

UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Determinación de la exposición a plomo suspendido en el aire en ambientes escolares de niños entre 6-12 años en zonas de riesgo definidas en Bogotá D.C

Edna Katalina Medina Palacios

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Medicina, Departamento de Toxicología
Bogotá, Colombia
2017

Determinación de la exposición a plomo suspendido en el aire en ambientes escolares de niños entre 6-12 años en zonas de riesgo definidas en Bogotá D.C

Edna Katalina Medina Palacios

Tesis o trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Toxicología

Director:

PhD Néstor Y Rojas Roa

Codirectora:

MD Msc Alba Isabel Rodríguez Pulido

Codirector:

MD Msc Rodrigo Sarmiento Suarez

Línea de Investigación: Toxicología de los Metales

Grupo de Investigación: TOXICAO "Toxicología Ambiental y Ocupacional"

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Medicina, Departamento de Toxicología
Bogotá, Colombia
2017

Dedicatoria

A mi hija, que me enseñó a perseverar para alcanzar mis metas a pesar de su corta edad.

A mi madre, que siempre ha sido amiga y compañera incondicional toda mi vida.

Agradecimientos

En este trabajo participaron diferentes personas que en la ciudad han venido trabajando por el mejoramiento de la Salud Ambiental en el Distrito Capital; es así que en primera medida agradezco al grupo de la Línea de Aire, Ruido y Radiación Electromagnética de la Secretaría Distrital de Salud de Bogotá del nivel local y central quienes con su dedicado trabajo hicieron posible el desarrollo del presente trabajo.

Al equipo del Laboratorio de Salud Pública de la Secretaría Distrital de Salud y en especial a la doctora Nancy Patiño por su asesoría y apoyo en cuanto al trabajo analítico, así como a mis compañeros y colegas Adriana Ruiz e Iván Brito quienes con su dedicación participaron activamente en la obtención de resultados de este trabajo.

De igual manera, agradezco el apoyo que me brindo el profesor Juan Pablo Ramos, quien impartió bases conceptuales en mi formación académica y apoyó el desarrollo de la tesis con su equipo de trabajo de la Universidad de Los Andes.

Quiero agradecer a tres amigos, colegas y grandes personas que me han ayudado en mi desarrollo profesional y personal como lo son los Doctores Luis Jorge Hernández, Leonardo Quiroz y Rodrigo Sarmiento, quienes con sus conocimientos aportaron y apoyaron al desarrollo de este trabajo y me acompañaron hasta su culminación.

A mi Director y Codirectores, quienes me guiaron y me apoyaron incondicionalmente en los momentos tan difíciles que pase en el transcurso de mis estudios y el desarrollo de este trabajo.

Resumen

El plomo es un metal presente en el ambiente ya sea de forma natural o generado por actividades antropogénicas y la exposición a éste metal causa múltiples efectos en la salud, afectando principalmente a los niños. En el presente estudio de tipo transversal se identificó la exposición a partículas suspendidas totales (PST) y plomo en ambientes escolares de población infantil entre 6 y 12 años en zonas de riesgo definidas en Bogotá D.C. A través de la herramienta de evaluación acumulada de riesgo (EAR) se logró determinar que en el sur de la ciudad (localidades de Ciudad Bolívar, Usme, Tunjuelito, Kennedy, Puente Aranda y Bosa), el 78% de las zonas (n=127) resultaron ser de alto riesgo por contaminación del aire debido a material particulado y plomo, en contraste con el norte de la ciudad, donde solo el 52% (n=94) de las zonas fueron definidas como de bajo riesgo. Esto es consistente con los resultados obtenidos en el muestreo de calidad del aire en ambientes escolares, evidenciando concentraciones más altas en el sur de Bogotá, especialmente en la localidad de Ciudad Bolívar con concentraciones de 378 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para Partículas Suspendidas Totales (PST), y en las localidades de Bosa, Puente Aranda y Ciudad Bolívar con concentraciones por encima de 10 ng/m^3 para el caso del Plomo. Lo que sugiere que las dosis potenciales de exposición (DPE) obtenidas para la población entre 6 a 12 años fueron dependientes de la concentración a la que estaban expuestos, alcanzando hasta 5 $\text{ng}/\text{Kg}/\text{día}$ para el grupo de 6-11 años y de 3 $\text{ng}/\text{Kg}/\text{día}$ para el grupo de 11-16 años en donde las localidades de Bosa, Ciudad Bolívar, Puente Aranda, Kennedy y San Cristóbal presentan mayores dosis. Al correlacionar las concentraciones medidas a nivel intramural y las concentraciones a nivel extramural obtenidas de la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá (RMCAB) conforme a las zonas de riesgo definidas, se encuentra que la concentración de plomo depende del comportamiento del material particulado en sus diferentes diámetros de partícula.

Palabras clave: riesgo (1), plomo (1), dosis potencial de exposición, contaminación del aire (1)

Abstract

Lead is a metal present in the environment either naturally or generated by anthropogenic activities and exposure to this metal causes multiple effects on health, affecting mainly children. In the present cross-sectional study, exposure to total suspended particles (PST) and lead in school environments of children between 6 and 12 years in risk areas defined in Bogotá D.C. Was evaluated the accumulated risk assessment tool (EAR) it was possible to determine that in the south of the city (towns of Ciudad Bolívar, Usme, Tunjuelito, Kennedy, Puente Aranda and Bosa), 78% of the áreas (n=127) were found to be high risk for air pollution due to particulate matter and lead, in contrast to the north of the city, where only 52% of the áreas (n=84) were defined as low risk. This is consistent with the results obtained in the sampling of air quality in school environments, showing higher concentrations in the south of Bogotá, especially in the town of Ciudad Bolívar with concentrations of $378 \mu\text{g}/\text{m}^3$ for Total Suspended Particles (TSP), and in the towns of Bosa, Puente Aranda and Ciudad Bolívar with concentrations above $10 \text{ ng} / \text{m}^3$ for the case of Lead.

This suggests that the potential exposure doses (DPE) obtained for the population between 6 and 12 years were dependent on the concentration to which they were exposed, reaching up to $5 \text{ ng}/\text{kg}/\text{day}$ for the group of 6-11 years and $3 \text{ ng}/\text{Kg} /\text{day}$ for the group of 11-16 years in which the localities of Bosa, Ciudad Bolívar, Puente Aranda, Kennedy and San Cristóbal present higher doses. When correlating the concentrations measured at the intramural level and the extramural concentrations obtained from the Bogota Air Quality Monitoring Network (RMCAB) according to the defined risk zones, it is found that the concentration of lead depends on the behavior of the particulate material in its different particle diameters.

Keywords: Risk (2), lead (2), exposure dose, air pollution (2)

Contenido

	Pág.
Agradecimientos	VII
Resumen	IX
Contenido.....	XI
Lista de figuras	XIII
Lista de tablas	XV
Introducción.....	18
1. Planteamiento y Justificación.....	21
1.1 Planteamiento del problema	21
1.2 Justificación.....	25
2. Marco Teórico.....	28
2.1 Generalidades del plomo	28
2.2 Cinética del plomo en el ambiente.....	32
2.2.1 Suelo	35
2.2.2 Agua	36
2.2.3 Aire	37
2.2.4 Biota	38
2.3 Toxicocinética del plomo en el ser humano	41
2.3.1 Exposición	41
2.3.2 Absorción	41
2.3.3 Distribución.....	43
2.3.4 Metabolismo	44
2.3.5 Excreción.....	44
2.4 Toxicodinamia del plomo en el cuerpo humano	45
2.5 Efectos del plomo en la salud	46
2.6 Marco normativo	51
3. Objetivos.....	53
3.1 Objetivo general	53
3.2 Objetivos específicos	53
4. Metodología	55

XII Determinación de la exposición a plomo suspendido en el aire en ambientes escolares de niños entre 6-12 años en zonas de riesgo definidas en Bogotá D.C

4.1	Fuentes Fijas.....	58
4.2	Calidad del aire y variables meteorológicas	60
4.3	Fuentes móviles.....	62
4.4	Otras actividades económicas relacionadas con la manipulación de plomo	63
4.5	Componente sociodemográfico	64
5.	Resultados	79
5.1	Resultados del primer objetivo: Definición de unidades de análisis o zonas de exposición de acuerdo al área de las localidades	79
5.2	Resultados del segundo objetivo: Muestreo de aire intramural	88
5.3	Resultados del tercer objetivo: Estimación de la dosis potencial de exposición	91
5.4	Resultados del objetivo cuatro: Coeficiente de correlación	93
5.4.1	Análisis descriptivo	93
5.4.2	Análisis Bivariado	96
5.4.3	Aplicación de coeficiente de correlación	96
6.	Discusión	101
7.	Conclusiones y Recomendaciones	107
7.1	Conclusiones.....	107
7.2	Recomendaciones	108
8.	Bibliografía.....	111

Lista de figuras

	Pág.
Figura 2-1. Clasificación del plomo	29
Figura 2-2. Producción primaria de plomo en el mundo	31
Figura 2-3. Comparativo del tamaño relativo de partículas y el plomo con el diámetro de un cabello humano.	34
Figura 2-4. Cinética del plomo en el ambiente	40
Figura 2-5. Modelo compartimental del plomo en el organismo humano	43
Figura 2-6. Ciclo toxicocinético del plomo en el cuerpo humano	45
Figura 2-7. Efectos del plomo en los niños	49
Figura 2-8. Efectos del plomo en adultos	49
Figura 4-1. Modelo grafico de grillas	57
Figura 4-2. Métodos analíticos utilizados para la determinación de material particulado PM y extracción de plomo.	67
Figura 4-3. Esquema de exposición y dosis (57)	74
Figura 5-1. Grillas para la evaluación acumulada de riesgo por exposición a material particulado y plomo en Bogotá	81
Figura 5-2. Zonas de riesgo acumulado por exposición a material particulado PM y plomo en Bogotá.	87
Figura 5-3. Distribución territorial de la concentración de partículas suspendidas totales (PST) al interior de Instituciones educativas por zona de riesgo en Bogotá 2015-2016... ..	89
Figura 5-4. Cumplimiento normativo de la concentración de partículas suspendidas totales (PST) al interior de Instituciones educativas por zona de riesgo en Bogotá 2015-2016	89
Figura 5-5. Distribución territorial de la concentración de plomo suspendido en el aire al interior de instituciones educativas por zona de riesgo en Bogotá 2015-2016.	90
Figura 5-6. Cumplimiento normativo de la concentración de plomo suspendido en el aire al interior de Instituciones educativas por zona de riesgo en Bogotá 2015-2016.	91
Figura 5-7. Distribución territorial del comportamiento de la dosis potencial de exposición a plomo suspendido en el aire para niños de 6-16 años por zona de riesgo en Bogotá 2016.	92
Figura 5-8. Diagrama de cajas partículas suspendidas totales (PST) y plomo suspendido en el aire intramural por zona de riesgo en Bogotá 2016.	94
Figura 5-9. Diagrama de cajas para material particulado PM₁₀ y PM_{2.5} obtenidos de la Red de Monitoreo de Calidad del Aire por zona de riesgo en Bogotá 2016.	95
Figura 5-10 Diagrama de cajas calificación de riesgo de las grillas según zona de exposición definida.	95
Figura 5-11. Diagrama de dispersión entre plomo y partículas suspendidas totales (PST) según zona de exposición.	97

XIV Determinación de la exposición a plomo suspendido en el aire en ambientes escolares de niños entre 6-12 años en zonas de riesgo definidas en Bogotá D.C

Figura 5-12. Diagrama de dispersión entre plomo y material particulado PM_{10} y $PM_{2.5}$ según zona de exposición98

Figura 5-13. Diagrama de dispersión entre plomo y calificación de la grilla según zona de exposición99

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 2-1. Formas naturales del plomo.....	29
Tabla 2-2. Efectos del plomo en la salud	47
Tabla 2-3. Niveles máximos permisibles para material particulado (PM)	51
Tabla 2-4. Niveles Máximos Permisibles para Contaminantes No Convencionales	51
Tabla 2-5. Niveles máximos permisibles para plomo suspendido en el aire a nivel internacional.	52
Tabla 2-6. Valores umbral de plomo definidos por agencias internacionales	52
Tabla 4-1. Cálculo de grillas por localidad para definir zonas de exposición a material particulado y plomo suspendido en Bogotá.	56
Tabla 4-2. Variables consideradas en la evaluación acumulada de riesgos en Bogotá	57
Tabla 4-3. Clasificación por tipo de fuente fija y combustible para la evaluación acumulada de riesgo en Bogotá.	59
Tabla 4-4. Calificación de la densidad de fuentes fijas por grilla para la evaluación acumulada de riesgo en Bogotá.	59
Tabla 4-5. Calificación del tipo de combustibles de las fuentes fijas para la evaluación acumulada de riesgo en Bogotá.	60
Tabla 4-6. Calificación de la concentración de contaminación del aire por material particulado PM ₁₀ para la evaluación acumulada de riesgo en Bogotá.	61
Tabla 4-7. Calificación de la velocidad del viento para la evaluación acumulada de riesgo en Bogotá.	61
Tabla 4-8. Calificación de la precipitación para la evaluación acumulada de riesgo en Bogotá.	62
Tabla 4-9. Calificación del flujo vehicular para la evaluación acumulada de riesgo en Bogotá.	63
Tabla 4-10. Calificación de actividades económicas que manipulan plomo para la evaluación acumulada de riesgo en Bogotá.	64
Tabla 4-11. Calificación del estrato socioeconómico para la evaluación acumulada de riesgo en Bogotá.	65
Tabla 4-12. Variables definidas para la evaluación acumulada de riesgo por exposición a contaminación del aire en Bogotá.	65
Tabla 4-13. Criterios para definir tipo de riesgo por exposición a contaminación del aire en Bogotá	66
Tabla 4-14. Insumos y equipos empleados en el trabajo de campo	68
Tabla 4-15. Instituciones educativas seleccionadas para muestreo de calidad del aire por partículas suspendidas totales PST y plomo	70
Tabla 4-16. Parámetros para cálculo del tamaño de la muestra.....	71
Tabla 4-17. Tamaños de muestra recomendados para tres diferentes porcentajes de potencia para muestreo de calidad del aire	71

Tabla 4-18. Parámetros para muestreo de calidad del aire	71
Tabla 4-19. Valores recomendados por la EPA para el cálculo de dosis potencial de exposición (58)	75
Tabla 5-1. Relación de grillas para evaluación acumulada de riesgo por exposición a por exposición a material particulado y plomo en Bogotá.	80
Tabla 5-2. Descripción por grilla de riesgo del comportamiento de fuentes fijas y tipo de combustible según la evaluación acumulada de riesgo por exposición a material particulado y plomo en Bogotá.	82
Tabla 5-3. Descripción del comportamiento de las variables de calidad del aire y meteorológicas según evaluación acumulada de riesgo por exposición a material particulado y plomo en Bogotá	84
Tabla 5-4. Descripción del comportamiento del flujo vehicular según evaluación acumulada de riesgo por exposición a material particulado y plomo en Bogotá.	84
Tabla 5-5. Descripción del comportamiento de las actividades económicas relacionadas con la manipulación de plomo según la evaluación acumulada de riesgo por exposición a material particulado y plomo en Bogotá	85
Tabla 5-6. Descripción del comportamiento de las condiciones socioeconómicas según la evaluación acumulada de riesgo por exposición a material particulado y plomo en Bogotá	86
Tabla 5-7. Estadísticos descriptivos concentraciones de contaminantes medidos en instituciones educativas en Bogotá 2015-2016.	94
Tabla 5-8. Prueba de muestras independientes según nivel de exposición de los concentraciones de contaminantes medidos en Bogotá 2015-2016.....	96
Tabla 5-9. Correlación de plomo suspendido en el aire con contaminantes medidos en Bogotá 2015-2016	97

Introducción

De los contaminantes presentes en la atmósfera, el Material Particulado (PM) es de gran importancia, debido a que ha sido asociado a diversos indicadores de morbilidad y mortalidad de la población. Conforme a los tamaños de partícula, existirá una afectación en mayor o menor grado, según su alojamiento a lo largo del tracto respiratorio en el ser humano. Por lo cual, para evaluar la exposición en el individuo a las concentraciones de contaminantes en el aire de ambientes urbanos, el muestreo de partículas es el método más útil para estimar de manera periódica y precisa la exposición real de contaminantes en una población específica. La concentración de estas partículas está ligada a la actividad de cada persona y a la presencia de fuentes externas e internas que lleguen a afectar en alguna medida la exposición (3).

Para evaluar de manera completa la exposición de la población a partículas, es necesario complementar el monitoreo ambiental con el poblacional, con el fin de analizar las concentraciones presentes en el ambiente tanto extramural como intramuros, así como también se requiere comprender el comportamiento de los distintos periodos en los que se pueda ver expuesta la población (3).

En el material particulado (PM) se pueden encontrar contaminantes como metales, hidrocarburos, carbón elemental, nitratos, sulfatos y otros. Uno de los elementos de mayor interés en salud pública es el plomo, que rara vez se encuentra en su forma elemental en la naturaleza. Este tiene diferentes mecanismos de transporte en las matrices ambientales (aire, agua, suelo). Se ha encontrado que el material particulado (PM) suspendido en el aire es el principal distribuidor de especies metálicas en sus diferentes fracciones, siendo en zonas residenciales donde se encuentra en mayor proporción en relación con material respirable (PM_{10}) y en zonas de alto tráfico vehicular en material ultrafino ($PM_{2.5}$), eliminándose por medio de la lluvia o la sedimentación gravitacional. (4)

Esta problemática ambiental tiene impacto en la salud de las personas teniendo dado que el sistema respiratorio es la principal vía de ingreso de los contaminantes atmosféricos. Uno de los metales de mayor estudio en la actualidad es el plomo, ya que según la Organización Mundial de la Salud (OMS) la exposición causa una variedad de efectos en la salud, afectando a los niños principalmente. La población está expuesta a este metal a través del aire que respiran, así como al agua y los alimentos que consumen. Los efectos tóxicos son por lo general por la exposición a largo plazo, y las principales fuentes varían de acuerdo a la región del mundo e incluyen: el uso industrial, el reciclado, la gasolina y tuberías con plomo. Este se distribuye principalmente por vía aérea, pero hay un poco de flujo en el suelo y el agua. (5)

En el mundo, se han realizado diferentes investigaciones relacionadas con la exposición a niveles de plomo; en el año 2003 Jarosinska y colaboradores realizaron una evaluación de la exposición a plomo en niños en seis ciudades de la provincia de Silesia (Polonia) entre los años 1993 y 1998, y la asociación con los niveles ambientales, para lo cual se contó con un total de 414.000 niños y niñas que participaron en el programa de edades comprendidas entre 2 y 7 años, con información completa sobre el nivel de plomo en sangre, año y época de muestreo, así como la aplicación de un cuestionario. De lo anterior, se evidenció que las concentraciones de plomo en el aire variaron desde 72 hasta 269 ng/m^3 estableciendo que la concentración media en el aire era más alta en invierno que en meses de verano. La precipitación media anual de este metal en las ciudades estudiadas fue de 15 a 95 mg/m^2 y el total de plomo en sangre fue 6,3 mg/dL (rango 0,6-48 mg/dL). De la misma manera, la proporción de niños con niveles elevados difirió significativamente entre las ciudades estudiadas concluyendo que la relación entre las mediciones de plomo en el ambiente y plomo en sangre en los niños fue directamente proporcional (6).

A través de los años, en Bogotá se han realizado investigaciones puntuales para determinar la exposición ambiental, sin embargo no se ha estudiado a profundidad la exposición a nivel intramuros especialmente en población vulnerable como la infantil.

De la misma manera, han cambiado los patrones de consumo, se han implementado políticas de reducción de este contaminante, como la prohibición de usar tetraetilo de plomo como antidetonante en la gasolina, sin embargo, el estudio de la problemática solo se ha priorizado en zonas específicas de la ciudad como lo es la localidad industrial de

Puente Aranda, lo cual no ha permitido realizar una trazabilidad de la problemática ni definir las zonas de mayor presencia de este metal en Bogotá. Considerando lo anterior, se hace necesario establecer una línea base de exposición al plomo suspendido en el aire en la ciudad en población vulnerable.

El presente trabajo establece la presencia de plomo en partículas suspendidas totales (PST) a nivel intramuros en Bogotá. Inicialmente, se definen de forma cualitativa las zonas con mayor posibilidad de presencia de este contaminante en el aire, mediante una adaptación de la metodología de evaluación acumulada de riesgo (EAR) (7). Posteriormente, se hace la cuantificación de los niveles de partículas suspendidas totales (PST) mediante campañas de campo en instituciones educativas y posterior determinación de Plomo en el laboratorio, comparando las concentraciones con los estándares nacionales, buscando determinar el nivel de la exposición de niños escolares al plomo suspendido en el aire en las zonas de riesgo definidas en Bogotá por medio de la dosis potencial de exposición (DPE).

1.Planteamiento y Justificación

1.1 Planteamiento del problema

Según la Asociación Internacional del Plomo (ILA) este metal se explota a un ritmo de casi cinco millones de toneladas al año, y es relativamente económico de producir. Como con todos los metales, hay dos rutas principales de producción; la primaria a través de la extracción de mineral de plomo y la secundaria, a partir de la recuperación de productos reciclados o de los residuos derivados del proceso de producción, representando en la actualidad más de la mitad de todo el plomo producido a nivel mundial.

En los EE.UU más de 80% del plomo proviene de la producción y en Europa es más de 60%. Hoy en día aproximadamente el 80% de este metal se utiliza en baterías de plomo ácido, las cuales son recuperables y reciclables. Un 6% es utilizado en forma de lámina en la industria de la construcción, junto con aplicaciones tales como blindaje contra la radiación, revestimiento de cables, amortiguadores de terremotos. Aproximadamente el 90% del plomo se utiliza en productos fácilmente reciclables (8).

En Colombia, según el plan de recuperación de Baterías Plomo-Acido como programa pos consumo, registra 59 empresas que realizan actividades de recuperación de este metal (9). Sin embargo, no se produce plomo, pero entre el 2001 y el 2009 se importaron 347581 toneladas de productos que lo contienen, ocupando el cuarto lugar a nivel de Latinoamérica y el Caribe. Dentro de los productos que generan estas importaciones, se encuentran los óxidos de plomo, el plomo rojo, el plomo naranja con 18.8% y monóxido de plomo con 23.3%, en donde los principales países proveedores son Bélgica, México y Perú, este último con una participación en el mercado Colombiano del 63.5%.

En el mismo periodo, se exportaron 231755 toneladas de productos que contienen plomo manufacturado, siendo el sexto país en la región. Dentro de los productos que generan estas exportaciones se encuentran baterías plomo-ácido hacia Chile, Perú, Estados Unidos y Venezuela (10).

Respecto a la producción local de baterías usadas, se realizó en el año 1999 un diagnóstico ambiental sobre el manejo realizado en el mantenimiento del parque automotor en Bogotá, cuyo objetivo fue estimar las baterías generadas anualmente y su proyección de acuerdo con las variables socioeconómicas que tienen influencia en el crecimiento del Parque Automotor del Distrito Capital. Es así que, sobre un estimado de 1000000 de vehículos, de los cuales aproximadamente 91% correspondía a transporte particular y 9% a transporte público, se presentó una generación de 623016 baterías al año, en las que el Plomo oxidado y reducido fue del 76% en peso, del cual un 45% corresponde a plomo reducido y 55% a plomo oxidado. Respecto a la cadena de gestión de este tipo de residuo, se identificó que el 10% del aprovechamiento era de baja tecnología, realizado manualmente en Bogotá, el 40% (249.200 baterías/año) con tecnología intermedia se realizaba en el municipio de Soacha, y el 50% del aprovechamiento restante (311.500 baterías/año) se realizaba de forma tecnificada en la ciudad de Cali (11).

En Bogotá, se han realizado diferentes trabajos académicos para medir la exposición de plomo en ambiente. En 1987, Ojeda concluyó que el comportamiento de los niveles encontrados en la ciudad fueron espacialmente uniformes, con una correlación positiva (0,82) entre los puntos monitoreados (12). En el año 2010, Bautista realizó la evaluación de las características físicas y químicas del material particulado (PM) en Bogotá encontrando metales en las fracciones respirables y fina y la mayor concentración de plomo (194 ng/m^3 en fracción respirable y 137 ng/m^3 en fracción fina) en el punto de monitoreo ubicado en la localidad de Fontibón; sin embargo en todos los puntos monitoreados se encontraron niveles de plomo que no superaron las normas nacionales (resolución 601 de 2006 para la época) e internacionales (niveles permisibles de la EPA $1.5 \mu\text{m}^3$), y en mayor proporción en fracción respirable (PM_{10}) en relación con la fracción fina de material particulado ($\text{PM}_{2.5}$) de las fundiciones (metalurgia de plomo y fábricas de baterías) (13).

En el año 2008, en el marco de la formulación del Plan Decenal de Descontaminación del aire para Bogotá, se estableció que las fuentes industriales en Bogotá emiten anualmente a la atmósfera 1440 toneladas de material particulado (PM), 2600 toneladas de óxidos de nitrógeno (NO_x) y 2200 toneladas de óxidos de azufre (SO_x); y que la localidad donde se concentra el mayor número de empresas asociadas con emisiones atmosféricas es la localidad de Puente Aranda (14).

Así mismo, se estableció que las fuentes vehiculares emiten anualmente a la atmósfera más de 4800000 toneladas de dióxido de carbono (CO_2), 450000 toneladas de monóxido de carbono (CO), 30000 toneladas de óxidos de nitrógeno (NO_x), 60000 toneladas de hidrocarburos y 1100 toneladas de material particulado grueso (PM) (14); este último considerado como el principal agente contaminante en Bogotá y cuya principal fuente de generación es el transporte público colectivo (15). De la misma manera, se encontró que en zonas industriales se detectaron mayores niveles de contenido de plomo en el material particulado PM_{10} suspendido en el aire (0.67 ug/m^3) en comparación con las zonas residenciales (0.30 ug/m^3) (14). Ahora bien, estos niveles de contaminación del aire en la ciudad no son iguales, si no que dependiendo de la zona existen diferencias, encontrando mayor contaminación en la zona sur de la ciudad presentando una inequidad ambiental.

Bogotá cuenta con 395 establecimientos educativos públicos oficiales con 741 sedes y 1841 de carácter privado (16), albergando 1695501 estudiantes menores de 16 años (17), siendo esta población de especial estudio por su potencial a estar expuesta a niveles de contaminación del aire. Con base en lo anterior, partiendo de que la población con mayor vulnerabilidad a los contaminantes del aire es la infantil, y con indicios de presentar niveles importantes y diferenciales de su exposición en la ciudad en los escenarios de mayor permanencia en su vida cotidiana como lo es el escolar, dado que se ha identificado que la contaminación a nivel intramuros en las instituciones educativas proviene principalmente de la combustión realizada por automóviles y penetra en las aulas por las ventanas (18), se pretende establecer una línea base en ambientes escolares de la exposición a plomo suspendido en el aire en Bogotá.

Ahora bien, los niveles de contaminación del aire en la ciudad no son iguales hablando de distribución geográfica. Según el informe anual de la Red de Monitoreo de Calidad del aire del año 2015 (19), de las once estaciones, el 27% es decir tres estaciones, superan el

límite anual permisible para material particulado PM_{10} , siendo estas Puente Aranda, Kennedy y Carvajal-Sevillana ubicadas en el suroccidente y en el sur, lo cual demuestra que esta zona representa altos niveles de contaminación en comparación con otros sectores de la ciudad, lo anterior refiere que en Bogotá se presentan diferentes niveles de contaminación lo cual influye que se presenten diferentes gradientes de exposición.

Dado que en la ciudad a través de los años, han cambiado los patrones de consumo, y se han realizado investigaciones aisladas relacionadas con la exposición de este metal en el aire, pero no con la suficiente representatividad geográfica en términos de cobertura, este estudio busca que pueda servir de diagnóstico real del contenido de plomo en el aire en las diferentes zonas de Bogotá y que se tome como base para investigaciones futuras.

Además pretende presentar recomendaciones pertinentes a las autoridades con base en los resultados que pueda arrojar, estableciendo posibles zonas de exposición en la ciudad de forma teórica tomando fuentes de información secundarias que posteriormente se verificaran por medio de un monitoreo de campo, de manera que pueda concluir si la información disponible es suficiente para soportar estudios de nivel epidemiológico que se realicen en un futuro.

Por consiguiente, se pretende responder la siguiente pregunta de investigación:

¿Hay diferencias en los niveles de plomo suspendido en el aire de ambientes escolares de niños entre 6 y 12 años, de acuerdo a las zonas de exposición definidas?

Hipótesis nula: No Hay diferencias en los niveles de plomo suspendido en el aire en ambientes escolares de niños entre 6 y 12 años, de acuerdo a las zonas de exposición definidas.

Hipótesis alterna: Se observa asociación entre los niveles de plomo suspendido en el aire en ambientes escolares de niños entre 6 y 12 años, de acuerdo a las zonas de exposición definidas.

1.2 Justificación

De acuerdo al estudio de carga global de la enfermedad, el 41% de la discapacidad intelectual idiopática (no especificada) se le puede atribuir a la exposición a plomo en el grupo de edad de 5-14 años a nivel mundial, de acuerdo a la cuantificación de los años vividos con discapacidad (AVD). En Colombia esta tendencia también se mantiene aunque el riesgo atribuible es menor (23%). Aunque se ha reducido el impacto de la exposición a plomo en Colombia entre 1990 y 2015, aún tiene un alto impacto sobre el total de años de vida saludables perdidos (AVISAS) con una tasa de 9,67 x 100.000 en este grupo de edad y está entre las 10 primeros factores de riesgo ambientales de la carga de la enfermedad en el país (20).

Las políticas de empleo actualmente generan inequidad en la vulnerabilidad ante la exposición, sumado a la ausencia de controles ambientales con base en la normativa existente en el país. La generación de emisiones en espacios de vida cotidiana como por ejemplo contenidos de plomo en las pinturas que se usan en viviendas e instituciones educativas o en la fabricación de juguetes (21) hacen que el riesgo aumente especialmente en la población infantil siendo la más vulnerable.

Así mismo, a nivel internacional se ha evidenciado el potencial negativo que tiene la exposición a contaminación del aire al interior en escuelas dado el tiempo de permanencia de los niños en ellas (22), así como se han documentado efectos neuropsicológicos como la disminución del coeficiente intelectual en niños por la exposición a plomo en la sangre $\geq 10 \mu\text{g/dL}$ afectando principalmente capacidades de lenguaje, lectura y matemáticas (23).

En Bogotá, se encontraron diferencias significativas entre niveles de plomo en sangre y el reporte de signos y síntomas, evidenciando que hay una agrupación geográfica de los niveles elevados. Por consiguiente, se recomendó que es necesario monitorear plomo en ambiente para definir el nivel de exposición y orientar medidas de control, así como implementar acciones para detectar tempranamente casos de intoxicación principalmente en niños, mujeres embarazadas y en edad fértil (24).

Por tal razón y con base en lo expuesto anteriormente se hace necesario que el presente trabajo cuantifique los niveles de plomo suspendido en el aire en ambientes escolares y

establezca las zonas en las que se presentan las condiciones de riesgo que determine las diferencias de exposición.

2.Marco Teórico

Según la OMS, más del 50% de las muertes por neumonía en menores de 5 años son causadas por partículas inhaladas en interiores con aire contaminado (25). La exposición a contaminantes del aire interior es importante en términos de los potenciales efectos negativos que puede ocasionar, especialmente cuando los niños pasan la mayoría del tiempo en instituciones educativas. Maesano y colaboradores realizaron un estudio de las posibles asociaciones con casos de asma y rinitis desarrollados en aulas escolares analizando entre otros contaminantes partículas finas con diámetros inferiores a 2,5 micrómetros, concluyendo que las partículas provienen principalmente de la combustión realizada por automóviles y penetra en las aulas por las ventanas (18).

2.1 Generalidades del plomo

El plomo es una sustancia química de origen natural, que rara vez se encuentra en su forma elemental. Las fuentes naturales son la erosión del suelo, el desgaste de los depósitos de los minerales y las emanaciones volcánicas. En el medio ambiente se distribuye principalmente por vía aérea, pero hay un poco de flujo en el suelo y el agua. Se resalta que solo el 4% del plomo es emitido por las fuentes naturales y el resto por fuentes antropogénicas. Se produce en la corteza terrestre, principalmente como la galena mineral, y en menor medida como anglesita y cerusita. Se libera a partir de fuentes naturales como los volcanes, el polvo arrastrado por el viento y la erosión, aunque estas emisiones son menores en comparación con las fuentes antropogénicas (26).

