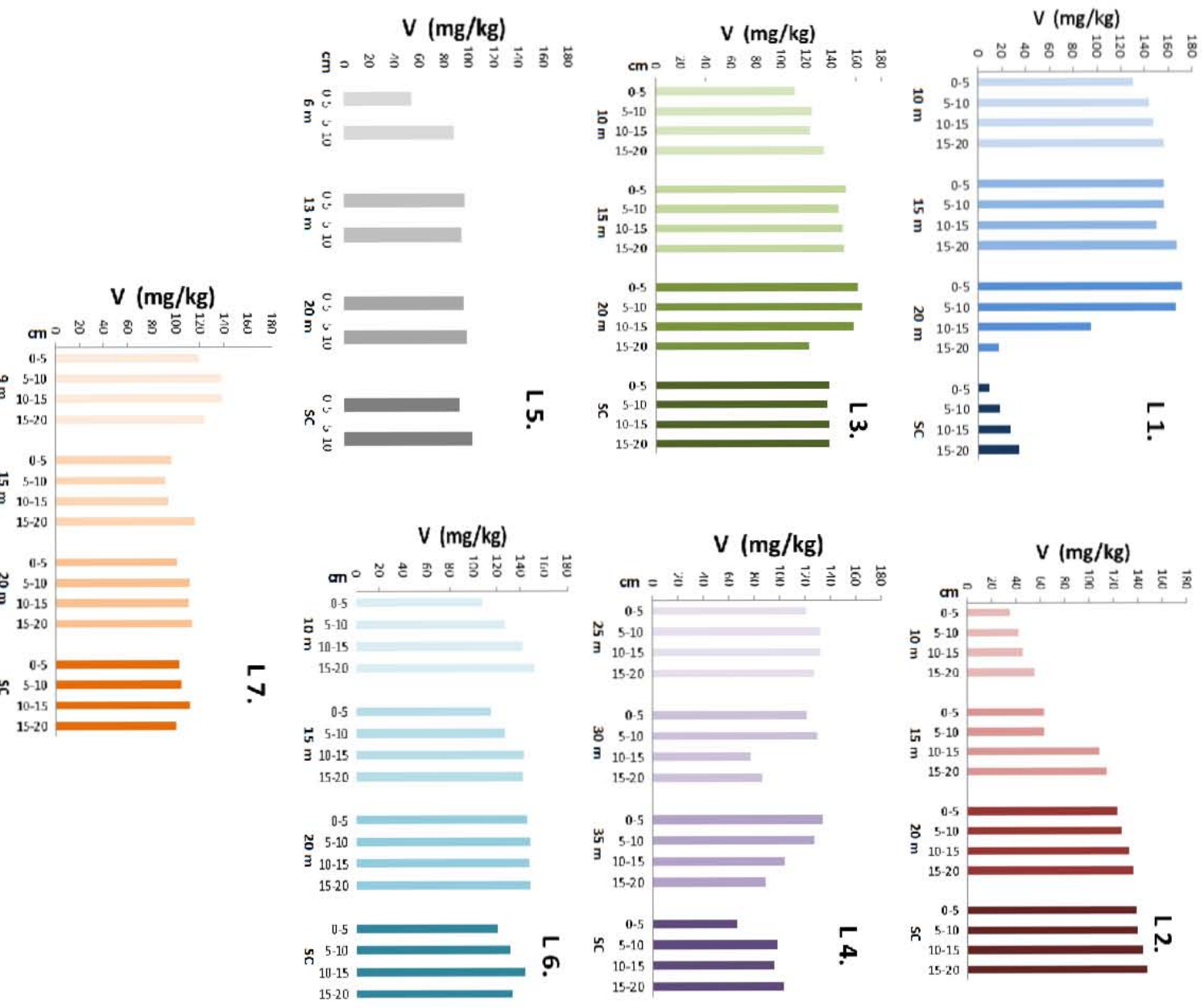


Figura 30: Graficas de barras correspondientes a las concentraciones totales de Vanadio en los 7 lavaderos (L1 – L7).

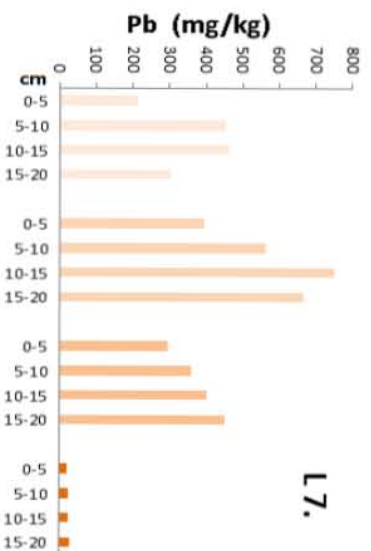
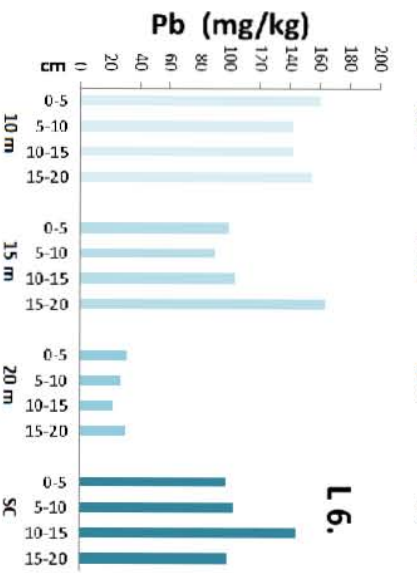
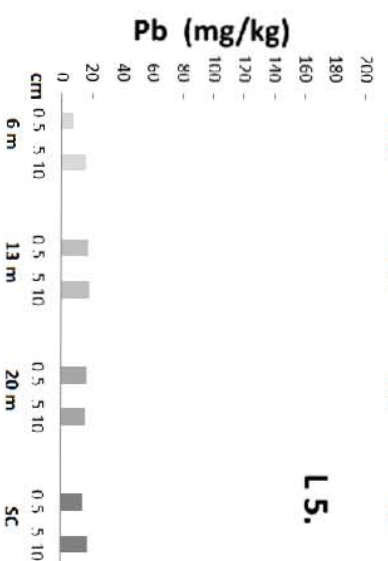
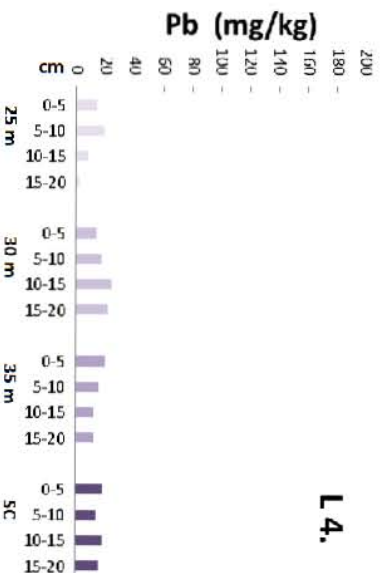
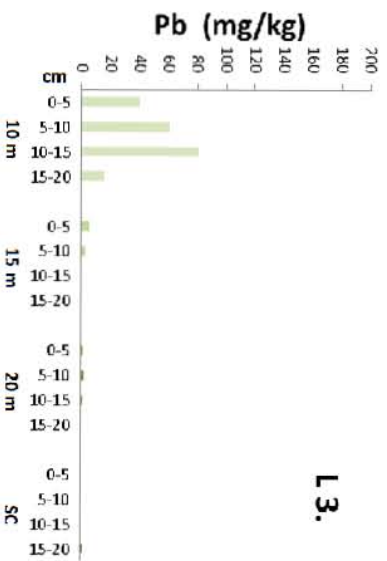
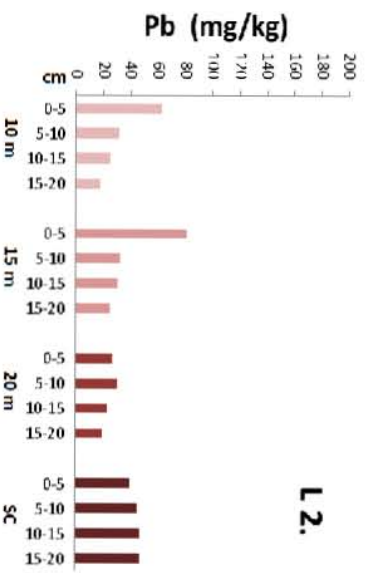
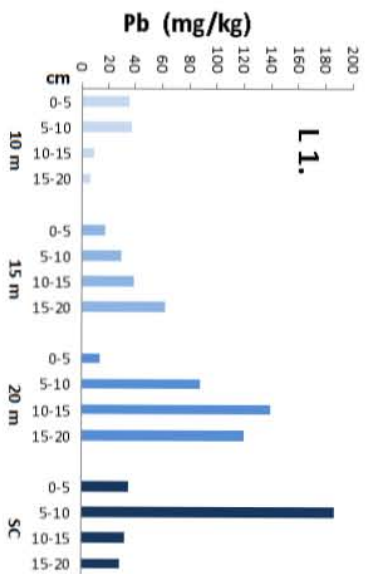


Figura 31: Graficas de barras correspondientes a las concentraciones totales de Plomo en los 7 lavaderos (L1 – L7).

