

UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA  
FACULTAD DE CIENCIAS  
ESCUELA DE QUÍMICA  
LICENCIATURA EN GEOQUÍMICA



**EVALUACIÓN GEOQUÍMICA AMBIENTAL DE METALES PESADOS  
(Pb, As y Cd) EN PARTICULADO ATMOSFÉRICO EN EL PUERTO DE  
LA GUAIRA**

Trabajo Especial de Grado  
presentado ante la ilustre  
Universidad Central de Venezuela  
por la **Br. Alejandra Carolina  
Valera Rodríguez** como requisito  
para optar al título de Licenciada  
en Geoquímica.

Caracas, Julio de 2025

# ACTA

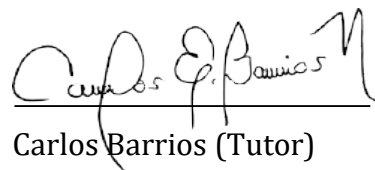
Los abajo firmantes, asignados por la Universidad Central de Venezuela, como integrantes del jurado examinador del Trabajo de Especial de Grado titulado: "**EVALUACIÓN GEOQUÍMICA AMBIENTAL DE METALES PESADOS (Pb, As y Cd) EN PARTICULADO ATMOSFÉRICO EN**

**EL PUERTO DE LA GUAIRA**" Presentado por la Br. Alejandra Valera, certificamos que este trabajo cumple con los requisitos exigidos por nuestra Magna Casa de Estudios para optar por el título de Licenciada en Geoquímica.



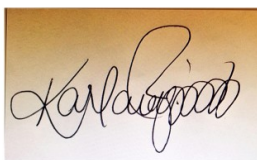
---

Katya Reategui (Tutor)



---

Carlos Barrios (Tutor)



---

Karla Pérez (Jurado)



---

Adolfo Giro'n (Jurado)

## **DEDICATORIA**

*A mí querida madre, Milena Rodríguez, por todo su amor  
y apoyo incondicional durante este camino.*

*A mis amados abuelos, Milena e Isaac, quienes desde el  
cielo guían mis pasos y me acompañan en todos mis logros .*

*A mis padrinos, Norma y Manuel, quienes con su  
confianza en mí me han impulsado a culminar esta etapa de mi  
vida.*

## **AGRADECIMIENTOS**

El camino transitado no ha sido sencillo, pero todo logro importante en la vida requiere sacrificios. Agradezco a cada una de las personas que de una forma u otra hicieron que esto fuese posible.

Agradezco a mi amada madre por estar siempre a mi lado apoyándome y dándome palabras de aliento cuando creía que ya no podía más. Sin ella esta investigación no hubiese sido posible. También a mis tíos, quienes siempre han creído en mi y me han apoyado de todas las maneras posibles.

A mis ángeles en el cielo, Milena, Isaac, Héctor y Ramiro, por iluminar cada uno de mis pasos durante este largo camino al éxito profesional.

A mis hermanas del alma Joseph y Kelly, por estar presente durante este recorrido y escuchar cada drama, molestia y llanto. A la hermana que me regalo la UCV, Madaly, gracias por cada sonrisa, traspasos y tristeza que vivimos juntas.

A José Antonio Rondón, por estar durante estos últimos años de la carrera a mi lado. Gracias por estar conmigo en mis momentos de risas, llantos y desesperación durante toda la investigación, solo nosotros sabemos cuánto sufrimos y sin ti nada de esto hubiese sido posible. Gracias por siempre creer en mí y demostrarme que sí podía lograrlo. Espero seguir disfrutando a tu lado el resto de mi vida. Gracias a tu familia por todo el apoyo que me han brindado también.

A mis amigos Jhonnathan, Viktor, Winderlin, Jainaldo, Javier, Rosnely. Gracias por todos los buenos momentos que vivimos, por escucharme en mis momentos de crisis y transformarlos en risas. También a Santiago, Mónica, Ana, Manuel, José Miguel, César y Bernard, y a todas esas personas que me brindaron su amistad durante esta etapa.

A los profesores, Santiago, Jesús, Vannesa, Chaveli, Alessia, Alejandra, Elisa, Salvador y Guillermo, por todos sus conocimientos y guiarme a lo largo de la carrera. Especialmente a mis tutores Dra. Katya Reategui y Msc. Carlos Barrios, por enseñarme que puedo ser capaz de todo lo que me proponga y creer en mi para esta investigación.

Al Msc. Adolfo Girón por todo su apoyo y cada consejo durante este tiempo para poder llevar a cabo este proyecto.

A todo el cuerpo de Guardacostas en especial al Teniente Navío González, por apoyarnos durante todo el tiempo de muestreo.

Gracias a mi querida casa de estudio la Universidad Central de Venezuela, la Facultad de Ciencias y el Instituto Ciencias de la Tierra, por permitirme formarme como profesional en sus aulas. Nunca olvidaré todos los momentos lindos y no tan lindos vividos dentro de sus instalaciones. Hoy más que nunca entiendo que las somos la casa que vence las sombras.

Finalmente, agradecer al Mincyt por financiar este proyecto de investigación a través del proyecto FONACIT N° 2023PGP241 y al INEA por su colaboración como contraparte del mismo.

## RESUMEN

Esta investigación consistió en estudiar los niveles de partículas totales suspendidas y de metales pesados (Pb, As, Cd) asociados a estas, producto de las actividades desarrolladas en el Puerto de La Guaira y cercanas a esta localización. Para ello, se capturaron 20 muestras en 58 días de monitoreo y por medio de gravimetría se obtuvo la concentración de partículas. Por otra parte, para la concentración de los metales pesados (Pb, As, Cd) se tomó una tira de 20,00 cm de largo x 2,54 cm de ancho y se sometió a un proceso de digestión ácida, usando 9mL de HCl y 3mL de HNO<sub>3</sub> concentrados. Posteriormente, la solución fue analizada por medio de absorción atómica.