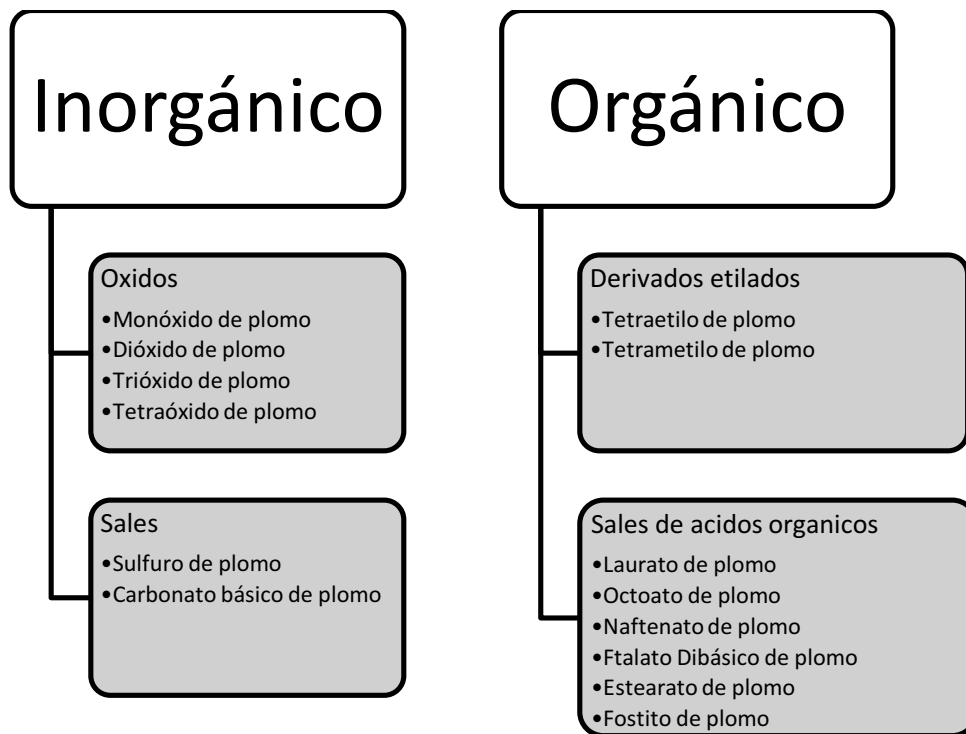
Tabla 2-1. Formas naturales del plomo

MINERAL	FORMULA QUÍMICA	%PLOMO
Galena	PBS	86%
Cerusita	PbCO ₃	77.5%
Anglesita	PbSO ₄	68.32 o 73,6% PbO
Piromorfita	Pb ₅ Cl(PO ₄) ₃	82.2% de PbO, hasta 15.4% de P ₂ O ₅

Fuente: El autor

Los minerales de plomo se encuentran en asociación con el zinc, cobre y sulfuros de hierro, así como oro, plata, bismuto, antimonio entre otros. En estado natural, contiene muchas impurezas, de las cuales unas son oxidables como antimonio, hierro y arsénico y otras difícilmente oxidables como el oro y la plata. También se presenta como un elemento traza en el carbón, petróleo y madera (27).

Figura2-1. Clasificación del plomo



Fuente: Realizado por el autor con base en (28)

El plomo tiene tres estados de oxidación Pb(IV) y Pb(II), y Pb(0) y en la naturaleza es una mezcla de cuatro isótopos estables: Pb-204 (1,4%), Pb-206 (25,2%), Pb-207 (21,7%) y Pb-208 (51,7%) (26).

Los isótopos de plomo son los productos finales de cada una de las tres series de elementos radiactivos naturales: Pb-206 para la serie de uranio, Pb-207 para la serie de actinio y Pb-208 para la serie de torio, adicionalmente se reconocen otros cuarenta y tres isótopos de plomo, todos radioactivos. Además los isótopos más pesados del plomo (^{210}Pb , ^{211}Pb , ^{212}Pb , y ^{214}Pb) se producen en la naturaleza como productos intermedios de uranio y torio en decaimiento (26).

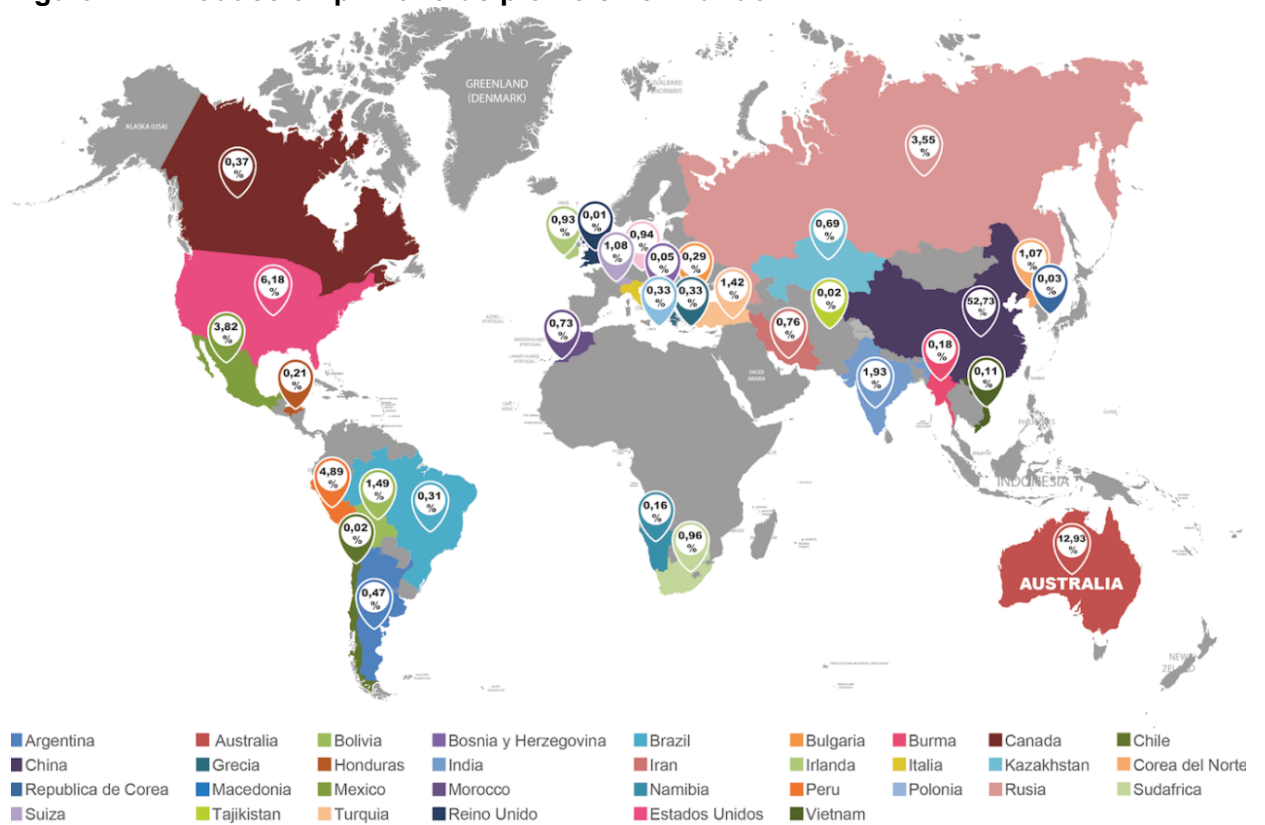
En el ambiente, se encuentra principalmente en forma de iones y es conocido por formar complejos tales como carbonato, cloruro, fluoruro, nitrato y sulfato; de la misma forma, los factores que inciden en la especiación de este metal son el pH, tipos y concentraciones de complejos catiónicos y la magnitud de las constantes de estabilidad (26).

Reacciona con ácido sulfúrico, ácido nítrico y ácido clorhídrico. En polvo, puede reaccionar (posiblemente violentamente) con oxidantes fuertes, nitrato de amonio, trifluoruro de cloro, metales químicamente activos, peróxido de hidrógeno concentrado, acetiluro de sodio. Incompatible con azida sódica, acetilurodisódico, peróxido de hidrógeno, metales activos - sodio, potasio, zirconio. Es atacado por agua pura y ácidos orgánicos débiles en presencia de oxígeno; y a temperatura ambiente por cloro y flúor. Cuando se calienta a temperaturas mayores de 450°C emite vapores altamente tóxicos (26).

Mao y colaboradores en el 2008, describieron la movilización del plomo en el ambiente por medio de cuatro ciclos: producción, la fabricación y manufactura, uso y la gestión de residuos y reciclaje. Respecto a la producción, ésta fue clasificada en primaria y secundaria. En cuanto a la fabricación, manufactura y uso se fundamentó en las corrientes de baterías, tuberías, revestimientos de cables, aleaciones, y otros (aditivos en la gasolina, cristales). Y por último la gestión de residuos y reciclaje se fundamentó en dos fuentes principales: los productos obsoletos del plomo después de su uso y los residuos industriales (29)

Es así que de forma primaria es producido en 33 países y, según el libro de minerales del Servicio Geológico de Estados Unidos del año 2013, la producción mundial de plomo fue 5.500.000 toneladas, teniendo China y Australia como los principales productores con alrededor del 52% y 13%, respectivamente. (30)

Figura 2-2. Producción primaria de plomo en el mundo



Fuente: realizado por el autor con base en (30)

La producción mundial de plomo de las minas ha disminuido ligeramente en 30 años, pasando de 3.6 millones de toneladas en 1975 a 3.1 millones de toneladas en 2004. Durante este mismo período, la producción mundial de plomo refinado y el consumo de metal aumentó alrededor de 4.7 millones a 7.1 millones de toneladas. La razón de la diferencia entre la producción y el consumo se debe al reciclado de plomo (10). Para América Latina y el Caribe en el año 2013 representó el 11% de la producción mundial, siendo los principales productores Perú (266.472 toneladas) y México (210.000 toneladas) (30). Los minerales ricos en plomo se producen con mayor frecuencia junto con otros metales, y cerca de dos tercios de la producción de plomo en todo el mundo se obtiene a partir de minerales mixtos de plomo y zinc (10).

Después de haber determinado la movilización del plomo en el ambiente y como parte de un estudio multinivel del ciclo de plomo de origen antropogénico, Mao y colaboradores estimaron los flujos de plomo en siete corrientes de emisión en 52 países de 8 regiones en el mundo. Las corrientes de estudio fueron: desechos tóxicos, escorias, manufactura, los vertederos, y la dispersión de productos de descarte, estableciendo que por cada kilogramo de plomo dispuesto, 0.5 kilogramos se pierde en el medio ambiente, siendo las corrientes donde más se identificó: (i) vertederos con un 34.4%; y (ii) dispersión con un 20,7%. Así mismo se identificaron cinco depósitos de plomo en ambiente entre los cuales se encuentran las suspensiones contenidas en la tierra, los sólidos contenidos en la tierra, el agua, el aire, y los sólidos no contenidos en la tierra. (29)

A nivel regional en el mundo, las emisiones de plomo más grandes se producen en Asia (34% del total), seguida de Europa y América del Norte (24 y 23% del total, respectivamente) y teniendo en cuenta los diferentes países de estudio, se evidenció que la emisión de plomo más grande se produce en los Estados Unidos seguido por China. Estos dos países aportan el 17% y 15% de las emisiones totales del mundo, respectivamente. (29)

2.2 Cinética del plomo en el ambiente

El plomo se dispersa en el medio ambiente principalmente como resultado de actividades antropogénicas. En el aire, está en forma de partículas y se elimina por la lluvia o la sedimentación gravitacional. La solubilidad de los compuestos de plomo en agua se da en función del pH, la dureza, la salinidad, la presencia de material húmico y es más alta en aguas blandas y ácidas. El plomo se deposita en el suelo y los sedimentos, manteniéndose en las capas superiores y no se filtran en el subsuelo y las aguas subterráneas. Los compuestos de plomo se pueden transformar en el entorno a otros, sin embargo, es un elemento y no puede ser destruido. En las plantas y los animales puede bioconcentrarse pero no se biomagnifica en la cadena alimentaria acuática o terrestre (26).

Algunas de las exposiciones al plomo más importantes se han producido como resultado de vivir en entornos urbanos, especialmente en áreas cercanas a las fuentes fijas de

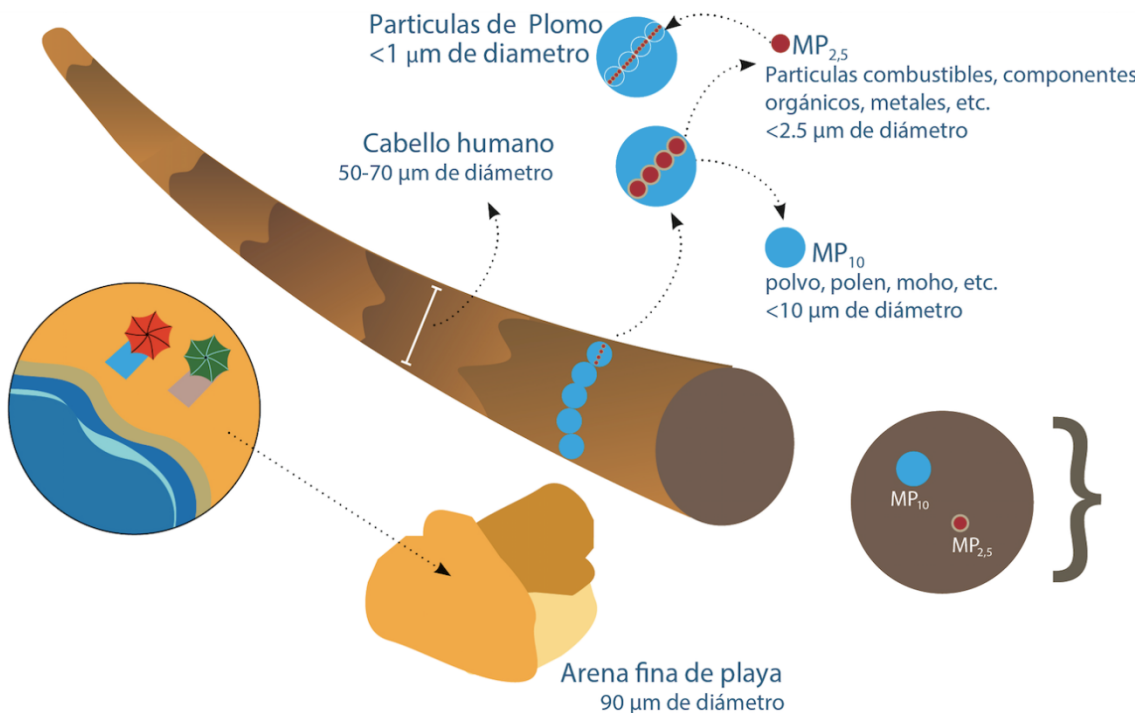
emisión por ejemplo, las fundiciones, la renovación de las viviendas que contienen pintura con plomo, el contacto con polvo de plomo en la pintura de interiores, la exposición ocupacional y la exposición ocupacional de segunda mano, es decir las familias de los trabajadores que utilizan este metal (26).

La principal fuente en el ambiente han sido históricamente las emisiones antropogénicas a la atmósfera contenido en el material particulado (PM), siendo el aire el medio de dispersión más común. El material, es el contaminante que más significativamente ha sido asociado a eventos de mortalidad y morbilidad en la población (31). Se clasifica según su diámetro, característica de la cual depende la intensidad de sus impactos. Existen dos métricas comúnmente utilizadas para clasificarlo, partículas menores a 10 micrometros (μm) conocidas como material particulado PM_{10} y partículas menores a 2.5 micrometros (μm), conocidas como material particulado $\text{PM}_{2.5}$ (32).

En el material particulado PM_{10} se distinguen dos fracciones, la fracción respirable, es decir, entre 2,5 y 10 (μm), y la fracción fina, menor a 2,5 (μm) (32) dependiendo del proceso que las haya originado, destacándose los compuestos orgánicos, metales pesados, óxidos metálicos y compuestos de calcio, aluminio y silicio, procedentes de polvo del suelo (26). Los metales al no ser química ni biológicamente degradables permanecen en el ambiente durante cientos de años, ocasionando problemas ambientales y de salud a largo plazo.

Ho y colaboradores realizaron estudios de caracterización del material particulado (PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$) en Hong Kong, encontrando concentraciones de plomo en zonas de alto tráfico vehicular e industrial, indicando que provienen principalmente de fuentes antropogénicas (33) .

Figura 2-3. Comparativo del tamaño relativo de partículas y el plomo con el diámetro de un cabello humano.



Fuente: Adaptado por el autor con base en (32)

La deposición atmosférica es la principal fuente de plomo que se encuentra en los suelos y se transfiere de forma continua entre el aire, el agua y el suelo por procesos naturales químicos y físicos tales como la erosión, la escorrentía, el flujo de la precipitación, deposición seca de polvo y el flujo o arroyo de los ríos, sin embargo, el suelo y los sedimentos parecen ser depósitos importantes. Las partículas de plomo se eliminan de la atmósfera principalmente por deposición húmeda y seca. El tiempo medio de permanencia en la atmósfera es de 10 días. Durante este tiempo, puede transportarse largas distancias; es extremadamente persistente en el agua y el suelo y la especiación en estos medios varía ampliamente dependiendo de factores tales como temperatura, pH y la presencia de materiales húmicos. El plomo (Pb) es en gran medida asociado a los sólidos suspendidos y sedimentos en los sistemas acuáticos (26).

Casi toda la exposición ambiental al plomo es por medio de compuestos inorgánicos, incluso en los alimentos (34).

2.2.1 Suelo

En la mayoría de los casos, el plomo presente en los suelos es relativamente insoluble y tiene poca movilidad, razón por la cual, los suelos contaminados lo retienen cientos y hasta miles de años. Resulta más móvil en ambiente ácido, algo frecuente en residuos mineros y en lixiviados de vertederos. (34)

Cuando se libera en el suelo, el plomo se convierte a otras formas como $PbSO_4$, $Pb_3(PO_4)_2$, PbS y PbO (26) y su acumulación en la mayoría de los suelos es principalmente una función de la velocidad de deposición de la atmósfera, por lo cual en suelos con $pH \geq 5$ y con un contenido de al menos el 5% de materia orgánica, se mantiene en los primeros 5 cm de suelo y es relativamente inmóvil y puede persistir durante largos períodos de tiempo, ya sea añadido al suelo como haluros, hidróxidos, óxidos, carbonatos o sulfatos (de la combustión de combustibles automotrices o de procesos industriales) como arseniato de plomo, insecticidas, o como una impureza en fertilizantes o componente de aguas residuales. Así mismo, el plomo inorgánico se puede unir en matrices cristalinas de las rocas y permanecer esencialmente inmóvil (34).

La adsorción está fuertemente correlacionada con el pH y la capacidad de intercambio iónico de los suelos, aumentando la movilidad en entornos que tienen un pH bajo debido a la solubilidad en condiciones ácidas (siendo escasamente soluble a pH 8 y cada vez más soluble a medida que el pH se aproxima a 5), es así que aumenta proporcionalmente con el contenido de materia orgánica de los suelos así como en presencia de carbonatos y minerales fosfatados (27).

Por lo anterior, se acumula en la capa superficial del suelo debido a la complejación con la materia orgánica y la transformación de los compuestos de plomo soluble a sulfato o derivados de fosfato relativamente insoluble, lo que limita en gran medida la transferencia a los sistemas acuáticos y también inhibe la absorción por las plantas, excepto bajo condiciones ácidas. Por consiguiente, a un pH ácido, los complejos orgánicos de plomo soluble se pueden filtrar o pueden ser absorbidos por las plantas. Estos procesos son dependientes del tipo de suelo, tamaño de partícula, el contenido de materia orgánica del suelo, la presencia de coloides inorgánicos y óxidos de hierro, capacidad de intercambio catiónico, y la cantidad en el suelo. (34)

2.2.2 Agua

El plomo en el agua puede ser el resultado de fuentes industriales, pero la escorrentía urbana y la deposición atmosférica contribuyen significativamente a la carga total (35). Su química en solución acuosa es altamente compleja porque este elemento se puede encontrar en múltiples formas, y tiene una tendencia a formar compuestos de baja solubilidad con los aniones principales encontrados en aguas naturales. Sin embargo, puede encontrarse en las aguas disuelto o en partículas en suspensión (27).

Realmente, pocos productos de plomo se disuelven fácilmente en el agua, precipitándose con frecuencia y depositándose seguidamente en los sedimentos fluviales u oceánicos. Es así que los complejos plomo-materia orgánica son estables a un pH de 3, siendo menos estables con el aumento de la dureza del agua; por lo cual, la adsorción del plomo a la materia orgánica, la arcilla y las superficies minerales, y la precipitación y/o absorción por óxidos de hierro y manganeso hidratados es función del pH (26).

A su vez, el plomo elemental es insoluble en agua y los compuestos son generalmente solubles en agua blanda y levemente ácida (26). La cantidad soluble en las aguas superficiales depende de parámetros tales como la disponibilidad de ligandos, pH, condiciones redox, salinidad, concentración de hierro, composición de material particulado disuelto y sedimento y concentración (34).

La especiación difiere en agua dulce y agua de mar. Una gran parte del plomo introducido en el medio acuático está asociado con partículas que se depositan en los sedimentos. En sitios altamente contaminados, el contenido orgánico antropogénico del agua controla la especiación del plomo (34). En agua dulce, puede existir parcialmente como un catión divalente (Pb^{2+}) a pHs por debajo de 7.5, pero se compleja con carbonato disuelto para formar $PbCO_3$ insoluble en condiciones alcalinas. Incluso pequeñas cantidades de iones carbonato formados en la disolución del CO_2 atmosférico son suficientes para mantener las concentraciones en los ríos en el límite de solubilidad de 500 $\mu g/L$. La absorción a partículas polares en ambientes de agua dulce y estuarios es un proceso importante para la eliminación en estas aguas superficiales (27). Por otro lado, el cloruro y carbonato de plomo son los complejos primarios formados en el agua de mar (27).

Gran parte es transportado por el agua de río en forma de sólidos suspendidos de carbonato de plomo, óxido de plomo, hidróxido de plomo. Cálculos de equilibrio muestran que a $\text{pH} > 5.4$, la solubilidad total es de aproximadamente 30 g/L en agua dura y aproximadamente 500 mg/L en agua blanda (27).

2.2.3 Aire

En la atmósfera, los compuestos de plomo existen principalmente en forma de partículas de sales inorgánicas (PbSO_4 y PbCO_3) (35). No está completamente claro cómo la composición química del plomo cambia durante la dispersión (27). El diámetro medio es bastante pequeño, 0,55 μm . Debido a su pequeño tamaño, las partículas que contienen plomo pueden permanecer en el aire hasta 64 horas y viajar 1.600 km, sin embargo estudios han demostrado que el plomo suspendido en partículas más grandes se deposita dentro de un radio de máximo de 10 km de las fuentes de las emisión (34).

El 86% de las partículas con plomo emitidas por fundiciones tiene un tamaño menor a 10 micras. Las partículas más pequeñas, aquellas menores de 1 micra, están asociadas con los procesos de combustión a alta temperatura. Tras su liberación a la atmósfera, las partículas de plomo se dispersan y finalmente son eliminadas por deposición húmeda o seca. Aproximadamente el 40-70% de la deposición es por precipitación húmeda y del 20-60% de las partículas de plomo emitidas desde automóviles se depositan alrededor de la fuente. Este tipo de deposición a partir de la atmósfera es una de las mayores causas de contaminación del suelo y de las aguas, aunque en los países en los que se ha suprimido el uso de la gasolina con plomo, la situación ha mejorado de forma drástica (34).

Antes de la prohibición de la venta de gasolina con plomo, se emitían partículas de plomo a la atmósfera de los gases de escape de los automóviles como haluros de plomo (sobre todo PbBrCl) y como sales dobles con haluros de amonio (por ejemplo, $2\text{PbBrCl} \cdot \text{NH}_4\text{Cl}$, $\text{Pb}_3(\text{PO}_4)_2$ y PbSO_4). Después de 18 horas, se liberaba aproximadamente el 75% del bromo y el 30-40% del cloro, y se producían carbonatos, oxicarbonatos y óxidos de plomo. El bromocloruro de plomo, la forma primaria de plomo emitido por los vehículos de motor, se convierte en sulfato de plomo menos soluble, ya sea por reacciones en la atmósfera o por reacciones en la superficie del suelo, limitando así la movilidad en el suelo. (27)

Un factor importante en la determinación del transporte atmosférico es la distribución de tamaño de partícula. La velocidad de deposición seca de partículas de plomo con un diámetro aerodinámico de 0.06-2.0 μm se estima que oscila entre 0.2 y 0.5 cm/segundo (34).

Para el caso de las fuentes de emisión fijas, como minas y fundiciones, principalmente, las partículas de plomo se emiten en forma elemental y compuestos de plomo-azufre, PbSO_4 , PbO , PbSO_4 y PbS . Se ha encontrado que el plomo emitido por la combustión de aceites usados está en forma de PbCl_2 , PbO y en forma elemental. Este último sólo existe en la fase de vapor por encima de 1.750°C, por lo tanto, a temperaturas ambientales, se deposita como componente del material particulado (PM) (27).

2.2.4 Biota

En las plantas y los animales, el plomo puede bioconcentrarse pero no se espera su biomagnificación. En general, las mayores concentraciones se encuentran en los organismos acuáticos y terrestres que habitan cerca de la minería de plomo, fundición, refinación e instalaciones de almacenamiento, plantas de reciclaje de baterías, las zonas afectadas por alto tráfico vehicular, zonas de caza y la pesca, y en las zonas urbanas e industrializadas (26).

Puede estar presente en las superficies de plantas como resultado de la deposición atmosférica; su presencia en los tejidos internos de la planta indica absorción biológica del suelo y las superficies de las hojas. La biodisponibilidad en el suelo a las plantas es limitada debido a la fuerte fijación del plomo a la materia orgánica del suelo. La distribución en las plantas está principalmente en las raíces y mucho menos en los tallos o las hojas.

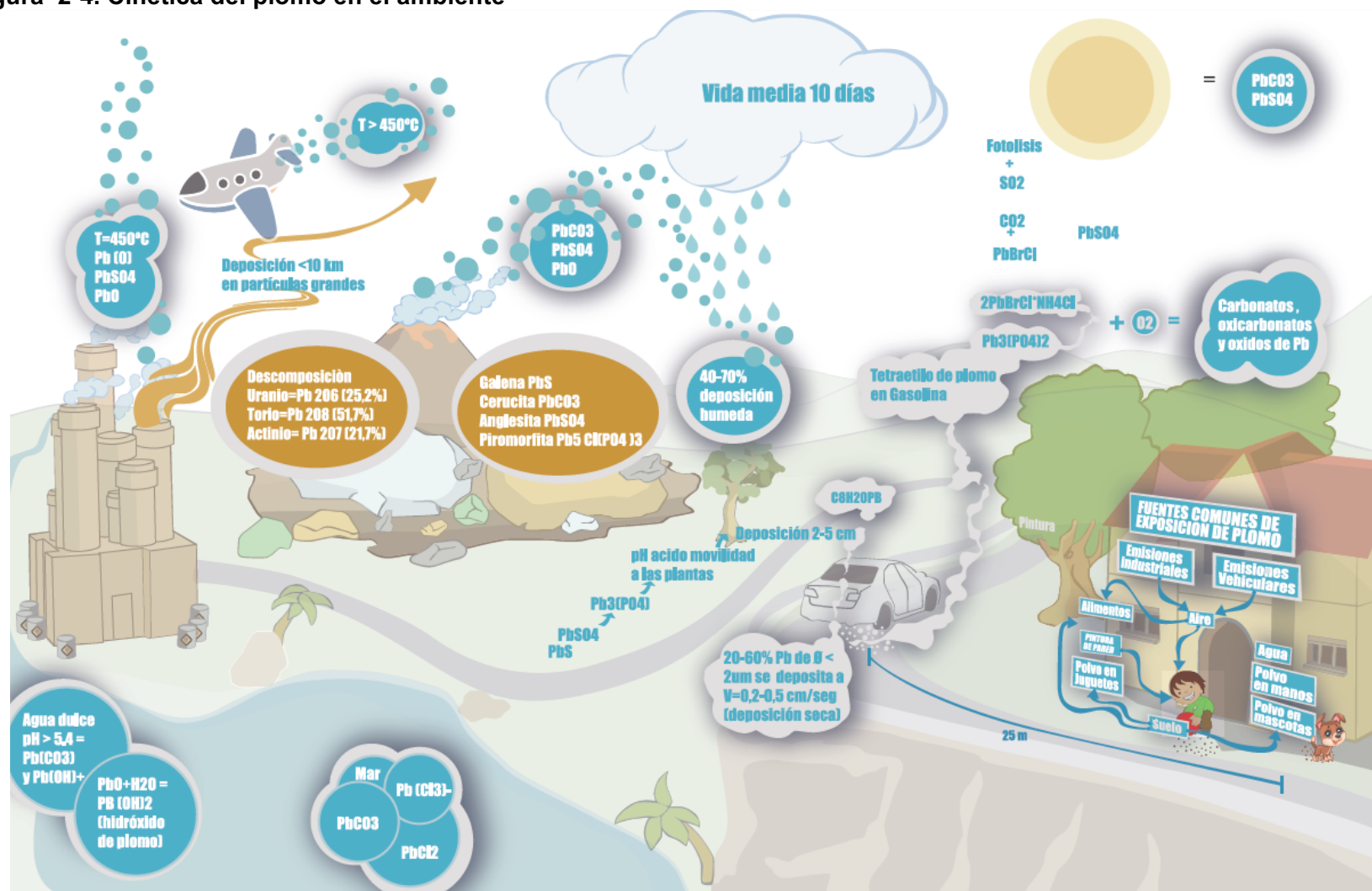
Eventualmente, es devuelto al suelo cuando las plantas se descomponen a menos que sean cosechadas (para posiblemente entrar en la cadena alimenticia) o removidas; las plantas pueden absorber del suelo altos niveles hasta 500 ppm, pero concentraciones más altas perjudican su crecimiento (27). En estudios realizados de plantas cultivadas en suelos contaminados con plomo mostraron una baja acumulación en las partes comestibles. La cantidad en el suelo que está biodisponible en las plantas depende de factores tales como

la capacidad de intercambio catiónico, el pH, la cantidad de materia orgánica presente, el contenido de humedad del suelo y el tipo de fertilizantes agregados al suelo (34).

La absorción en los animales puede ocurrir como resultado de la inhalación de aire contaminado o ingestión de plantas contaminadas. Sin embargo, el plomo no se biomagnifica en las cadenas alimentarias acuáticas o terrestres. En los organismos acuáticos, las concentraciones son generalmente más altas que en los organismos bentónicos y algas, y más baja en el nivel trófico superior como los depredadores (34). La evidencia sugiere que la captación en los peces después de semanas de exposición está localizada en la mucosa de la epidermis, la dermis y las escamas y se acumula en papada, hígado, riñón y huesos, de modo que la disponibilidad en las porciones comestibles no representa un peligro para la salud humana. (36)

Con base en lo descrito en el presente capítulo la Figura 2-4 presenta la movilización del plomo en el ambiente en las matrices agua, suelo, aire y biota, ya sea de fuentes naturales o antropogénicas.

Figura 2-4. Cinética del plomo en el ambiente



Fuente: El autor

2.3 Toxicocinética del plomo en el ser humano

2.3.1 Exposición

La exposición poblacional al plomo inorgánico se produce principalmente a través de la ingestión de alimentos y agua potable, aunque la exposición a través de tierra, polvo, aire y pintura con plomo astillado contribuye significativamente a la exposición general (35).

Los niños están expuestos al plomo por la ingestión de pintura con plomo, papel de periódico de colores o jugando en la tierra, especialmente cerca de vías con alto tráfico vehicular (34).

2.3.2 Absorción

La vía respiratoria es la vía de entrada más importante, penetrando por inhalación de vapores, humos y partículas del polvo. Un 50% del plomo depositado en los pulmones se encuentra en sangre circulante tras aproximadamente 50 horas, pasando un porcentaje a tejidos o siendo eliminado (37). El grado de absorción por esta vía depende de la concentración, el tiempo de exposición, de la forma física (vapores, humos, tamaños de las partículas) y química inhalada, de factores personales (edad, tipo de ventilación) y de las condiciones ambientales (temperatura, humedad y ventilación ambientales, y nivel de esfuerzo físico) (27). Las partículas muy pequeñas (por debajo de unos 2.5 μm) que entran al tracto respiratorio se absorben entre un 50% hasta un 90% en los alvéolos (35).

Aproximadamente 35-50% del plomo inhalado de tamaño de partícula menor de 1 μm se deposita en el tracto respiratorio inferior, principalmente en el tracto alveolar, y el 50-70% de la dosis inhalada es absorbida. Las partículas más grandes, como las generadas en los gases de escape, se absorben casi por completo (> 90%) (35). Se estima que una concentración de 1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de plomo en aire inhalado determina una concentración de 1-2 $\mu\text{g}/100\text{ ml}$ en el torrente sanguíneo (27).

Por vía oral, las partículas de polvo son ingeridas directamente a través de las manos, alimentos, bebidas o cigarrillos contaminados en el ambiente de trabajo. Se ha estimado que un niño promedio puede ingerir hasta 100 mg de suelo al día (35). La principal fuente ambiental de exposición para bebés y niños pequeños hasta los 4 años de edad, son la transferencia manual de virutas de pintura que contienen plomo o polvo de pisos de viviendas antiguas que puede venir de fuera del hogar y puede estar relacionado con el plomo en el suelo de zonas aledañas a las viviendas (38). Se han reportado concentraciones entre 1-5 mg/cm² en virutas de pintura a base de plomo.