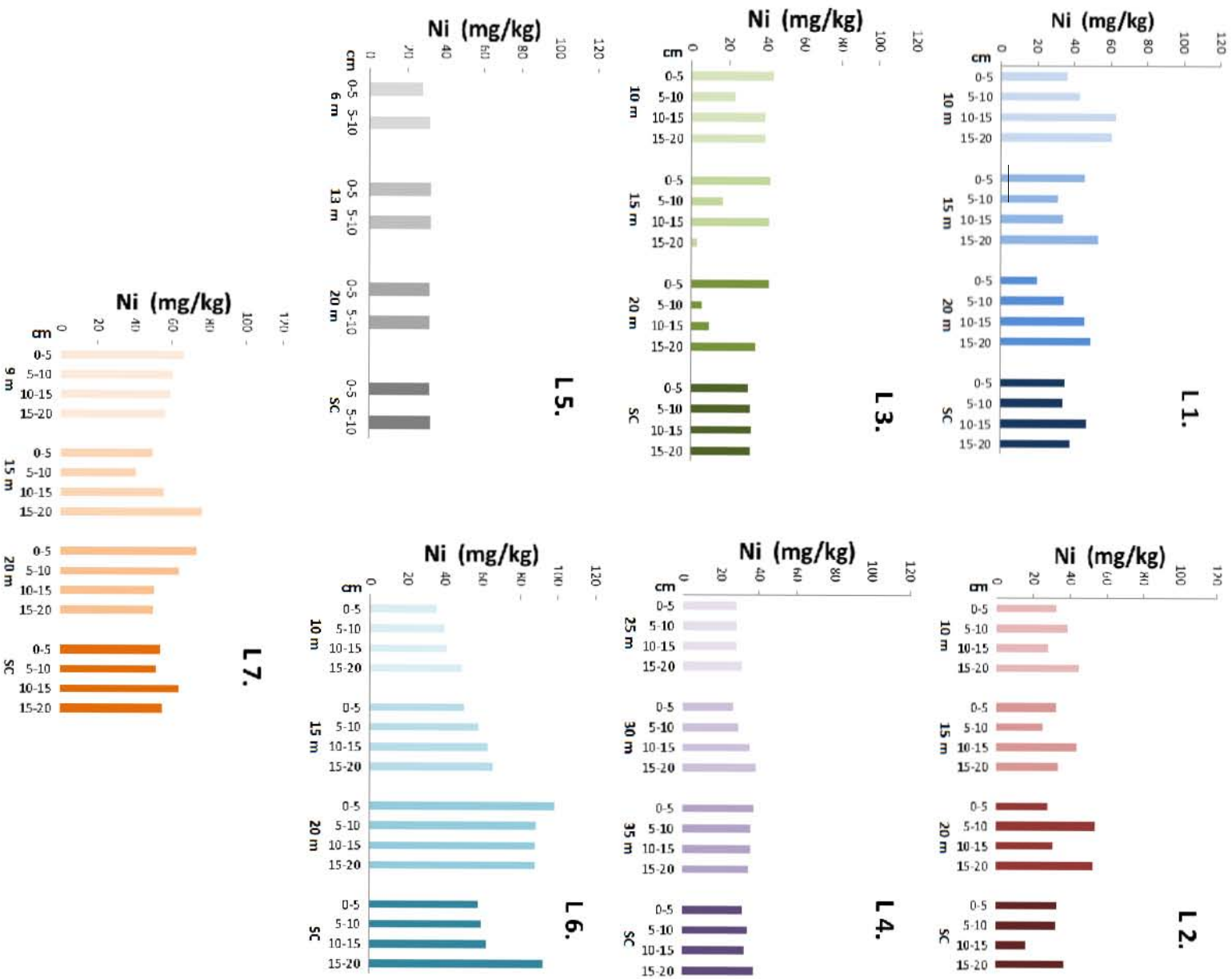


Figura 32: Graficas de barras correspondientes a las concentraciones totales de Niquel en los 7 lavaderos (L1 – L7).

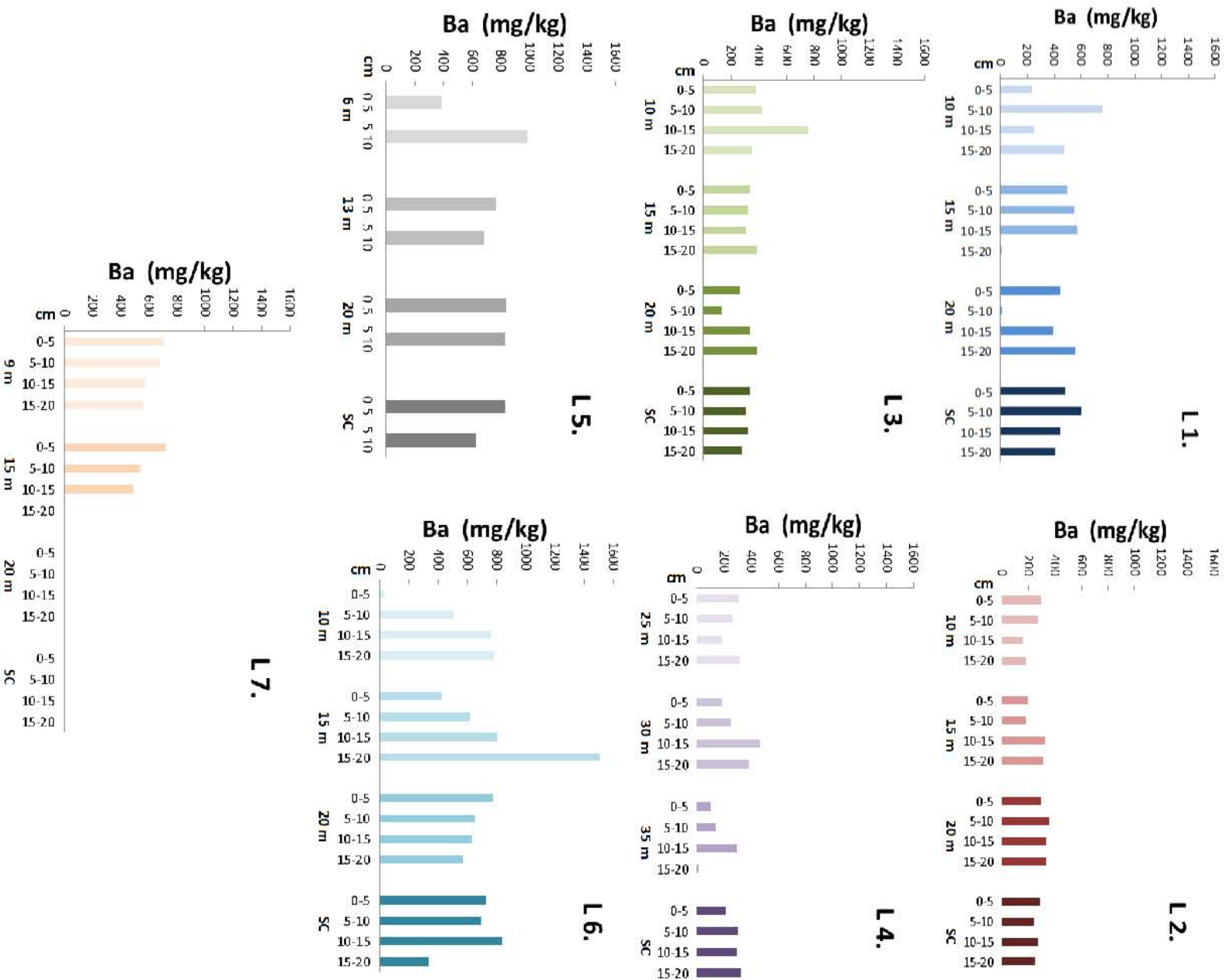


Figura 33: Graficas de barras correspondientes a las concentraciones totales de Bario en los 7 lavaderos (L1 – L7).

X. Discusión

Los resultados totales de pH se registraron entre los 4.70 y 7.64, mientras que haciendo la diferenciación entre la zona húmeda y la zona seca, los resultados se registraron entre los 4.70 y 6.99; 6.07 y 7.64 respectivamente, lo que hace notar que los suelos húmedos registraron una tendencia mayormente ácida con un ligero acercamiento al comportamiento neutral. Los suelos secos registraron una tendencia ácida-neutra-básica.