Las PTS exhibieron una mediana de 76  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  el cual se encuentra dentro del rango de 75-200  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , permitiendo clasificar la zona de estudio como aire moderadamente contaminado según lo dicta el Decreto 638. En el caso de los metales se obtuvo como resultado una mediana de 0,006  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  para Pb, 0,104  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  para As y 0,008  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  para Cd. A su vez, las concentraciones fueron comparadas con la norma internacional de la Unión Europea, obteniendo que el aire en el Puerto de La Guaira está contaminado por arsénico y cadmio. Por su parte, los niveles de plomo se encuentran por debajo de su límite permitido (0,5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Además, las principales fuentes de emisión de partículas y As provienen de las actividades realizadas en el puerto y el Pb se relaciona con la quema de residuos que se realiza en el continente.

**Palabras claves:** calidad de aire, partículas totales suspendidas, metales pesado.

# INDICE

1.	INTRODUCCIÓN.....	1
2.	OBJETIVOS .....	3
	General .....	3
	Específicos.....	3
3.	MARCO TEÓRICO .....	4
	3.1 Línea base ambiental (LBA).....	4
	3.1.1 Línea base geoquímica ambiental.....	4
	3.1.2 Elaboración de una línea base ambiental.....	5
	3.2 Atmósfera.....	5
	3.2.1 Contaminación atmosférica .....	7
	3.3 Geoquímica de los metales pesados .....	14
	3.3.1 Plomo (Pb).....	14
	3.3.2 Cadmio (Cd) .....	15
	3.3.3 Arsénico (As).....	16
	3.4 Actividades portuarias que causan contaminación a nivel atmosférico.....	17
	3.5 Normativa nacional e internacional sobre calidad de aire .....	18
4.	ANTECEDENTES .....	21
	4.1 Nacionales .....	21
	4.2 Internacionales.....	22
5.	ZONA DE ESTUDIO.....	25
	5.1 Ubicación .....	25
	5.2 Clima .....	25
	5.3 Patrones de viento .....	26
6.	MARCO METODOLÓGICO.....	28

6.1 Etapa de pre campo.....	28
6.2 Etapa de campo.....	29
6.2.1 Calibración del muestreador.....	30
6.2.2 Captación de muestras.....	31
6.1.1 Acondicionamiento de filtros.....	32
6.1.2 Pesaje de filtros.....	33
6.3 Etapa de laboratorio.....	34
6.3.1 Determinación de PTS.....	34
6.3.2 Determinación de metales pesados (Pb, As, Cd).....	35
6.3.3 Tratamiento estadístico.....	39
7. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	41
7.1 Ubicación del punto de muestreo.....	41
7.2 Cuantificación de partículas totales suspendidas.....	43
7.3 Niveles de Pb, As y Cd asociados a las PTS.....	51
7.3.1 Plomo (Pb).....	53
7.3.2 Arsénico (As).....	55
7.3.3 Cadmio (Cd).....	57
7.4 Correlaciones entre metales y partículas totales suspendidas (PTS).....	59
7.5 Correlaciones entre metales.....	61
7.6 Aporte litológico.....	61
7.7 Tratamiento estadístico de los datos.....	62
7.8 Impacto ambiental.....	63
8. CONCLUSIONES.....	65
9. RECOMENDACIONES.....	66
10. BIBLIOGRAFÍA.....	67

11. APÉNDICE .....	77
--------------------	----

## INDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Estructura de la atmósfera, representación de la presión y la temperatura con la altura (Tomado de Orozco et al., 2004).....	6
<b>Figura 2:</b> Procesos de formación de partículas (Tomado de Pacheco, 2020).....	12
<b>Figura 3:</b> Nivel de ingreso de las partículas atmosféricas al sistema respiratorio humano en función del tamaño (Tomado de la EPA).....	13
<b>Figura 4:</b> Ubicación del Puerto de La Guaira (Elaborado en Google Earth, 2024).....	25
<b>Figura 5:</b> Climograma del estado La Guaira (1986-2015) (Tomado del INAMEH, s.f.).....	26
<b>Figura 6:</b> Rosa de los vientos para La Guaira (Tomado de Datos Climáticos y Meteorológicos Históricos Simulados Para la Guaira, s. f.).....	27
<b>Figura 7:</b> Muestreador de gran volumen, marca General Metal Works (GMW), Graseby. ....	29
<b>Figura 8:</b> Caseta del Hi Vol (Tomado de: Norma COVENIN 2060:2005).....	30
<b>Figura 9:</b> Unidad de calibración (Tomado de Norma COVENIN 2060:1996). ....	31
<b>Figura 10:</b> Proceso del cambio de filtros en el Puerto de La Guaira. ....	32
<b>Figura 11:</b> Pesaje del filtro en la balanza analítica. ....	33
<b>Figura 12:</b> Digestión ácida.....	36
<b>Figura 13:</b> Filtrado de muestra. ....	37
<b>Figura 14:</b> Muestras envasadas. ....	38
<b>Figura 15:</b> Ubicación del muestreador de alto volumen en el Puerto de La Guaira.(Elaborado en Google Earth, 2025).....	42
<b>Figura 16:</b> Muestreador de gran volumen instalado en el Puerto de La Guaira. ....	43
<b>Figura 17:</b> Filtro de coloración grisácea. ....	49
<b>Figura 18:</b> Filtro de coloración marrón.....	50
<b>Figura 19:</b> Barco descargando chatarra en el puerto. ....	51
<b>Figura 20:</b> Mapa Geológico desde-Punta Gorda a Camurí mostrando la litología asociada a la zona de estudio. Modificado de Urbani & Ostos (1989) y Singer & Rodríguez (1999). ....	62

## INDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1:</b> Límites de calidad del aire para el material particulado (Modificado de: OMS, 2005).....	18
<b>Tabla 2:</b> Clasificación de zonas de acuerdo con los rangos de concentraciones (PTS) (Modificado de: Art. 5. Decreto 638, 1995).....	19
<b>Tabla 3:</b> Límites de calidad del aire (Modificado de: Art. 5. Decreto 638, 1995).....	20
<b>Tabla 4:</b> Valores límite para la protección de la salud humana (Modificado de: DIRECTIVA (UE) 2024/2881 DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO. (2024). Sobre la calidad del aire ambiente y a una atmósfera más limpia en Europa). 20	
<b>Tabla 5:</b> Concentración de PTS en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ obtenidas en el Puerto de La Guaira .....	44
<b>Tabla 6:</b> Actividades observadas durante el monitoreo en el Puerto de La Guaira .....	46
<b>Tabla 7:</b> Concentración de Pb, As, Cd asociado a PTS en el Puerto de La Guaira .....	52
<b>Tabla 8:</b> Tratamiento estadístico de los datos. ....	63

## INDICE DE GRAFICOS

<b>Gráfico 1:</b> Concentraciones obtenidas de partículas totales suspendidas en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ captadas en el Puerto de La Guaira.....	45
<b>Gráfico 2:</b> Actividades del Puerto de La Guaira vs la concentración de PTS ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )..	48
<b>Gráfico 3:</b> Porcentaje de muestras que exceden el límite máximo permitido según el art. 3, decreto 638, considerando la actividad en la zona de estudio. <b>¡Error! Marcador no definido.</b>	
<b>Gráfico 4:</b> Correlación de concentración de PTS ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) vs precipitaciones (mm) en el Puerto de La Guaira. (Datos de precipitación tomados de Meteostat, 2024). ..... <b>¡Error! Marcador no definido.</b>	
<b>Gráfico 5:</b> Concentraciones obtenidas de Pb asociado a PTS en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en el Puerto de La Guaira. .... <b>¡Error! Marcador no definido.</b>	
<b>Gráfico 6:</b> Relación de la concentración de Pb con respecto a las actividades observadas en el Puerto de La Guaira.....	55
<b>Gráfico 7:</b> Concentraciones obtenidas de As asociado a PTS en el Puerto de La Guaira. ....	56
<b>Gráfico 8:</b> Relación entre la concentración de As con respecto a las actividades observadas en el Puerto de La Guaira.....	57
<b>Gráfico 9:</b> Concentraciones obtenidas de Cd asociado a PTS en el Puerto de La Guaira. ....	58
<b>Gráfico 10:</b> Relación de la concentración de Cd con respecto a las actividades observadas en el Puerto de La Guaira.....	59
<b>Gráfico 11:</b> Correlación de concentración de Pb vs PTS en el Puerto de La Guaira. .... <b>¡Error! Marcador no definido.</b>	
<b>Gráfico 12:</b> Relación de las concentraciones de Pb y PTS en días sin actividad y quema de residuos.....	60



## 1. INTRODUCCIÓN

La atmósfera es considerada un sistema dinámico, debido a que está en constante interacción con los océanos, los organismos vivos y las plantas. Esta se encuentra dividida en capas: troposfera, estratosfera, mesosfera, termosfera y exosfera (Domínguez, 2004) y su composición es principalmente nitrógeno, oxígeno, argón, dióxido de carbono y pequeñas proporciones de otros gases. Además, contiene vapor de agua, un componente importante para el ciclo hidrológico y el desarrollo de diversas actividades en el sistema. Asimismo, hay muchos materiales que son emitidos a la atmósfera por diferentes fuentes en forma de partículas (Camilloni y Vera, 2012).

Ahora bien, se puede encontrar material particulado tanto de origen natural como antropogénico (Seinfeld y Pandis, 2006). Estas partículas atmosféricas tanto líquidas como sólidas en suspensión, son determinantes para la calidad del aire y se pueden clasificar según su diámetro aerodinámico, origen y mecanismo de formación (Piña, 2011).

Las partículas atmosféricas tienen un aporte positivo en muchas de las actividades que se desarrollan en la atmósfera, tales como el balance radiactivo y el proceso de formación de las nubes (Penner *et al.*, 2001). Sin embargo, empiezan a ser tóxicas para la salud cuando estas se encuentran por encima del valor límite establecido por organismos nacionales o internacionales. Asimismo, el material particulado de menor tamaño suele ser el más nocivo para la salud, ya que puede ingresar con mayor facilidad al cuerpo humano logrando llegar hasta el torrente sanguíneo (OMS, 2024).

Por su parte, las partículas atmosféricas también pueden sorber metales pesados, tales como plomo (Pb), cadmio (Cd) y arsénico (As) (Piña, 2011). Estos metales suelen ser tóxicos y en algunos casos nocivos para los humanos; incluso cuando son inhalados en concentraciones bajas. Los metales pesados son elementos químicos de alta densidad y masa (Londoño *et al.*, 2016). Debido a sus propiedades, estos son persistentes; es decir, no pueden ser degradados, ni mediante procesos biológicos ni antropogénicos (Chávez *et al.*, 2017). Además, se consideran

contaminantes primarios, dado que provienen directamente de las fuentes de emisión, estipulado así por organizaciones internacionales como la OMS, la EPA y la Unión Europea (Velasco, 2005).

Los metales pesados más preocupantes cuando se trata de calidad de aire son: el mercurio, cadmio, arsénico y plomo. Todos ellos son producidos por efecto de la actividad antrópica, por ejemplo, la combustión de desechos industriales (Singh *et al.*, 2012). Además, la presencia de estos elementos en la atmósfera no solo amenaza la salud de los seres humanos, sino también influye en los animales y la vegetación (Londoño *et al.*, 2016).