La exposición al plomo de la pintura se limita generalmente a las áreas próximas a las superficies pintadas y la remoción de la pintura puede dar lugar a altas concentraciones en el aire interior. Las fuentes domésticas incluyen la contaminación de alimentos y bebidas por el contacto con utensilios como cerámica vidriada o el uso de remedios tradicionales. Esta constituye la segunda vía de entrada, en importancia y hay también un porcentaje de partículas por encima de unos 10 µm que después de haber sido inhalados posteriormente son vertidos al tubo digestivo por los mecanismos de aclaramiento pulmonar. (35)

En adultos, aproximadamente el 5-15% del plomo ingerido es absorbido y retienen menos del 5% de lo que se absorbe; en los niños, la absorción puede ser del 42% con un 32% de retención (38). Las condiciones ácidas favorecen la disolución del plomo y sus compuestos. (26)

La absorción gastrointestinal del plomo se ve afectada por las características fisicoquímicas de las partículas y por factores fisiológicos como la edad, el ayuno, el calcio nutricional, el estado de hierro y el embarazo. En adultos sin exposición ocupacional y en niños mayores, el plomo absorbido por el tracto gastrointestinal proviene principalmente de la ingesta de alimentos, bebidas, tierra y polvo contaminados con este metal. Los bajos niveles de calcio, hierro, cobre, zinc, selenio o fosfato en la dieta pueden aumentar su absorción (35).

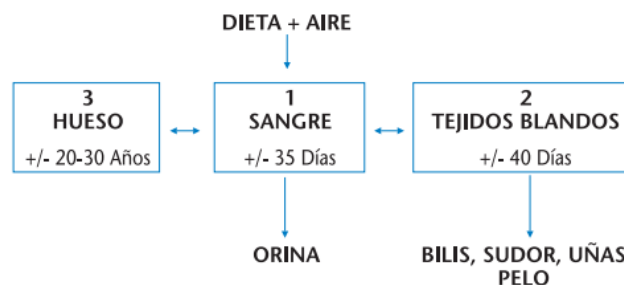
Por vía dérmica, la absorción de los compuestos inorgánicos es generalmente bastante baja, estimándose durante el uso normal de productos que contienen plomo en un 0,06% (35).

La exposición laboral puede ocurrir en una variedad de ocupaciones, incluyendo la fundición y refinado de plomo, operaciones de soldadura o corte de acero, fabricación o reciclaje de baterías, talleres de reparación de radiadores, construcción, entre otras. El Instituto Nacional para la Seguridad y la Salud Ocupacional (NIOSH) identificó más de 100 ocupaciones en las que los trabajadores pueden estar expuestos a compuestos inorgánicos de plomo (35).

2.3.3 Distribución

El plomo se distribuye en tres compartimentos, en primer lugar, circula en sangre unido a los glóbulos rojos, luego se distribuye a los tejidos blandos como hígado, riñón, médula ósea y sistema nervioso central, que son los órganos afectados por su toxicidad. Luego de 1 a 2 meses, el plomo se deposita en los huesos (38) como se presenta en la Figura 2-5.

Figura 2-5. Modelo compartimental del plomo en el organismo humano



Fuente. Tomado de (37)

Es transportado principalmente en los glóbulos rojos unidos a proteínas plasmáticas (99%) y sólo el 1% del plomo circulante en el suero está disponible para la distribución tisular (38). La vida media en sangre, tejido blando y hueso es de aproximadamente 36 días, 40 días y 27 años, respectivamente (35).

En adultos, aproximadamente el 90% de la carga corporal total de plomo se encuentra en el hueso. Sin embargo, en los niños, sólo es el 70% aumentando la concentración con la edad. Después de la exposición crónica, este se deposita, en forma de fosfato de plomo

insoluble en áreas del esqueleto que están creciendo rápidamente, tales como el radio, la tibia y el fémur (35).

El plomo óseo se moviliza fácilmente en la sangre contribuyendo hasta el 50%, cuyo efecto es más evidente en personas con antecedentes de exposición ocupacional y adultos mayores (35). La liberación de plomo en los huesos puede ser importante también en mujeres debido a la reabsorción ósea durante el embarazo, la lactancia, la menopausia y la osteoporosis (38). Se transfiere fácilmente a través de la placenta de la madre al feto en desarrollo durante el embarazo y se acumula en el hueso fetal. La concentración de plomo en la sangre del cordón umbilical puede ser de 85-90% de la sangre materna, por lo tanto, plantea un riesgo potencial para el feto (35).

2.3.4 Metabolismo

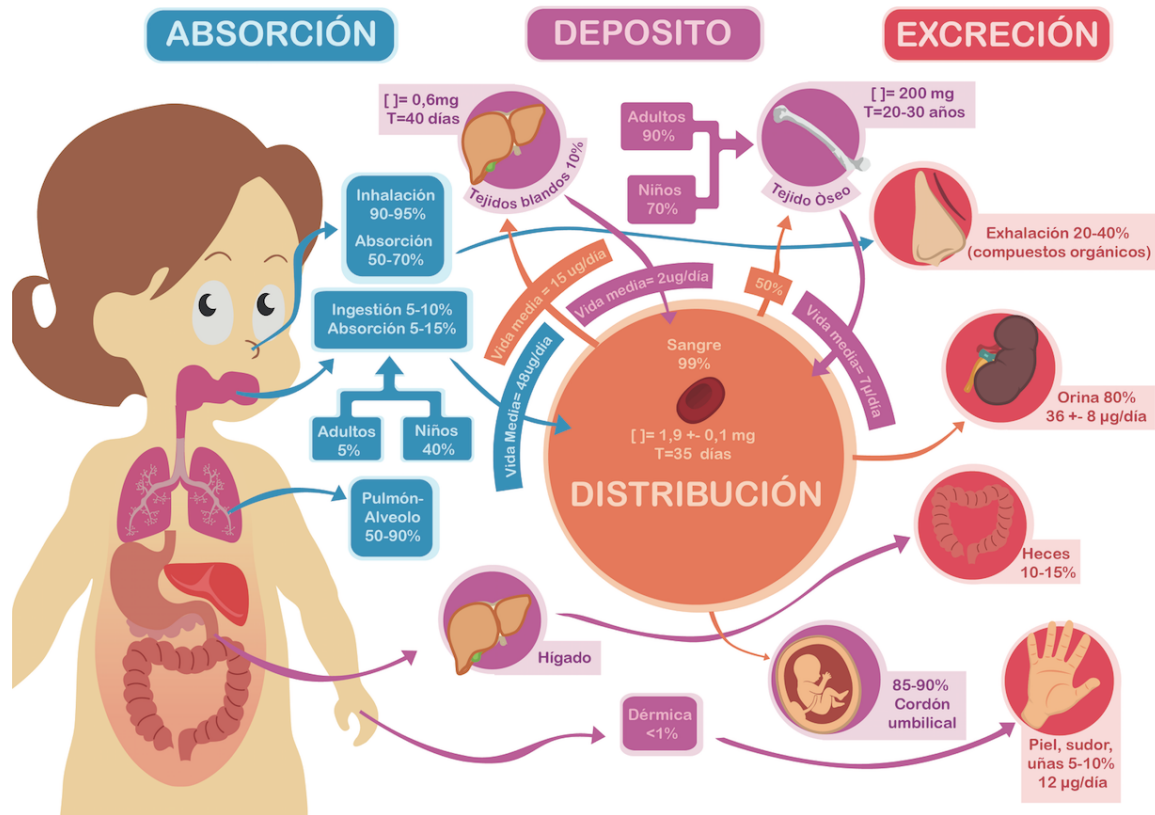
El plomo inorgánico no es metabolizado en el hígado, mientras que el orgánico (presente en aditivos de la gasolina como el plomo tetraetilo (PTE) y el plomo tetrametilo (PTM)) se absorbe casi en su totalidad y es metabolizado en el hígado transformándolo en plomo inorgánico, siendo un compuesto hidrosoluble (39).

2.3.5 Excreción

El plomo no absorbido que es ingerido, se elimina a través de las heces. El absorbido se excreta principalmente en la orina (75-80%) y en las heces (15%, un tercio de la excreción total de plomo absorbido). El sudor, la saliva, el cabello, las uñas y la leche materna son rutas menores de excreción (35).

La exhalación de compuestos orgánicos (tetraetil plomo y tetrametil plomo) es del 20% (plomo de tetraetilo) y del 40% de la dosis inhalada después de 48 horas; el plomo inorgánico absorbido no es exhalado del pulmón (40).

Figura 2-6. Ciclo toxicocinético del plomo en el cuerpo humano



Fuente: Adaptado por el autor de (41)

2.4 Toxicodinamia del plomo en el cuerpo humano

En forma general el mecanismo tóxico del plomo está dado por tres formas de acción, entre las cuales se tiene:

1. Gran afinidad por los grupos sulfhidrilo, compitiendo en especial por las enzimas dependientes del zinc e interfiere con el metabolismo del calcio, sobre todo cuando el metal está en concentraciones bajas, alterando el ciclo del calcio de las siguientes formas (37):
 - Reemplaza el calcio y se comporta como un segundo mensajero intracelular, alterando su distribución en los compartimentos dentro de la célula.
 - Activa la proteinquinasa C, una enzima que depende del calcio y que interviene en múltiples procesos intracelulares.

- Se une a la calmodulina más ávidamente que el calcio. Esta es una proteína reguladora de la contracción muscular (obtención de la energía), regula la liberación de hormonas y el control de la forma celular.
 - Inhibe la bomba de Na-K-ATPasa, lo que aumenta el calcio intracelular, afectando la neurotransmisión y el tono vascular lo que podría explicar en parte la hipertensión y la neurotoxicidad.
2. Afecta la síntesis del grupo HEM, al inhibir las siguientes enzimas (28): (i) Acido Delta Amino Levulinico Deshidratasa (ALAD), que tiene dos alelos y tres polimorfismos, lo que causa sensibilidad diferencial a la exposición al plomo (ii) Ferroquelatasa (iii) Acido Delta Amino Levulinico Sintetasa (ALA Sintetasa) y (iv) Porfobilinógeno Sintetasa. (37)
 3. A nivel renal interfiere con la conversión de la vitamina "D" en su forma activa, hay inclusiones intranucleares en los túbulos renales, produce una tubulopatía, que en estadios más avanzados llega a atrofia tubular y fibrosis sin compromiso glomerular, caracterizándose por una proteinuria selectiva. En niños se puede ver un síndrome semejante al de Fanconi, con aminoaciduria, glucosuria, e hipofosfatemia, sobre todo en aquellos con plumbemias altas (37).

2.5 Efectos del plomo en la salud

Los efectos tóxicos van desde la inhibición de las enzimas descritas anteriormente, hasta la producción de patologías severas o la muerte. Los niños son más sensibles a los efectos sobre el sistema nervioso central, mientras que en adultos la neuropatía periférica, la nefropatía crónica y la hipertensión son más frecuentes. Otros tejidos diana incluyen el tejido gastrointestinal, inmune, esquelético, y los sistemas reproductivos. Los efectos sobre la biosíntesis de la hemoglobina proporcionan un indicador bioquímico sensible incluso en ausencia de otros efectos detectables. (38).

Los efectos observados después de una exposición aguda a altos niveles de plomo incluyen: trastornos gastrointestinales, molestias, inquietud, irritabilidad, falta de atención, dolores de cabeza, daño hepático y renal, hipertensión, alucinaciones y encefalopatía. La Tabla 2-2 recoge los principales efectos que pueden presentarse a nivel sistémico. (35)

Tabla 2-2. Efectos del plomo en la salud

TIPO DE EFECTO	AGUDO	CRONICO
HEMATOTOXICIDAD	NA	Anemia, debido a la reducción de la producción de hemoglobina y la vida útil de los eritrocitos en adultos y niños a PbB de 50 µg/dL y 40 µg/dL, respectivamente. Otros efectos hematológicos reportados incluyen marcado basófilo, anisocitosis, poiquilocitosis, eritrocitos nucleados y policromasia o acromasia.
NEFROTOXICIDAD (TOXICIDAD RENAL)	Insuficiencia renal aguda y nefritis renal a concentraciones de plomo en sangre de 40 - 80 µg/dL que generalmente es reversible.	Esclerosis glomerular, fibrosis intersticial y nefropatía tubular próxima a niveles de PbB < 20 µg/dL. Tasa de filtración glomerular deprimida en niveles medios de PbB < 20 µg/dL. Enzimuria y proteinuria a PbB > 30 µg/dL. Déficit en la función renal y cambios patológicos con PbB > 50 µg/dL. Mortalidad después de la nefropatía crónica a concentraciones de PbB superiores de 60 µg/dL.
INMUNOTOXICIDAD	NA	Desplazamiento del equilibrio de las células T de Th1 a Th2, lo que puede resultar en aumento inmune o supresión inmune.
CARDIOTOXICIDAD	Una exposición aguda a concentraciones de PbB de 48 - 120 µg/dL puede causar hipertensión arterial.	En adultos aumento de la presión arterial sistólica a concentraciones de 3,0 µg/kg-día.
TOXICIDAD GATROINTESTINAL	En adultos se pueden presentar calambres abdominales, diarrea con heces negras, vómitos y anorexia a Concentraciones de PbB a partir de 40 hasta 400 µg/dL y en niños en concentraciones de Pb en sangre a partir de 60 µg/dL.	En adultos se pueden presentar calambres abdominales, diarrea con heces negras, vómitos y anorexia a concentraciones de PbB a partir de 100 hasta 200 µg/dL y en niños en concentraciones de Pb en sangre a partir de 60 µg/dL. También se puede experimentar sensación metálica en la boca.
HEPATOTOXICIDAD	En niños Inhibición del citocromo P450 en concentraciones e 500 µg por 24 horas.	En niños Inhibición del citocromo P450 en concentraciones de 44 µg/dL.
TOXICIDAD REPRODUCTIVA	NA	En mujeres riesgo de aborto espontáneo, parto prematuro y bajo peso al nacer a PbB ≥ 10 µg/dL. Reducción en la función intelectual en la descendencia de madres con niveles de PbB < 10 µg/dL. En hombres a PbB > 40 µg/dL puede estar vinculado con disminución de la libido, bajo volumen de semen y recuento de espermatozoides y aumento del

TIPO DE EFECTO		AGUDO	CRONICO
			esperma anormal (morfología) y disminución de la movilidad de los espermatozoides.
CARCINOGENICIDAD	NA		Los compuestos de plomo inorgánicos están catalogados como probablemente cancerígenos para los seres humanos en el grupo 2A de la clasificación IARC, especialmente por cáncer de estómago, pulmón, y vejiga. Los compuestos orgánicos de plomo no son clasificables en cuanto a carcinogenicidad en seres humanos basado en evidencia inadecuada en estudios en seres humanos y en animales.

Fuente: Tabla realizada por el autor con base en (35), (38), (40), (42)

Como se observa en la Tabla 2-2, los efectos en el ser humano difieren según el rango de la edad, generando efectos de tipo agudo o crónico dependiendo del tiempo de exposición al contaminante, es así que la severidad del daño es directamente proporcional a medida que aumenta la concentración en el organismo. Sin embargo, se debe prestar importante atención a los daños ocasionados en los casos donde se presentan bajas concentraciones como se presenta a continuación en las Figura 2-7 y Figura 2-8.

Figura 2-7. Efectos del plomo en los niños



Fuente. El autor

Figura 2-8. Efectos del plomo en adultos



Fuente. El autor

En el año 2000, la Organización Mundial de la Salud planteó que la exposición ambiental al plomo era un problema de salud pública de dimensiones globales, y relacionaba directamente la disminución de los niveles en sangre a la eliminación de este metal como compuesto de la gasolina. Consideraba como factores de riesgo socio demográficos la etnia negra no hispana, familias de bajos ingresos que vivían en viviendas muy antiguas. En población general estableció que por cada miligramo de plomo en un (1) m³ de aire, se disminuía 1.92 mg/dL de sangre. Siendo en los países en vías de desarrollo, los principales predictores de la exposición a nivel intramuros las cerámicas esmaltadas utilizadas en la preparación de los alimentos infantiles, la exposición al plomo transportado por el aire de las emisiones de los vehículos y el contenido de este metal en el polvo de las manos de los niños (43).

Con base en lo anterior, se han desarrollado modelos de farmacocinética fisiológica (PBPK) para la evaluación del riesgo de plomo. El modelo O'Flaherty es un modelo para niños y adultos del metabolismo óseo (44); el modelo integrado de absorción de la exposición (IEUBK) fue desarrollado por la EPA para predecir el nivel de plomo en la sangre en población infantil y el modelo de Leggett permite simular exposiciones de por vida y puede usarse para predecir el plomo en sangre en niños y adultos (38). Sin embargo, estos modelos en su mayoría deben ser alimentados con información de la concentración del contaminante en diferentes matrices ambientales o biológicas con el fin de realizar la evaluación del riesgo, lo cual su aplicación se limita a la disponibilidad de información.

2.6 Marco normativo

Para la evaluación de los contaminantes a nivel nacional, la norma vigente de calidad de aire es la Resolución 610 de 2010 emitida por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Territorial, la cual establece la norma de calidad del aire o nivel de inmisión en condiciones de referencia. A continuación se establece un comparativo de los niveles máximos permisibles para material particulado (PM) a nivel nacional e internacional dados por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA) y la Organización Mundial de la Salud (OMS).

Tabla 2-3. Niveles máximos permisibles para material particulado (PM)

CONTAMINANTE	TIEMPO DE EXPOSICIÓN	RESOLUCIÓN 610 DE 2010 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	EPA ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	OMS ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
PST	Anual	100		
	24 Horas	300		
PM 10	Anual	50	50	20
	24 Horas	100	150	50
PM2.5	Anual	25		
	24 Horas	30	35	25

Fuente. Tabla realizada por el autor con base en (45) (46)

Para los contaminantes no convencionales con efectos carcinogénicos como el plomo, se establecen los siguientes estándares:

Tabla 2-4. Niveles Máximos Permisibles para Contaminantes No Convencionales

CONTAMINANTE	TIEMPO DE EXPOSICIÓN	RESOLUCIÓN 610 DE 2010 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	EPA ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	OMS ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Plomo	Anual	0,5	0.15	---
	24 Horas	1,5		

Fuente. Tabla realizada por el autor con base en (47) (45) (46)

Para el año 2016, la EPA realizó la revisión periódica de los estándares de calidad del aire en ordenanza a la Ley del Aire Limpio de los Estados Unidos, la cual se basó en literatura científica disponible sobre los efectos en salud del plomo, concluyendo que el estándar de calidad del aire es de $0.15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de plomo en partículas suspendidas totales en un promedio de tres meses (47).

A nivel internacional, se han determinado los siguientes valores límite para la protección de la salud pública, tiempo promedio de muestreo y frecuencia de excedencia permitida en las normas sobre plomo en América Latina, el Caribe, Canadá, China, Estados Unidos, Japón y la Unión Europea.

Tabla 2-5. Niveles máximos permisibles para plomo suspendido en el aire a nivel internacional.

PAIS	VALOR LIMITE (ug/m3)	TIEMPO PROMEDIO DE MUESTREO
Argentina	1.5	3 meses
Bolivia	1.5	3 meses
Costa Rica	0.5	1 año
Cuba	0.3	24 horas
México	1.5	3 meses
Unión Europea	0.5	1 año
Venezuela	2	3 meses

Fuente: (48)

Diferentes agencias han definido los valores umbral tanto en matrices ambientales, como en matrices biológicas, los cuales se deben interpretar conforme al tipo de exposición:

Tabla 2-6. Valores umbral de plomo definidos por agencias internacionales

AGENCIA	MATRIZ AMBIENTAL/BIOLOGICA	NIVEL
CDC	Sangre adultos	10 µg/dL
CDC	Sangre niños	5 µg/dL
OSHA	Sangre	40 µg/dL
ACGIH	Sangre	30 µg/dL
OSHA	Aire	50 µg/m3
CDC/NIOSH	Aire	100 µg/m3
ACGIH	Aire	50 µg/m3
EPA	Agua consumo humano	15 µg/L
CPSC	Pintura	600 ppm (0.06%)

Fuente: (47)

3. Objetivos

3.1 Objetivo general

Determinar la exposición a plomo suspendido en el aire en ambientes escolares de niños entre 6 y 12 años según zonas de riesgo definidas en Bogotá.

3.2 Objetivos específicos

- Identificar mediante un análisis acumulativo de riesgos las zonas en Bogotá que podrían presentar niveles de plomo suspendido en el aire.
- Cuantificar las concentraciones de plomo en el material particulado suspendido en el aire en los ambientes escolares de las zonas de riesgo establecidas.
- Estimar la dosis potencial de exposición al plomo suspendido en el aire en niños entre 6 y 12 años, en los ambientes escolares de las zonas de riesgo monitoreadas.
- Correlacionar las concentraciones determinadas por medio analítico de material particulado y plomo suspendido en el aire, con las zonas de riesgo establecidas.

4. Metodología

A nivel general, se desarrolló un estudio de tipo transversal que busca identificar la exposición de la población infantil entre 6 y 12 años escolarizada en diferentes zonas de riesgo definidas en Bogotá D.C. con base en la Metodología de Evaluación Acumulada de Riesgo (EAR) (7) de impactos y contrastar con la medición de concentraciones de plomo suspendido en el aire en ambientes escolares.

Para cumplimiento del primer objetivo, se desarrolló la metodología establecida por la Agencia Ambiental de Estados Unidos (EPA) sede California (7) denominada Evaluación Acumulada de Riesgos (EAR) de Impactos, para lo cual se basó en un análisis descriptivo tomando como base fuentes de información secundarias proporcionadas por las entidades Distritales (Secretaría Distrital de Ambiente, Secretaría de Movilidad, Secretaria de Planeación y Secretaría Distrital de Salud) en las cuales se revisaron diferentes factores de riesgo que inciden en el estado de la contaminación del aire en Bogotá. El análisis se realizó por medio de la definición de zonas o unidades denominadas grillas, con base en el área de la división territorial de la ciudad denominada localidades y su correspondiente área.

Para tal fin se organizaron las localidades de menor a mayor área y teniendo en cuenta la extensión territorial conforme al Plan de Ordenamiento Territorial de Bogotá (49), se realizó la división de la ciudad a través de las grillas.

Una vez organizadas las extensiones de las localidades urbanas en hectáreas por orden ascendente y convertirlas a unidades de km^2 , se realizó la mediana del área de las localidades con el fin de definir dos clasificaciones: localidades pequeñas (menor a 17 km^2) y localidades grandes (mayor a 17 km^2). Posteriormente, se promedió el área de cada clasificación y se realizó una relación proporcional definiendo que el tamaño de las grillas

para las localidades con menor área es de 1 km² y para las localidades con mayor área es de 3 km² como se presenta en la Tabla 4-1:

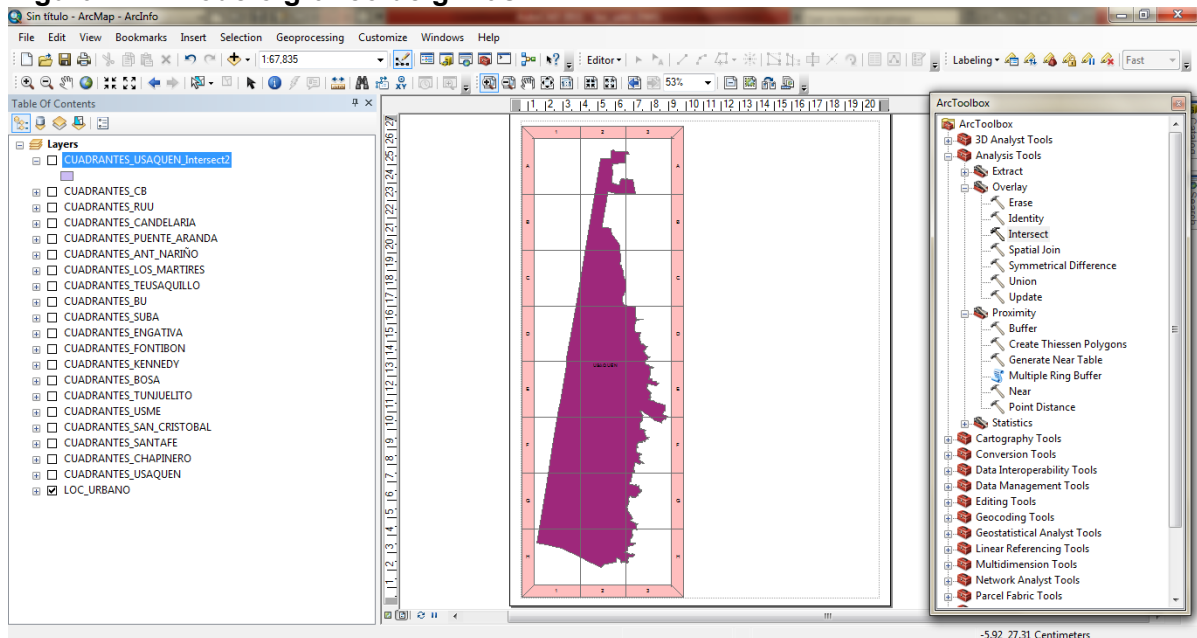
Tabla 4-1. Cálculo de grillas por localidad para definir zonas de exposición a material particulado y plomo suspendido en Bogotá.

UNIDAD TERRITORIAL	AREA (km ²)	MEDIANA	MEDIA	RELACIÓN DE MEDIAS	GRILLAS CALCULADAS POR LOCALIDAD
La Candelaria	2,06				4
Antonio Nariño	4,88				18
Los Mártires	6,51				16
Santafé	6,96				20
Tunjuelito	9,91		9,98	1	18
Barrios Unidos	11,9				16
Chapinero	13,07				18
Rafael Uribe	13,83				24
Teusaquillo	14,19				25
San Cristóbal	16,49	16,49			28
Puente Aranda	17,31				25
Bosa	19,32				20
Usme	21,2				24
Fontibón	30,52		31,77	3	30
Ciudad Bolívar	32,39				35
Usaquén	35,25				24
Engativá	35,88				36
Kennedy	36,06				25
Suba	58				54
TOTAL					462

Fuente: El autor

Para graficar se tuvo en cuenta los extremos de las localidades para lo cual y con base en el marco del área se dividió equitativamente el territorio de cada localidad de acuerdo al número de grillas calculadas teóricamente las cuales se nombraron alfanuméricamente en donde el eje vertical se denominó con letras y el eje horizontal con números como se muestra en el ejemplo de la Figura 4-1.

Figura 4-1. Modelo grafico de grillas



Fuente: Secretaría Distrital de Salud

Una vez se tuvo la cartografía para cada localidad, se analizaron los grupos de variables por cada una de las grillas, propuestas por la metodología (7) como se observa en la Tabla 4-2 :

Tabla 4-2. Variables consideradas en la evaluación acumulada de riesgos en Bogotá

VARIABLE	JUSTIFICACIÓN
<p>Niveles de contaminación del aire por material particulado PM₁₀ en Bogotá y variables meteorológicas (precipitación y velocidad del viento) del último año (2015) disponible.</p>	<p>Contaminación: Las concentraciones de PM₁₀ en la ciudad no son totalmente uniformes, los valores registrados por la RMCAB se pueden usar para identificar sectores que soportan mayores niveles de contaminación que otros dentro de la ciudad (50)</p> <p>Precipitación: La precipitación no cae con la misma intensidad y frecuencia sobre todos los puntos de Bogotá. (50)</p> <p>Vientos: Durante la mayor parte del año predominan en Bogotá las calmas en horas de la noche, condición que promueve el enfriamiento superficial y no favorece la dispersión de las partículas contaminantes. (50)</p>
<p>Fuentes móviles (flujo vehicular) del último año disponible.</p>	<p>La posibilidad de que la exposición a la contaminación atmosférica relacionada</p>

VARIABLE	JUSTIFICACIÓN
	con el tráfico perjudique la salud pública tiene implicaciones para el diseño de ciudades y la planificación del transporte. (51)
Inventario de fuentes fijas de contaminación del aire (tipo de fuente, tipo de combustibles y número de fuentes) del último año disponible.	Los sectores de fabricación de productos alimenticios y bebidas, de fabricación y acabado de productos textiles, y de fabricación de productos de metal corresponden al 50% de las fuentes existentes en la ciudad. En la industria bogotana en donde 2 de cada 3 empresas hacen uso de gas natural (52).
Actividades que en su proceso procesen, manipulen o generen residuos con plomo del último año disponible.	La concentración de plomo inorgánico es mayor hacia el sur de la ciudad, en espacial al suroeste (12).
Variables socio-demográficas (estrato) del último año disponible.	Factores relacionados con la sensibilidad y características de las personas que viven en el área geográfica estableciendo la vulnerabilidad (7)

Fuente: El autor

A continuación se describen cada una de las variables tenidas en cuenta para el cumplimiento del primer objetivo, la clasificación a realizar conforme al diseño de una ponderación cualitativa y cuantitativa en términos de escala colorimétrica y puntaje otorgado en donde el mayor puntaje representa el riesgo más alto.

4.1 Fuentes Fijas

Un criterio a contemplar en la definición de las zonas de exposición en Bogotá es la contaminación del aire que aportan las fuentes fijas, ya que se cuentan con localidades más industrializadas que otras para lo cual se tomaron en cuenta las siguientes variables:

Densidad de fuentes fijas: Para realizar el análisis de esta variable, se depuró el inventario de fuentes fijas en el Distrito Capital proporcionado por la Secretaría Distrital de Ambiente teniendo en cuenta el tipo de fuente y tipo combustible que utiliza, para lo cual se clasificó bajo los siguientes parámetros:

Tabla 4-3. Clasificación por tipo de fuente fija y combustible para la evaluación acumulada de riesgo en Bogotá.

TIPO DE FUENTE	COMBUSTIBLE
ASADOR	ACEITE
CALDERA	ACPM
HORNO	CARBON
PLANTA ELECTRICA	CRUDO
PARRILLA	ENERGIA ELECTRICA
ESTUFA	GAS
SECADOR	MADERA
EQUIPOS VARIOS	GASOLINA
FREIDORA	FUEL OIL
PLANCHA	
INCINERADOR	

Fuente. El autor

Es así, que la densidad de fuentes se calculó teniendo en cuenta el número de fuentes fijas en cada una de las grillas establecidas a nivel local para lo cual se graficó la totalidad de las fuentes reportadas por la autoridad ambiental de la siguiente manera:

Tabla 4-4. Calificación de la densidad de fuentes fijas por grilla para la evaluación acumulada de riesgo en Bogotá.

CALIFICACIÓN	CARACTERÍSTICA	COLOR
3	Mayor a 40 fuentes fijas	
2	De 20 a 39 fuentes fijas	
1	Hasta 19 fuentes fijas	

Fuente. El autor

Igualmente, se tuvo en cuenta el combustible que dichas fuentes reportaron por cada uno de las grillas, es así que si el 80% de las fuentes fijas reportadas utilizaban combustibles limpios como gas natural y energía eléctrica se asignó una calificación de uno, en caso contrario si más del 20% de las fuentes utilizaban para su funcionamiento combustibles como carbón, ACPM, madera, aceite usado, entre otros se otorgó una calificación de 3 puntos, dejando la calificación más alta al combustible que generara mayor emisión de contaminantes. En los casos que se encontrará el mismo porcentaje de tipos de combustibles, se calificó con el de mayor afectación, es decir, con la clasificación de otros combustibles equivalente a 3.

Tabla 4-5. Calificación del tipo de combustibles de las fuentes fijas para la evaluación acumulada de riesgo en Bogotá.

CALIFICACIÓN	CARACTERÍSTICA	COLOR
3	Otros Combustibles (carbón, ACP, Madera, Aceite Usado, Crudo, entre otros)	
2	Combustibles Limpios (Gas natural y energía eléctrica)	
1	Sin combustibles/No específico	

Fuente. El autor

Dadas las calificaciones anteriores se calculó el aporte de fuentes fijas a la zona de estudio conforme en la Ecuación 4-1:

Ecuación 4-1. Aporte de fuentes fijas a la evaluación acumulada de riesgo por exposición a material particulado y plomo

$$FF=(40\% \text{número de fuentes fijas})+(60\% \text{Tipo de combustible})$$

4.2 Calidad del aire y variables meteorológicas

Concentración de contaminación del aire PM_{10} : La Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá (RMCAB) reporta de forma diaria el estado de la calidad del aire dado por la concentración de los contaminantes criterio, en donde el contaminante de principal atención en Bogotá es el material particulado PM_{10} según lo establecido en el plan Decenal de Descontaminación del aire de Bogotá formulado por la Secretaría Distrital de Ambiente (50).

Por lo anterior, se tomó como criterio de estudio en la definición de zonas de exposición la concentración del último año (media móvil) en $\mu g/m^3$ con base en lo reportado en los archivos Shapes proporcionados por la Secretaría Distrital de Ambiente, para definir el nivel de calidad del aire por territorio, y se clasificó en tres rangos (Tabla 4-6), partiendo del primer nivel la recomendación establecida por la Organización Mundial de la Salud (OMS) (45) para dicho contaminante ($50 \mu g/m^3$ promedio diario):

Tabla 4-6. Calificación de la concentración de contaminación del aire por material particulado PM₁₀ para la evaluación acumulada de riesgo en Bogotá.