Por otra parte los resultados totales de C.E. se registraron entre los 49.00 y 541.00 $\mu\text{S/cm}$, haciendo la diferenciación entre la zona húmeda y la zona seca, los resultados oscilaron entre los 49.10 y 541.00 $\mu\text{S/cm}$; 49.00 y 478.00 $\mu\text{S/cm}$, es decir que la conductividad eléctrica de los suelo en la zona húmeda con respecto a los suelos de la zona seca es mayor pero sin diferir por mucho, de esta manera, al presentarse una conductividad eléctrica mayor en los sitios de la zona húmeda, podríamos esperar mayores concentraciones de metales en estos sitios.

En cuanto a las concentraciones totales de cada metal, para los cuatro metales la media obtenida siempre fue mayor a la media de las concentraciones geogénicas señaladas en Kabata-Pendias, 2000. Debido a que la referencia de Blume, 2004, no señala la media de cada metal, se compararon los niveles máximos de esta referencia con las concentraciones medias obtenidas, observándose que para el caso de V, las concentraciones fueron muy similares, mientras que para Pb, se registró una concentración 3 veces mayor y Ni aunque de igual manera presento una concentración similar, el resultado obtenido fue menor al señalado por esta referencia; Ba no fue contemplado en el trabajo de Blume, 2004. De igual manera, observando la comparación con la NOM-147, se observa que la media obtenida no rebasó las concentraciones señaladas por la norma, a excepción de vanadio.

Si bien, el trabajo de Blume, 2004 logró ampliar el panorama de las concentraciones geogénicas reportados en trabajos internacionales, esta referencia solo se consideró como un punto de comparación para Kabata-Pendias, 2000, pues Blume, 2004 no especifica el tipo de suelo sobre el que se reportan las concentraciones, por lo que a partir de ahora, los niveles de referencia o las concentraciones geogénicas únicamente se referirán a las señaladas por Kabata-Pendias, 2000.

De acuerdo al párrafo anterior, si se comparan los niveles de referencias, únicamente con las concentraciones señaladas en la NOM-147, se observa que la norma señala concentraciones muy por encima de las concentraciones geogénicas para los cuatro metales: Pb (17 veces mayor), Ni (134 veces mayor), Ba (21 veces mayor) y V (2 veces mayor), de esta manera, se pueden resaltar tres puntos importantes: 1) dentro del trabajo de Kabata-Pendias, 2000 se contemplaron las concentraciones señaladas para suelos estadounidenses, específicamente para la categoría de suelos “histosoles y suelos orgánicos”, por lo que este trabajo, si bien no establece las concentraciones geogénicas específicas para el tramo estudiado en la presente tesis, sirve como un punto de referencia cercano a las concentraciones geogénicas que podrían presentarse en el sitio de estudio, al no contar con información específica del sitio de trabajo pero tomando en consideración la importancia del trabajo de Kabata-Pendias, 2000, no es posible declarar un reflejo de la contaminación en los suelos estudiados, pero sí un incremento en las concentraciones de los cuatro metales analizados, en comparación con Kabata-Pendias, 2000; 2) la NOM-147, como ya se ha explicado, es la Norma Oficial Mexicana más cercana al trabajo realizado, sin embargo, en ella no se indican los tipos de suelos que se contemplan en las dos categorías señaladas por la norma (uso agrícola y uso industrial). En México, la alta diversidad de ecosistemas, está relacionado con una alta diversidad de tipos de suelos, por lo que sería importante establecer concentraciones específicas para cada tipo de suelo presente en territorio nacional y esto resulta aún más importante si se toma en cuenta, que la NOM-147 es un documento oficial que sirve de referencia para distintos trámites de interés económico en los que se pueden ver afectados los ecosistemas y por ende, los suelos de nuestro país; y 3) si los resultados obtenidos en la presente tesis únicamente se compararan con los niveles de la NOM-147, se estaría hablando de un afecto de contaminación solamente para el metal vanadio, porque los metales Pb, Ni y Ba no rebasan los niveles señalados en la NOM, así, se deja entrevisto la gran variabilidad que existe entre los datos de un documento oficial y los datos de un trabajo científico internacional.

Haciendo la diferenciación a distancia de cada metal, fue posible observar que las concentraciones de las tres distancias y el SC en los metales vanadio y níquel son más altas en comparación con el trabajo de Kabata-Pendias, 2000, pero al mismo tiempo las concentraciones son similares entre sí; de igual manera esto hace resaltar que si tomamos

como concentraciones geogénicas definitivas los niveles de Kabata-Pendias, 2000, para el caso de estos dos metales, se observa que en todas las distancias, las concentraciones rebasan los niveles de la media pero sin alcanzar los valores máximos señalados por los niveles de referencia; este comportamiento de igual manera se presentó en ambos SC por lo que podríamos hablar de que las tres distancias y el SC presentan un excedente de metal o “contaminación” y que por ende la elección de los SC no fue adecuada.

En lo referente a plomo y bario, las concentraciones registradas, fueron más cercanas a los valores de la media señalados por Kabata-Pendias, 2000, especialmente para plomo en donde se observa que para cada sitio se presentó un comportamiento muy cercano al de las concentraciones geogénicas, incluso valores del SC estuvieron por debajo de la media de las concentraciones de referencia, también es importante señalar que en el caso específico de plomo, este presentó valores extremos y súper extremos, especialmente en el sitio dos, de manera que podríamos considerar que la mayor acumulación de este metal llega a un punto máximo en la segunda distancia de muestreo. Las concentraciones de bario resultaron muy similares entre sí, sin embargo únicamente los resultados del sitio tres y el SC se registraron incluso por debajo de la media geogénica, por otra parte, las concentraciones del SC aunque tuvieron un rango de distribución menor, en su mayoría estuvieron por arriba de la media geogénica, lo que podríamos interpretar como que la dispersión de bario en los sitios es poco homogénea y que contrario a lo que se pensaba, la dispersión del contaminante no sigue necesariamente un solo curso.

En cuanto a los resultados diferenciados por profundidad, los resultados más cercanos a las concentraciones geogénicas fueron los correspondientes a Ba y Pb. Para Ba, la media de los resultados obtenidos resulta cercana a la media de las concentraciones geogénica en las cuatro profundidades y aunque los resultados de cada profundidad no difieren mucho entre sí, se observa un valor súper extremo en la última profundidad por lo que podría ser que este metal presente un comportamiento de distribución con gradiente a una mayor profundidad. Con respecto a Pb, la media de las cuatro profundidades resultó muy similar a la media correspondiente a los niveles de referencia, sin embargo se observa que en las cuatro profundidades se presentan valores extremos y súper extremos, mostrando el valor más alto en la profundidad 3, lo que hace notar dos puntos importantes: 1) tomando a

consideración que la media de los niveles de referencia es muy similar a la media de los resultados obtenidos en el análisis de la presente tesis, resulta evidente un aumento en la concentración de este metal, es comparación con la referencia de Kabata-Pendias, 2000, por lo que se podría hablar de un posible reflejo de contaminación; y 2) si bien en las cuatro profundidades se presentan valores extremos, los valores más altos de estos valores extremo se presentan en las últimas dos profundidades, por lo que al igual que Ba, se puede contemplar la idea de que la distribución de este metal, se presente sobre un gradiente a profundidad. Por su parte, V, presentó concentraciones muy similares entre sí pero por encima de los niveles de referencia. Ni, tuvo un comportamiento similar presentando resultados por encima de los niveles de referencia pero con valores extremos y presentando el valor más alto en la muestra superficial (primera profundidad).

Siguiendo la diferenciación entre la zona de muestreo húmeda y la zona seca, tal y como lo esperábamos se observó un gradiente más amplio en las concentraciones de la zona húmeda con respecto a la zona seca, por lo que se considera que las propiedades física como la compactación y permeabilidad, tipo de suelo y humedad de las muestras pueden intervenir directamente en el comportamiento de distribución y acumulación de los metales.

La hipótesis inicial del presente trabajo, contemplaba un comportamiento esperado de los metales a disminuir en función de la distancia y de la profundidad, registrando las concentraciones más bajas (posibles concentraciones geogénicas) en los SC de cada lavadero, sin embargo ese comportamiento únicamente se vería reflejado en un análisis más detallado, por metal y por lavadero. De esta manera, los resultados mostrados en las graficas de barras reflejaron un comportamiento muy distinto para cada sitio de muestreo y para cada uno de los metales. El comportamiento esperado surgió al plantearse un efecto de acumulación derivado de la escorrentía que genera la pendiente de cada lavadero, sin embargo los resultados reflejaron un comportamiento único en cada gráfica.