En los puertos marítimos se tiene una gran emisión de partículas a la atmósfera provenientes de las actividades portuarias. Entre estas actividades podemos mencionar la movilización de barcos, carga y descarga de contenedores, así como el tráfico vehicular de la zona. Estas actividades utilizan diferentes tipos de combustibles, como la gasolina, fueloil y gasoil, las cuales generan emisiones de partículas a la atmósfera y de una gran variedad de metales pesados asociados a estas partículas. Por este motivo, existe a nivel mundial una creciente presión en los puertos para afrontar el deterioro de la calidad del aire que generan las actividades portuarias, a fin de proteger la salud de las personas y mitigar la contaminación del aire (Proyecto GFE-UNDP-IMO GloMEEP e IAPH, 2018).

Rodríguez *et al.* (2016), evaluaron la concentración de PTS proveniente de las actividades realizadas en el puerto de La Guaira, llevando a cabo un muestreo continuo de 21 días en 3 puntos diferentes (7 días por punto); obteniendo así una concentración promedio de  $111\mu\text{g}/\text{m}^3$ , concluyendo que el aire en esa zona está moderadamente contaminado por PTS porque encontró que estuvo dentro del intervalo  $75\text{-}200\mu\text{g}/\text{m}^3$  establecido en el Decreto N° 638. Sin embargo, se carece de detalle con respecto a la composición de este particulado atmosférico.

## 2. OBJETIVOS

### **General**

- Evaluación de metales y pesados (Pb, As y Cd) asociados a partículas totales suspendidas (PTS) en el Puerto de La Guaira.

### **Específicos**

- Evaluar la concentración de las partículas totales suspendidas presentes en la atmósfera del Puerto de La Guaira.
- Determinar las concentraciones de metales pesados (Pb, As y Cd) en las partículas totales suspendidas y las posibles fuentes.
- Comparar las concentraciones de los metales pesados (Pb, As y Cd) con los valores límites de normas nacionales e internacionales.

### **3. MARCO TEÓRICO**

En esta sección se presentan una serie de conceptos teóricos en los cuales se fundamenta este proyecto de investigación. Se discuten aspectos sobre el estudio de línea base, la contaminación atmosférica, la calidad del aire, las partículas atmosféricas y su clasificación. Culminando con la geoquímica de los metales pesados y las actividades portuarias que pueden causar contaminación atmosférica.

#### **3.1 Línea base ambiental (LBA)**

La LBA es definida como la determinación o medición de la calidad ambiental en la que se encuentra actualmente un área en específico (Nievas, 2013; Shoemaker, 2017). En pocas palabras, esta nos ayudará a contextualizar un panorama general sobre el medio preexistente (MINAM, 2018)

La línea base ambiental nos ayuda a medir el impacto y los cambios que pudieran ocurrir en nuestro medio ambiente en un futuro. Su importancia radica en poder establecer una fuente de información inicial de cómo se encuentra un área determinada, antes de ser sometida frente a una actividad que pudiese alterar las características actuales. Es indispensable que este tipo de estudios incluya, no solo las condiciones actuales, sino también todos los factores que pueden influir en los sistemas sociales y ambientales en un futuro (MINAM, 2018).

Los estudios de línea base suelen abarcar todos los factores que son relevantes para el entorno ambiental y social. Tales como el clima, la meteorología, la geomorfología, hidrografía, suelo, calidad de aire, ruido, los ecosistemas y las especies de flora y fauna terrestre y acuática que los conforman. Además de los factores económicos, culturales y antropológicos. La suma de todos estos factores permite obtener una base inicial para elaborar comparaciones en futuras evaluaciones o monitoreos, así como para diseñar estrategias para el control y seguimiento de estas mismas (MINAM, 2018).

##### ***3.1.1 Línea base geoquímica ambiental***

La línea base geoquímica se refiere a la abundancia natural de un elemento en un material en específico (suelo, roca, sedimentos o partículas) utilizando como

referencia una zona o conjunto de datos en específico, y este valor se puede expresar como un límite único para distinguir la anomalía y el fondo geoquímico (Salminen y Gregorauskiene, 2000).

Es común que se confunda la línea base geoquímica con el fondo geoquímico, sin embargo, existe diferencia entre ambos. La principal diferencia es que el fondo geoquímico solo refleja la concentración de elementos en materiales naturales dejando por fuera la influencia de la actividad antrópica. En cambio, la línea base contempla la influencia de actividades humanas y natural en la concentración de elementos (Chaffee *et al*, 1997; Chaffee y Carlson, 1998).

Las líneas base geoquímicas son importantes en la legislación ambiental, que establece límites para los metales pesados, bien sea en zonas contaminadas o en materiales superficiales, según definan las autoridades medio ambientales (Gregorauskiene y Kaduñas, 1997; Salminen and Tarvainen, 1997).