CALIFICACION	CARACTERÍSTICA		COLOR
	NIVEL	CONCENTRACION (ug/m ³)	
3	Máximo	Mayor a 100	
2	Medio	51-100	
1	Mínimo	0-50	

Fuente. El autor

Para los casos que se presentó más de un valor de concentración de material particulado PM₁₀ en cada una de las grillas, éste se multiplicó por el porcentaje del área que presentó en cada una y posteriormente se sumó para obtener un único valor por grilla.

Variables Meteorológicas: Las variables meteorológicas influyen en la dinámica de la contaminación del aire; es así que se seleccionó para el estudio la velocidad del viento y precipitación para la definición de zonas de exposición teniendo en cuenta que estas ayudan a la dispersión o no de la contaminación del aire, dado que la precipitación contribuye al lavado de la atmosfera disminuyendo el material particulado (PM) en el aire. De la misma manera, la velocidad del viento contribuye a la dispersión de los contaminantes conforme a la intensidad ya que sí un territorio posee vientos relativamente bajos la dispersión es menor y por consiguiente mayor concentración de contaminantes.

Para el caso de la velocidad del viento se tomó el mapa de velocidad del viento para el último año proporcionado por la Secretaría Distrital de Ambiente y de acuerdo a la información reflejada correspondiente a la velocidad registrada en las grillas se calificó con base en la escala Beaufort (53):

Tabla 4-7. Calificación de la velocidad del viento para la evaluación acumulada de riesgo en Bogotá.

CALIFICACIÓN	CARACTERÍSTICA		COLOR
	NIVEL ESCALA DE BEAFORT	VELOCIDAD PROMEDIO, m/s	
3	Viento calma a ventolina	0.1-1.5	
2	Brisa débil	1.6-2.5	
1	Brisa moderada	Mayor 2.6	

Fuente. El autor

Para la variable precipitación, se tuvo en cuenta la lluvia acumulada para el último año expresado en milímetros (mm), tomando el mapa de precipitación para el último año proporcionado por la Secretaría Distrital de Ambiente.

Tabla 4-8. Calificación de la precipitación para la evaluación acumulada de riesgo en Bogotá.

CALIFICACION	CARACTERÍSTICA		COLOR
	NIVEL	PRECIPITACION ACUMULADA mm	
3	Mínimo	0-800	
2	Medio	801-1100	
1	Máximo	Mayor a 1101	

Fuente. El autor

Dadas las calificaciones anteriores se calculó el aporte de las variables meteorológicas a la zona de estudio conforme en la Ecuación 4-2:

Ecuación 4-2. Aporte de variables meteorológicas a la evaluación acumulada de riesgo por exposición a material particulado y plomo

VM= calificación de la concentración de contaminación del aire + calificación de precipitación + calificación de vientos

4.3 Fuentes móviles

Se definió que el flujo vehicular reportado según aforos realizados en el Distrito Capital informado por la Secretaría Distrital de Movilidad, es de suma importancia para realizar una aproximación de la problemática de contaminación del aire en la ciudad. Es así que con base en la información del informe de monitoreo de tránsito y transporte (54) se reportaron 48 intersecciones en Bogotá en las cuales se realizó medición de flujo vehicular; a esta información se le dio tratamiento cartográfico preliminar por medio de la interpolación de los datos (polígonos de thiessen) a través del programa ArcGis para extrapolar los datos a toda el área de la ciudad. La calificación se realizó con base en el valor ponderado (multiplicación del área de cada polígono por el flujo vehicular en el mismo) de cada uno de los polígonos que conforman la grilla.

Tabla 4-9. Calificación del flujo vehicular para la evaluación acumulada de riesgo en Bogotá.

CALIFICACION	TIPO DE FLUJO	CARACTERÍSTICA FLUJO VEHICULAR vehículos/día	COLOR
3	Alto	Mayor a 125.000 vehículos/día	
2	Medio	97.001-124.999 vehículos/día	
1	Bajo	0-97.000 vehículos/día	

Fuente. El autor

4.4 Otras actividades económicas relacionadas con la manipulación de plomo

Este grupo de variables busca identificar las fuentes potenciales que puedan aportar plomo en cada grilla, por lo anterior se tomó en cuenta la base reportada por el Mapa de Seguridad Química de la Secretaría Distrital de Salud, en donde se registran las visitas de inspección, vigilancia y control sanitario de las empresas que manipulan y procesan sustancias químicas en el Distrito Capital y se filtró de acuerdo a las siguientes actividades económicas:

- Fundición y tratamiento de piezas metálicas
- Fabricación de pinturas, lacas y barnices.
- Fabricación, mantenimiento y reparación de vehículos.
- Artes gráficas y fotografía
- Recubrimientos de piezas de barro
- Bisutería
- Fabricación de artículos relacionados con vidrio
- Otros productos relacionados con metales
- Fabricación de armas y municiones
- Fabricación de materiales eléctricos

De la misma manera, se analizó la información de las salidas del registro de generadores de residuos peligrosos que proporcionó la Secretaría Distrital de Ambiente contemplando los siguientes códigos según la normativa vigente:

- Y31 Plomo, compuestos de plomo.

- A1010 Desechos metálicos y desechos que contengan aleaciones de cualquiera de las sustancias siguientes: Antimonio, Arsénico, Berilio, Cadmio, Plomo, Mercurio, Selenio, Telurio, Talio.
- A1020 Desechos que tengan como constituyentes o contaminantes, excluidos los desechos de metal en forma masiva, cualquiera de las sustancias siguientes: Antimonio; compuestos de antimonio, Berilio; compuestos de berilio, Cadmio; compuestos de cadmio, Plomo y puestos de plomo, Selenio y compuestos de selenio, Telurio; compuestos de telurio.
- A1080 Residuos de desechos de zinc no incluidos en la lista B, que contengan plomo y cadmio en concentraciones tales que presenten características del Anexo III.
- A1160 Acumuladores de plomo de desecho, entero o triturado.
- A3030 Desechos que contengan, estén integrados o estén contaminados por lodos de compuestos antidetonantes con plomo.
- A3090 Desechos de cuero en forma de polvo, cenizas, lodos y harinas que contengan compuestos de plomo hexavalente o biosidas

Para el caso de no encontrar alguna de estas actividades en la grilla de análisis, se asignó un puntaje de 1 lo cual no alteró el cálculo de la evaluación acumulada de riesgo (EAR) de exposición. Conforme a lo anterior, se sumó el número de fuentes de estos componentes y se clasificó su presencia o no para cada grilla

Tabla 4-10. Calificación de actividades económicas que manipulan plomo para la evaluación acumulada de riesgo en Bogotá.

CALIFICACION	CARACTERÍSTICAS ACTIVIDADES ECONOMICAS RELACIONADAS CON MANIPULACION DE PLOMO	COLOR
2	Si hay	
1	No hay	

Fuente. El autor

4.5 Componente sociodemográfico

Este grupo tuvo como fin identificar población potencialmente vulnerable en las zonas de análisis a nivel local para lo cual se tomó en cuenta el estrato socioeconómico con base en la cartografía proporcionada por la Secretaría Distrital de Planeación, lo cual permitió

reflejar la vulnerabilidad de la población para cada una de las grillas. Para los casos en que se encontró más de un estrato en el mismo cuadrante se tuvo en cuenta el estrato predominante para el análisis.

Tabla 4-11. Calificación del estrato socioeconómico para la evaluación acumulada de riesgo en Bogotá.

CALIFICACIÓN	CARACTERÍSTICA NIVEL ESTRATO SOCIOECONÓMICO	COLOR
3	0-1-2	
2	3-4	
1	5-6	

Fuente: El autor

Se construyó una matriz de Evaluación Acumulada de Riesgo por material particulado y plomo ANEXO A, que consolida la información de los grupos de variables descritos anteriormente con el fin de analizar la información, para lo cual a cada grupo se les determinó un peso descrito en la Tabla 4-12 y se calculó su interacción conforme a la Ecuación 4-3 diseñada, partiendo de la base que todas aportan un riesgo global del 100%.

Tabla 4-12. Variables definidas para la evaluación acumulada de riesgo por exposición a contaminación del aire en Bogotá.

VARIABLE	DEFINICION OPERATIVA	PESO EN LA ECUACION DE RIESGO
Fuentes fijas	-Número de hornos y calderas -Tipo de combustible	20%
Calidad del aire y variables meteorológicas)	-Media Móvil PM ₁₀ -Velocidad del viento promedio anual -Precipitación acumulada anual	15%
Fuentes móviles	-Flujo vehicular al día	35%
Actividades económicas	-Actividades económicas que manipulan fuentes con plomo (ya sea materia prima o generación de residuos)	15%
Vulnerabilidad	-Estrato socioeconómico	15%

Fuente: El autor

Cabe anotar que según el inventario de emisiones para la ciudad y que se tomó como base para la formulación del Plan Decenal de Descontaminación del aire para Bogotá (50), las industrias aportan más del 40% de las emisiones de material particulado (PM) y las fuentes móviles cerca del 60%; por tanto, y como se consideraron otras variables como el nivel de contaminación del aire, meteorología y estrato económico para la distribución del porcentaje global de la Ecuación 4-3, se tomó como el mayor el porcentaje las fuentes

móviles, seguido de las fijas y a las variables restantes se les dio un peso equitativo completando el 100%

Ecuación 4-3. Evaluación acumulada de riesgo por exposición a contaminación del aire

$$EAR = ((0.20 * \text{Fuentes fijas}) * (0.35 * \text{Fuentes móviles}) * (0.15 * \text{Calidad del Aire y Meteorológicas}) * (0.15 * \text{Actividades Económicas}) + (0.15 * \text{Vulnerabilidad}) \times 100)$$

Fuente. El autor con base en (7)

Una vez se realizó el cálculo para cada grilla de cada una de las localidades, se definió la clasificación de estas con base en la mediana de los datos totales y se establecieron dos criterios de exposición (i) zonas de alta exposición y (ii) zonas de baja exposición como se muestra en la Tabla 4-13 considerando que no hay exposición cero en la ciudad a contaminación del aire y dicotomisando la variable para efectos de análisis.

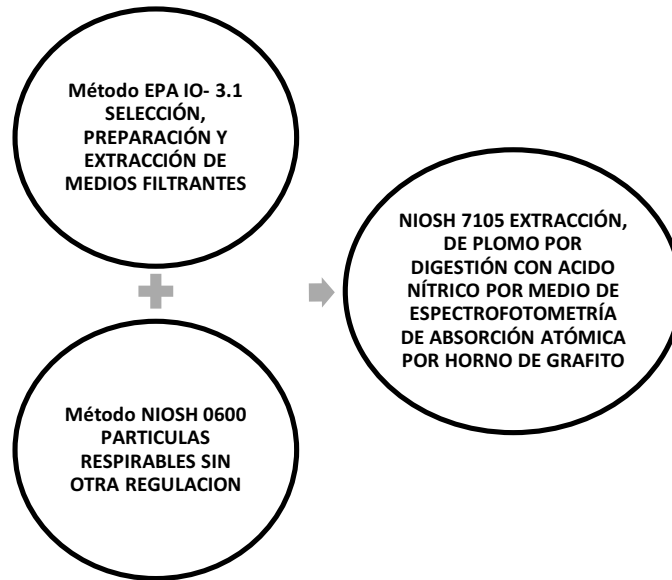
Tabla 4-13. Criterios para definir tipo de riesgo por exposición a contaminación del aire en Bogotá

RIESGO DE EXPOSICIÓN	CLASIFICACIÓN	COLOR
Bajo	0-45	
Alto	Mayor a 45	

Fuente. El autor

Para el cumplimiento del segundo objetivo y después de definir las zonas de alto y bajo riesgo de exposición, se seleccionaron instituciones educativas (dos por cada localidad de la ciudad, una por cada zona de riesgo) con el fin de cumplir con el tamaño de la muestra calculado según la Tabla 4-16 y lograr una representatividad geográfica de la ciudad en términos de cobertura para el muestreo de aire a nivel intramural en las instituciones educativas con base en las especificaciones contempladas en los métodos analíticos resumidos en la Figura 4-2

Figura 4-2. Métodos analíticos utilizados para la determinación de material particulado PM y extracción de plomo.



Fuente: El autor





Para llevar a cabo el muestreo en campo, se emplearon bombas de monitoreo personal instaladas en las aulas de clase de la población de estudio suministradas por la Maestría de Toxicología de la Universidad Nacional, que estuvieron debidamente calibradas (ANEXO B) al iniciar el trabajo de campo.

Los filtros empleados fueron acondicionados en un desecador antes y después de cada muestreo por un tiempo mínimo 24 horas bajo condiciones controladas de temperatura (20 °C) y humedad (22%) en el laboratorio de Salud Pública de la Secretaría Distrital de Salud conforme a los protocolos establecidos (ANEXO F), para ser pesados en una micro balanza electrónica marca Mettler Toledo modelo MX 5 debidamente calibrada (ANEXO C) propiedad de la Universidad de Los Andes.

Las bombas fueron instaladas por parte del personal de los hospitales primer y segundo nivel del Distrito adscritos a la Secretaría Distrital de Salud, en las aulas de clase de la población de estudio a una altura entre 1.80 -1.90 mt, de manera que los estudiantes no las manipularan; antes de iniciar cada muestreo, se realizó la correspondiente verificación y corrección de caudal con un calibrador de flujo de burbuja Optiflow 660 marca MSA propiedad del Hospital del Sur ESE, debidamente calibrado (ANEXO D). Al momento de

instalación y retiro de los filtros, se realizaron mediciones de temperatura y humedad relativa. Con el fin de asegurar la trazabilidad de los datos obtenidos en campo, se estableció la custodia de los filtros por medio de un formato que contenía la información correspondiente al muestreo, entre estos: lugar, fecha y hora de instalación y retiro de los filtros, peso inicial y final de los filtros, humedad relativa y temperatura de instalación y retiro de los filtros, horas totales de monitoreo (ANEXO E).

Tabla 4-14. Insumos y equipos empleados en el trabajo de campo

METODO	INSTRUMENTO/INSUMO	
<p>Método NIOSH 0600</p> <p>Partículas respirables sin otra regulación</p>	<p>Balanza electrónica marca Mettler Toledo modelo MX5 calibrada de 6 dígitos del Laboratorio de Ingeniería de la Universidad de los Andes</p>	
	<p>Desecador de vacío del Laboratorio de Salud Pública de la Secretaría de Salud</p>	
	<p>Filtro de membrana de esteres de celulosa de 37 mm de diámetro 0,8 µm) Cassettes de poliestireno de 2 ó 3 cuerpos, de 37 mm de diámetro en los que se coloca el filtro sobre el soporte de celulosa</p>	
	<p>Cajas de Petri en poliestireno de 47 mm</p>	

Fuente: El autor

MÉTODO	INSTRUMENTO/INSUMO	
<p>Método NIOSH 0600 Partículas respirables sin otra regulación</p>	<p>Bombas para muestreo personal de partículas, el cual proporciona una capacidad de muestreo de hasta 2.5 l/min de la maestría en Toxicología de la Universidad Nacional</p>	
	<p>Termo higrómetro digital</p>	
	<p>Calibrador de flujo de burbuja Optiflow 660 marca MSA</p>	
<p>Método NIOSH 7105 Extracción, de plomo por digestión con ácido nítrico por medio de espectrofotometría de absorción atómica por horno de grafito</p>	<p>Espectrofotómetro de absorción atómica con horno de grafito.</p> <p>Reactivos: Ácido nítrico (HNO₃), concentrado, ultra puro, Peróxido de Hidrogeno, Patrón de plomo, acetileno, Agua destilada y desionizada</p>	

Fuente: El autor

Se realizó un muestreo aleatorio estratificado, y los estratos correspondieron a zonas de alta y baja exposición, definidas por medio de la evaluación acumulada de riesgo (EAR) desarrollada en el primer objetivo del presente trabajo. De acuerdo al número de instituciones educativas públicas presentes en estas, se definió el tamaño de la muestra, en donde la unidad de muestreo fueron las zonas de riesgo definidas y la unidad de análisis fueron las instituciones educativas como se presenta en la Tabla 4-15.

Tabla 4-15. Instituciones educativas seleccionadas para muestreo de calidad del aire por partículas suspendidas totales PST y plomo

TIPO DE ZONA DE RIESGO	NÚMERO DE GRILLAS	TOTAL DE SEDES INSTITUCIONES EDUCATIVAS	TOTAL DE COLEGIOS SELECCIONADOS
Riesgo alto	161	616	18
Riesgo bajo	181	582	18
TOTAL	342	1198	36

Fuente. El autor

El cálculo del tamaño de muestra se hizo con el programa EPIDAT V 4.2, y se tuvieron en cuenta los datos de las concentraciones de PM₁₀ en 24 horas reportadas por la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá del año inmediatamente anterior al trabajo de campo (2014), para lo cual se realizó un análisis de varianza tomando la opción “tamaño de muestra para diferencia de promedios” con el fin de obtener el número de puntos a muestrear con base en la Ecuación 4-4

Ecuación 4-4. Calculo tamaño de la muestra

$$n = \frac{2(Z_{\alpha} + Z_{\beta})^2 \times S^2}{d^2}$$

Donde:

n = sujetos necesarios en cada una de las muestras

Z_α = Valor Z correspondiente al riesgo deseado

Z_β Valor Z correspondiente al riesgo deseado

S² = Varianza de la variable cuantitativa que tiene el grupo control o de referencia.

d = Valor mínimo de la diferencia que se desea detectar (datos cuantitativos)

En la Tabla 4-16, se presenta los datos introducidos al programa para el cálculo del tamaño de la muestra.

Tabla 4-16. Parámetros para cálculo del tamaño de la muestra

-PARAMETRO	VALOR
Varianzas	Iguals
Diferencia de medias a detectar	20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Desviación estándar común	22,5
Razón entre tamaños muestrales	1
Nivel de confianza	95%

*Se ponderaron las varianzas en los dos grupos

Tabla 4-17. Tamaños de muestra recomendados para tres diferentes porcentajes de potencia para muestreo de calidad del aire

POTENCIA	TAMAÑO DE A MUESTRA		
	Menor exposición	Mayor Exposición	Total
80	21	21	42
85	24	24	48
90	28	28	56

Fuente. Secretaría Distrital de Salud

Sin embargo, y conforme al alcance operativo que se tenía para el desarrollo del trabajo, se seleccionaron dos instituciones educativas públicas por localidad de forma aleatoria una por cada zona de exposición definida, que tuvieran jornada única, para realizar el monitoreo en los ambientes escolares alcanzando una potencia de la muestra por debajo del 80% monitoreando 36 instituciones educativas públicas.

Se definió realizar una prueba piloto para precisar el trabajo operativo, lo cual permitió definir el tamaño de partícula a monitorear, tiempo aproximado de muestreo por punto y trazabilidad de la muestra recolectada; para tal fin se seleccionó la localidad de Puente Aranda, la cual arrojó los siguientes parámetros para el trabajo de campo:

Tabla 4-18. Parámetros para muestreo de calidad del aire

PARAMETRO	CRITERIO DE TRABAJO DE CAMPO
Tamaño de Partícula	PST
Tiempo de muestreo por filtro	1 semana continua
Número de puntos por institución	1
Número de filtros por punto	4 filtros (3 monitoreados y 1 blanco)
Tiempo total de muestreo por punto	3 semanas

Fuente. El autor

Para el caso del tamaño de partícula monitoreado, se realizaron pruebas muestreando material particulado total PST, PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$ concluyendo que para el caso del material fino se necesitaba ampliar el tiempo de monitoreo de manera que se recolectara suficiente para

realizar la caracterización por plomo en el laboratorio, por lo cual se realizó el trabajo de campo monitoreando material particulado grueso PST.

Una vez terminado el monitoreo de cada punto, los filtros fueron pesados por segunda vez, y se realizó el cálculo de material particulado total (PST) por el Método NIOSH 0600 (55) como se muestra a continuación con base en las siguientes ecuaciones:

Ecuación 4-5. Diferencia de pesos del filtro con el blanco. (55)

$$\text{Peso filtro } (\mu\text{g}) = (\text{Peso inicial filtro} - \text{Peso final filtro})$$

$$\text{Diferencia pesos } (\mu\text{g}) = (\text{Peso del filtro blanco en el punto} - \text{Peso del filtro})$$

Fuente: Método NIOSH 0600. Determinación de material particulado respirable

Ecuación 4-6. Volumen de la muestra (55).

$$V_{\text{muestreo}}(\text{m}^3) = Q_m \left(\frac{\text{m}^3}{\text{min}} \right) * T(\text{min})$$

En donde

Q_m= Flujo de muestreo, m³/min
T= Temperatura °C

Fuente: Método NIOSH 0600. Determinación de material particulado respirable

Ecuación 4-7. Corrección de Volumen por presión y temperatura de acuerdo a la ley de los gases ideales. (55)

$$V_{\text{corregido}}(\text{m}^3) = V_{\text{muestreo}} \frac{P_{\text{muestreo}}}{P_{\text{estandar}}} * \frac{T_{\text{estandar}}}{T_{\text{muestreo}} + 273,15}$$

En donde

V corregido= m³
V muestreo= m³
P muestreo= Presión de Bogotá, según informe Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá 564.1 mm Hg
P estándar= 1 atmosfera de presión (760 mm Hg)
T estándar= 25 °C (298 °K)

Fuente: Método NIOSH 0600. Determinación de material particulado respirable

Para el cálculo de la concentración de material particulado total PST se utilizó la siguiente fórmula:

Ecuación 4-8. Cálculo de la concentración de material particulado (PST) (55)

$C \left(\frac{\mu g}{m^3} \right) = \frac{[Diferencia\ de\ pesos] * 10^3}{V_{corregido}}$	<p>Donde</p> <p>C(mg/m³)=Concentración de material particulado en mg/m³ recolectado durante el muestreo.</p> <p>V_c= Volumen de aire muestreado y corregido, litros</p> <p>10³: factor de conversión de litros a m³</p>
---	---

Fuente: Método NIOSH 0600. Determinación de material particulado respirable

Posteriormente, los filtros se ingresaron oficialmente al laboratorio de Salud Pública de la Secretaría Distrital de Salud de Bogotá bajo un número de radicado para finalmente realizar el análisis toxicológico (extracción de plomo en la muestra) de acuerdo al método NIOSH 7105 (56); “Determinación de plomo por medio de horno de grafito” (ANEXO F). Los resultados fueron reportados en unidades de microgramos por litro (µg/L), y se realizaron los cálculos correspondientes estipulados en el método tomando las siguientes ecuaciones:

Ecuación 4-9. Diferencia de concentración del filtro con el blanco (56)

$Concentración\ filtro\ (\mu g/ml) = (Concentración\ inicial\ filtro - Concentración\ final\ filtro)$
$Diferencia\ Concentración\ (\mu g/ml) = (PConcentración\ filtro\ blanco\ en\ el\ punto - Concentración\ del\ filtro)$

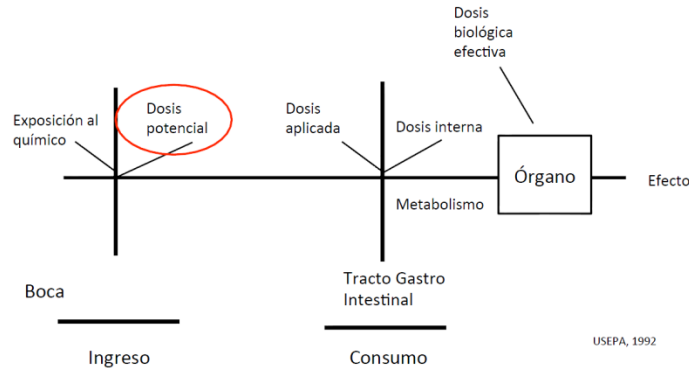
Fuente. Método NIOSH 7105. Determinación de plomo por espectrofotometría de absorción atómica por horno de grafito

Ecuación 4-10. Cálculo de la concentración de plomo en el aire (56)

$C \left(\frac{\mu g}{m^3} \right) = \frac{(C_s * V_s - C_b * V_b)}{V_c}$	<p>Donde</p> <p>C(µg/m³)=Concentración de plomo en µg/m³ recolectado durante el muestreo.</p> <p>C_s= Concentración de plomo en la muestra, µg/mL</p> <p>V_s= Volumen de la solución de la muestra, (10 mL)</p> <p>C_b= Concentración de plomo en el blanco, µg/mL</p> <p>V_b= Volumen de la solución de blanco, (10 mL)</p> <p>V_c= Volumen de aire muestreado y corregido, m³</p>
--	--

Fuente: Método NIOSH 7105. Determinación de plomo por absorción atómica por horno de grafito

Para el tercer objetivo, se desarrolló la modelación de la dosis potencial de exposición. La exposición se define como el contacto del cuerpo con un agente químico externo. Una dosis de exposición es un estimado de la cantidad de una sustancia química que ingresa al cuerpo de una persona cuando esta última entra en contacto con la sustancia (42).

Figura 4-3. Esquema de exposición y dosis (57)

Fuente: The Risk Sciences and Public Policy, Institute. Johns Hopkins University

Conforme a lo anterior, se desarrollaron los cálculos correspondientes con base en las siguientes ecuaciones:

Ecuación 4-11. Dosis potencial de exposición (58)

$DP = \frac{C * TI * FE}{P}$	<p>Donde</p> <p>DP: Dosis potencial (mg/kg/día) C: concentración de la sustancia (mg/lit, mg/kg, ppm) TI: tasa de ingreso lit/día o Kg/día P: peso corporal en (kilogramos) FE: Duración de la exposición en un tiempo ponderado</p>
$FE = \frac{F * DE}{AT}$	<p>Donde:</p> <p>FE: Factor de exposición (sin unidades) F: Frecuencia de exposición (días, meses, años) DE: Duración exposición (años) TP: Tiempo promedio para efectos no cancerígenos según los años de vida</p>

Fuente. Child-Specific Exposure Factors Handbook 2008.EPA

Para el cálculo de la dosis potencial de exposición, se asumieron los valores recomendados para dos grupos de edad (ANEXO G): (i) edades de 6-11 años y (ii) edades entre 11-16 años del manual de factores de exposición recomendados para niños (58) de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA) como se presentan en la Tabla 4-19

Tabla 4-19. Valores recomendados por la EPA para el cálculo de dosis potencial de exposición (58)

VARIABLE	VALOR RECOMENDADO
Tasa de ingreso para niños entre 6-11 años	12,4m ³ /día
Peso para niños entre 6-11 años	20 (kg)
Tasa de ingreso para niños entre 11-16 años	15,1m ³ /día
Peso para niños entre 11-16 años	40 (kg)

Fuente. Child-Specific Exposure Factors Handbook 2008.EPA

Por último, para el cumplimiento del cuarto objetivo y con base en los resultados obtenidos del muestreo (concentraciones de partículas suspendidas totales (PST) y plomo), se determinó el grado de relación entre las variables de estudio contaminación del aire a nivel intramural en las instituciones educativas según la zona de riesgo. Al igual, se revisó la relación con la contaminación del aire por material particulado PM₁₀ y PM_{2.5} extramural o ambiente medida por la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá (RMCAB) administrada por la Secretaría Distrital de Ambiente, teniendo en cuenta las zonas de riesgo de exposición conforme a los grupos definidos (riesgo alto y bajo).

Por lo anterior, el análisis está compuesto de una primera parte descriptiva donde se revisaron los estadísticos de las concentraciones de los contaminantes (valores mínimos y máximos, promedios y variabilidad de los datos) frente a las zonas de riesgo; y la segunda parte comprendido por un análisis bivariado en el cual se realizó la comparación de medias, revisión de la homogeneidad de varianzas por medio de la prueba de Levene y la aplicación de la prueba t para los promedios de las variables según tipo de riesgo.

Es así que antes de la realización de la prueba t para comparar la variables exposición (grupos de riesgo alto y bajo) y los promedios de la variable desenlace (contaminación del aire por PST, Plomo, PM₁₀, PM_{2.5} y la calificación de la zona de riesgo), se realizó valoración de la homogeneidad de las varianzas a través de la prueba de Levene con el objetivo de conocer si estas eran heterogéneas interpretando el valor p, en donde éste debe ser menor a 0,05 ($p < 0,05$), de lo contrario se asume que son homogéneas si el valor p es mayor a 0,05 ($p > 0,05$) aceptando la hipótesis de homogeneidad de varianzas.

Finalmente y para determinar el grado de relación de las variables se utilizó el coeficiente de correlación de Pearson (medida de la relación lineal entre dos variables aleatorias cuantitativas) el cual varía entre -1 y 1, lo cual indica que un valor de 1 establece una

relación lineal positiva; un valor de -1 indica una relación lineal negativa y un valor de cero (0) indica una relación nula.

El presente trabajo reconoce los principios éticos que rigen las buenas prácticas de investigación en seres humanos contenidos en las siguientes declaraciones y códigos:

- Resolución 8430 de 1993 del Ministerio de Salud (59) que establece las normas académicas, técnicas y administrativas para la investigación en salud, en el Título II Capítulo I Artículo 11 sobre los aspectos éticos de la investigación en seres humanos: No se realizarán procedimientos invasivos en el trabajo dado que se trabajara con instituciones educativas, considerándola de riesgo mínimo. De la misma manera, se presentó a los comités de ética de la Universidad Nacional y comité de investigaciones de la Secretaría Distrital de Salud para contar con la correspondiente aprobación debido a que se realizó investigación con la comunidad.
- Declaración de Helsinki (60) numeral 11 y 15: Los residuos generados en el desarrollo de la investigación, especialmente los residuos de tipo peligrosos resultantes del procesamiento de los filtros de monitoreo se dispondrán conforme a la normativa ambiental por parte del Laboratorio de Salud Pública de la Secretaría Distrital de Salud. Por otro lado, y en caso de encontrar niveles de los ambientes escolares monitoreados, esto se informara a la autoridad ambiental del Distrito (Secretaría Distrital de Ambiente) que es la entidad encargada para abordar la problemáticas ambientales en la ciudad de manera que pueda tomar las medidas correctivas pertinentes para la disminución de los niveles encontrados por medio de la investigación.
- Declaración de Helsinki numeral 20: La investigación está dirigida a población infantil por ser un grupo vulnerable respecto a la exposición a contaminantes del aire.
- Declaración de Helsinki numeral 22: Se cuenta con protocolo general de la investigación y especialmente para el desarrollo de los objetivos 1 y 2 que contienen la metodología de evaluación acumulada de riesgo y campaña de campo para el monitoreo.

-
- Declaración de Helsinki numeral 24: Para el caso de la presentación de los resultados del monitoreo y en aras de no exponer los datos de las instituciones educativas donde se realizará el monitoreo estas se identificarán conforme a la localidad y tipo de zona resguardando la intimidad de las instituciones participantes en la investigación y la confidencialidad de su información.
 - Declaración de Helsinki numeral 25, 26, 29 y 31: Dado que el trabajo se realizó en colaboración con la Secretaría Distrital de Salud en el marco de la Vigilancia epidemiológica, ambiental y sanitaria del impacto en salud por exposición a contaminación de aire en Bogotá D.C, se manejó el consentimiento informado aportado por la entidad para dicha vigilancia el cual se desarrolla en niños menores a 14 años y entre otras actividades enuncia “Monitoreo de Calidad del Aire: Extramuros, Intramuros y Personal el cual es un procedimiento no invasivo”, dicho consentimiento está dirigido a la población estudiantil que es objeto de vigilancia, sin embargo se complementó con la autorización de las directivas de la institución educativa,

5. Resultados

5.1 Resultados del primer objetivo: Definición de unidades de análisis o zonas de exposición de acuerdo al área de las localidades

Para realizar la evaluación acumulada de riesgo (EAR) se realizaron las siguientes actividades:

1. Se establecieron las zonas de exposición con el fin de realizar un posterior muestreo en los ambientes escolares y como resultado del primer objetivo, para lo cual se organizaron las 19 localidades de la ciudad por orden de área ascendente, en donde la localidad con menor extensión fue La Candelaria con 2.06 km^2 y la de mayor extensión Suba con 58 km^2 . Se calculó la mediana del grupo (16.49 km^2) obteniendo dos clasificaciones: Localidades Pequeñas (menor a 17 km^2) y Localidades Grandes (mayor a 17 km^2).
2. Se promedió el área de cada clasificación resultando el área promedio de las localidades pequeñas 9.98 km^2 y el área promedio de las localidades grandes 31.77 km^2 logrando realizar una relación proporcional entre las áreas definiendo que el tamaño de las grillas de la siguiente manera:
 - Grilla localidades pequeñas 1 km^2
 - Grilla localidades grandes: 3 km^2

De lo anterior, se definieron 462 grillas para toda la extensión del Distrito Capital, teniendo en cuenta los extremos de cada una de las localidades trazando un cuadrado o marco de área que se dividió equitativamente de acuerdo al número de zonas calculadas

teóricamente; en donde se identificó que solo 192 se tomaron para el análisis por poseer extensión urbana como se presenta en la Tabla 5-1.