Considerando el comportamiento esperado, para el caso de V, en el L1 se podría considerar como acertada la elección del SC, porque refleja concentraciones menores a las registradas en las muestras a distancia; considerando las concentraciones del SC como las concentraciones geogénicas del sitio, se podría delimitar un *Road effect zone* a los 20 m de distancia de la carretera y a una profundidad de 15 cm; por su parte, el L2, reflejo un

comportamiento contrario a lo planteado inicialmente, pues se registraron concentraciones con tendencia a aumentar en función de la distancia y de la profundidad, comportamiento que también se vio reflejado en el SC, por lo que para este caso en específico, se concluye que la elección del SC no fue la mejor y que probablemente el arrastre hídrico en este lavadero está llevando los metales a mayores distancias.

Para el caso de Pb, los lavaderos L2, L3 y L7 presentaron el comportamiento esperado, registrando concentraciones menores en los SC en comparación a las muestras a distancia, de esta manera se podría delimitar un *Road effect zone* en la distancia 15 m, profundidad 5 cm; 10 m, profundidad 15 cm; y más de 20 m, con una posible profundidad mayor a los 20 cm, para cada lavadero, respectivamente.

Los resultados correspondientes a Ni presentaron comportamientos muy distintos a los esperados, pero muy similares entre sí, por lo que se podría contemplar que este metal cuente con una mayor capacidad de dispersión.

De igual manera, para el caso de Ba, la gráfica correspondiente al L7, señala el comportamiento esperado, pues en ese sitio es posible delimitar un *Road effect zone* a una distancia de 15 m y a una profundidad de 15 cm.

XI. Conclusiones

La ecología de carreteras es un tema realmente interesante y muy importante, el cual cuenta con muy poca divulgación en nuestro país, la delimitación del *Road effect zone* resulta complicada pues al trabajar en áreas tan cercanas a una vía de comunicación su estudio incorpora varios factores que están asociados principalmente a procesos de perturbación, aunado a esto la diversidad de ecosistemas y de suelos con los que cuenta México, mismos que pueden ser atravesados por una sola vía de comunicación dificultan aún más el análisis y delimitación de un *Road effect zone*. Conocer los niveles geogénicos de un sitio es la base de la cual se debe partir para evaluar el excedente en las concentraciones de un metal o un proceso de contaminación por metales, por ello lo ideal sería conocer las concentraciones geogénicas específicas de la zona de estudio. Así mismo, la manera de abordar e interpretar los datos obtenidos en un análisis de este tipo, puede llevar a conclusiones muy distintas.

Como uno de los trabajos pioneros en el tema, este trabajo dejó entrevisto la carencia de información con respecto a la composición de nuestros suelos, resulta evidente la necesidad de darle mayor importancia y divulgación a temas de interés nacional como lo es la contaminación en suelos y la regulación de carreteras y autopistas nacionales. De la misma forma resulta aún más importante e interesante continuar investigando temas referentes a la ecología de carreteras, pues hay muchos temas y formas de abordarlos, si bien, en cuanto a contaminación y específicamente en cuanto a la delimitación del *Road effect zone* la presente tesis es una de las primeras que abordan la temática, también resulta importante hacer notar que los sitios denominados como lavaderos carreteros, mismos que como fue explicado anteriormente fueron los sitios de muestreo, no siempre desembocan en terrenos aledaños, pues en campo se logró observar en repetidas ocasiones, que estos sitios de arrastre y acumulación de contaminantes desembocan en cuerpos de agua, lo que se podría traducir en un incremento y expansión de las concentraciones de metales en los cuerpos de agua nacionales. Este trabajo permitió conocer el panorama general de la situación a la que los investigadores nos enfrentamos al pretender llevar a cabo este tipo de estudios, concluyendo de esta manera que hay mucho trabajo por hacer, comenzando por estudiar a fondo los suelos mexicanos y más detalladamente en materia de *Road effect zone*, complementar las características del muestreo y del estudio como tal.

Al ser un tema con poca divulgación y poco estudiado en nuestro país, se extiende la invitación a conocer más acerca de la ecología de carreteras e interesarse por la realización de este tipo de estudios, pues la práctica común de estos estudios llevará a un manejo más detallado y adecuado del tema en nuestro país.

XII. Recomendaciones para trabajos futuros

Como ya bien se ha explicado, el presente trabajo buscó realizar un primer acercamiento al estudio del *Road effect zone* en México, pero lo cierto es que no fue fácil y el resultado obtenido nos permitió ver aspectos que no fueron contemplados en un inicio, por lo que se emiten las siguientes recomendaciones para aquellos investigadores que busquen realizar un trabajo similar.

- Las concentraciones geogénicas deben de ser un punto de partida para realizar las comparaciones pertinentes y poder emitir un juicio acerca de si se está registrando un fenómeno de contaminación o no. De lo contrario no es posible emitir un juicio de tal magnitud.
- Lo ideal es consultar los niveles geogénicos específicos de la zona de estudio para evitar emitir juicios erróneos. De acuerdo a la investigación realizada, los trabajos correspondientes a niveles geogénicos nacionales son muy escasos por lo que habría que replantarse la idea de comenzar por realizar un estudio para analizar estas concentraciones en suelos nacionales y que estos resultados se sumen a los trabajos ya existentes.
- En el presente trabajo únicamente se contempló el efecto acumulativo de los metales por efecto del arrastre del agua, pero no hay que olvidar que existen otros procesos acumulativos que pueden estar interviniendo en la dispersión de los contaminantes, como por ejemplo el efecto de depositación atmosférica.

XIII. Referencias

- Acevedo, E., O. Carrasco., E. León., P. Martínez., G. Silva., I. Castillo., G. Ahumada. G. Borie y S. González. (2005). Análisis de regulaciones internacionales sobre criterios de protección de calidad de suelo en relación a metales pesados. En: Criterios de calidad de suelos agrícolas. pp. 174-186
- Akbar, K., W. Hale., A. Headley y M. Athar. (2006). Heavy metal contamination of roadside soils of Northern England. *Soil & Water Res.*, 1, 2006 (4): 158-163.
- Alloway, B. y J. Trevors. (2013). *Heavy Metals in Soils: Trace Metals and Metalloids in Soils and their Bioavailability*. New York. 3rd Edition. Editorial Board. 613 pp.
- Arellano-Martín, F. y J. Andrade. (2016) Aspiradoras verdes: captura de carbono en bosques tropicales. *CONABIO. Biodiversitas*, 125:2-7.
- Aslam, J., S. Khan y S. Khan. (2011). Heavy metals contamination in roadside soil near different traffic signals in Dubai, United Arab Emirates. *Journal of Saudi Chemical Society*. 17: 315-319.
- Ayala de la Portilla, H. (2007). Técnica de digestión total de hidrocarburos para análisis de metales pesados. (Tesis de Licenciatura). Universidad tecnológica de Querétaro, México. 91pp. Recuperado de: <http://www.geociencias.unam.mx/~bole/eboletin/hernanRepTesis07.pdf>
- Blume, H. (2004). *Handbuch des bodenschutzes*. Wiley-Vch. Landsberg am Lech. 758pp.
- Bojakowska, I., Duszyński, J., Jaroń, I., Kucharzyk, J., Lech, D. y Maksymowicz, A. (2009). Zróżnicowanie zawartości metali ciężkich w glebach przy drogach wylotowych z Warszawy. *Przegląd Geologiczny*, 57, 1073–1077
- Cámara de diputados. (s.f.). Cámara de diputados. México. [página web] Recuperado de: <http://www.diputados.gob.mx/comisiones/transportes/presenta.htm>
- Camino y Puentes Federales (CAPUFE). (2013). Comunicado No. 14: Capufe, 54 años al servicio de México. [en línea]. Recuperado de: <http://www.capufe.gob.mx/portal/wwwCapufe/SalaDePrensa/ComunicadosDePrensa/Com-014-2013.pdf>
- Camino y Puentes Federales (CAPUFE). (2017). Autopista México-Acapulco. (Imagen). Recuperado de: <http://www.capufe.gob.mx/portal/wwwCapufe/ParaViajar/PrincipalesTramos/MexicoAcapulco.pdf>

Caminos y Puentes Federales (CAPUFE). (2017). Transito Promedio Diario (TPD). [en línea] recuperado de: <http://www.capufe.gob.mx/TPD/>

Chen, X., Xia, X., Zhao, Y. y Zhang, P. (2010). Heavy metal concentrations in roadside soils and correlation with urban traffic in Beijing, China. *Journal of Hazardous Materials*, 181, 640–646.

Ciazela, J. y M. Siepak. (2016). Environmental factors affecting soil metals near outlet roads in Poznań, Poland: impact of grain size, soil depth, and wind dispersal. *Environ Monit Assess.* 188: 323. DOI: 10.1007/s10661-016-5284-5.