### **3.1.2 Elaboración de una línea base ambiental**

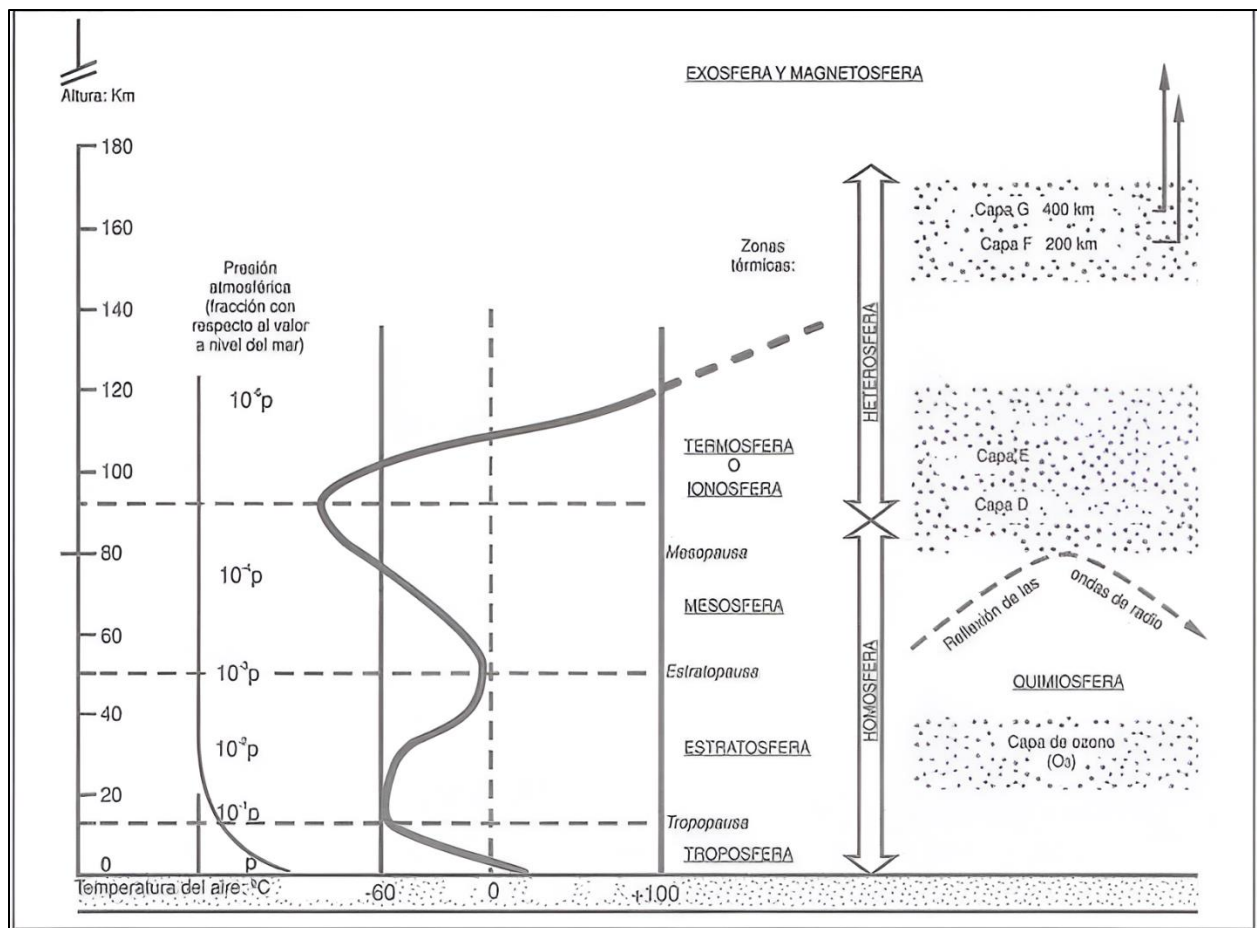
Para que un estudio de línea base ambiental se considere completo debe incluir una revisión de la información secundaria (informes, estadísticas, mapas y censos), descripción detallada de la información primaria (tesis, libros, artículos, encuestas y toma de muestras), delimitación de zona de estudios, objetivos a alcanzar, interpretación de los datos obtenidos, evaluación de las variables ambientales importantes para el estudio y su potencial sensibilidad frente a los impactos; por último, indicaciones sobre posibles limitaciones, incertidumbre en relación con la exactitud de los datos y análisis de costo (Moris y Therivel, 2009; Linares, 2021; MINAN, 2022).

## **3.2 Atmósfera**

La atmósfera es una capa gaseosa que envuelve al planeta tierra, consta con un espesor de aproximadamente 2000 km. Su composición es principalmente nitrógeno (78 %) y oxígeno (21 %), con pequeñas concentraciones de otros gases, como vapor de agua (0-4 %), dióxido de carbono (0,036 %) y partículas (0,000001 %). Estas últimas son incorporadas a la atmósfera por medio de las acciones del viento y juegan un papel

beneficioso al actuar como superficies donde el agua se condensa para formar las gotas de las nubes (Orozco *et al.*, 2004; Camilloni y Vera, 2012).

Esta capa gaseosa se puede subdividir en 5 capas llamadas troposfera, estratosfera, mesosfera, termosfera y exosfera; cada una de ellas posee diferentes propiedades relativas a densidad, temperatura y tipo de actividad química que tiene lugar. En la figura 1 se representa la variaciones de temperatura, presión y las distintas capas entre las que se subdivide la atmósfera.



**Figura 1:** Estructura de la atmósfera, representación de la presión y la temperatura con la altura (Tomado de Orozco *et al.*, 2004)

Los procesos de industrialización y urbanización son los responsables de alterar la composición química de la atmósfera, debido a la liberación de calor antropogénico y generación de residuos en ella. Esta alteración de la composición química de la

atmósfera, por encima de los valores considerados límites por organismos gubernamentales relacionados al cuidado de la salud, es conocida como contaminación atmosférica (Camilloni y Vera, 2012).

### **3.2.1 Contaminación atmosférica**

Debido a su repercusión en los seres vivos, los efectos sobre la salud de los seres humanos o por sus efectos en el cambio climático, la contaminación atmosférica es uno de los temas más críticos y preocupantes (Spedding, 1981). Esta se puede definir como la presencia de agentes químicos, físicos o material particulado que se encuentra disperso en el medio ambiente y puede alterar las características de este. Estos agentes pueden provenir de cualquier fuente, así como pueden reducir la visibilidad, causar olores desagradables y atacar diversos materiales. Es decir, son alteraciones perjudiciales para los seres vivos y demás organismos que habitan el planeta (Molina y Molina, 2001).

Según Brusseau *et al.* (2019), un contaminante en el aire es cualquier gas o partícula que puede ser perjudicial para la vida, el medio ambiente y/o propiedad. Los procesos que ocasionan la contaminación atmosférica pueden ser naturales, antropogénicos o ambos. La concentración de estos contaminantes en la atmósfera depende netamente de la masa total emitida al aire, así como de las condiciones atmosféricas que controlan su transporte y destino.