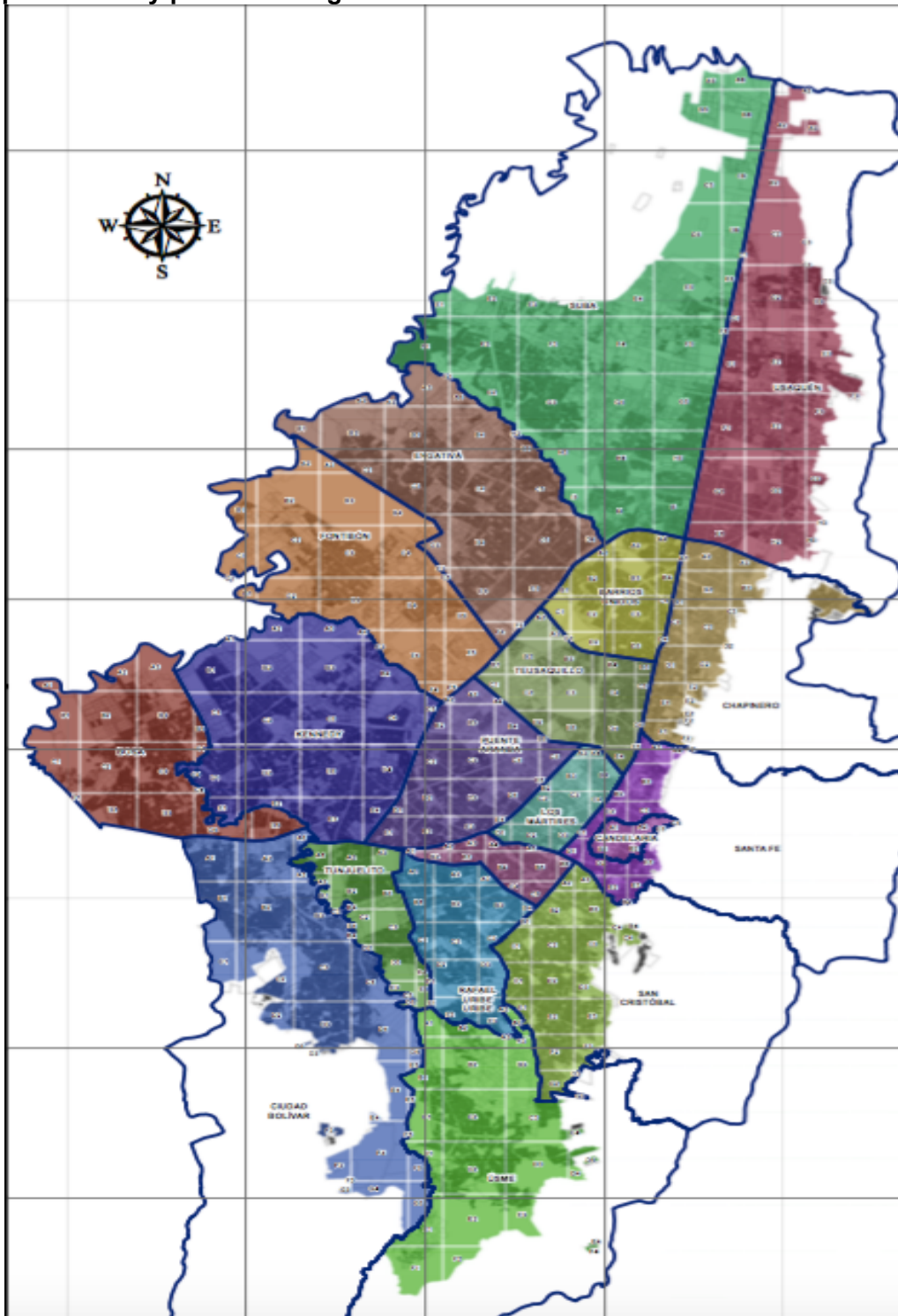
Tabla 5-1. Relación de grillas para evaluación acumulada de riesgo por exposición a por exposición a material particulado y plomo en Bogotá.

NUMERO	LOCALIDAD	ÁREA LOCALIDAD URBANA (KM2)	AREA GRILLA (KM2)	NUMERO GRILLAS CALCULADAS	NUMERO DE GRILLAS GRAFICADAS
1	Usaquén	38,068	3,6	24	21
2	Chapinero	12,027	1,56	18	16
3	Santafé	6,962	1,44	20	13
4	San Cristóbal	16,486	1,44	28	21
5	Usme	30,289	3,06	24	22
6	Tunjuelito	9,911	1,44	20	14
7	Bosa	23,934	2,7	20	16
8	Kennedy	38,568	3,06	25	21
9	Fontibón	33,280	3,06	30	21
10	Engativá	35,881	3,24	36	21
11	Suba	62,711	3,61	54	32
12	Barrios Unidos	11,904	1,4	16	15
13	Teusaquillo	14,193	1,44	25	18
14	Los Mártires	6,514	1,21	16	12
15	Antonio Nariño	4,880	1	18	14
16	Puente Aranda	17,311	1,56	25	20
17	Candelaria	2,060	1,56	4	4
18	Rafael Uribe	13,834	1,56	24	17
19	Ciudad Bolívar	33,901	3,2	35	24
Bogotá				462	342

Fuente. El autor

Estas grillas se nombraron alfanuméricamente en donde en el eje vertical se incluyeron las letras de la A hasta la I y en el eje horizontal en números de 1 a 9, como se muestra a continuación en Figura 5-1

Figura 5-1. Grillas para la evaluación acumulada de riesgo por exposición a material particulado y plomo en Bogotá



Fuente: El autor y Línea de Aire, Ruido y Radiación Electromagnética. Secretaría Distrital de Salud de Bogotá

3. Una vez definidas las zonas, se ingresó la información en la matriz de Evaluación Acumulada de Riesgo por contaminación del aire por material particulado y plomo (ANEXO A) en la cual se listó cada una de las variables de estudio por localidad obteniendo los siguientes resultados:

- En la ciudad de Bogotá se identificaron por parte de la autoridad ambiental 3148 fuentes fijas, en donde se evidencia una distribución uniforme, dado que en el 84% de las grillas (n=286) la densidad no sobrepasa las 20 fuentes; frente al tipo de combustible que utilizan, en el 34% de los casos emplean combustibles con mayor aporte de contaminantes al aire como madera, gasolina, aceite usado, carbón, ACPM, crudo y fuel oil, y el 26% (n=1353) restante utiliza combustibles menos contaminantes como gas o energía eléctrica. Adicional, se encontró que en un porcentaje importante de las grillas 40% (n=135) existen fuentes pero no funcionando, las cuales se catalogaron como sin combustible. Este análisis se realizó dado el aporte de material particulado que pueden estar generando a la atmosfera de la zona. Al realizar el análisis por zona de riesgo la distribución de fuentes es equitativa (50% para cada zona), sin embargo para la zona definida como de riesgo alto se evidencia mayor uso de combustibles contaminantes como se ve en la Tabla 5-2.

Tabla 5-2. Descripción por grilla de riesgo del comportamiento de fuentes fijas y tipo de combustible según la evaluación acumulada de riesgo por exposición a material particulado y plomo en Bogotá.

CLASIFICACIÓN DE LA GRILLA	DENSIDAD DE FUENTES FIJAS			TIPO DE COMBUSTIBLE		
	HASTA 19 FUENTES	DE 20-39 FUENTES	MAYOR A 40 FUENTES	COMBUSTIBLES LIMPIOS	OTROS COMBUSTIBLES	SIN COMBUSTIBLES
RIESGO ALTO	52% (n=150)	34% (n=11)	38% (n=9)	33% (n=29)	54% (n=64)	57% (n=77)
RIESGO BAJO	48% (n=136)	66% (n=21)	62% (n=15)	67% (n=60)	46% (n=54)	43% (n=58)

Fuente. El autor

- Para el caso de la distribución territorial de las fuentes, las localidades que presentan mayor densidad son Puente Aranda, Chapinero y Kennedy (ANEXO H),

siendo Puente Aranda, Kennedy, Fontibón y Engativá donde se evidenció un número de grillas mayor respecto a la presencia de fuentes fijas con combustibles más contaminantes. (ANEXO I)

- Respecto a la concentración por material particulado (PM_{10}) en Bogotá, el 48% ($n=165$) de las zonas se clasificaron como de nivel máximo, es decir que se encontraban por encima de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ promedio anual siendo las localidades de Ciudad Bolívar y Kennedy las que mayor presentan este comportamiento. Para el caso del nivel medio (rango entre 21 y hasta $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ promedio anual) un 52% ($n=177$) presentan esta tendencia siendo Suba, San Cristóbal y Usaquén las localidades en las que predomina este nivel.
- Al revisar el comportamiento por zona de riesgo, en la de exposición alta se presenta el 62% por encima de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (nivel máximo) como se muestra en la Tabla 5-3, donde las localidades de Ciudad Bolívar y Kennedy son las que presentan con mayor proporción esta situación. Para el caso de la zona de riesgo bajo la situación se evidencia en la localidad de Puente Aranda. (ANEXO J)
- Un factor que aporta a la dispersión de los contaminantes en la atmósfera es la velocidad del viento, en donde el 69% ($n=235$) de las grillas analizadas presentan un comportamiento entre 1.6 y 2.5 m/s promedio anual según la escala de Beaufort, (53) que clasifica este rango como brisa débil, situación que al revisarla por zona de riesgo esta acentuada en la zona clasificada como riesgo de exposición alto. Frente a la distribución geográfica de este evento, la localidad de Usaquén es el territorio de la ciudad donde predomina el viento en calma. (ANEXO K)
- La precipitación, al igual que la velocidad del viento son variables que influyen en la cinética de los contaminantes en la atmósfera, especialmente la del material particulado, por eso también se incluyó en el análisis realizado, en donde se determinó que la precipitación promedio anual en el 62% de las zonas se clasificó entre 801 y 1100 mm (nivel medio) predominando frente a los otros dos niveles (mínimo y máximo) que se distribuyen equitativamente el 38% restante como se muestra en la Tabla 5-3. Las zonas donde menos se presenta este evento son las localidades de Bosa, Kennedy y Fontibón siendo consecuente con la dinámica de

la contaminación del aire por ser los territorios que mayores niveles presentan de material particulado (PM) (ANEXO L).

Tabla 5-3. Descripción del comportamiento de las variables de calidad del aire y meteorológicas según evaluación acumulada de riesgo por exposición a material particulado y plomo en Bogotá

CLASIFICACIÓN DE LA GRILLA	CONCENTRACIÓN DE MATERIAL PARTICULADO PM		VIENTOS			PRECIPITACIÓN		
	NIVEL MAXIMO	NIVEL MEDIO	VIENTOS EN CALMA	BRISA DEBIL	BRISA MODERADA	MINIMA	MEDIA	MAXIMA
Riesgo alto	62% (n=103)	38% (n=67)	40% (n=31)	52% (n=121)	58% (n=18)	62% (n=41)	56% (n=119)	15% (n=10)
Riesgo bajo	37% (n=62)	62% (n=110)	60% (n=45)	48% (n=114)	42% (n=13)	38% (n=25)	44% (n=93)	84% (n=54)

Fuente. El autor

- Respecto al flujo vehicular, el 54% (n=184) de las zonas se clasifica como flujo medio, es decir entre 70.001-115.000 vehículos/día, seguido del 36% (n=122) se clasifica en flujo alto como se presenta en la Tabla 5-4, siendo las localidades de Suba y Engativá las que presentan mayor flujo vehicular en la ciudad.

Tabla 5-4. Descripción del comportamiento del flujo vehicular según evaluación acumulada de riesgo por exposición a material particulado y plomo en Bogotá.

CLASIFICACIÓN DE LA GRILLA	GRILLAS CON NIVEL DE FLUJO VEHICULAR ALTO	GRILLAS CON NIVEL DE FLUJO VEHICULAR MEDIO	GRILLAS CON NIVEL DE FLUJO VEHICULAR BAJO
Riesgo alto	35% (n=43)	64% (n=117)	28% (n=10)
Riesgo bajo	65% (n=79)	36% (n=67)	72% (n=26)

Fuente. El autor

- Para el caso de la distribución geográfica del flujo vehicular, se evidencia que la mayor proporción se acentúa en la transversalidad de la ciudad especialmente en

las localidades de Kennedy, Puente Aranda, Teusaquillo, Barrios Unidos, Suba y Usaquén por donde se ubica la Av. carrera 30 desembocando en la Autopista Norte siendo una de las vías más importantes que atraviesa la ciudad de Bogotá (ANEXO M).

- Dado que dentro de las actividades económicas que pueden estar relacionadas con manipulación de productos de plomo se encuentran la fundición y tratamiento de piezas metálicas, fabricación de pinturas, lacas y barnices, fabricación, mantenimiento y reparación de vehículos, artes gráficas y fotografía, recubrimientos de piezas de barro, bisutería y fabricación de artículos relacionados con vidrio, fabricación de armas y municiones, se determinó que en Bogotá se encuentran 6575 establecimientos relacionados siendo las localidades de Barrios Unidos, Los Mártires y Puente Aranda las que presentan mayor proporción de dichos establecimientos. Sumado a esto y dado que el Decreto 4741 de 2005 (61) establece la gestión integral de residuos peligrosos en Colombia, se identificaron por medio del registro de generadores de residuos peligrosos administrado por la autoridad ambiental del distrito, 354 generadores de residuos de plomo en la ciudad, siendo las localidades de Fontibón y Puente Aranda las más representativas (ANEXO N).

Tabla 5-5. Descripción del comportamiento de las actividades económicas relacionadas con la manipulación de plomo según la evaluación acumulada de riesgo por exposición a material particulado y plomo en Bogotá

CLASIFICACIÓN DE LA GRILLA	ACTIVIDADES ECONOMICAS	RESIDUOS PELIGROSOS CON PLOMO
Riesgo alto	28% (n=1876)	35% (n=125)
Riesgo bajo	72% (n=4699)	65% (n=229)

Fuente. El autor

- Frente al estrato socioeconómico, se encontró que el 53% de las grillas habita en estrato 1-2 localizándose en las zonas periféricas de la ciudad en las localidades de Ciudad Bolívar, Usme, Bosa, Kennedy y San Cristóbal, (ANEXO O), el 40% en estrato 3-4 y el 7% restante en el estrato 5 y 6.

Tabla 5-6. Descripción del comportamiento de las condiciones socioeconómicas según la evaluación acumulada de riesgo por exposición a material particulado y plomo en Bogotá

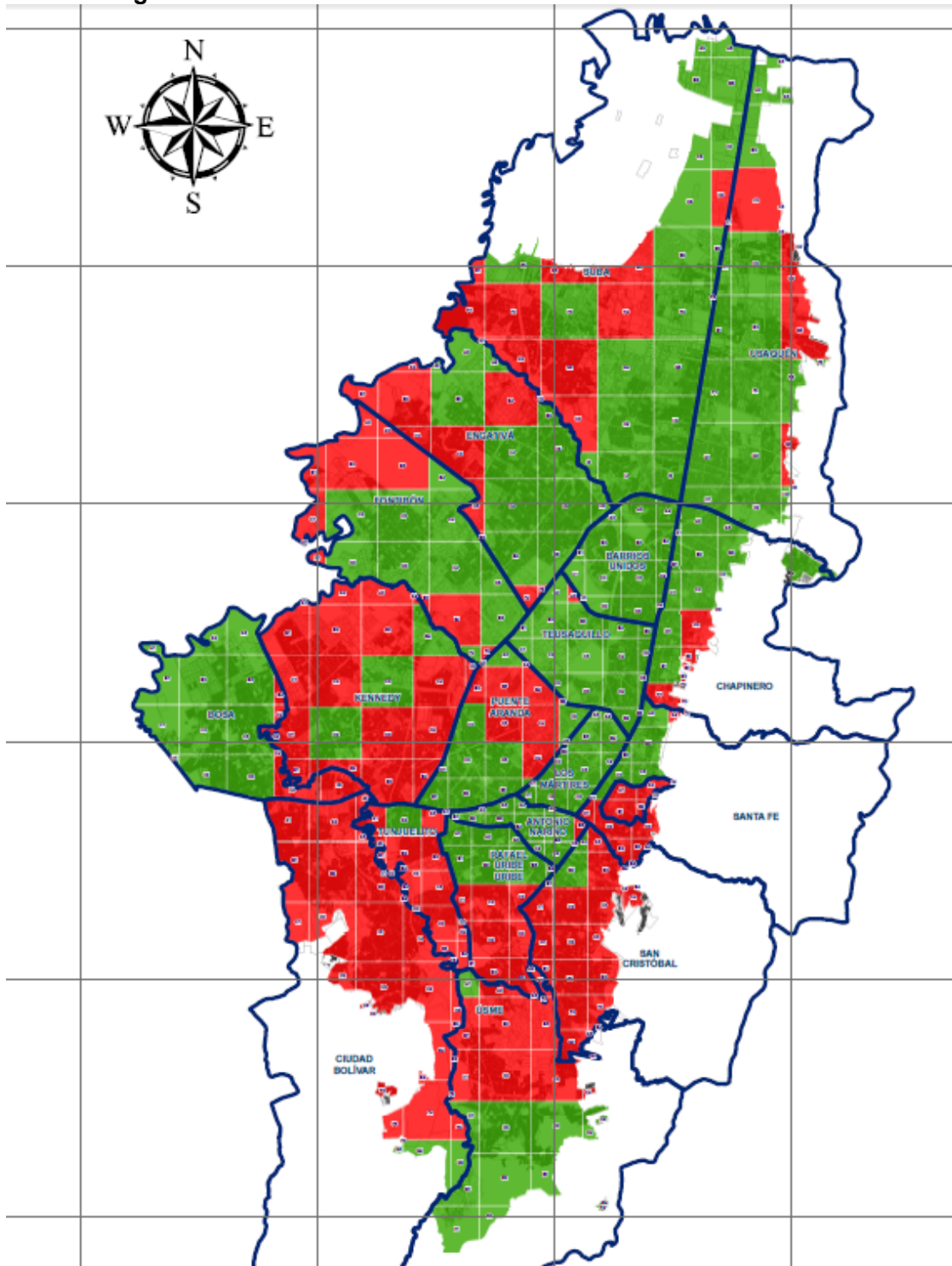
CLASIFICACIÓN DE LA GRILLA	ESTRATO 1-2	ESTRATO 3-4	ESTRATO 5-6
Riesgo alto	87% (N=160)	7% (n=10)	0% (n=0)
Riesgo bajo	13% (N=23)	93% (n=126)	100% (n=23)

Fuente. El autor

- Al discriminar por zonas de riesgo, se evidencia que para los estratos 5 y 6 no se presentaron grillas clasificadas en riesgo alto de exposición a contaminación del aire, pero sí predominante en los estratos 1 y 2 de la ciudad con un 87% (n=160). Para el caso de la zona de riesgo bajo los estratos que mayor representatividad son el 3 y 4 con un 93% (n=126).

Como resultado del análisis conjunto de las variables anteriormente explicadas de forma independiente se encontró que el 47% (n=161) de los cuadrantes definidos resultaron ser de riesgo alto y el 53% (n=181) de riesgo bajo. De igual manera se observó la tendencia que en las localidades ubicadas al norte de la ciudad se clasificaron en riesgo bajo especialmente en las localidades de Suba, Teusaquillo, Usaquén y Barrios Unidos, y caso contrario sucede con las localidades ubicadas al sur de la ciudad como lo son Ciudad Bolívar, Kennedy, San Cristóbal y Usme, como se observa en la Figura 5-2.

Figura 5-2. Zonas de riesgo acumulado por exposición a material particulado PM y plomo en Bogotá.



Fuente: El Autor y Línea de Aire, Ruido y Radiación Electromagnética. Secretaría Distrital de Salud de Bogotá

5.2 Resultados del segundo objetivo: Muestreo de aire intramural

Como resultado del segundo objetivo, posterior a la determinación de las zonas de riesgo de exposición, se cuantificaron las concentraciones de plomo en el material particulado en los ambientes escolares por medio de la implementación del muestreo en 18 de las 20 localidades de la ciudad, exceptuando la localidad de Sumapaz dado que esta tiene una predominancia rural y la localidad de La Candelaria la cual geográficamente está incorporada en la Localidad de Santa Fe. Durante el segundo semestre del año 2015 y primer semestre del año 2016, en dichas localidades se tomaron muestras de partículas suspendidas totales (PST) en 36 colegios distritales (2 por localidad) por medio de la instalación de bombas de muestreo en los salones de la población de estudio, previo consentimiento de las instituciones educativas.

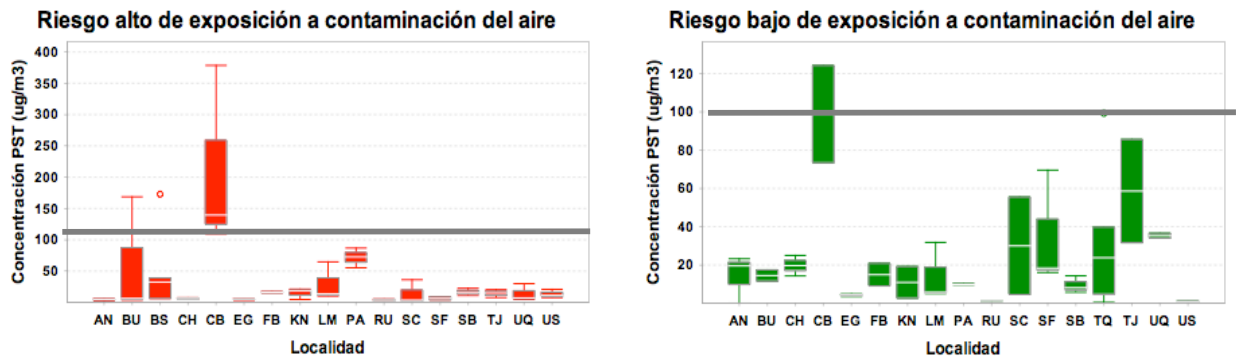
El monitoreo se realizó de forma simultánea cada dos localidades a un flujo de 2.5 L/m utilizando un calibrador de Burbuja antes de cada muestreo, de manera que permitió recoger material particulado (PM) suficiente para poder realizar la determinación de plomo en el laboratorio, conforme a los parámetros operativos obtenidos en la prueba piloto. Durante el periodo monitoreado ocurrieron las dos épocas de lluvia que se presentan normalmente en la ciudad, lo que pudo influir en los resultados del muestreo, sin embargo por ser un monitoreo a nivel intramural esta variable no afecta de manera directa los resultados.

Como resultado se obtuvieron un total de 153 muestras, de los cuales 36 muestras fueron filtros catalogados como blancos y 24 muestras se perdieron, tomando como muestras válidas 93 en total, de las cuales 49 pertenecen a la zona catalogada como de alto riesgo (identificada con color rojo) y las 44 restantes a la zona de bajo riesgo (identificada con color verde).

Las concentraciones más altas de partículas suspendidas totales, mayor a 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ se presentaron en las instituciones catalogadas con riesgo alto en las localidades de Ciudad Bolívar, Barrios Unidos, Bosa y Puente Aranda, sin embargo, en una misma localidad se pueden tener diferentes valores de concentración, es así que las instituciones educativas

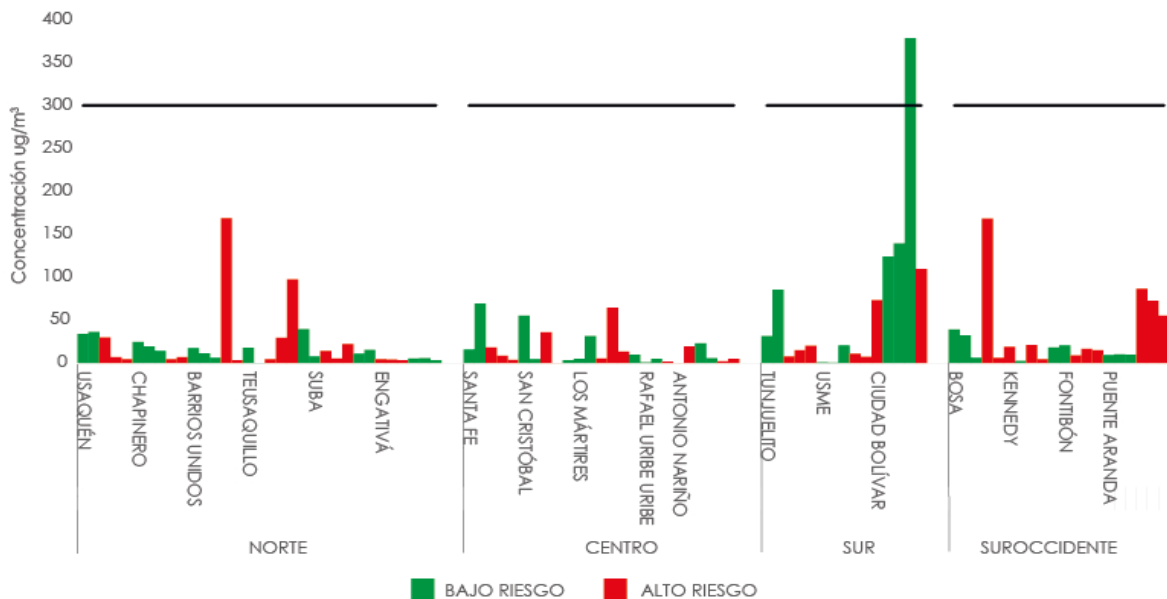
catalogadas con bajo riesgo de las localidades de Ciudad Bolívar, Tunjuelito y Usaquén presentaron niveles entre 30 a 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ como se presenta en la Figura 5-3.

Figura 5-3. Distribución territorial de la concentración de partículas suspendidas totales (PST) al interior de Instituciones educativas por zona de riesgo en Bogotá 2015-2016



Fuente. El autor

Figura 5-4. Cumplimiento normativo de la concentración de partículas suspendidas totales (PST) al interior de Instituciones educativas por zona de riesgo en Bogotá 2015-2016



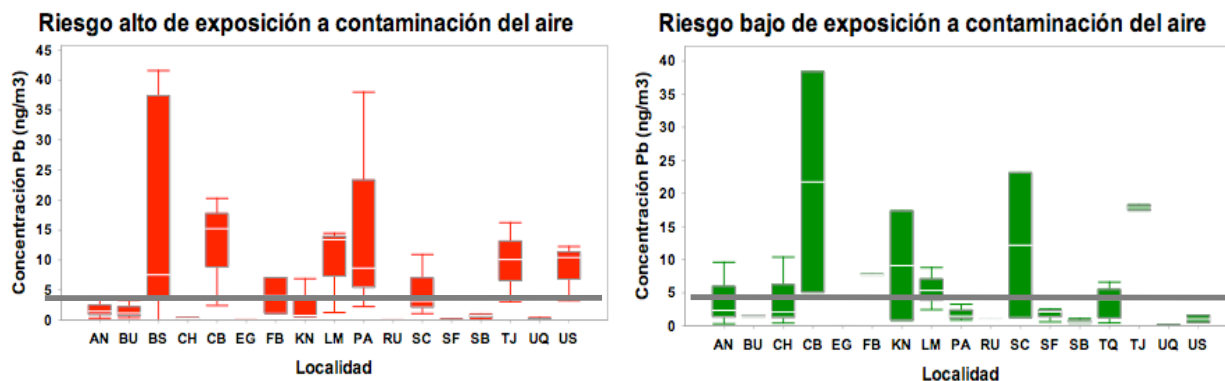
Fuente. El autor

En la Figura 5-4 se observa la concentración de partículas suspendidas totales en el aire al interior de las instituciones educativas ($n=93$), agrupadas por zona de la ciudad (Norte, Centro, Sur y Suroccidente), evidenciando que la zona sur (especialmente la localidad de

Ciudad Bolívar) registró las concentraciones más altas comparado con el resto de la ciudad, la cual a su vez se encontró el punto que sobrepasó la norma nacional establecida para un periodo de 24 horas ($300 \mu\text{g}/\text{m}^3$) para este contaminante con un valor de $378 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en la zona de bajo riesgo, esto dando cuenta que en una misma localidad existen diferentes niveles de contaminación del aire.

Para el caso de las concentraciones de plomo suspendido en el aire ($n=93$), encontradas en las instituciones educativas catalogadas de alto riesgo, las ubicadas en las localidades de Bosa, Puente Aranda y Ciudad Bolívar fueron las que presentaron concentraciones por encima de $10 \text{ ng}/\text{m}^3$, al igual que las de bajo riesgo monitoreadas en las localidades de Ciudad Bolívar, Tunjuelito, Kennedy y San Cristóbal como se evidencia en la Figura 5-5.

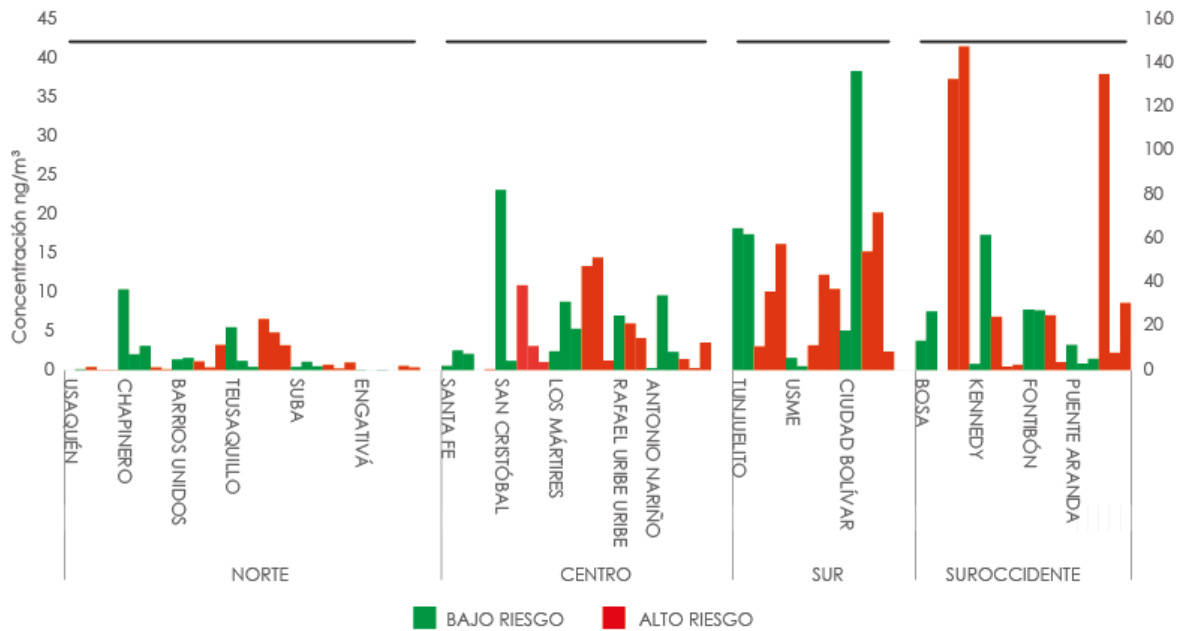
Figura 5-5. Distribución territorial de la concentración de plomo suspendido en el aire al interior de instituciones educativas por zona de riesgo en Bogotá 2015-2016.



Fuente. El autor

En la Figura 5-6 se observan las concentraciones de plomo suspendido en el aire agrupadas por zona de la ciudad (Norte, Centro, Sur y Suroccidente) evidenciando que la zona suroccidente (especialmente la localidades de Kennedy y Puente Aranda) registraron las concentraciones más altas comparado con el resto de la ciudad. Frente al cumplimiento de la norma nacional ($150 \text{ ng}/\text{m}^3$) promedio 24 horas en ninguno de los casos se presentaron excedencias.

Figura 5-6. Cumplimiento normativo de la concentración de plomo suspendido en el aire al interior de Instituciones educativas por zona de riesgo en Bogotá 2015-2016.



Fuente. El autor

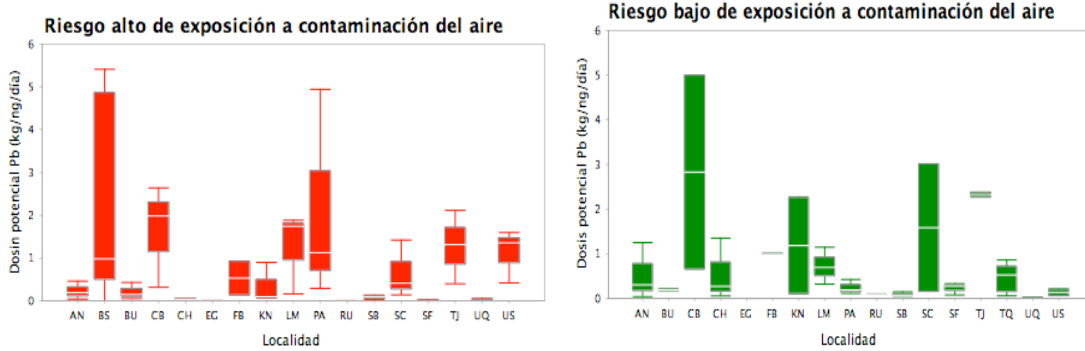
5.3 Resultados del tercer objetivo: Estimación de la dosis potencial de exposición

El cálculo de la dosis se realizó para dos grupos de edad, (i) 6-11 años y (ii) 11-16 años utilizando la Ecuación 4-11 dado que al revisar los valores recomendados por la EPA (58) estos se encontraban segmentados para el rango de edad del estudio (6-12 años).