Dasguptal, R., B. Crowley y B. Maynard. (2017). Organic and inorganic pollutant concentrations suggest anthropogenic contamination of soils along the Manali-Leh highway, northwestern Himalaya, India. *Arch Environ Contam Toxicol.* DOI: 10.1007/s00244-017-0396-7

Díaz-Pineda, J. (2006). Integración ambiental. Notas del coordinador. Carreteras. Revista técnica de la asociación española de la carretera. 4ta época, (número 150), 9.

Earon, R., Olofsson, B. y Renman, G. (2012). Initial Effects of a New Highway Section on Soil and Groundwater. *Water, Air & Soil Pollution*, 223, 5413–5432

European Environment Agency (EEA). (2016). Explaining road transport emissions. Copenhagen. 53p.

Federal Highway Administration. 1996. Evaluation and Management of Highway Runoff Water Quality. Publication FHWA-PD-96-032. Washington, D.C.: U.S. Department of Transportation.

Fernández-Buces, N, R. Bautista-Trejo y S. López-Noriega (2011). Environmental Consultants. 2011. Does size matter? Animal crossings in roads of tropical ecosystems in Mexico. Grupo Selome. International Conference on Ecology and Transportation, August 21-25, 2011, Seattle, Washington.

Fernandez-Buces, N. (2013). Propuesta para la instalación de un centro de investigación aplicada en ecología de carreteras (CIAPEC). Grupo Selome SA de CV.

Fernández-Buces, N., S. López-Noriega y G. Lorenzana-Piña. (2009). Designing new highways to reverse habitat conectivity loss due to old highways and land use change; a case study in Nayarit, Mexico. Grupo Selome. International Conference on Ecology and Transportation, September 13 – 17, Duluth, Minnesota.

Forman, R., D. Sperling., J. Bissonette., A. Clevenger., C. Cutshall., V. Dale., L. Fahring., R. France., C. Goldman., K. Heanue., J, Jones., F. Swanson., T. Turrentine y T. Winter.

(2003). Road ecology. Science and solutions. Bibliovault OAI Repository, the University of Chicago Press. 484 pp.

Gutiérrez-Ruiz, M. E., Cenicerós-Gómez A., Luna-González, L., Morales-Manilla, L. M., Romero, F., Martínez-Jardines, L. G., Rosas, H. y J. López-Blanco. (2009). Elaboración de un mapa regional de valores de fondo de elementos potencialmente tóxicos (EPT) de México. Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Geografía. Informe final. SNIB-CONABIO, proyecto No. GS002. México, D.F.

Hui, Z., W. Caiqiu., G. Jiping., Y. Xuyin., W. Qiao., P. Wenming., L. Tao., Q. Jie y Z. Hanpei. (2017). Assessment of heavy metal contamination in roadside soils along the Shenyang-Dalian highway in Liaoning province, China. Pol. J. Environ. Stud. Vol. 26, No. 4: 1,539-1,549. DOI: 10.15244/pjoes/68910.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2015). Estadísticas a propósito del día del caminero (17 de octubre). [en línea] Recuperado de: <http://www.inegi.org.mx/saladeprensa/aproposito/2015/caminero0.pdf>.

Jaeger, J., J. Bowman., J. Brennan., L. Fahrig., D. Bert., J. Bouchard, N. Charbonneau., K. Frank., B. Gruber., K. Tluk von Toschanowitz. (2005). Predicting when animal populations are at risk from roads: an interactive model of road avoidance behavior. Ecological Modelling 185: 329-348.

Jian-Hua, M., C. Chun-Jie., L. Jian y S. Bo. (2009). Heavy metal pollution in soils on railroad side of Zhengzhou-Putian section of Longxi-Haizhou railroad, China. Pedosphere. 19(1): 121-128.

Kabata-Pendias, A. (2000). Trace elements in soils and plants. Washington D.C. 4ta edición, CRC Press. 534 pp.

Kobringer, N. P. 1984. Sources and Migration of Highway Runoff Pollutants – Executive Summary. Vol. 1. FHWA/RD-84/057. Milwaukee, Wis.: Federal Highway Administration and Rexnord EnviroEnergy Technology Center.

Martínez-Martínez, S. (2009). Niveles de fondo y de referencia de metales pesados en suelos desarrollados de material parental volcánico, metamórfico y sedimentario en la Región de Murcia. (Tesis de doctorado). Universidad Politécnica de Cartagena, España. Recuperado de: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=50283>

Martínez-Martínez, S. (2009). Niveles de fondo y de referencia de metales pesados en suelos desarrollados de material parental volcánico, metamórfico y sedimentario en la Región de Murcia. (Tesis de licenciatura). Universidad Politécnica de Cartagena, España. Recuperado de: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=50283>

McGraths, P., C. Changa., L. Pagea y E. Wittere. (1994). Land application of sewage sludge: scientific perspectives of heavy metal loading limits in Europe and the United States. *Environ. Rev.* 2:108-1 18.

Mendoza-Díaz, A., J. Gutiérrez-Hernández y Ma. Cadengo-Ramírez. (2013). Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT). Instituto Mexicano del Transporte (IMT). Siniestralidad vial de carreteras en áreas urbanas, caso: Autopista Cuernavaca-Acapulco km 98-99. Recuperado de: <http://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt378.pdf>

Modrzewska, B. y M. Wyszowski. (2014). Trace metals content in soils along the state road 51 (northeastern Poland). *Environ Monit Assess.* 186: 2,589-2,597. DOI: 10.1007/s10661-013-3562-z.

Nordberg, G. (2001) Metales: Propiedades químicas y toxicidad. En Stellman, J., McCann, M., Warshaw, L., Brabant, C., Finklea, J., Messite, J., Coppée, G., Sauter, S., Hunt, V., Spiegel, J., Kraus, R., Soskolne, C., Laurig, W., Terracini, B., Myers, M. y Dufresne, C. Enciclopedia de salud y seguridad en el trabajo. Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales. Subdirección General de Publicaciones. Madrid, España. Puc-Sánchez, J., C. Delgado-Trejo, E. Mendoza-Ramírez, I. Sauzo-Ortuño. (2013). Las carreteras como una fuente de mortalidad de fauna silvestre de México. *CONABIO. Biodiversitas*, 111:12-16.

Radziemska, M. y J. Fronczyk. (2015). Level and contamination assessment of soil along an expressway in an ecologically valuable area in central Poland. *Int. J. Environ. Res. Public Health.* 12: 13372-13387. DOI:10.3390/ijerph121013372

Roj-Rojewski, S. y M. Klimaszewska. (2014). Heavy metals contamination in soils of a small town with intensive road traffic. *Pol. J. Environ. Stud.* Vol. 23, No. 5: 1,711-1,717.

Secretaria de Comunicaciones y Transportes (SCT). (2000). N-CTR-CAR-1-03-006/00. Libro: CTR. Construcción. 21 de noviembre de 2000

Secretaria de Comunicaciones y Transportes (SCT). (2017). Datos viales: Transito Promedio Diario (TPD). [página web]. Recuperado de: <http://www.sct.gob.mx/carreteras/direccion-general-de-servicios-tecnicos/datos-viales/>

Secretaria de Comunicaciones y Transportes (SCT). (2011). Capitulo II. México y sus indicadores. En SCT. (2011), Diseño y Gestión de Proyectos (pp. 17-22) Recuperado de: <http://www.sct.gob.mx/fileadmin/DireccionesGrales/DGDC/Publicaciones/Libro/capitulo2.pdf>

Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2 de marzo de 2007). NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004-PROFEPA. Diario Oficial de la Federación (DOF). Recuperado de: http://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/1392/1/nom-147-semarnat_ssa1-2004.pdf

Siebe, C. y S. Cram. (2015). Suelo y salud: Un tema poco atendido que nos incumbe a todos. CONABIO. *Biodiversitas*, 122:2-5.

Torres-Moreno, A. (2010). Efectos de la construcción de una autopista sobre una población de avutardas: Influencia en la distribución espacial y efectos en la abundancia y la productividad. (Tesis de maestría). Recuperado de: https://www.uam.es/personal_pdi/ciencias/jspinill/trabajos_alumnos/ATM_TESIS_DE_MAESTRIA.pdf

USEPA. (1996). Method 3050B Acid digestion of sediments, sludges and soils, Test Methods for Evaluating Solid Waste, Physical/Chemical Methods (SW-846). Office of Solid Waste. United States Environmental Protection Agency. Manual. Washington, DC. 12 pp.

Van der Ree, R., J. Jaeger, E. van der Grift y A. Clevenger. (2011). Effects of roads and traffic on wildlife populations and landscape function: road ecology is moving towards larger scales. *Ecology and Society* 16(1):48.