Los contaminantes como gases o material particulado que son emitidos a la atmósfera, suelen tener diferentes comportamientos (Marcos y Valderrama, 2012):

- Eliminación de la atmósfera por diversos procesos naturales.
- Desplazamiento en la misma dirección del viento, con difusión progresiva lateral y vertical.
- Transformación química o física de los contaminantes primarios (CO, NO, SO<sub>2</sub>, hidrocarburos y partículas), pudiendo originar en algunos casos, elementos más tóxicos como O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub> y SO<sub>3</sub> (contaminantes secundarios), por procesos fotoquímicos de la acción ultravioleta de la luz.

### **3.2.1.1 Partículas atmosféricas**

El término particulado atmosférico es definido como la mezcla de componentes sólidos y líquidos aerosolizados que se encuentran en suspensión en el aire atmosférico, con un tamaño igual o menor a 10  $\mu\text{m}$  (Ferrís *et al.*, s.f.). Este material particulado proviene principalmente de fuentes naturales de diversos tipos: erupciones volcánicas, erosión de rocas, aerosoles marinos e incendios forestales naturales (Orozco *et al.*, 2004).

La composición química de las partículas suele ser bastante compleja; muchas pueden incluir hollín, humo, polvo, fibras de asbesto, plaguicidas, así como también algunos metales pesados Cd, As y Pb (Brusseau *et al.*, 2019).

Las partículas atmosféricas abarcan ciertas características que permiten clasificarlas según una serie de parámetros. Según su comportamiento en la atmósfera estas partículas pueden ser primarias o secundarias. El material particulado primario es llamado así debido a que provienen directamente de su fuente de emisión, bien sea antrópica o natural. Mientras que las secundarias son generadas por reacciones en la atmósfera (Orozco *et al.*, 2004). Además, por medio de su clasificación permite conocer de forma más clara y directa su fuente de emisión. Debido a que se puede categorizar las partículas según características propias de ellas, permitiendo así conocer el origen, naturaleza física y química de estas (Piña, 2011).

### **3.2.1.2 Clasificación**

Según Schumann, (2012) y Piña, (2011), las partículas atmosféricas se pueden clasificar de acuerdo con su:

#### a. Origen

Las partículas atmosféricas pueden provenir de fuentes de origen natural o antropogénico y su concentración en el aire va a depender del tipo de fuente emisora de donde provengan (Artiñano *et al.*, 2003).

Se dice que las partículas atmosféricas son de origen natural cuando son generadas por fenómenos naturales como el transporte de sales marinas

en forma de aerosoles, la erosión del suelo, erupciones volcánicas, emisiones de material biológico fraccionado (polen, restos de insectos, plantas, animales o de piel humana) o incendios forestales espontáneos. Estas fuentes generan preferentemente partículas gruesas (Piña, 2011).

En cambio, son de origen antropogénico cuando son generadas como resultado de la actividad humanas. Entre las cuales se encuentra la quema de combustible debido al intenso tránsito vehicular y aéreo, actividad minera y metalúrgica (HEI, 2013).

Por su parte, las fuentes antropogénicas y naturales se pueden clasificar en 3 tipos distintos, emisiones fijas, móviles y de área. Se conocen como fuentes fijas a establecimientos industriales (termoeléctrica, textil, bebida y tabaco, combustible, productos derivados del petróleo, etc). La móviles se define como aquellas emisiones que cambian su posición, entre los que se encuentran vehículos, aviones y transporte marítimo. Por último, se encuentran las de área, donde se pueden incluir ciertas actividades particulares como agricultura, uso de solventes domésticos e industriales y los vertederos a cielo abierto (SEMARNAT, SINAICA e INECC, 2018a; Sosa *et al.*, 2018).

#### b. Naturaleza física

En función de su estado físico, las partículas atmosféricas pueden ser sólidas o líquidas. En estado sólido son partículas finas, por lo que su tamaño les permite estar un tiempo determinado en la atmósfera. Mientras que en estado líquido son diminutas gotas (aerosoles) las cuales pueden ser de origen marinas, terrestres o industriales (Piña, 2011; Schumann, 2012).

#### c. Diámetro aerodinámico

El tamaño de las partículas atmosféricas puede variar entre 0,005 a 500  $\mu\text{m}$  y de acuerdo con su tamaño, estas se pueden subdividir en sedimentables y no sedimentables. El material que posee un diámetro mayor a 10  $\mu\text{m}$  es conocido como partículas sedimentables, estas

permanecen menos tiempo en la atmósfera que las no sedimentables menores a 10  $\mu\text{m}$  (Piña, 2011).

Las partículas totales suspendidas suelen clasificarse en 3 grupos diferentes. Se encuentran las partículas ultrafinas ( $\text{PM}_{0,1}$ ) que poseen un diámetro menor a 0,1  $\mu\text{m}$ , por su pequeño tamaño pueden ingresar con mayor facilidad al cuerpo humano. Luego están las partículas finas ( $\text{PM}_{2,5}$ ) que van de 0,1 a 2,5  $\mu\text{m}$ , estas se desplazan por el aire como si fuesen moléculas de gases y su velocidad de sedimentación es baja, lo que quiere decir que recorrer largas distancias antes de sedimentarse. Por último, están las que van desde 2,5 a 10  $\mu\text{m}$ , se conocen como partículas gruesas ( $\text{PM}_{10}$ ). Aquellas partículas atmosféricas que tienen un diámetro mayor a 10  $\mu\text{m}$  se conocen como extragruesas (Farfán *et al.*, 2011; Piña, 2011).

d. Naturaleza química

Por su naturaleza química se pueden dividir en orgánicas e inorgánicas y ambas están relacionadas con su origen de emisión. Las partículas inorgánicas suelen estar compuestas por metales, aniones, cationes, sulfatos, nitratos, dióxido de azufre, minerales, entre otros. Mientras que las orgánicas provienen directamente de hidrocarburos gaseosos, bien sean antrópicos o biogénicos (Querol *et al.*, 2001; Schumann, 2012).