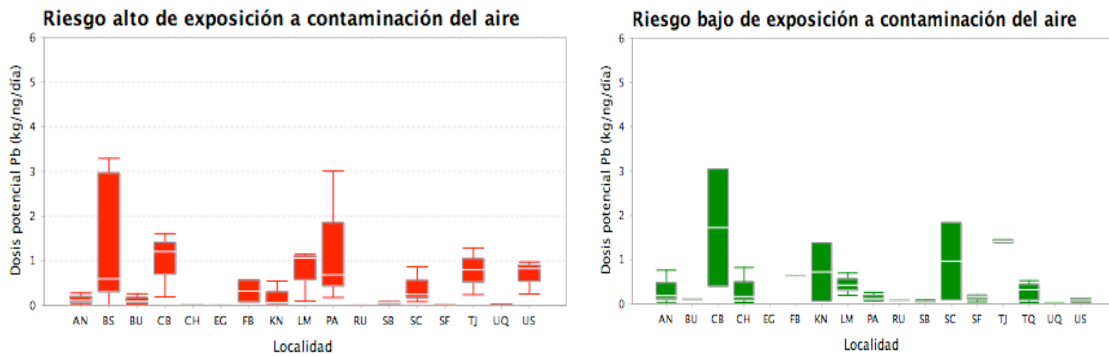
Los valores de plomo utilizados fueron los resultantes del monitoreo en las instituciones educativas (n=93), la tasa de ingreso para niños hasta 11 años fue de 12,4 m³/día y de los niños de 11 a 16 años fue de 15,1 m³/día, el peso que se tomó para el grupo de edad hasta 11 años fue de 20 kg y para el grupo de niños de hasta 11 años fue de 40 kg según lo establecido en la tabla del ANEXO G. Se aclara que los valores propuestos para la tasa de ingreso y el peso fueron calculados para la población de niños norteamericanos con condiciones de salud diferentes a los latinoamericanos.

Figura 5-7. Distribución territorial del comportamiento de la dosis potencial de exposición a plomo suspendido en el aire para niños de 6-16 años por zona de riesgo en Bogotá 2016.

Niños de 6-10 años



Niños de 11-16 años



Fuente. El autor

Se puede verificar que entre el primer grupo de edad (niños 6-11 años) la dosis de exposición es mayor, en comparación con el segundo grupo de edad (11-16 años), disminuyéndose en un 61% la exposición, alcanzando hasta 5 ng/kg/día para el grupo de 6-11 años y de 3 ng/kg/día para el grupo de 11-16 años indistintamente de la zona de riesgo. Lo anterior se da porque las dosis son directamente proporcionales a la concentración, siendo las zonas de alto riesgo las que presentan mayores niveles en comparación con las de bajo riesgo. Ahora bien, para el caso de los grupos de edad se debe tener en cuenta que el peso es una variable determinante para el cálculo de las dosis, siendo los niños de mayor edad los que presentan menos dosis por presentar mayor peso.

Frente a la distribución territorial, las localidades de Bosa, Ciudad Bolívar y Puente Aranda son las zonas donde se presenta mayores dosis potenciales para el caso de los niños que asisten a las instituciones catalogadas como de riesgo alto. Para el caso de los niños que asisten a las instituciones catalogadas como de riesgo bajo las localidades de Ciudad Bolívar, San Cristóbal y Kennedy presenta mayores dosis potenciales. Sin embargo, es de anotar que en una misma localidad pueden presentarse gradientes de exposición de las instituciones educativas, dados por factores como fuentes de emisión internas (consumo de tabaco) o cercanas (fuentes fijas que manipulen plomo).

5.4 Resultados del objetivo cuatro: Coeficiente de correlación

Con base en los resultados obtenidos del muestreo (concentraciones de partículas suspendidas totales (PST) y plomo) se realizó un análisis de los datos mediante el coeficiente de correlación (r). Adicionalmente, y con el fin de relacionar el comportamiento de la contaminación del aire a nivel extramural con la intramural, se tomaron las concentraciones de material particulado PM_{10} y $PM_{2.5}$ arrojados por la Red de Monitoreo de Calidad del Aire en Bogotá (RMCAB) administrada por la Secretaría Distrital de Ambiente, del año correspondiente a la época del muestreo (años 2015 y 2016), obteniendo los siguientes resultados:

5.4.1 Análisis descriptivo

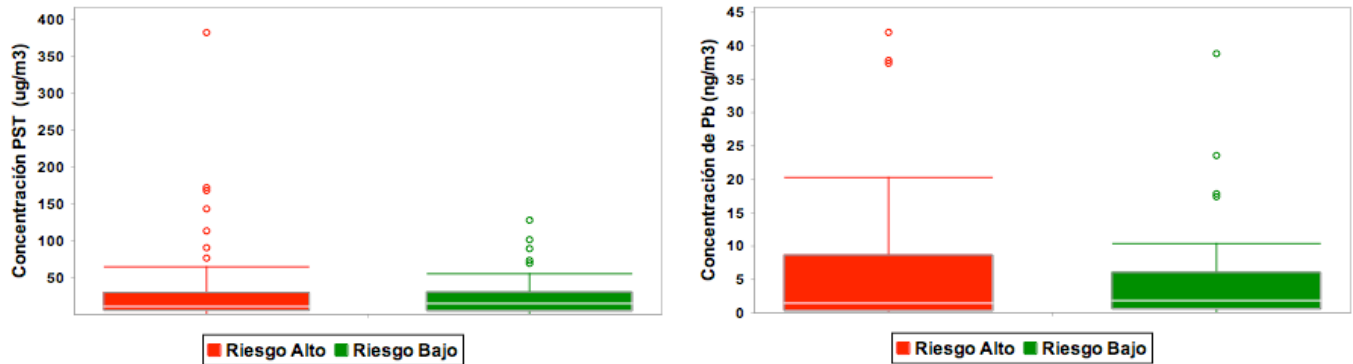
Para el caso del plomo y las partículas suspendidas totales (PST) contaminantes medidos al interior de las instituciones educativas, se encontró que conforme al comportamiento de las medias por zonas de riesgo, las muestras tomadas en las zonas catalogadas como de alto riesgo presentaron concentraciones más elevadas comparadas con las que se tomaron en las zonas de bajo riesgo como se muestra en la Tabla 5-7.

Tabla 5-7. Estadísticos descriptivos concentraciones de contaminantes medidos en instituciones educativas en Bogotá 2015-2016.

RIESGO DE LA ZONA	CONTAMINANTE	NUMERO DE MUESTRAS	MINIMO	MÁXIMO	MEDIA	DESVIACIÓN ESTÁNDAR
Alto	Plomo (ng/m^3)	49	0,000	41,571	6,254	9,940
	PST ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	49	0,149	378,518	34,994	64,682
	PM ₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	49	16,200	114,000	49,186	25,344
	PM _{2,5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	49	6,560	46,250	22,492	10,805
	Calificación de la grilla	49	41,340	62,190	52,404	5,584
Bajo	Plomo (ng/m^3)	44	0,000	38,389	4,995	7,568
	PST ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	44	0,102	124,163	23,640	27,759
	PM ₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	44	16,200	71,370	40,289	14,633
	PM _{2,5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	44	5,440	42,870	20,361	9,782
	Calificación de la grilla	44	27,474	54,700	41,372	6,062

Fuente: Línea de Aire, Ruido y Radiación Electromagnética. Secretaría Distrital de Salud de Bogotá

Es así que para el caso del plomo la media de la concentración en la zona de alto riesgo fue de $6,2 \text{ ng}/\text{m}^3$ frente a $4,9 \text{ ng}/\text{m}^3$ en la zona de bajo riesgo y para la concentración de Partículas Suspendidas Totales (PST) la media de la concentración en la zona de alto riesgo fue de $34,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ frente a $23,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ observado para este último contaminante una alta variabilidad en las concentraciones conforme a la desviación estándar calculada para los dos grupos de riesgo.

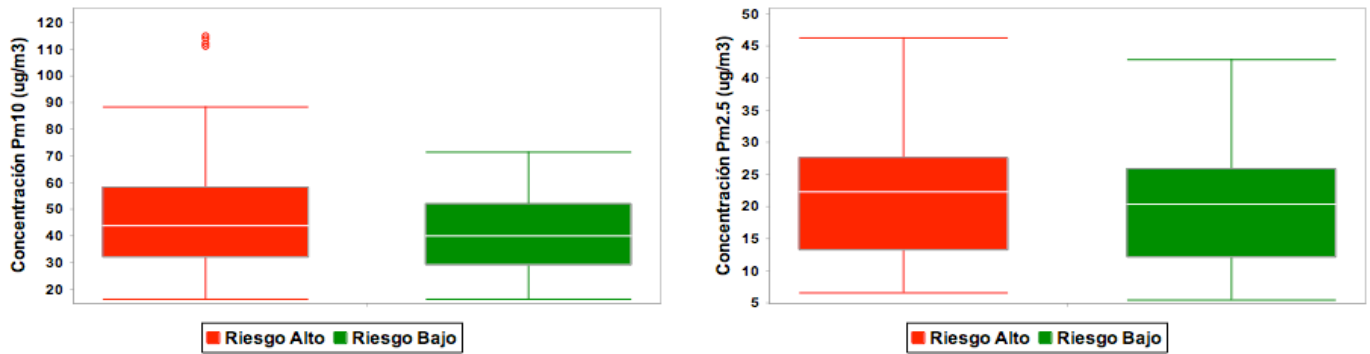
Figura 5-8. Diagrama de cajas partículas suspendidas totales (PST) y plomo suspendido en el aire intramural por zona de riesgo en Bogotá 2016.

Fuente. El autor

Por otro lado, y conforme a los datos analizados obtenidos de la red de monitoreo de calidad del aire de Bogotá ($n=93$), el comportamiento es igual a los resultados para plomo y partículas suspendidas totales (PST) muestreados a nivel intramural, encontrando que

para el caso del PM₁₀ la media de la concentración en la zona de alto riesgo fue de 49,1 µg /m³ frente a 40,2 µg/m³ en la zona de bajo riesgo y para la media de la concentración de PM_{2,5} la media de la concentración en la zona de alto riesgo fue de 22,4 µg/m³ frente a 20,3 µg/m³, observando para el caso del PM₁₀ una alta variabilidad en las concentraciones conforme a la desviación estándar calculada para los dos grupos de riesgo, 25,3 µg/m³ para la zona de riesgo alto frente a 14,6 µg/m³ para la zona de riesgo bajo.

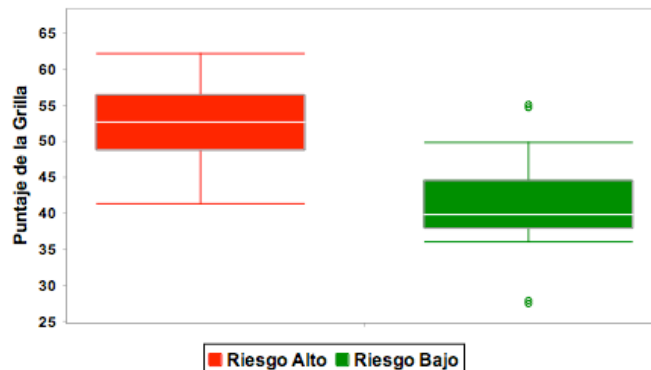
Figura 5-9. Diagrama de cajas para material particulado PM₁₀ y PM_{2,5} obtenidos de la Red de Monitoreo de Calidad del Aire por zona de riesgo en Bogotá 2016.



Fuente. El autor

Dado que la grilla se le asignó un valor a través de la metodología de evaluación acumulada de riesgo (EAR) está también se analizó como variable cuantitativa, encontrando que la media en la zona de alto riesgo fue de 52,4 frente a 41,3 en la zona de bajo riesgo.

Figura 5-10 Diagrama de cajas calificación de riesgo de las grillas según zona de exposición definida.



Fuente: El Autor

Tomando como base lo anterior, se valida que la selección de zonas de exposición realizada con base en información de fuentes secundarias es adecuada dado que se evidencian diferencias en dichas zonas.

5.4.2 Análisis Bivariado

En la Tabla 5-8 se presentan los resultados obtenidos de la comparación de medias de manera que permitiera revisar la homogeneidad de varianzas para la aplicación de la prueba t, de lo cual se resalta que para el caso del material particulado PM_{10} , los niveles son mayores en la zona definida como de mayor exposición y estadísticamente significativos al igual que para el caso de la calificación de las grillas. Para el caso de los niveles de PST, Plomo intramurales y $PM_{2.5}$ estramural no fueron significativos.

Tabla 5-8. Prueba de muestras independientes según nivel de exposición de los concentraciones de contaminantes medidos en Bogotá 2015-2016

CONTAMINANTE	PRUEBA DE LEVENE HOMOGENEIDAD DE VARIANZAS	Valor t	DIFERENCIA DE MEDIAS	INTERVALO CONFIANZA (95%)	SIGNIFICANCIA
PST	NO	1,119	11,35	(-8,89 a 31,6)	NO
PLOMO	SI	0,681	1,35	(-2,41 a 4,93)	NO
PM_{10}	NO	2,099	8,89	(0,45 a 17,33)	SI*
$PM_{2.5}$	SI	0,99	2,13	(-2,13 ; 6,39)	NO
CUADRANTE	SI	9,13	11,03	(8,63 ; 13,43)	SI*

Fuente: Línea de Aire, Ruido y Radiación Electromagnética. Secretaría Distrital de Salud de Bogotá

5.4.3 Aplicación de coeficiente de correlación

Finalmente, se realizaron las correlaciones según la zona de riesgo entre plomo (variable dependiente) y las demás variables (PST, PM_{10} , $PM_{2.5}$ y calificación de la grilla) que son las variables independientes para determinar si los cambios de estas influyen en el comportamiento de la concentración del plomo suspendido en el aire.

Como se observa en Tabla 5-9, la concentración de plomo depende del comportamiento del material particulado es sus diferentes diámetros de partícula, siendo la correlación del plomo con el PM_{10} la que representa el mayor coeficiente (0,448) en comparación con las otras fracciones (0,445 para $PM_{2.5}$ y 0,420 para PST) en la zona de riesgo alta.

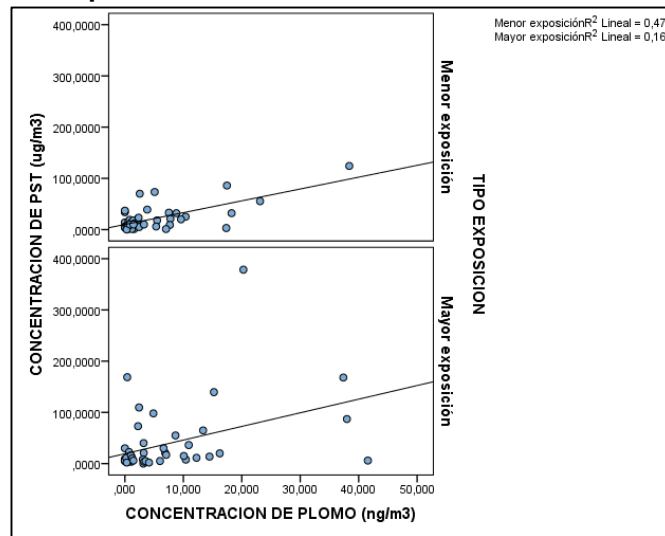
Tabla 5-9. Correlación de plomo suspendido en el aire con contaminantes medidos en Bogotá 2015-2016

RIESGO		COEFICIENTE DE CORRELACIÓN			CALIFICACIÓN CUADRANTE	
		PM ₁₀	PM _{2,5}	PST		
Alto	Plomo	r	0,448	0,445	0,420	0,119
		Sig. (unilateral)	0,001	0,001	0,001	0,208
Bajo	Plomo	r	0,267	0,125	0,634	0,230
		Sig. (unilateral)	0,040	0,210	0,000	0,066

Fuente: Línea de Aire, Ruido y Radiación Electromagnética. Secretaría Distrital de Salud de Bogotá

Sin embargo, se debe tener en cuenta que para este caso las partículas suspendidas totales (PST) el muestreo fue realizado a nivel intramural en donde se reportó mayor correlación del plomo en la zona de menor riesgo de exposición como se ve en Figura 5-11 probablemente de fuentes no consideradas en el estudio como la cercanía de actividades económicas que manipularan plomo en cercanías a las instituciones educativas o dentro de la misma institución; es así que entre el diámetro de la partícula sea mayor, hay mayor afinidad entre el plomo y la partícula queriendo decir que este metal se puede encontrar con mayor probabilidad asociado a fuentes que emiten material grueso a la atmosfera.

Figura 5-11. Diagrama de dispersión entre plomo y partículas suspendidas totales (PST) según zona de exposición.

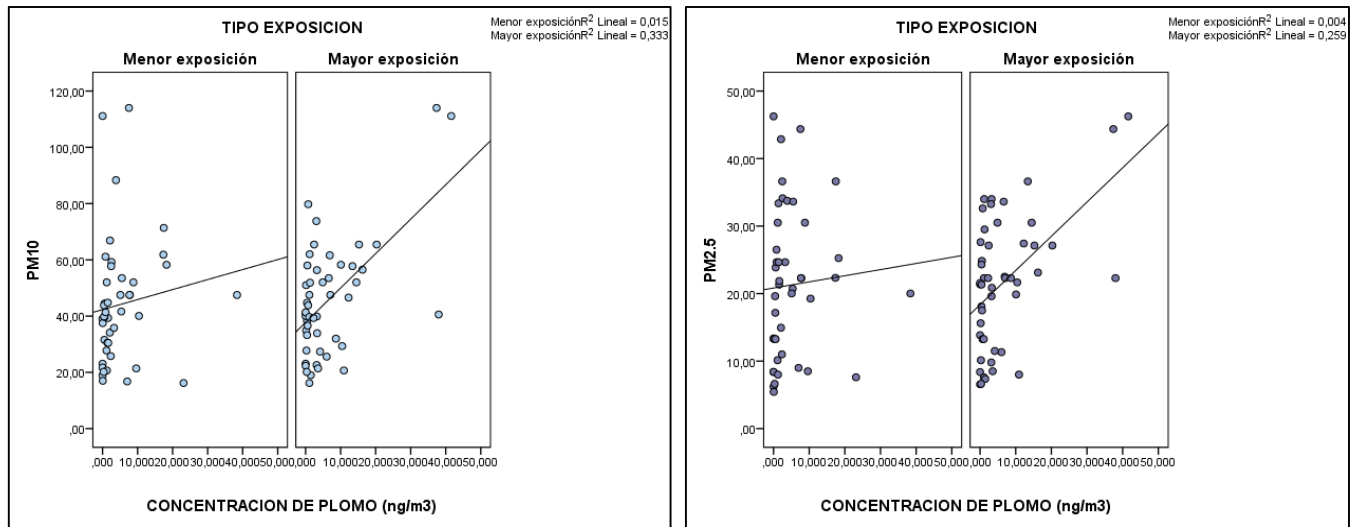


Fuente: El autor

Se evidencia que para el material particulado PM_{2,5} no se presentó una correlación significativa para la zona de menor exposición, lo anterior probablemente porque el diámetro de la partícula es más pequeño y la concentración es menor.

Para el caso de las correlaciones obtenidas para material particulado PM_{10} y $PM_{2.5}$ con el plomo se observa en la Figura 5-12 que las calculadas para las zonas de alto riesgo son mayores en comparación a las de bajo riesgo siendo consistentes, debido probablemente a que el sistema de medición para estos contaminantes es realizado por la red de monitoreo de calidad del aire de Bogotá (RMCAB) el cual es automático influyendo de forma positiva en la calidad de los datos, logrando controlar más variables de confusión que influyen en la toma de la muestra como lo es la humedad siendo este sistema de toma de muestras automático y no manual como realizado en el trabajo de campo del presente estudio.

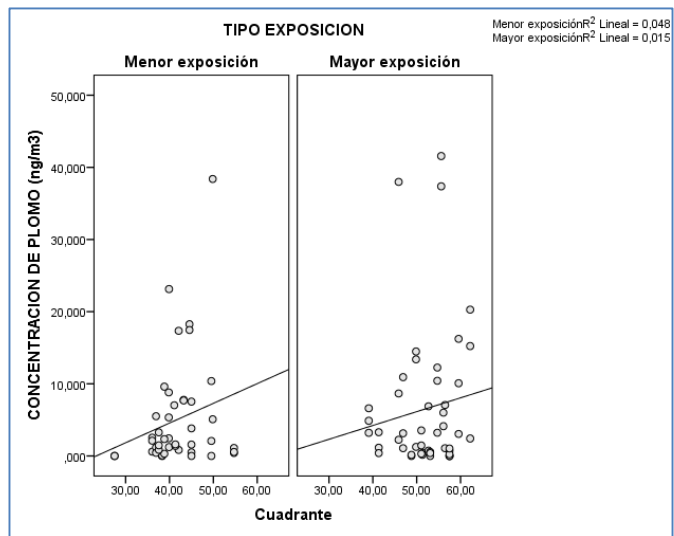
Figura 5-12. Diagrama de dispersión entre plomo y material particulado PM_{10} y $PM_{2.5}$ según zona de exposición



Fuente: El autor

Ahora bien, para el caso de las zonas de riesgo, la correlación entre el plomo y la calificación dada a la grilla no fue significativa para los dos grupos de riesgo catalogados como de riesgo alto, sin embargo, para los definidos como de riesgo bajo si fue significativo como se evidencia en la Figura 5-13, lo anterior probablemente a que las fuentes secundarias empleadas para la determinación de la calificación de la grilla deben ampliarse, considerando por ejemplo el estado de las vías y cantidad de material particulado resuspendido.

Figura 5-13. Diagrama de dispersión entre plomo y calificación de la grilla según zona de exposición



Fuente: El autor

6. Discusión

Se quiso abordar la exposición a contaminación del aire por medio de la evaluación acumulada de riesgo buscando realizar un estudio del comportamiento individual (una a una) de las variables incluidas así como su interacción (como se relacionan de forma colectiva). A nivel internacional esta metodología recomienda la determinación de la forma de incluir y medir la vulnerabilidad de los grupos (62). Para el ejercicio planteado, se consideró la variable de vulnerabilidad por medio del estrato la cual es menor en las partes periféricas de la ciudad. Sin embargo, la literatura propone otras variables como las psicosociales, estado de salud que no se tuvieron en cuenta en este trabajo.

La exposición diferencial juega un importante papel en evaluación acumulada, dado que en Bogotá se encuentran zonas denominadas localidades con variabilidad predominante en uso del suelo. Es así que localidades como Puente Aranda tienen una predominancia del uso del suelo industrial a gran escala, que en comparación con la localidad de Tunjuelito ubicada al sector sur de la ciudad su predominancia economía es informal a una escala industrial con pequeñas empresas. Localidades como Usaquén y Chapinero presentan zonas residenciales y algunas de tipo comercial lo que genera que los factores de exposición cambien en la ciudad.

El análisis realizado para la ciudad muestra que un gran porcentaje de zonas de alto riesgo se encuentran al sur de Bogotá, donde se cuenta con diferentes variables ambientales atenuadas que no se consideraron en el análisis, como el mal estado de las vías. Sin embargo, las variables consideradas en este estudio se comportan de la siguiente manera:

- La densidad de fuentes fijas de contaminación del aire se concentra en la zona suroccidente en las localidades de Puente Aranda y Kennedy, y en la zona norte en la localidad de chapinero.

- Las fuentes fijas de las localidades al suroccidente (Puente Aranda, Kennedy, Fontibón) y noroccidente (Engativá) de la ciudad usan en mayor proporción combustibles catalogados como más contaminantes.
- Las localidades donde se presenta mayor densidad de fuentes fijas también presentan los niveles de material particulado PM₁₀ más altos en relación con las demás. Así mismo, presentan los niveles de vientos y precipitación más bajos, lo que dificulta la dispersión de contaminantes en comparación con localidades como Usaquén, Chapinero y Rafael Uribe, que registran los valores de velocidad de vientos más altos en la ciudad.
- El flujo vehicular más alto está concentrado en las localidades de Kennedy, Puente Aranda, Teusaquillo, Barrios Unidos, Suba y Usaquén.
- Las actividades económicas relacionadas con generación de plomo no se sitúan en una zona específica de la ciudad. Se encontró que a lo largo y ancho de la ciudad existen 354 establecimientos que generan residuos relacionados con plomo, como son las baterías plomo ácido, láminas de plomo de radiografías periapicales y chalecos plomados.

Estudios internacionales han demostrado correlación entre los niveles de plomo en sangre con niveles de plomo intradomiciliario en forma de polvo estableciendo que a distancias menores de fuentes fijas que emiten este metal mayores son los niveles de plomo en la sangre (63), así como niveles mayores en zonas de patios en instituciones educativas que al interior de las aulas de clase (64). El presente estudio realizó una aproximación frente a la identificación de las actividades económicas que manipulan o generan residuos de plomo en el marco de la evaluación acumulada de riesgo (EAR), identificando que en las zonas definidas como de riesgo bajo se identificaron mayores actividades relacionadas con la manipulación de este metal.

Por otro lado, al revisar el comportamiento de las concentraciones agrupadas por zona de la ciudad que fueron medidas, se observa que son mayores en la zona suroccidente y sur, siendo consecuente con lo calculado teóricamente con la evaluación acumulada de riesgo (EAR), identificando un problema en esta zona del Distrito Capital.

Franco y colaboradores en el 2009 registraron niveles de material particulado PM₁₀ medidos en instituciones educativas en Bogotá entre 55 y 91 µg/m³, indicando que estas

cifras exceden los valores recomendados por la Organización Mundial de la Salud (OMS) y que la cantidad de vehículos que circulan por vías aledañas a las instituciones educativas son elementos determinantes para las diferencias entre las concentraciones de PM registradas (65). Para el presente trabajo, aunque no se midió material particulado PM₁₀ si no la fracción más gruesa (PST), permitió establecer que la media de la concentración en la zona de alto riesgo fue de 34,9 µg/m³ frente a 23,6 µg/m³ en la zona de bajo riesgo de lo cual se aclara que las zonas de alto riesgo están caracterizadas por tener presencia de alto tráfico vehicular, así como presencia de alta densidad de fuentes fijas y con uso de combustibles más contaminantes que aportan a la contaminación del aire en el exterior que potencialmente puede ingresar a las instituciones educativas.

Respecto a la medición de plomo en interiores de instituciones educativas, Awang y colaboradores (66) reportaron mayores concentraciones en colegios que se encontraban cerca de vías principales especialmente en horas pico (5.18–7.01 µg/ m³). Ahora bien, el presente estudio encontró mayores niveles de plomo (6,2 ng/m³) en las instituciones educativas de las zonas definidas como de alto riesgo en las cuales el flujo vehicular es mayor en comparación con las de bajo riesgo (4,9 ng/m³) siendo consistente los resultados obtenidos con el estudio mencionado.

Se resalta que los niveles, comparados con los reportados en otros países, fueron superiores; es así que en 2009, la agencia para la protección de la salud del Reino Unido reportó que la concentración de plomo de fondo en el aire fue <10 ng/m³ para la mayor parte del Reino Unido detectando niveles más altos en las zonas urbanas, en particular en las zonas industriales (35) en comparación con los 41 ng/m³ de plomo encontrados en las instituciones educativas como nivel máximo por el presente estudio. Así mismo, se ha encontrado que la concentración de plomo en el aire en las zonas rurales del Este de Estados Unidos es típicamente de 6-10 ng/m³ (38). Para Bogotá, se encontró que en el 19% de los casos los valores superaron lo reportado en estos dos países.

A nivel mundial, la presencia de plomo en el ambiente se ha reducido en los últimos 20 años, debido a las medidas tomadas para su disminución en su uso comercial, particularmente en la gasolina. Sin embargo, la exposición crónica a bajos niveles del metal sigue siendo un problema desde el punto de vista toxicológico y para la salud pública,

especialmente entre algunas minorías y grupos socioeconómicamente desfavorecidos, por estar más propensos a vivir en viviendas de baja calidad.

Habitar cerca de actividades económicas informales que no tienen controles para la emisión de contaminantes, o estar en cercanías a vías en mal estado o con circulación de tráfico pesado, incrementa la exposición a material particulado (PM) y por ende a plomo suspendido en el aire, dado que el comportamiento de la concentración de este metal depende de la cantidad de material particulado (especialmente partículas gruesas) presente en el ambiente.

La evidencia de este trabajo sugiere que la re suspensión de polvo parece tener una importante responsabilidad por los niveles detectables de plomo en la ciudad, dado que la presencia de este metal está más relacionado con las partículas gruesas, siendo esta problemática en la actualidad de importancia de estudio con base en lo determinado en investigaciones anteriores por la Universidad de los Andes en el 2009, que concluyó que la contribución del polvo re suspendido enriquecido por actividad vehicular es mayor para el caso del PM_{10} en la zona industrial (42%), tráfico vehicular (52%), y residencial (60%) en comparación con el $PM_{2.5}$ donde no se encontró para esta fuente; sin embargo sí se encontró para material resuspendido de origen natural en la zona industrial y residencial en una proporción del 3% y 7% correspondientemente. (14)

Por otro lado, las diferencias de las concentraciones de partículas suspendidas totales (PST) y plomo suspendido en el aire teniendo en cuenta las zonas de riesgo definidas, fueron significativas en el presente trabajo en contraposición con lo encontrado por Juannete y colaboradores (67) donde reportaron que las concentraciones de plomo a partir de partículas suspendidas totales (PST) en centros de cuidado infantil fueron más bajas a las reportadas en cercanías a estos centros considerando otras fuentes de emisión de plomo como la edad de los edificios lo que influye en la presencia de paredes con pintura con compuestos de plomo. Lo anterior posiblemente explicado por el alcance geográfico que se le dio al presente estudio donde se logró una representatividad por cada localidad de la ciudad, así como el número de muestras recolectadas para el análisis.

Con el fin de poder estimar la exposición poblacional, se debe entender el concepto de dosis, la cual tiene diferentes mediciones. Una de ellas es la potencial, siendo la cantidad

de sustancia que entra en contacto con el organismo por cualquiera de sus vías, dependiendo de la concentración, duración y frecuencia de la exposición (68). El presente trabajo permitió estimar esta dosis potencial con base en las diferentes mediciones realizadas en una muestra de instituciones educativas de carácter público, en salones donde se encontraban niños entre 6 y 12 años de edad, concluyendo que la dosis potencial es directamente proporcional a los niveles medidos. Las localidades donde se encontró mayor concentración de plomo (mayor a 10 ng/m^3) suspendido en el aire fueron Chapinero, San Cristóbal, Usme, Tunjuelito, Bosa, Kennedy, Fontibón, Los Mártires, y Ciudad Bolívar donde también se presentaron mayores dosis potenciales de exposición.

Lo anterior coincide geográficamente en población de tres localidades a las que se les reportó en Bogotá en el 2012 (24) mayores niveles de plomo en sangre como lo son San Cristóbal, Kennedy y Usme.

7. Conclusiones y Recomendaciones

7.1 Conclusiones

Para la determinación de la exposición a plomo suspendido en el aire en ambientes escolares de niños entre 6-12 años en Bogotá, se realizó la definición de zonas diferenciales de estudio a través de la metodología de evaluación acumulada de riesgo, la cual fue insumo para la cuantificación de las concentraciones de plomo en partículas suspendidas totales (PST) en las instituciones educativas con el fin de estimar la dosis potencial de exposición en niños entre 6-12 años que asisten a estos colegios así como establecer el comportamiento de las concentraciones obtenidas con las zonas definidas.

- Mediante la metodología de evaluación acumulada de riesgo, se identificaron las zonas que podrían presentar concentraciones de plomo suspendido en el aire con base en fuentes de información secundaria, determinando que el sur de la ciudad es el área que presenta una mayor proporción de zonas de mayor exposición, en comparación con el norte de la ciudad.
- Se cuantificaron las concentraciones de plomo en el material particulado suspendido en el aire en 38 ambientes escolares de las zonas de riesgo establecidas en Bogotá, encontrando que para el caso de las partículas suspendidas totales (PST) se supera la norma diaria nacional en la institución

educativa localizada en la zona definida de mayor exposición en la localidad de Ciudad Bolívar. En cuanto a las concentraciones de plomo encontradas, no se supera la norma establecida a nivel nacional en todos los puntos de muestreo. Sin embargo, se evidencia que en la zona sur de la ciudad, especialmente en la localidad de Bosa, se presentan concentraciones mayores de plomo que en el norte de la ciudad, lo cual es consistente con los hallazgos obtenidos por medio de la evaluación acumulada de riesgo (EAR).

- Se estimó la dosis de exposición al plomo suspendido en el aire de los estudiantes que permanecen en los salones de las instituciones educativas donde se realizó el muestreo, encontrando que la dosis obtenida es dependiente de la concentración a la que están expuestos. Para el grupo de edad de 6-11 años, la dosis varió entre 0.001 a 5,4 ng/kg al día, mientras que para el grupo de edad de 11-16 años varió entre 0.001 a 3,2 ng/kg al día, abarcando estos resultados el rango de edad del estudio.
- Se encontraron correlaciones significativas entre la concentración de plomo suspendido en el aire de los ambientes escolares y las partículas suspendidas totales (PST) resultantes del muestreo intramural medidos en el presente trabajo, al igual que para el material particulado PM_{10} obtenido de la Red de Monitoreo de Calidad del aire de Bogotá para el mismo periodo en las dos zonas de riesgo definidas. Para el caso del $PM_{2.5}$, la significancia estadística solo se presentó en las zonas de alto riesgo, lo que quiere decir que a mayor concentración de partículas de $PM_{2.5}$ hay mayor probabilidad que se encuentre plomo en esta fracción.