Vergara, T. (2011). Infraestructura logística. Red carretera. México. Trade & Logistics Innovation Center. [página web] Recuperado de: <http://www.ciltec.com.mx/es/infraestructura-logistica/red-carretera>

XIV. Anexos

14.1 Análisis descriptivos de los sitios de muestreo.

- Lavadero 1.



Coordenadas (UTM)		
X: 483534	Y: 2121291	Altitud: 2,598 m.s.n.m.
Pendiente: 7.3°	Longitud de concreto: 6.40 m	Ancho: ---
Tipo de vegetación: Bosque de pino y área de agricultura.		
Basura: Residuos de leña, carbón y acumulación de tierra.		



De acuerdo con la información recabada en el lavadero 1, en el sitio, se registró la presencia de bosque de pino y a una corta distancia, un área destinada a la agricultura por lo que se considera la posibilidad de que el agua de riego, los fertilizantes y las fumigaciones a los sembradíos, así como la remoción de la tierra producto de la agricultura pudieran ser factores que están influyendo en los distintos comportamientos de los metales para este sitio, aportando una mayor cantidad de los metales analizados o propiciando el lavado y posiblemente la dispersión de los mismos.

- Lavadero 2.



Coordenadas (UTM)		
X: 483137	Y: 2117347	Altitud: 2,780 m.s.n.m.
Pendiente: 0.3°	Longitud de concreto: 6.20 m	Ancho: 1.78 m
Tipo de vegetación: Cipreses del género <i>Cupressus</i> sobre el derecho de vía y áreas con pasto en terrenos aledaños al límite de esté.		
Basura: Residuos orgánicos y basura al finalizar la porción de concreto.		



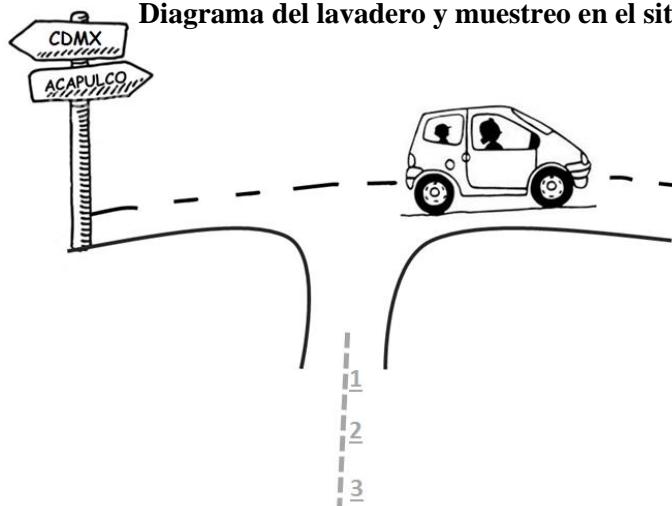
De acuerdo a la información del sitio, en el sitio 2, se registró vegetación tipo *Cupressus* y áreas con pasto, así como la presencia de residuos orgánicos e inorgánicos (basura) justo en el hombro del lavadero. La historia del sitio resulta desconocida para el presente trabajo por lo que algún suceso registrado en la historia del sitio pudiera estar interviniendo en la distribución y comportamiento de los metales.

- Lavadero 3.



Coordenadas (UTM)		
X: 471304	Y: 2068509	Altitud: 1,021 m.s.n.m.
Pendiente: 18.4°	Longitud de concreto: 8.6 m	Ancho: 2.5 m
Tipo de vegetación: Pasto seco en talud de carretera dentro del derecho de vía.		
Basura: Residuos orgánicos.		

Diagrama del lavadero y muestreo en el sitio:



La información recabada en campo con respecto al sitio 3, indica que fue el primer sitio de muestreo en un área con clima seco, por lo que se contempla la posibilidad de que la textura y el tipo de suelo (análisis no realizados) influyan en el comportamiento de la distribución de los metales. En el área se observó la presencia de pastos secos así como la de residuos orgánicos abundantes.

- Lavadero 4.



Coordenadas (UTM):		
X: 470780	Y: 2056401	Altitud: 950 m.s.n.m.
Pendiente: 9.8°	Longitud de concreto: 20 m	Ancho: 1.53 m
Tipo de vegetación: Pasto en el derecho de vía.		
Basura: Residuos inorgánicos. Plásticos.		

Diagrama del lavadero y muestreo en el sitio:

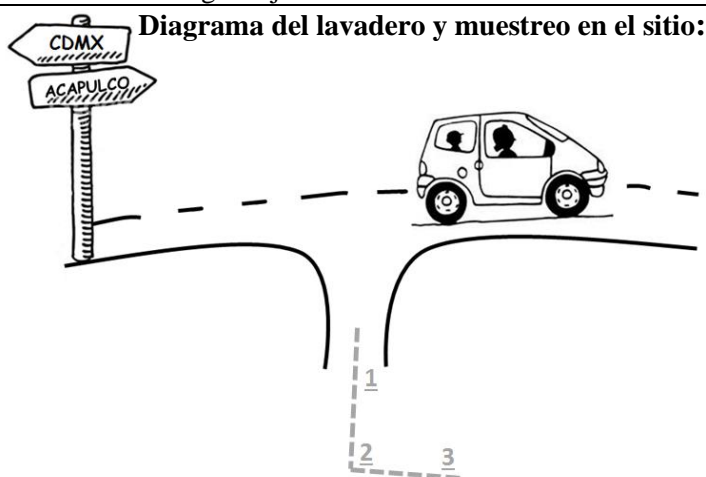


La presencia de pasto fue predominante en el sitio 4, también se registró la presencia de residuos inorgánicos (basura), pero a diferencia de los lavaderos anteriores, la longitud del concreto del lavadero fue mayor (20m) por lo que este podría ser uno de los factores que estuvieran relacionados a la distribución de los metales pues al tener una mayor pendientes de arrastre, la fuerza con la que desembocan sería mayor, lo que implica que los metales lleguen a mayores distancias.

▪ Lavadero 5.

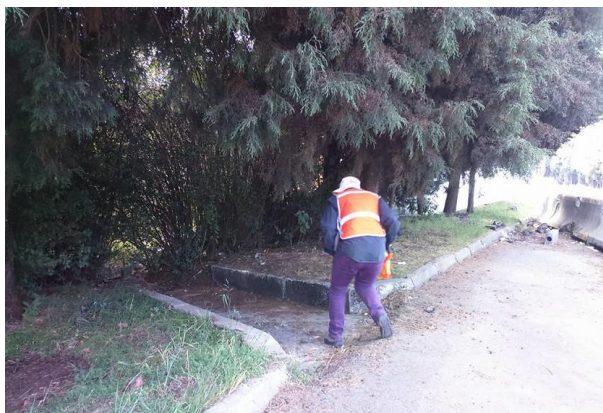


Coordenadas (UTM):		Altitud: 1,015 m.s.n.m.
X: 469671	Y: 2065831	
Pendiente: 3.7°	Longitud de concreto: 3.54 m	Ancho: 1.87 m
Tipo de vegetación: Pasto en derecho de vía.		
Basura: Abundantes residuos inorgánicos, plásticos.		
Observaciones:		
<ul style="list-style-type: none"> • Superficie muy pedregosa, por lo que solo fue posible la toma de muestras a dos profundidades (0-5 y 5-10 cm). • Presencia de abundantes hormigas rojas. 		



La toma de muestras solo fue a dos profundidades debido a que el suelo era muy pedregoso y compacto. La información recabada en el muestreo de campo señala la presencia de pasto así como la presencia de residuos orgánicos (basura). Los resultados registrados en las dos profundidades si bien no dan un panorama tan completo, tomando como referencia los lavaderos anteriores, sí dan un panorama general, y es que las concentraciones de los cuatro metales se registraron en niveles muy similares, por lo que teniendo en cuenta la pedregosidad del suelo, podría ser que la textura y por ende la permeabilidad del suelo fuera un factor importante a considerar para definir el *Road effect zone*.

▪ Lavadero 6.



Coordenadas (UTM)

X: 477296

Y: 2110668

Altitud: 2,984 m.s.n.m.

Pendiente: 9.1°

Longitud de concreto: 4.8 m

Ancho: 2.85 m

Tipo de vegetación: Presencia de género *Cupressus* y de áreas con pasto.

Basura: Abundantes residuos inorgánicos, plásticos enterrados en las zonas de muestreo.