Luego de que las partículas han ingresado a la atmósfera desde su fuente de emisión, experimentan ciertas reacciones y cambios que pueden ocasionar un aumento en su tamaño. Varios autores describen los diversos procesos de formación de partículas:

### **3.2.1.3 Procesos de formación**

Las partículas atmosféricas se pueden formar por procesos de nucleación, acumulación, modo Aitken o procesos mecánicos (Figura 2), y dependiendo del método de formación existirá una distribución peculiar del número de partículas (Seinfeld y Pandis, 2006). Así mismo, el mecanismo de generación también determinará el

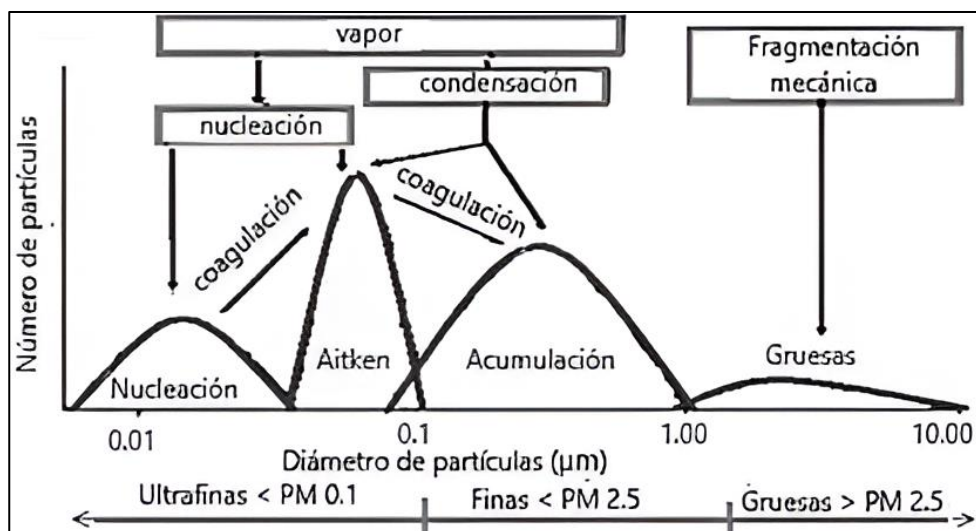
diámetro aerodinámico y, por ende, su tiempo de residencia en la atmósfera (Forbes y Garland, 2016).

El proceso de nucleación genera partículas extra finas y contiene las partículas que se forman por procesos de condensación de vapores. Su formación depende de la presión, descenso en la temperatura e incremento de la humedad relativa, donde tiene lugar la conversión gas – partícula. Este proceso es conocido como nucleación homogénea. Normalmente los pioneros gaseosos que pueden formar estas partículas son los hidrocarburos, el vapor de agua, el ácido sulfúrico y el amoníaco. Su tiempo de vida media es solo horas, ya que pueden coagular rápidamente o incluso, aumentan su tamaño porque otras sustancias coagulan con ellas (Schuman, 2012).

El proceso de formación Aitken es la acumulación de las partículas primarias y partículas secundarias formadas por la coagulación de las partículas generadas en procesos de nucleación. Estas partículas Aitkens tienen un tiempo de vida mayor con respecto a las formadas por nucleación. (Seinfeld y Pandis, 2006; Schuman, 2012).

Las formadas por acumulación son el resultado del crecimiento de partículas existentes. Esto ocurre gracias a que algunas partículas formadas cuentan con una presión de vapor muy baja logrando condensarse entre sí y formar partículas completamente nuevas (Lohmann y Jones, 1998). El proceso ocurre en partículas con un tamaño de entre 0,10 a 1  $\mu\text{m}$  y se debe a que los mecanismos de eliminación de estas son menos eficientes, logrando que se acumulen (Seinfeld y Pandis, 2006).

Por último, se encuentran las partículas gruesas con un diámetro  $>10 \mu\text{m}$ , las cuales se forman por procesos mecánicos o físicos como la erosión o el aerosol marino (Smichowski y Gómez, 2015). Estas no pueden ser sometidas a un rápido movimiento browniano, lo que inhibe su crecimiento adicional. Generalmente, las partículas formadas por este proceso suelen separarse en material particulado de menor tamaño (Schumann, 2012).