7.2 Recomendaciones

- Fortalecer la metodología de evaluación acumulada de riesgo (EAR) incluyendo variables relacionadas con morbilidad y mortalidad asociada a la exposición a contaminantes del aire y a metales pesados.
- La Autoridad Ambiental debe contemplar en el actual monitoreo de calidad del aire la caracterización de plomo y otros metales en la ciudad, para tener un panorama que oriente las acciones de vigilancia y control a las diferentes fuentes de emisión

conforme al protocolo de monitoreo y seguimiento de la calidad del aire en Colombia (46)

- La autoridad de salud debe fortalecer los actuales esquemas de vigilancia epidemiológica complementándolos con nuevas estrategias para la detección de casos probables de intoxicación crónica por metales pesados.
- Las entidades pertenecientes a los sectores Hábitat, Educación, Movilidad, Ambiente y Salud deben trabajar de manera coordinada, con el fin de plantear acciones para mitigar las posibles fuentes de emisión relacionadas con el material particulado (fino y grueso) y plomo.
- Estudios futuros deberán explorar las condiciones de informalidad en el entorno de los colegios ya que pueden estar relacionados con fuentes de emisión de plomo y otros contaminantes no explorados.
- Las autoridades de Ambiente y Salud deben avanzar en establecer parámetros a nivel intramural de manera que se tenga un punto de comparación con los niveles presentes en la actualidad en la ciudad de manera que fortalezca futuros estudios en la materia.

8. Bibliografía

1. **Organización Panamericana de la Salud.** Descriptores de ciencias de la salud. *Biblioteca virtual en salud.* [En línea] [Citado el: 20 de Mayo de 2017.] <http://decs.bvs.br/E/homepagee.htm>.
2. **National Library of Medicine.** Medical Subject Headings 2017. *National Library of Medicine.* [En línea] [Citado el: 20 de Mayo de 2017.] <https://meshb.nlm.nih.gov/search>.
3. **Secretaría Distrital de Salud de Bogotá.** *Protocolo para la Vigilancia epidemiológica, Ambiental y Sanitaria de la exposición a contaminación del aire en Bogotá.* Bogotá : s.n., 2013.
4. **Bautista Vanegas, Luisa Fernanda.** *Evaluación de las características físicas y químicas del Material Particulado en Bogotá.* Universidad de Los Andes. Bogotá : s.n., 2010.
5. **Organización Mundial de la Salud.** World Health Organization. [En línea] [Citado el: 27 de Mayo de 2012.] Prepared for World Water Day 2001. Reviewed by staff and experts in the Programme of Chemical Safety (PCS), and Water, Sanitation and Health Unit (WSH), World Health Organization (WHO), Geneva.. http://www.who.int/water_sanitation_health/diseases/lead/en/index.html.
6. **Jarosińska, Dorota, Biesiada, Marek y Muszyńska-Graca, Maja.** Environmental burden of disease due to lead in urban children from Silesia, Poland. [En línea] 2006. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969706000039>.
7. **Alexeeff, George, y otros.** A Screening Method for Assessing Cumulative Impacts. [En línea] 2012. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3315269/>. ISSN 1660-4601.
8. **Asociación Internacinal del Plomo.** International Lead Association. [En línea] 2016. [Citado el: 15 de Octubre de 2016.] <http://www.ila-lead.org/>.
9. **Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.** Baterías Plomo Acido. [En línea] 2016. [Citado el: 15 de Octubre de 2016.] <http://www.minambiente.gov.co/index.php/component/content/article/546-plantilla-asuntos-ambientales-y-sectorial-y-urbana-sin-galeria-42#resoluci%F3n>.
10. **Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente.** *Análisis del flujo del comercio y revisión de prácticas de manejo ambientalmente racionales de productos conteniendo cadmio, plomo y mercurio en América Latina y el Caribe.* [En línea] Diciembre de 2010. [Citado el: 3 de Noviembre de 2012.] http://www.unep.org/hazardoussubstances/Portals/9/Lead_Cadmium/docs/Trade_Reports/LAC/Trade_report_LAC_Spanish_and_English.pdf.
11. **Departamento Técnico Administrativo del Medio Ambiente.** *Diagnóstico ambiental sobre el manejo actual de baterías usadas generadas por el mantenimiento del parque automotor en Santa Fé de Bogotá.* Bogotá : s.n.

12. **Ojeda Burbano, Eduardo Orlando.** Evaluación de los Niveles de Contaminación por Plomo en el Aire a Partir de las Muestras Obtenidas en las Estaciones de Monitoreo de la Calidad de Aire en la Ciudad de Bogotá. [ed.] Facultad de Ingeniería. Bogotá : Universidad Nacional de Colombia. , Agosto de 1987.
13. **Secretaría Distrital de Ambiente.** [En línea] [Citado el: Tres de Octubre de 2012.] www.secretariadeambiente.gov.co.
14. **Universidad de Los Andes.** *Elementos técnicos del Plan Decenal de Descontaminación del Aire de Bogotá. Parte 1.* [ed.] Alcaldía Mayor de Bogotá. Bogotá : s.n., 2009. Vol. 1. ISBN 978-958-695-441-9.
15. **Rojas, Nestor Y. y Peñalosa, Nelson .** *Desagregación de inventarios de emisiones. Bogotá como caso de estudio.* Bogotá : Editorial Académica Española, 2012. 978-3-659-00796-5.
16. **Secretaría de Educación del Distrito.** Directorio unico de establecimientos educativos en Bogotá. [En línea] 25 de Octubre de 2017. <https://dueb.educacionbogota.edu.co/Dueb/varlrGenerarReportesPublicos.sed>.
17. —. *Caracterización del sector educativo en Bogota.* Bogotá : s.n., 2015. Boletín.
18. **Maesano, Isabella, y otros.** Poor air quality in classrooms related to asthma and rhinitis in primary school children of the French 6 Cities Study. *Bmj Journals.* [En línea] 21 de Marzo de 2012. <http://thorax.bmj.com/content/early/2012/03/20/thoraxjnl-2011-200391>. 2011-200391.
19. **Secretaría Distrital de Ambiente.** *Informe anual de calidad del aire de Bogotá.* Bogotá : s.n., 2015.
20. **Institute for health metrics and evaluation .** Global Burden of Disease (GBD). *Institute for health metrics and evaluation .* [En línea] [Citado el: 20 de Mayo de 2017.] <https://vizhub.healthdata.org/gbd-compare/>.
21. **Informe Global de la pintura de plomo (2016).** Ipen a toxics free future. [En línea] [Citado el: 20 de Mayo de 2017.] <http://www.ipen.org/sites/default/files/documents/IPEN-global-lead-report-final-Oct-2016-en.pdf>.
22. **Del Campo Diaz, Victor y Mendivil Martínez, Ainhoa.** *International Network for Information on Ventilation and Energy Performance.* Bilbao : s.n.
23. **Surkan, Pamela, y otros.** Neuropsychological funtion in children with blood lead levels < 10µg/dL. [En línea] Julio de 2007. [Citado el: 2017 de Noviembre de 16.] <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2276844/>.
24. **Osorio, Samuel, y otros.** Prevalencia de mercurio y plomo en población general de Bogotá 2012/2013. [En línea] 2014.
25. **Organización Mundial de la Salud .** Centro de prensa OMS. Contaminación del aire de interiores y salud. *Organización Mundial de la Salud.* [En línea] [Citado el: 20 de Mayo de 2017.] <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs292/es/>.
26. **U.S. National Library of Medicine.** TOXNET: Toxicology Data Network. *HSDB: Lead elemental.* [En línea] [Citado el: 5 de 11 de 2016.] <https://toxnet.nlm.nih.gov/cgi-bin/sis/search2/f?./temp/~szEi5B:1>.
27. **Toxicological Profile for Lead.** Agency for Toxic Substances and Disease Registry ATSDR. [En línea] 2007. [Citado el: 19 de Noviembre de 2016.] <https://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp13.pdf>.
28. **Gonzalez Leija, Juan.** Intoxicación por Plomo. [En línea] [Citado el: 27 de Noviembre de 2016.] <http://es.slideshare.net/juangonzalezleija/intoxicacin-por-plomo-6592665>.
29. **Mao, J.S., Dong, Jaime y Graedel, T.E.** Losses to the environment from the multilevel cycle of anthropogenic lead. [En línea] 2009. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S026974910900222X>.

30. **Servicio Geológico de Estados Unidos.** [En línea] 2016. [Citado el: 15 de Octubre de 2016.] <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/lead/index.html#myb>.
31. **Pope y Dockery, Dw.** Health effects of fine particulate air pollution: lines that connect. [En línea] Junio de 2006. <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10473289.2006.10464485>.
32. **Ministerio de Medio Ambiente del Gobierno de Chile.** Ministerio de Medio Ambiente del Gobierno de Chile. *Informe del estado del medio ambiente en Chile 2011.* [En línea] [Citado el: 20 de Mayo de 2017.] http://www.mma.gob.cl/1304/articles-52016_Capitulo_1.pdf.
33. **Ho, Lee, y otros.** Characterization of chemical species in PM_{2.5} and PM₁₀ aerosols in Hong Kong. [En línea] Enero de 2003. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S135223100200804X>. 1352-2310.
34. **U.S. National Library of Medicine.** TOXNET: Toxicology Data Network. *HSDB: Lead Compounds.* [En línea] [Citado el: 5 de 11 de 2016.] <https://toxnet.nlm.nih.gov/cgi-bin/sis/search2/f?./temp/~fv98FH:1>.
35. **Health Protection Agency UK.** Lead Toxicological overview. *Public Health England.* [En línea] 2012. [Citado el: 19 de Noviembre de 2016.] https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/337733/LEAD_Toxicological_overview_v3.pdf.
36. **Organización Mundial de la Salud -OMS-**. International Programme on Chemical Safety IPCS . [En línea] 1989. [Citado el: 19 de Noviembre de 2016.] <http://www.inchem.org/documents/ehc/ehc/ehc85.htm>.
37. **Valdivia Infantas, Melinda.** Intoxicación por Plomo. [En línea] 2005. [Citado el: 27 de Noviembre de 2016.] http://medicinainterna.org.pe/revista/revista_18_1_2005/Intoxicacion.pdf.
38. **Doull's, Casaret and.** *Toxicology. The Basic Science the Poisons.* [ed.] Curtis D. Department of Pharmacology, Toxicology, and Therapeutics. University of Kansas Medical Center Klaassen. Seventh Edition. Kansas City : Mc Graw Hill, 2008. ISBN 0-07-159351-9.
39. **Ramirez, Augusto.** El cuadro clínico de la intoxicación ocupacional por plomo. [En línea] 2005. <http://revistasinvestigacion.unmsm.edu.pe/index.php/anales/article/view/1352/1147>. ISSN 1025 - 5583.
40. **World Health Organization OMS.** *International Agency for Research on Cancer IARC.* [En línea] 2006. [Citado el: 27 de Noviembre de 2016.] <http://monographs.iarc.fr/ENG/Monographs/vol87/>. ISBN 92 832 1287 8/ ISSN 1017-1606.
41. **Rabinowrrz,, Michael B, Wetherill, George W y Kopple, Joel D.** Kinetic Analysis of Lead Metabolism in Healthy Humans. [En línea] Agosto de 1976. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC333178/pdf/jcinvest00644-0006.pdf>.
42. **ATSDR Agencia para sustancias tóxicas y el Registro de enfermedades.** Evaluación toxicológica y de vías de exposición. *ATSDR Agencia para sustancias tóxicas y el Registro de enfermedades.* [En línea] 14 de febrero de 2008. https://www.atsdr.cdc.gov/es/training/pha_professional2/module3/sv5.html.
43. **Tong, Shilu, Von Schirnding, Yasmin y Prapamontol, Tippawan .** Environmental lead exposure: a public health problem of global dimensions. [En línea] 2000. [http://www.who.int/bulletin/archives/78\(9\)1068.pdf](http://www.who.int/bulletin/archives/78(9)1068.pdf).
44. **O'Flaherty, Ellen J. , y otros.** The O'Flaherty model of lead kinetics: an evaluation using data from a lead smelter population. [En línea] 15 de 11 de 1999. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/10558927>.

45. **Organización Mundial de la Salud OMS.** Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre. [En línea] 2006. [Citado el: 22 de Mayo de 2017.] http://www.who.int/phe/health_topics/outdoorair/outdoorair_aqg/es/.
46. **Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.** Protocolo de monitoreo de la calidad del aire en Colombia. *Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM.* [En línea] 2008. [Citado el: 17 de Mayo de 2017.] <http://www.ideam.gov.co/documents/51310/527391/Protocolo+para+el+Monitoreo+y+seguimiento+de+la+calidad+del+aire.pdf/6b2f53c8-6a8d-4f3d-b210-011a45f3ee88>.
47. **Environmental Protection Agency EPA.** National Ambient Air Quality Standards (NAAQS) for Lead (Pb) . *U.S. Environmental Protection Agency.* [En línea] 10 de Octubre de 2016. [Citado el: 5 de Enero de 2017.] <https://www.epa.gov/lead-air-pollution/national-ambient-air-quality-standards-naaqs-lead-pb>.
48. **Organización Panamericana de la salud OPS.** *Guías y normas de calidad del aire en interiores.* págs. 13-31. http://www.bvsde.ops-oms.org/bvsci/e/fulltext/normas/2_1.pdf. OPS/CEPIS/PUB/00.50.
49. **Secretaría Distrital de Planeación.** Decreto 190 de 2004. Plan de ordenamiento territorial de Bogotá. Bogotá : s.n., 22 de Junio de 2004.
50. **Secretaría Distrital de Ambiente.** *Plan Decenal de Descontaminación del Aire para Bogotá.* Bogotá : s.n., 2009. pág. 323. ISBN 978-958-695-441-9.
51. **Health Effects Institute.** *Traffic-Related Air Pollution: A Critical Review of the Literature on Emissions, Exposure, and Health Effects.* Boston, Massachusetts : s.n., 2010.
52. **Universidad de Los Andes.** *Elementos técnicos del plan decenal de descontaminación de Bogotá. Parte 2. Inventario de fuentes fijas y móviles.* Bogotá : s.n., 2009. ISBN No. 978-958-695-442-6 .
53. **Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM.** Manual de claves tiempo, clima, agua. Anexo 2 Reglamento técnico OMM. [En línea] 2009. [Citado el: 22 de Mayo de 2017.] <http://www.ideam.gov.co/documents/24024/92354/OMM-306-V-I.1-ES.pdf/2bf76d98-73a8-40a2-ae39-8bf527a9a45b>.
54. **Consortio monitoreo tránsito y transporte urbano Bogotá 2011.** *Cartilla monitoreo tránsito y transporte urbano urbano Bogotá 2011.* Secretaría de Movilidad. 2011.
55. **Center for disease control and prevention CDC.** Metodo 0600. Particulates not otherwise regulated respirable . *Instituto Nacional para la Seguridad y Salud Ocupacional (NIOSH).* [En línea] [Citado el: 20 de Septiembre de 2016.] <https://www.cdc.gov/niosh/docs/2003-154/pdfs/0600.pdf>.
56. —. Center for disease control and prevention. *Instituto Nacional para la Seguridad y Salud Ocupacional (NIOSH).* [En línea] [Citado el: 20 de Septiembre de 2016.] <https://www.cdc.gov/niosh/docs/2003-154/pdfs/7105.pdf>.
57. **Burke, Tom.** *The Risk Sciences and Public Policy.* [En línea] 2005. [Citado el: 19 de Noviembre de 2016.]
58. **United States Environmental Protection Agency.** *Child-Specific Exposure Factors Handbook.* National Center for Environmental Assessment Office of Research and Development. Washington : s.n., 2008. EPA/600/R-06/096F.
59. **Ministerio de Salud y Protección Social.** Resolución 8430 de 1983. [En línea] 1993. [Citado el: 18 de Enero de 2015.] https://www.minsalud.gov.co/Normatividad_Nuevo/RESOLUCION%208430%20DE%201993.pdf.
60. **Instituto de Salud Carlos III.** Declaración de Helsinki de la AMM. Principios éticos para las investigaciones medicas en seres humanos. [En línea] 1964. [Citado el: 18 de

- Enero de 2015.] <http://www.isciii.es/ISCIII/es/contenidos/fd-investigacion/fd-evaluacion/fd-evaluacion-etica-investigacion/Declaracion-Helsinki-2013-Esp.pdf>.
61. **República de Colombia.** Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga CDMB. [En línea] 30 de Diciembre de 2005. [Citado el: 21 de Octubre de 2016.] <http://www.cdm.gov.co/web/ciudadano/centro-de-descargas/277-decreto-4741-de-2005-1/file>.
62. **deFur, Peter L, y otros.** Vulnerability as a Function of Individual and Group Resources in Cumulative. [En línea] 2007. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1867984/>.
63. **Ordoñez, Blanca , Romero, Lidia y Mora, Refugio.** Investigación epidemiológica sobre niveles de plomo en la población infantil y en el medio ambiente domiciliario de Ciudad Juárez Chihuahua , en relación con una fundición de El Paso, Texas. [En línea] 2003. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0036-36342003000800015. ISSN: 1606-7916.
64. **Conejo, Astrid y Gottesfeld, Perry.** *Niveles de plomo en interiores La Oroya-Peru.* Asociación Civil Labor, Occupational Knowledge International, CooperAcción Acción Solidaria para el Desarrollo. Lima-Peru : s.n., 2004.
65. **Franco, Juan Felipe, y otros.** Niveles de material particulado en colegios distritales ubicados en vías con alto tráfico vehicular en la ciudad de Bogotá: estudio piloto. [En línea] 2009. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0120-62302009000300010&lng=pt&nrm=.pf&tlng=es.
66. **Awang, Normah y Jamaluddin, Farhana.** Determination of Lead, Cations, and Anions concentration in indoor and outdoor air at the primary schools in Kuala Lumpur. [En línea] 2014. <https://www.hindawi.com/journals/jep/2014/408275/>. Article ID 408275.
67. **Juanette , John, y otros.** Our children in day care:reducing exposure to environmental lead and day care centers. [En línea] Abril de 2004. ISSN: 1996-7489.
68. **Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.** *Manual para la evaluación de riesgos ambientales.* [ed.] Instituto Nacional de Ecología. 2003.

**A. ANEXO A. Matriz de evaluación
acumulada de riesgo.**

B. ANEXO B. Certificado de calibración de bombas de monitoreo”.



Bogotá D.C., 11 de noviembre de 2015

**CERTIFICADO DE CALIBRACION
REGISTRO No. 2015-2017**

**EQUIPO : BOMBA DE MUESTREO
MODELO : ESCORT ELF
MARCA : MSA
SERIE N° : 3162
CLIENTE : HOSPITAL DEL SUR.**

Con la presente certificamos la calibración realizada al equipo de la referencia con base en el calibrador patrón de URIGO Ltda., modelo Optiflow S/N 431072, la bomba respondió a la calibración quedando seteada en :

Flujo de ajuste: 2.50 Lpm

Anexamos copia del Calibrador patrón utilizado

Calibrado por:

Alfonso Casas
Servicio Técnico



Bogotá D.C., 28 de Agosto de 2015

**CERTIFICADO DE CALIBRACION
REGISTRO No. 2015-1338**

**EQUIPO : BOMBA DE MUESTREO
MODELO : ESCORT ELF
MARCA : MSA
SERIE N° : 3373
CLIENTE : UNIVERSIDAD NACIONAL.**

Con la presente certificamos la calibración realizada al equipo de la referencia con base en el calibrador patrón de URIGO Ltda., modelo Optiflow S/N 431072, la bomba respondió a la calibración quedando seteada en :

Flujo de ajuste: 2.50 Lpm

Anexamos copia del Calibrador patrón utilizado

Calibrado por:

Alfonso Casas
Servicio Técnico

URIGO SAS NIT: 860.006.237-6
Bogotá: Cll 15 No. 33-18 PBX: (57-1) 5950095 FAX: (57-1) 3513619 Barrancabermeja: Carrera 22 No. 48-54 Tel. (57-7) 6226276.
Cartagena: Km 1 Vía Mamonal – Bellavista – Bloc Port Oficina 26 Tel. (57-5) 6670625 - 6671965. Resto del país: 01-800 122110 A.A.
4479

Lo escuchamos en: inconformidades@urigo.com Visite nuestro sitio web www.urigo.com



Bogotá D.C., 28 de Agosto de 2015

**CERTIFICADO DE CALIBRACION
REGISTRO No. 2015-1340**

**EQUIPO : BOMBA DE MUESTREO
MODELO : ESCORT ELF
MARCA : MSA
SERIE N° : 3374
CLIENTE : UNIVERSIDAD NACIONAL.**

Con la presente certificamos la calibración realizada al equipo de la referencia con base en el calibrador patrón de URIGO Ltda., modelo Optiflow S/N 431072, la bomba respondió a la calibración quedando seteada en :

Flujo de ajuste: 2.50 Lpm



Anexamos copia del Calibrador patrón utilizado

Calibrado por:

Alfonso Casas
Servicio Técnico

URIGO SAS NIT: 860.006.237-6
Bogotá: Cll 15 No. 33-18 PBX: (57-1) 5950095 FAX: (57-1) 3513619 Barrancabermeja: Carrera 22 No. 48-54 Tel. (57-7) 6226276.
Cartagena: Km 1 Vía Mamonal – Bellavista – Bloc Port Oficina 26 Tel. (57-5) 6670625 - 6671965. Resto del país: 01-800 122110 A.A.
4479

Lo escuchamos en: inconformidades@urigo.com Visite nuestro sitio web www.urigo.com



Bogotá D.C., 28 de Agosto de 2015

**CERTIFICADO DE CALIBRACION
REGISTRO No. 2015-1339**

**EQUIPO : BOMBA DE MUESTREO
MODELO : ESCORT ELF
MARCA : MSA
SERIE N° : 3396
CLIENTE : UNIVERSIDAD NACIONAL.**

Con la presente certificamos la calibración realizada al equipo de la referencia con base en el calibrador patrón de URIGO Ltda., modelo Optiflow S/N 431072, la bomba respondió a la calibración quedando seteada en :

Flujo de ajuste: 2.50 Lpm

Anexamos copia del Calibrador patrón utilizado

Calibrado por:

Alfonso Casas
Servicio Técnico

URIGO SAS NIT: 860.006.237-6
Bogotá: Cll 15 No. 33-18 PBX: (57-1) 5950095 FAX: (57-1) 3513619 Barrancabermeja: Carrera 22 No. 48-54 Tel. (57-7) 6226276.
Cartagena: Km 1 Vía Mamonal – Bellavista – Bloc Port Oficina 26 Tel. (57-5) 6670625 - 6671965. Resto del país: 01-800 122110 A.A.
4479

Lo escuchamos en: inconformidades@urigo.com Visite nuestro sitio web www.urigo.com



Bogotá D.C., 11 de noviembre de 2015

**CERTIFICADO DE CALIBRACION
REGISTRO No. 2015-2018**

**EQUIPO : BOMBA DE MUESTREO
MODELO : ESCORT ELF
MARCA : MSA
SERIE N° : 3636
CLIENTE : UNIVERSIDAD NACIONAL.**

Con la presente certificamos la calibración realizada al equipo de la referencia con base en el calibrador patrón de URIGO Ltda., modelo Optiflow S/N 431072, la bomba respondió a la calibración quedando seteada en :

Flujo de ajuste: 2.50 Lpm

Anexamos copia del Calibrador patrón utilizado

Calibrado por:

Alfonso Casas
Servicio Técnico

Flow Meter Calibration Certificate

The following record shows the accuracy of your digital flowmeter at tested flow rates compared to NIST calibrated standard TN 242118 TELEDYNE HBM-1A #1337, certified 02-Aug-2011, recertified by CMI 02-AUG-2016.

This flowmeter was tested in the condition that it was received for compliance to the stated absolute accuracy of 2 percent. Use within the flow range of 0.005 to 5.0 l/min.

CAL. DATE: 10/11/13 INT. UNIT #: 16246 SERIAL #: 43107A
 PRESSURE (mb): 953 TEMPERATURE (C): 21 REL. HUMIDITY (%): 17
 MAKE: 115A MODEL: 650 MAX FLOW: 5.0 l/min

AS RECEIVED ASSESSMENT: New Unit Calibration
 In Tolerance
 Out of Tolerance
 Inoperable

CALIBRATION FLOW (ml/min)	% ERROR AFTER CALIBRATION	% ERROR AS FOUND
49.66	-0.41	-0.63
497.34	-0.66	-0.88
2966.24	0.66	0.41

CALIBRATED BY: ta 

PROCEDURE: PC0903-13
 RECAL. DOE: 10/11/15

*Calibrated to the guide lines of ANSI / NCSL Z-540-1-1994 and ISO 9002
 Calibrated By California Integration Coordinators Inc.
 2929 Grandview, Placerville CA, 95667-4635
 Phone: (530) 626-6168
 Fax: (530) 626-7740
 www.cic-inc.com*

**C. ANEXO C. Certificado de
calibración balanza electrónica**



INFORME TÉCNICO

Comercialización de equipos, servicios y soluciones

INFORME TÉCNICO No. ST15001154 (anexo)

CLIENTE : UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
CONTACTO : SONIA GALLO MURCIA
EQUIPO : MICROBALANZA
MARCA : METTLER TOLEDO
MODELO : MX5
SERIE : 1128322584
FECHA : 30/03/2015

SOLICITUD/DIAGNOSTICO:

Pruebas de funcionamiento en rango bajo.

PROCEDIMIENTO.

Se realizan pruebas de funcionamiento con pesas patrón en rango desde 1mg hasta 5g.

PRUEBA DE SENSIBILIDAD

MASA CONVENSIONAL	PESO VISUALIZADO	DIFERENCIA
0,0010004	0,001002	0,000002
0,0020009	0,002002	0,000001
0,0050020	0,005003	0,000001
0,0100025	0,010001	-0,000001
0,0200013	0,020003	0,000002
0,0500030	0,050004	0,000001
0,1000045	0,100006	0,000002
0,2000052	0,200001	-0,000004
0,5000100	0,500010	0,000000
1,0000026	1,000005	0,000002
2,0000060	2,000005	-0,000001
5,0000010	5,000006	0,000005
	TOLERANCIA (+/-)	0,000035
	CUMPLE	SI



Código:
Versión:
Vigencia:
Paginas: 2 de 5

Se conecta equipo a software de servicio, se realizan pruebas obteniendo los siguientes datos:

Service Report	Friday, March 27, 2015
Instrument Info	
Type	MX5
TDNR	3.9.16.261.52
Serial Number	1128322584
SW-Version-Balance	3.22
Last Service	Friday, March 27, 2015
Battery Exp. Date	Sunday, March 27, 2016
Service Counter	1
Sys. Nr. Evaluation Unit	1128322584
Sys. Nr. Balance	1128322584
Std. Cal. Weight	5
Adjustments	
Datos de célula	Aceptar
Linearización de 5 puntos	Aceptar
Calibración estándar	Aceptar
Calibración de producción	Aceptar
Linearización de usuario	Aceptar
Calibración de usuario	Aceptar



TEST DE SENSIBILIDAD EN 1mg Y 5mg

Sensitivity Test

Reference Weight	Without Reference Weight	With Reference Weight	Diferencia	Deviation
1.0004 mg	0.000 mg	1.003 mg	1.003	0.003
Sensitivity Offset	0.003			
Specification	0.035			
Test Result	Bien			

Sensitivity Test

Reference Weight	Without Reference Weight	With Reference Weight	Diferencia	Deviation
5.002 mg	0.000 mg	5.001 mg	5.001	-0.001
Sensitivity Offset	0.001			
Specification	0.035			
Test Result	Bien			

TEST DE REPETIBILIDAD CON PESA INTERNA

Internal Repeatability Test

Start Delay	0 min
No. of preweighings	1
No. of weights	1
No. of measurements	5
No. of series	1
Stabilization time	4 sec
Customer	Mettler-Toledo AG
Remarks	

Series 1

Date 27.03.2015

Time 15:32



Código:
Versión:
Vigencia:
Paginas: 4 de 5

Nr.	Without Weight	With Weight	1st Diff. 2nd Diff	Diferencia
1	0.001			
2		2501.288	2501.287 mg	
3	0.000		2501.288 mg	2501.2880 mg
4		2501.285	2501.285 mg	
5	0.000		2501.285 mg	2501.2850 mg
6		2501.285	2501.285 mg	
7	0.000		2501.285 mg	2501.2850 mg
8		2501.286	2501.286 mg	
9	0.000		2501.286 mg	2501.2860 mg
10		2501.285	2501.285 mg	
11	0.000		2501.285 mg	2501.2850 mg
Mean (with weight)		2501.2858 mg		
Std.Dev. (with weight)		0.0012 mg		
Mean (without weight)		0.0002 mg		
Std.Dev. (without weight)		0.0004 mg		
Mean (difference)		2501.2858 mg		
Std.Dev. (difference)		0.0012 mg		

TEST DE REPETIBILIDAD CON PESA DE 50mg

Date 27.03.2015
Time 15:34

Repeatability Test

Nr.	Sin Pesas de control	Con Pesas de control	Desviación
1	0.000	50.003	50.003
2	0.000	50.003	50.003
3	0.000	50.002	50.002
4	0.000	50.003	50.003
5	0.000	50.004	50.004
6	0.000	50.004	50.004
7	0.000	50.003	50.003
8	0.000	50.003	50.003
9	0.000	50.004	50.004
10	0.000	50.003	50.003



n	10	
Mean		50.0032 mg
Min		50.002 mg
Max		50.004 mg
Std.Dev.		0.0006 mg
Specification		0.0009
Test Result	Bien	

RESULTADOS.

El equipo cumplió con las tolerancias dadas por el fabricante en todas las pruebas realizadas, tanto las realizadas el día 19 de marzo como las que se realizaron el día 27 de marzo.

Cordialmente,

JUAN HERNANDEZ
Coordinador técnico
Unidad Servicio Técnico
TEL: (57) (1) 4222300
www.vansolix.com

**D. ANEXO D. Certificado de
calibración calibrador de flujo**



Certificado de Calibración

CERTIFICATE OF CALIBRATION

Certificado No.: CF-431521-10767
Certificate number

Cliente: HOSPITAL DEL SUR EMPRESA SOCIAL DEL ESTADO
Customer

Dirección: Cra 78 No. 35-61 sur, Bogotá D.C., Distrito Capital
Address

Instrumento: CALIBRADOR DE FLUJOS PRIMARIO
Instrument

Fabricante: MSA
Manufacturer

Modelo: OPTIFLOW 660
Model

Número de serie: 431521
Serial number

Registro único entrada: 6202
RUE

Fecha de recepción: 2015-04-13
Date of receipt

Condición de ingreso: Sin anomalías visuales.
Entry condition

Fecha de calibración: 2015-04-16
Calibration date

Número de páginas del certificado incluyendo anexos: 2
Number of pages of this certificate and documents attached

Este certificado expresa fielmente el resultado de las mediciones realizadas. No podrá ser reproducido parcialmente, excepto cuando se haya obtenido previamente permiso por escrito del laboratorio que lo emite.
This certificate is an accurate record of the performed measurements results. This certificate must not be partially reproduced, except with prior written permission of the issuing laboratory.

El usuario es responsable de la calibración de sus instrumentos a intervalos apropiados.
The user is responsible for having his instruments calibrated at appropriated intervals.