Observaciones:

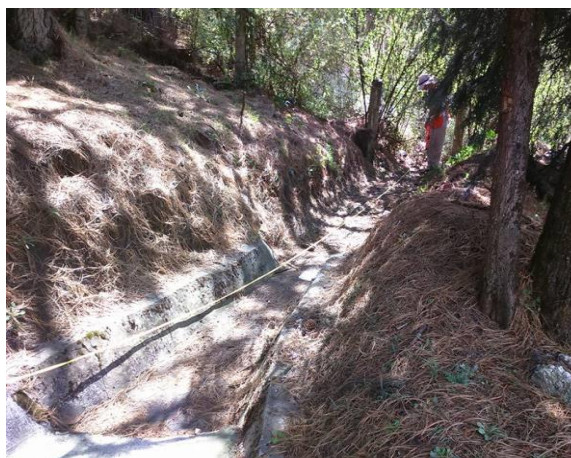
- Antiguo paradero de camiones.
- Presencia de bloques de barrera en el área destinada al antiguo paradero, aun así, la corriente del agua puede fluir.
- Marcas de derrames de aceites en la carpeta asfáltica.

Diagrama del lavadero y muestreo en el sitio:



De acuerdo a la información recabada en campo, en el sitio de muestreo se observó la presencia del género *Cupressus* y áreas de pasto, así como de residuos orgánicos e inorgánicos (basura), además de que el sitio pareciera ser que en algún punto de su historia sirvió como paradero de camiones pudiéndose observar marcas por derrames de aceites en la carpeta asfáltica del acotamiento y desechos de llantas en los alrededores, así como la presencia de bloques de barrera inhabilitando el uso del paradero, motivos que pudieran influir en el comportamiento (incremento) de las concentraciones de los metales.

▪ Lavadero 7.



Coordenadas (UTM)

X: 480078

Y: 2112646

Altitud: 3,036 m.s.n.m.

Pendiente: 18.4°

Longitud de concreto: 3.8 m

Ancho: 1.8 m

Tipo de vegetación: Pino-Cipreses o tascates del género *Cupressus* y zacatonal montano.

Basura: Residuos orgánicos.

Observaciones:

- Área notablemente conservada.

Diagrama del lavadero y muestreo en el sitio:



Debido a las condiciones del lavadero (pocas perturbaciones antropogénicas evidentes) se consideró a este sitio como el sitio más conservado por lo que esperábamos encontrar un comportamiento distinto en las concentraciones de los metales. Basado en lo anterior, las concentraciones de Ba fueron las únicas que cumplieron con el comportamiento planteado inicialmente, pues las concentraciones disminuyeron a mayor distancia y mayor profundidad, registrándose concentraciones incluso por debajo del LD. Al mismo tiempo y en el mismo sitio, se registró la concentración más alta de Pb.

14.2 Glosario

Acotamiento: Franja comprendida entre la orilla de la superficie de rodamiento de un camino, que sirve para dar más seguridad al tránsito y como estacionamiento eventual de vehículos.

Adsorbido: Acción de atraer un cuerpo, moléculas o iones de otro cuerpo en estado líquido o gaseoso y retenerlos en su superficie.

Autopista: Vialidad de cuatro o más carriles, con faja separada central e intersecciones generalmente resueltas a desnivel. El control de acceso puede ser total o parcial.

Barrena: Barra de hierro con un extremo terminado en punta cortante que se usa para agujerear rocas de gran tamaño y en otros materiales.

Bordillo de lavadero: Elementos que interceptan y condicen el agua que por el efecto de bombeo corre sobre el camino, descargándola en los lavaderos, para evitar la erosión de los taludes.

Carretera: Vialidad pública, ancha y espaciosa pavimentada y dispuesta para el tránsito de vehículos, con o sin accesos controlados, que puede prestar un servicio de comunicación a nivel nacional, interestatal, estatal o municipal.

Contracuneta: Zanjas o bordos que se construyen en las laderas localizadas aguas arriba de los taludes de los cortes, con el objetivo de interceptar el agua que escurre sobre la superficie del terreno natural, conduciéndola a una cañada inmediata o a una parte baja del terreno, para evitar el saturamiento hidráulico de la cuneta y el deslave o erosión del corte.

Cuneta: Zanjas que se construyen adyacentes a los hombros de la carretera en uno o en ambos lados, con el objeto de interceptar el agua que escurre sobre la superficie de la carretera, de los taludes de los cortes o del terreno contiguo, conduciéndola a un sitio donde no haga daño a la carretera o a terceros.

Flujo génico: Transferencia de alelos de genes de una población a otra.

Lavaderos carreteros: Canales que conducen y descargan el agua recolectada por los bordillos, cunetas o guarniciones a lugares donde no causen daño a la estructura del pavimento.

Mampostería: sistema de construcción tradicional. Consiste en superponer rocas, ladrillos o bloques de concreto prefabricados, para la edificación de muros o paramentos. Los materiales uniformes o no, también llamados mampuestos, se disponen de forma manual y aparejada. Para su adición se emplea una mezcla de cemento o cal, con arena y agua.

Sobrenadante: Líquido que queda en la parte superior cuando se ha producido la decantación de una mezcla heterogénea.

Terraplén: Estructuras que se construyen con materiales producto de cortes o procedentes de bancos, con el fin de obtener el nivel de subrasante que indique el proyecto o la Secretaría, ampliar el camino, cimentar estructuras, formar bordos o tender taludes.

14.3 Base de datos: Diseño de la estrategia de muestreo, visita de reconocimiento.

Tabla 4: Resultados (pH y C.E.) obtenidos en la visita de reconocimiento correspondiente al diseño de la estrategia de muestreo.

		Prof.	pH			C.E. (µS/cm)		
			1	2	3	1	2	3
LAVADERO	1	--	6.79	6.23	--	317	211.50	--
	2	--	6.32	--	--	170.50	--	--
		0 - 40	--	6.38	--	--	161.50	--
		40 - ...	--	6.07	--	--	130.50	--
	3	0 - 20	6.51	6.46	--	273.50	208.50	--
		20 - 40	6.53	6.11	--	176	114	--
		40 - ...	6.24	6.37	--	112	118.50	--
	4	0 - 10	6.36	6.52	6.71	152	112.50	116
		10 - 40	6.32	6.56	6.6	140.50	127	99.50
		10 - 75	6.18	6.53	6.65	124	105	105
		75 - ...	--	6.58	6.58	--	105	127.50
	5	0 - 35	7.26	7.28	--	262.50	235	--
		35 - ...	6.75	6.87	--	206.50	176.50	--

-- Muestra no colectada.

14.4 Base de datos: pH, C.E. y metales: Vanadio, Plomo, Níquel y Bario.



Tabla 5: Resultados (pH y C.E.) obtenidos del muestreo de campo.

		Prof.	pH				C.E. (µS/cm)			
			1	2	3	SC	1	2	3	SC
LAVADERO	1	0 - 5	6.23	5.97	6.06	6.05	474	366.7	154.4	183.2
		5 - 10	6.15	5.73	5.82	5.96	161.3	294.6	143.4	106.2
		10 - 15	5.98	5.71	5.66	5.92	121.2	206.35	148.7	95.7
		15 - 20	5.8	5.68	5.53	5.87	136.7	255.7	98.3	96.6
	2	0 - 5	6.99	6.37	5.3	5.39	401.6	163.2	247.8	421
		5 - 10	6.43	5.64	5.19	5.22	224.3	97.3	89.1	221
		10 - 15	5.77	5.3	5.14	4.7	89.2	87.3	84.1	254.4
		15 - 20	5.53	5.21	5.44	4.84	75.2	80.7	94.55	257.3
	3	0 - 5	7.26	6.38	6.81	6.41	219.9	71.4	74.3	52.5
		5 - 10	7.46	6.56	7.09	6.68	213.7	99.1	70.2	59.6
		10 - 15	7.44	6.48	7.35	6.99	164.9	90.7	70.2	51.4
		15 - 20	7.21	6.89	7.22	7.03	105.5	55.2	69.3	58.9
	4	0 - 5	7.36	7.01	6.71	6.7	204.85	344.2	125.9	182.5
		5 - 10	7.29	6.57	6.07	6.4	172.3	77.3	49	56.1
		10 - 15	7.1	6.51	6.92	6.43	149.5	79.7	169.1	76.15
		15 - 20	6.83	7.19	7.26	6.17	94.3	258.6	188.3	71.2
	5	0 - 5	6.94	7.3	7.38	7.34	366.8	310.1	219.6	478
		5 - 10	7.41	7.64	7.57	7.54	210	224.7	169.35	190.3
	6	0 - 5	6.53	6.43	5.89	6.03	541	302.45	86.4	120.1
		5 - 10	6.47	6.48	5.86	6.32	276.4	251.4	55.4	89.3
		10 - 15	6.43	6.15	5.85	6.39	199.1	97.1	49.9	102.6
		15 - 20	6.28	6.08	5.77	6.59	169.1	98	49.1	100.2
	7	0 - 5	6.89	6.49	6.51	5.18	308	437	255.4	59.7
		5 - 10	6.89	6.5	6.4	5.18	201.4	341.7	133.75	49.8
		10 - 15	6.88	6.29	6.24	5.18	161.5	247	133.7	54.5
		15 - 20	6.7	6.08	6.19	5.2	164.1	140	96.9	53

Tabla 6: Resultados: Vanadio (V), Plomo (Pb), Níquel (Ni) y Bario (Ba) obtenidos del muestreo de campo.