Realizó:
Performed by

LUCIA VARGAS POSSO

CA-FT-019 V2

Aprobó:
Approved by

EDGAR ANDRÉS MARTÍNEZ ARIAS
Director Técnico Laboratorio de calibración

Fecha de emisión:
Issue Date

2015-04-21

Sello
Seal

lab&service
NIT 830.102 705-2

Página 1 de 2

8630

E. ANEXO E. Formato de custodia de filtros

SECRETARÍA DISTRITAL DE SALUD
 SUBSECRETARÍA DE SALUD PÚBLICA
 DIRECCIÓN DE EPIDEMIOLOGÍA, ANÁLISIS Y GESTIÓN DE POLÍTICAS EN SALUD COLECTIVA
 SUBDIRECCIÓN DE VIGILANCIA EN SALUD PÚBLICA
 LÍNEA DE AIRE, RUIDO Y RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA
 CADENA DE CUSTODIA DE FILTROS



Empresa Social del Estado: _____ Línea de Acción: _____ Tipo de Análisis: 1. Físicoquímico 2. Microbiológico 3. Físicoquímico y microbiológico 4. Toxicológico

Fecha de recepción de la muestra Hora de recepción de la muestra Localidad: _____

PUNTO DE MONITOREO		PESAJE								MONITOREO								
ID	NOMBRE DEL ESTABLECIMIENTO	CODIGO DEL FILTRO	FECHA PESAJE INICIAL (DDMM/AA)	PESO INICIAL (gr)	TEMPERATURA DE PESO INICIAL (°C)	HUMEDAD RELATIVA PESO INICIAL (%)	FECHA PESAJE FINAL (DDMM/AA)	PESO FINAL (gr)	TEMPERATURA PESO FINAL (°C)	HUMEDAD RELATIVA PESO FINAL (%)	FECHA Y HORA DE INSTALACION DEL FILTRO	TEMPERATURA INICIAL DEL MONITOREO	HUMEDAD RELATIVA INICIAL DEL MONITOREO	FECHA Y HORA DE RETIRO DEL FILTRO	TEMPERATURA FINAL DEL MONITOREO	HUMEDAD RELATIVA FINAL DEL MONITOREO	HORAS TOTALES DE MONITOREO	NUMERO DE RADICADO DE LABORATORIO DE SALUD PUBLICA
1																		
2																		
3																		
4																		
5																		
6																		
7																		
8																		
9																		
10																		

Total de filtros

FUNCIONARIO QUE ENTREGA LA MUESTRA FUNCIONARIO QUE RECIBE LA MUESTRA

Observaciones _____ Nombre _____ Nombre _____
 _____ Cargo _____ Cargo _____

F. ANEXO F. Protocolo de análisis de laboratorio

METODO EPA IO-3.1 SELECCION, PREPARACION Y EXTRACCION DEL MEDIO FILTRANTE

Esta metodología consiste en la selección del medio filtrante numeración, preparación y pesaje antes y después de las mediciones realizadas en campo, dicha metodología se aplicó para el monitoreo, donde se comenzó con el acondicionamiento inicial del medio filtrante garantizando condiciones de temperatura y humedad en un desecador antes que fueran pesados, ya fuera peso inicial o final. La selección del filtro dependió del propósito de la prueba, lo cual está especificado dentro del método 7105 NIOSH, que sugiere el uso de filtros de membrana de ésteres de celulosa, de 0.8µm de tamaño de poro de 37mm de diámetro; dichos filtros no contienen concentraciones de analitos del compuesto objetivo en este caso, plomo.

Procedimiento para la selección, preparación y extracción del medio filtrante.

Medios Filtrantes



Se emplearán filtros de membrana de ésteres de celulosa, de 0.8-µm de tamaño de poro, diámetro de 27mm.

En ninguno de los casos (Muestreo en microambiente) se debe exceder la carga del filtro de 2mg.



Condiciones de Muestreo

Control de Temperatura: Entre 15°C y 35°C con una variación de $\pm 2^\circ\text{C}$.

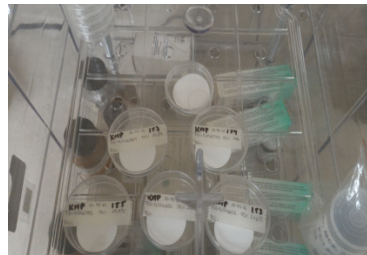
Control de Humedad. Deben estar a una humedad relativa menor a 50% (Manteniéndola constante $\pm 5\%$).

Identificación del filtro: Se hará según codificación estandarizada.

Prelistamiento

Inspección visual del filtro: Inicialmente se deberá verificar si el filtro tiene orificios, material suelto, decoloración, falta de uniformidad u otro tipo de imperfecciones.

Retirar Humedad: Con el fin de retirar la humedad del filtro, este debe permanecer dentro de un desecador durante 24 horas.



Identificación y codificación del filtro: Luego del pesaje inicial del filtro se asignara un código a cada uno para identificar la muestra; este código contiene cuatro secciones y dependerá de la localidad donde se realice, la clasificación de exposición previamente definida y un número consecutivo para la localidad como se describe a continuación conforme a las tres primeras iniciales de la localidad:

- Usaquén: USA
- Chapinero: CHA
- Santa Fe: SFE
- Mártires: MAR
- Candelaria CAN
- San Cristóbal: SCR
- Usme: USM
- Tunjuelito: TUN
- Bosa: BOS
- Kennedy: KEN
- Puente Aranda: PAR
- Fontibón: FON

- Engativá: ENG
- Suba: SUB
- Rafael Uribe: RUU
- Antonio Nariño: ANA
- Ciudad Bolívar: CBO

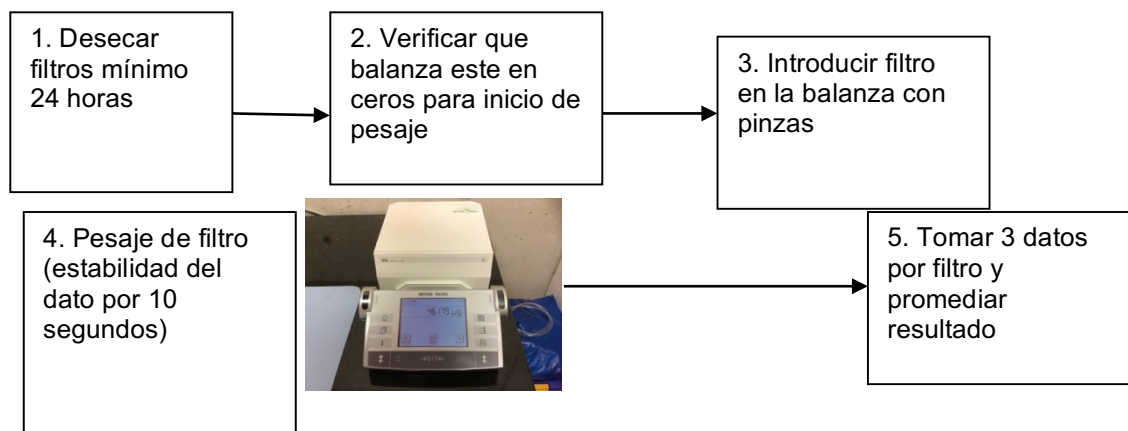
Posteriormente se identificara en el código el tipo de exposición del punto a monitorear de la siguiente manera:

- Mayor Exposición: MAE
- Menor Exposición: MEE

Por último se asignara un número consecutivo teniendo en cuenta la localidad

Pesaje del filtro: El filtro debe ser pesado antes de ser usado con el fin de obtener la masa inicial para poder comparar el valor después del monitoreo y por diferencia de pesos obtener la concentración de material particulado captado. La manipulación del filtro debe realizarse con guantes y pinzas para no contaminar el medio filtrante.

Antes de realizar el pesaje se debe verificar si la balanza se encuentra calibrada. Llevar a la balanza y registrar el valor obtenido en los formatos establecidos (Peso Iniciales y finales).



METODO NIOSH 0600: PARTICULAS SIN OTRA REGULACION, RESPIRABLES.

Esta metodología describe el procedimiento para el muestreo de partículas respirables. Para este tipo de muestreo se utilizaron 5 bombas de muestreo personal y filtros de membrana de ésteres de celulosa, de $0.8\mu\text{m}$ de tamaño de poro de 37mm de diámetro.

Procedimiento para partículas respirables, con bombas de muestreo personal.Partes y Descripción del Equipo

Equipo para muestreo personal de partículas, el cual tiene una capacidad de muestreo de hasta 2.5L/min.

Deben seguirse los siguientes pasos antes de utilizar el equipo.

- Carga de la batería.
- Calibración.
- Conectar el cabezal de muestreo.
- Verificar el caudal de muestreo.
- Colocar el filtro en el porta filtro.
- Fijar el periodo de medición.

Condiciones de Operación del Equipo

Luego de revisar la carga de batería, calibración y conectar el cabezal de muestreo, se debe verificar el caudal de funcionamiento de 2,5 L/min y colocar el filtro en el porta filtro ubicándolo en el cabezal del equipo, luego se fija el periodo de medición, presionando el botón de aceptar para dar encendido a la bomba.

Tiempo: 24 Horas en 3 semanas de muestreo

Caudal requerido: 2.5 L/min \pm 5%

Ubicación: Se tratará de garantizar que el sitio donde se ubique el equipo no ese en contacto con otras personas

Se debe tener en cuenta que se deben realizar blancos de la muestra, los cuales serán sometidos a las mismas manipulaciones que las muestras.



Debido al funcionamiento continuo que tiene el equipo se recomienda realizar calibración 1 vez por semana, con el fin de garantizar el caudal de muestreo.

Una vez en el punto de monitoreo se deben revisar y registrar las siguientes condiciones de operación del equipo: Corriente eléctrica, temperatura, humedad, presión, hora de muestreo (Debe ser a la misma hora), codificación del filtro y condiciones generales del día de muestreo.

Instalación del filtro: Después de verificadas las condiciones de operación del equipo se procede a instalar el filtro de la siguiente forma:

- Abrir el cabezal de muestreo.
- Colocar el porta filtros dentro del cabezal, instalándolo a la bomba.
- Se programan las condiciones de muestreo.
- Se procede a dar inicio al arranque de la bomba.
- Se registra en el formato las condiciones iniciales de muestreo.
- Posterior al muestreo, se verifican y registran las condiciones finales de monitoreo dentro de los formatos establecidos.
- Se retira el porta filtros colocándolo dentro de la nevera, para el transporte de la muestra al laboratorio de salud pública de la Secretaría Distrital de Salud.

ANÁLISIS DE LABORATORIO DE MATERIAL PARTICULADO

Posterior al muestreo se debe realizar nuevamente el acondicionamiento del filtro en el desecador y registrar el peso final del filtro.

Se recomienda realizar repeticiones en el pesaje de los filtros para garantizar la exactitud en el peso inicial y final del filtro (cinco veces por muestra).

Para continuar con la extracción de plomo en las muestras recolectadas continuar con el procedimiento establecido en el método 7105 de la NIOSH



METODO 7105 NIOSH, DETERMINACION DE PLOMO POR METODO DE HORNO DE GRAFITO.

Este es un método específico de determinación de plomo en aire ambiente, mediante espectrofotometría, el cual se apoya en los métodos descritos en los numerales anteriores. Dicho método involucra la preparación de las soluciones ácidas, la extracción de plomo de las muestras de material particulado, realizando los acondicionamientos al medio filtrante, lavado de material y lecturas en el espectrofotómetro, tomando como base un patrón de plomo, diluciones de la misma y de esta manera determinar la concentración de plomo en microambientes.

Procedimiento para extracción y determinación de Plomo

Materiales e Insumos

Lavado de Material

- Solución jabonosa
- Agua desionizada
- Ácido nítrico 50%
- Toallas de papel

Lavado de material (Vidrio)

- Solución acida (Ácido clorhídrico y ácido nítrico)
- Agua desionizada

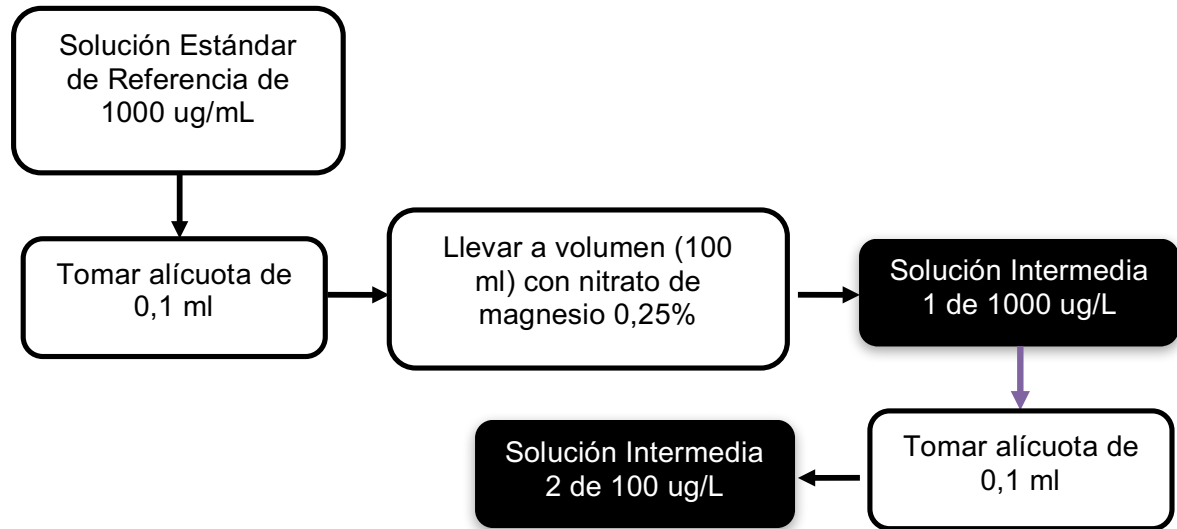
Extracción de plomo

- Ácido nítrico (HNO₃), concentrado.
- Agua
- Ácido clorhídrico HCl
- Solución patrón de plomo
- Acetileno
- Agua desionizada
- Beakers
- Frascos volumétricos
- Pipetas volumétricas
- Botellas de polietileno

Realizar el lavado de material siempre antes de su uso.

Los vasos de precipitado, matraces, pipetas y demás instrumentos de cristal se deberán lavar con ácido nítrico concentrado para su utilización y garantizar que los materiales queden libres de partículas y residuos de plomo. El ácido nítrico concentrado es un irritante y puede quemar la piel. Realice todas las digestiones en una campana de humos. El peróxido de hidrógeno es un agente oxidante fuerte, un fuerte irritante y corrosivo a la piel. Use guantes y protección ocular.



Preparación de los estándares de calibración

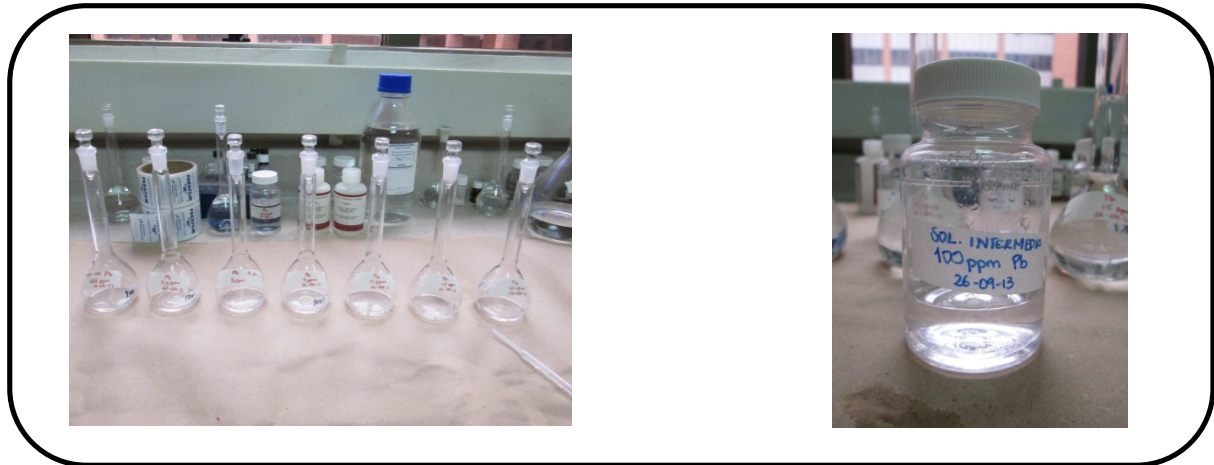
A partir de la Solución Intermedia 2 se realizan las diluciones tal y como se muestra en la siguiente tabla:

Preparación de los estándares de calibración para plomo.

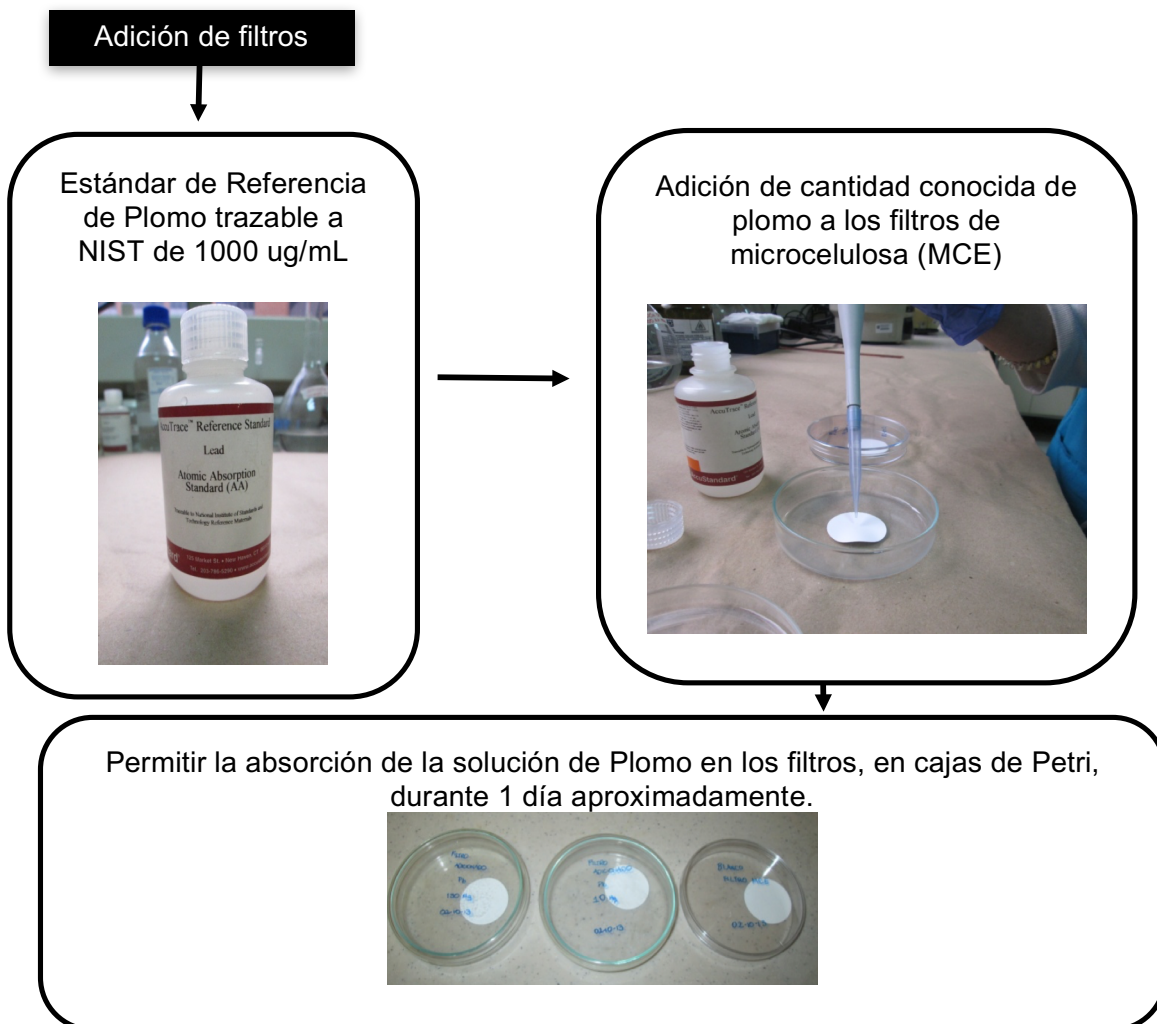
Soluciones para la calibración	Concentración declarada de cada estándar de calibración (ug/L)	Volumen de Solución Intermedia de Plomo para cada estándar (mL)	Volumen de Dilución (mL)	Diluyente
Blanco	0	0	50	Nitrato de magnesio 0,25%
Estándar 1	1,0	0,5	50	Nitrato de magnesio 0,25%
Estándar 2	2,0	1,0	50	Nitrato de magnesio 0,25%
Estándar 3	2,5	1,25	50	Nitrato de magnesio 0,25%
Estándar 4	5,0	2,5	50	Nitrato de magnesio 0,25%
Estándar 5	10,0	5,0	50	Nitrato de magnesio 0,25%
Estándar 6	20,0	10,0	50	Nitrato de magnesio 0,25%

Fuente: Laboratorio de Salud Pública Secretaría Distrital de Salud de Bogotá

Los estándares de calibración deben ser preparados en nitrato de magnesio 0,25% y en balones aforados de 50 ml, limpios y secos. Se adicionan las cantidades de solución y diluyente expresadas en la anterior tabla

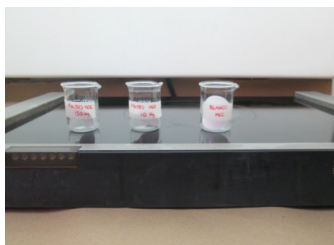


Fuente: Laboratorio de Salud Publica Secretaría Distrital de Salud de Bogotá



Digestión de filtros

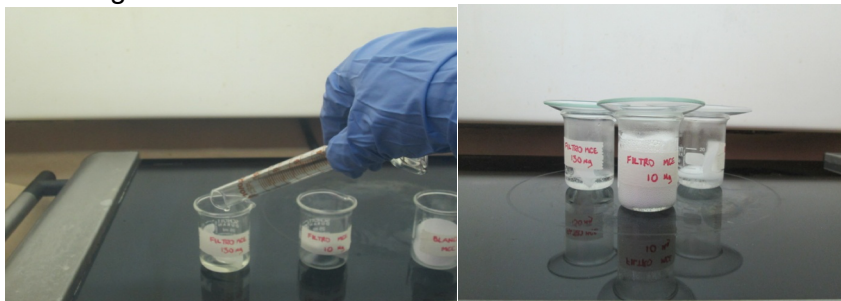
Los vasos se colocan sobre una plancha de calentamiento



Reactivos para digestión ácida: Ácido Nítrico Suprapur 65% y Peróxido de Hidrógeno 30%

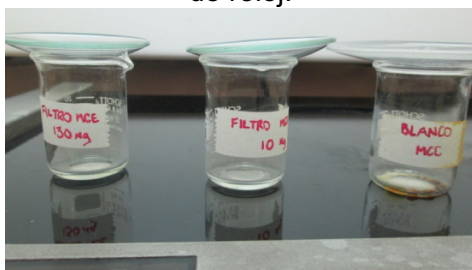


Se adicionan 1 ml de ácido nítrico concentrado suprapur y 0,7 ml de peróxido de hidrógeno al 30%.

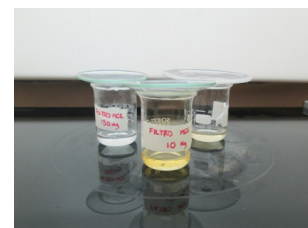


Permitir la evaporación de la solución, hasta obtener un remanente de la mitad del volumen inicial, y suspender el calentamiento.

Permitir que la solución alcance la temperatura ambiente, sin retirar el vidrio de reloj.

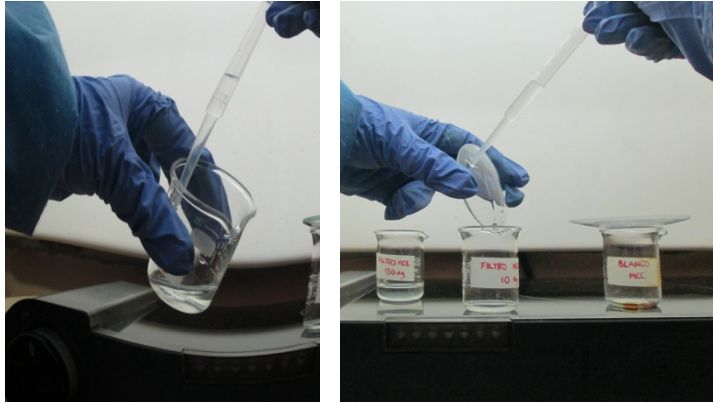


Los filtros, en contacto con los reactivos de digestión, son calentados a, aproximadamente, 140°C para lograr la digestión del filtro evitando que la solución tome un color amarillo.



Lavar las paredes del vaso y el vidrio de reloj con 2 ml de ácido nítrico al 5%.

Retirar el vidrio de reloj.

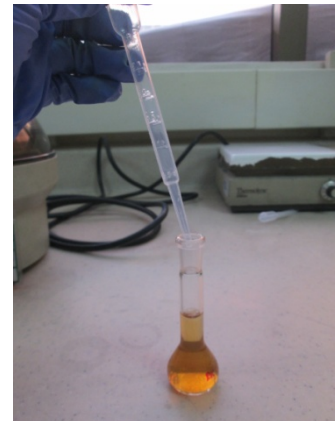


Nuevamente, calentar las muestras a 140°C y permitir que las soluciones evaporen hasta tener un remanente de, aproximadamente, 2ml.

Disolver el remanente con agua desionizada.

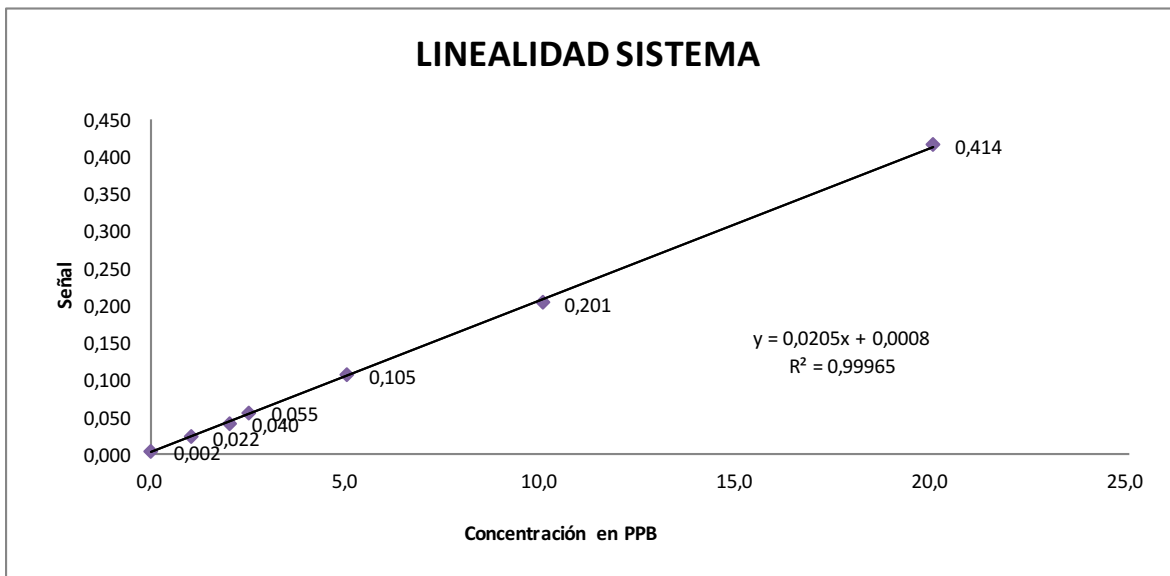


Transferir las muestras cuantitativamente a un balón de 10 ml, y completar a volumen con agua desionizada.

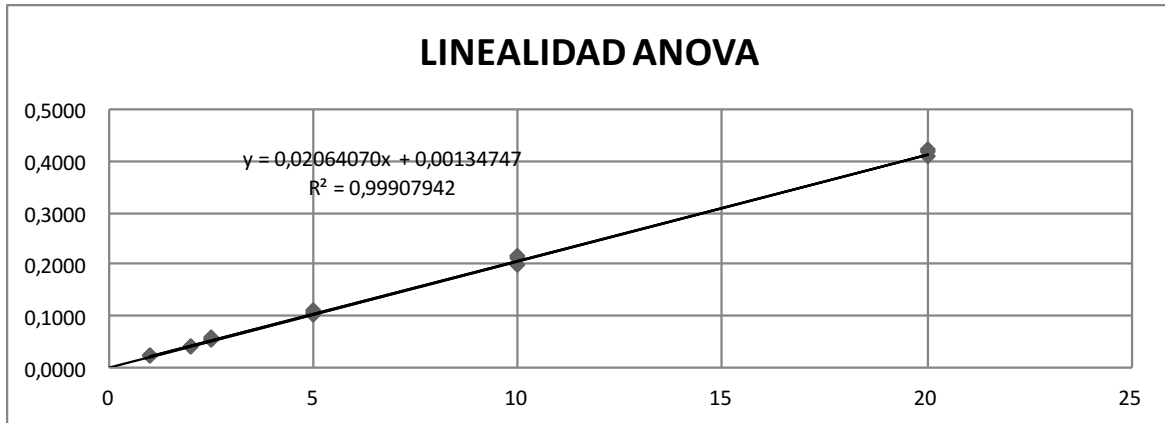


Linealidad

LINEALIDAD PLOMO										
ESTÁNDAR [µg/L]	SEÑAL-ABSORBANCIA					Promedio	s	CV %	Y calculado	Residuos
	CURVA 1	CURVA 2	CURVA 3	CURVA 4	CURVA 5					
0,0	0,0018	0,0019	0,0020	0,0016	0,0018	0,002	0,0001	8,150	0,0008	0,0010
1	0,0203	0,0215	0,0221	0,0219	0,0230	0,022	0,0010	4,521	0,0213	0,0005
2	0,0380	0,0403	0,0398	0,0395	0,0418	0,040	0,0014	3,445	0,0418	-0,0019
2,5	0,0550	0,0570	0,0525	0,0539	0,0551	0,055	0,0017	3,034	0,05205	0,0027
5	0,1028	0,1043	0,1046	0,1035	0,1081	0,105	0,0020	1,957	0,1033	0,0014
10	0,1994	0,2026	0,1985	0,2035	0,2018	0,201	0,0021	1,058	0,2058	-0,0046
20	0,4062	0,4142	0,4194	0,4145	0,4156	0,414	0,0048	1,164	0,4108	0,0032



Fuente. Laboratorio Salud Pública. Secretaría Distrital de Salud.



Fuente. Laboratorio Salud Pública. Secretaría Distrital de Salud.

Los estadísticos del método analítico indican una respuesta instrumental adecuada y estadísticamente válida para el análisis de plomo en material particulado recolectado en filtros de celulosa. La variabilidad de los datos es aceptable teniendo en cuenta que el rango lineal de trabajo es del orden de las partes por billón, el análisis de los residuos muestran homocedasticidad y ausencia de patrones evidentes de comportamiento de la curva, lo cual indica que las variables observadas están bajo control. Adicionalmente, el análisis de varianza para las variables dependiente e independiente muestran que la regresión lineal es estadísticamente significativa.

G. ANEXO G. Valores recomendados para cálculo de la dosis de exposición

Table 6-1. Recommended Long-Term Exposure (More Than 30 Days) Values for Inhalation (Males and Females Combined).					
Age Group	Mean m ³ /day	Sources Used for Means	95 th Percentile m ³ /day	Sources Used for 95 th Percentiles	Multiple Percentiles
Birth to <1 month	3.6	a	7.1	a	
1 to <3 months	- ^b	-	-	-	
3 to <6 months	4.1	a,c	6.1	a,c	
6 to <12 months	5.4	a,c	8.1	a,c	
1 to <2 years	8.0	a,c,d,e	12.8	a,c,d	See Tables 6-5 through 6-11 and 6-16
2 to <3 years	9.5	a,d,e	15.9	a,d	
3 to <6 years	10.9	a,d,e	16.2	a,d	
6 to <11 years	12.4	a,d,e	18.7	a,d	
11 to <16 years	15.1	a,d,e	23.5	a,d	
16 to <21 years	16.5	a,d,e	27.6	a,d	
^a	Arcus-Arth and Blaisdell, 2007.				
^b	No data for this age group.				
^c	Brochu et al., 2006.				
^d	U.S. EPA, 2006.				
^e	Stifelman, 2007.				
Note:	Some 95 th percentile values may be unusually high, and may not be representative of the average child.				

Fuente: (58)

H. ANEXO H. Comportamiento territorial de fuentes fijas según evaluación acumulada de riesgo por exposición a la contaminación del aire por material particulado y plomo en Bogotá

I. ANEXO I. Comportamiento territorial de los combustibles empleados por fuentes fijas según evaluación acumulada de riesgo por exposición a contaminación del aire por material particulado y plomo en Bogotá.

J. ANEXO J. Comportamiento territorial de la calidad del aire según evaluación acumulada de riesgo por exposición a contaminación del aire por material particulado y plomo en Bogotá.

K. ANEXO K. Comportamiento territorial de la velocidad del viento según evaluación acumulada de riesgo por exposición a contaminación del aire por material particulado y plomo en Bogotá.

L. ANEXO L. Comportamiento territorial de la precipitación acumulada según evaluación acumulada de riesgo por exposición a contaminación del aire material particulado y plomo en Bogotá.

M. ANEXO M. Comportamiento territorial del flujo vehicular según evaluación acumulada de riesgo por exposición a contaminación del aire por material particulado y plomo en Bogotá.

N. ANEXO N. Comportamiento de las actividades económicas según evaluación acumulada de riesgo por exposición a contaminación del aire por material particulado y plomo en Bogotá.

O. ANEXO O. Comportamiento territorial de las condiciones socioeconómicas según evaluación acumulada de riesgo por exposición a contaminación del aire por material particulado y plomo en Bogotá.

P. ANEXO P. Evaluación acumulada de riesgo por exposición a la contaminación del aire por material particulado y plomo en las localidades ubicadas en el sur de Bogotá.

Q. ANEXO Q. Evaluación acumulada de riesgo por exposición a la contaminación del aire por material particulado y plomo en las localidades ubicadas en el suroccidente de Bogotá.

R. ANEXO R. Evaluación acumulada de riesgo por exposición a la contaminación del aire por material particulado y plomo en las localidades ubicadas en el centro y oriente de Bogotá.

S. ANEXO S. Evaluación acumulada de riesgo por exposición a la contaminación del aire por material particulado y plomo en las localidades ubicadas en el norte de Bogotá