Prof.	V (mg/kg)				Pb (mg/kg)				Ni (mg/kg)				Ba (mg/kg)				
	1	2	3	SC	1	2	3	SC	1	2	3	SC	1	2	3	SC	
1	0 - 5	129.86	155.68	170.83	9.39	35.56	17.74	13.86	36.10	35.90	45.76	19.97	34.94	230.34	495.38	446.17	480.00
	5 - 10	144.06	156.01	166.26	17.85	37.61	29.03	88.26	186.46	43.07	31.17	34.45	34.02	758.50	549.07	11.29	600.53
	10 - 15	147.02	149.75	94.39	27.16	8.86	39.59	139.46	32.27	62.77	34.18	45.46	46.62	245.99	572.50	389.77	442.56
	15 - 20	156.53	167.19	17.10	33.97	5.99	62.56	120.32	28.01	60.08	53.03	48.83	37.59	476.37	11.17	556.97	408.99
2	0 - 5	35.23	63.04	122.71	138.37	62.68	80.77	26.39	39.83	32.04	32.42	28.04	32.91	294.93	199.66	294.67	291.23
	5 - 10	41.73	63.21	126.68	139.60	31.29	32.79	29.96	45.39	38.53	25.25	53.73	32.55	272.60	177.50	358.86	238.21
	10 - 15	45.69	107.85	132.55	144.25	24.65	30.71	22.49	47.53	28.28	43.79	30.60	15.95	157.71	325.01	329.42	274.16
	15 - 20	54.95	114.06	136.12	147.57	17.52	25.17	19.77	47.32	45.10	33.72	52.58	36.98	182.12	309.94	335.03	251.19
3	0 - 5	111.39	152.28	161.25	138.58	39.47	4.77	1.15	0.00	43.61	41.63	41.09	30.30	377.90	333.58	259.75	340.57
	5 - 10	124.24	145.56	164.65	136.15	60.83	2.27	1.61	0.00	23.05	16.48	5.55	31.43	425.15	326.61	133.05	304.66
	10 - 15	123.44	149.45	157.78	138.14	80.53	0.00	0.98	0.00	39.10	41.15	9.10	32.18	757.52	306.83	333.49	319.61
	15 - 20	134.15	149.93	122.38	138.18	15.29	0.00	0.00	0.14	39.22	2.96	33.96	31.51	351.79	386.07	387.77	280.54
4	0 - 5	121.33	121.40	134.04	66.33	14.29	13.60	19.45	18.30	28.07	26.35	37.03	31.05	313.39	184.69	101.98	212.38
	5 - 10	131.93	130.07	127.13	97.89	18.87	17.23	16.03	13.61	28.14	29.05	35.92	34.05	268.92	250.41	137.99	299.48
	10 - 15	131.88	77.19	104.40	95.95	7.61	24.53	11.94	18.32	28.33	35.43	35.85	32.40	185.78	461.51	289.55	296.86
	15 - 20	127.48	86.13	88.46	103.00	2.06	21.08	12.00	15.05	30.70	38.47	34.66	37.32	316.25	380.00	11.61	323.99
5	0 - 5	54.28	96.97	96.27	92.58	7.42	17.41	17.11	14.31	28.02	32.55	31.74	31.62	392.45	764.12	839.38	828.85
	5 - 10	88.88	93.97	98.60	102.55	16.27	17.85	16.23	17.55	31.80	32.25	31.87	32.26	980.58	682.95	827.98	630.22
6	0 - 5	108.02	115.11	145.60	120.80	159.96	99.35	30.96	97.74	35.49	50.20	98.52	58.20	31.68	423.38	778.13	733.93
	5 - 10	127.23	126.79	148.20	131.40	141.49	89.81	27.75	103.24	39.55	57.90	88.61	59.69	507.72	618.03	650.68	694.38
	10 - 15	141.63	143.12	147.57	144.01	142.29	103.76	22.31	144.29	41.09	62.96	88.26	62.48	761.35	804.54	632.04	838.23
	15 - 20	151.99	141.65	148.22	133.13	154.71	163.54	30.59	98.12	49.16	65.58	88.40	92.33	780.88	1510.50	567.40	333.25
7	0 - 5	119.27	96.43	100.73	102.63	213.50	395.62	297.85	21.11	66.62	49.44	73.23	54.14	701.59	717.64	0.00	0.00
	5 - 10	137.91	91.18	111.43	104.35	451.26	562.60	360.78	24.02	60.07	40.85	63.93	51.46	679.03	537.52	0.00	0.00
	10 - 15	138.70	93.73	110.09	111.61	463.12	750.29	404.50	26.86	59.01	55.72	50.83	63.94	578.21	491.38	0.00	0.00
	15 - 20	124.01	116.42	113.71	100.42	303.73	667.59	452.92	29.71	56.22	76.12	50.15	55.02	560.63	0.00	0.00	0.00

14.5 Formato de muestreo.

	<p>Formato de muestreo para tesis de licenciatura. Proyecto México-Cuernavaca</p> <p>Alumna: Sandybell Gutiérrez Castillo Tutoras: Dra. Silke Cram Heydrich Dra. Norma Fernández Buces Contacto: 55.4175.7293</p>	
Foto #: _____		
Fecha: ____ - enero - 17. Hora: ____ : ____		
Nombre: _____		
Lavadero #: _____ Muestra #: _____		
Coordenadas X: _____		
Y: _____ Altitud: _____ m.s.n.m.		
<p>Observaciones del LAVADERO</p> Pendiente de lavadero: _____ ° Longitud del concreto del lavadero: _____ m. Ancho: _____ m. Tipo de vegetación: _____ Basura: NO ___ SI ___ Observaciones: _____ _____ _____	<p>Observaciones de la MUESTRA</p> Distancia: 7, 10, 13 m. Profundidad: _____ a _____ cm. Color: _____ Densidad aparente en campo (método de cuchillo): _____ Organismos biológicos: NO ___ SI ___ Observaciones: _____ _____ _____	
<p>Dibujo del lavadero (indicar dirección de escurrimiento y puntos de muestreo):</p> 		

14.6 Hoja informativa de material de referencia, *Montana Soil, 2711*.



National Institute of Standards & Technology

Certificate of Analysis

Standard Reference Material® 2711

Montana Soil

Moderately Elevated Trace Element Concentrations

This Standard Reference Material (SRM) is intended primarily for use in the analysis of soils, sediments, or other materials of a similar matrix. SRM 2711 is a moderately contaminated soil that was oven-dried, sieved, radiation sterilized, and blended to achieve a high degree of homogeneity. A unit of SRM 2711 consists of 50 g of the dried material.

The certified elements for SRM 2711 are given in Table 1. The values are based on measurements using one definitive method or two or more independent and reliable analytical methods. Noncertified values for a number of elements are given in Table 2 as additional information on the composition. The noncertified values should **NOT** be used for calibration or quality control. Analytical methods used for the characterization of this SRM are given in Table 3 along with analysts and cooperating laboratories. All values (except for carbon) are based on measurements using a sample weight of at least 250 mg. Carbon measurements are based on 100 mg samples.

NOTICE AND WARNINGS TO USERS

Expiration of Certification: This certification of SRM 2711 is valid, within the measurement uncertainties specified, until **31 December 2011**, provided the SRM is handled in accordance with instructions given in this certificate (see *Instructions for Use*). This certification is nullified if the SRM is damaged, contaminated, or otherwise modified.

Maintenance of SRM Certification: NIST will monitor this SRM over the period of its certification. If substantive technical changes occur that affect the certification before the expiration of this certificate, NIST will notify the purchaser. Return of the attached registration card will facilitate notification.

The overall direction and coordination of the analyses were under the chairmanship of M.S. Epstein and R.L. Watters, Jr. of the NIST Inorganic Analytical Research Division.

Statistical consultation was provided by S.B. Schiller of the NIST Statistical Engineering Division.

The technical and support aspects involved in the preparation, certification, and issuance of this SRM were coordinated through the NIST Standard Reference Materials Program by T.E. Gills and J.S. Kane. Revision of this certificate was coordinated through the NIST Standard Reference Materials Program by B.S. MacDonald of the NIST Measurement Services Division.

Willie E. May, Chief
Analytical Chemistry Division

Gaithersburg, MD 20899
Certificate Issue Date: 18 July 2003
See Certificate Revision History on Page 6

John Rumble, Jr., Chief
Measurement Services Division