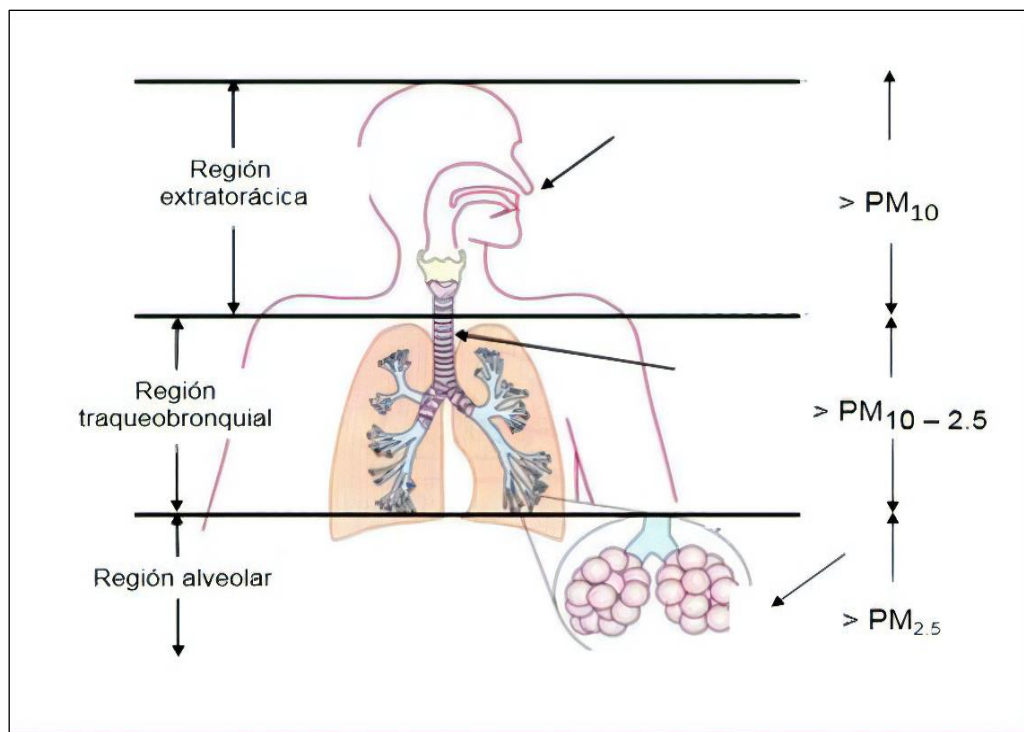


**Figura 2:** Procesos de formación de partículas (Tomado de Pacheco, 2020).

### 3.2.1.4 Efectos en la salud humana y el medio ambiente

Las partículas atmosféricas pueden tener un impacto significativo en los seres humanos y el medio ambiente. Estas suelen trabajar como núcleos de condensación para llevar a cabo diversas reacciones químicas en la atmósfera. Además, pueden contribuir como un transporte de nutrientes; sin embargo, cuando la concentración de estas se encuentra elevada pueden causar riesgo a la salud humana (Zhong, 2017).

El tamaño de las partículas está intrínsecamente relacionado con los efectos que estas pueden causar a la salud. Esto se debe a que su capacidad de ingreso al cuerpo humano será mayor a medida que el tamaño sea más fino. Por ello, el material particulado más peligroso sería el  $PM_{0,1}$  o ultrafino, dado que por su tamaño puede lograr ingresar hasta el torrente sanguíneo. Por su parte, las partículas que se encuentran entre 2,5 – 0,1  $\mu m$  son denominadas respirables y tienen la capacidad de acceder a los pulmones. Luego, se encuentran las gruesas con un tamaño 10 – 2,5  $\mu m$ , las cuales son conocidas como inhalables porque se adhieren a las membranas mucosa y son eliminadas por la parte baja del tracto respiratorio. De último, están las partículas extra gruesas con un diámetro mayor a 10  $\mu m$ . Las mismas llega a la boca o nariz, pero debido a su tamaño son eliminadas del sistema en un 99% (Heyder, 2004; Piña, 2011). En la figura 3 ilustra el ingreso de las partículas el sistema respiratorio humano.



**Figura 3:** Nivel de ingreso de las partículas atmosféricas al sistema respiratorio humano en función del tamaño (Tomado de la EPA).

De igual manera, dependiendo de la composición química de las partículas se notarán diversos cambios y efectos sobre el medio ambiente donde se sedimenten. Algunos de estos efectos pueden ser: acidificación de arroyos y lagos, reducción de nutrientes en el suelo, cambios en el balance nutricional de las aguas, daños a cultivos agrícolas o bosques sensibles, contribución a lluvias ácidas, entre otros (EPA, 2018).

Los metales pesados como el plomo pueden alojarse en el sistema nervioso, llegando a dañar las neuronas, también pueden afectar a la médula ósea y el riñón, lo que puede llegar a producir insuficiencia renal. El arsénico a su vez, tiene un efecto adverso en las mitocondrias. Por lo que los daños son muy diversos dependiendo del metal, pero se puede destacar que el daño general es de lesión celular (Romero, 2009).

### **3.3 Geoquímica de los metales pesados**

Los metales pesados son definidos como elementos químicos que poseen una alta densidad y masa atómica. Suelen ser altamente tóxicos aun cuando están en bajas concentraciones (Concon, 2009).

Los metales pesados se encuentran en el ambiente de manera natural a concentraciones que no son perjudiciales para los seres vivos. Sin embargo, una de las consecuencias más graves de la presencia de estos elementos en el ambiente es que no son degradados, ni química ni biológicamente, por la naturaleza, lo que origina su persistencia en ella (IPCS, 2002).

La biodisponibilidad externa de los metales pesados depende completamente de su capacidad para solubilizarse y ser liberado al ambiente desde un componente. Mientras que la interna se relaciona con su capacidad de ser absorbido y atacar un órgano en específico, así ejerce su efecto tóxico (García, 2002).). Por tal razón, es importante conocer como estos metales se encuentran presentes en la atmósfera.

#### **3.3.1 Plomo (Pb)**

El Pb es un elemento natural que se ubica en el grupo 14 de la tabla periódica. Suele tener la particularidad de ser resistente al ataque de los ácidos sulfúrico y clorhídrico, pero se disuelve con lentitud en ácido nítrico. Tiene un carácter anfótero, por lo que reacciona con ácidos, formando sales ácidas y también con bases, formando óxidos o sales metálicas (Nava, 2011).

Este elemento se puede encontrar de manera natural en la corteza como galena (PbS), carbonato de plomo (PbCO<sub>3</sub>) y anglesita (PbSO<sub>4</sub>). También, existen emisiones naturales que generan la presencia de Pb en la atmósfera, como son la actividad volcánica, erosión y meteorización de rocas y suelos (Kumar, 2023).

Por su parte, la actividad antrópica también es una fuente de emisión de Pb a la atmósfera. Entre estas destacan principalmente las actividades mineras, la metalúrgica, la utilización de combustible fósil y muchos productos de uso doméstico que contienen plomo en su composición, como pinturas, esmaltes y productos cosméticos (OMS, 2016).

Los diferentes movimientos que sigue el plomo a través del planeta conforman su ciclo biogeoquímico. Estos flujos vienen dados por procesos físicos como la adsorción, difusión, convección; químicos como la oxidación, hidrólisis, fotólisis; geográficos como el transporte, precipitación, erosión y la actividad biológica de los organismos participantes del ciclo (Alberich, 2010).

La biodisponibilidad del Pb es determinada por diversos factores como el modo y especie química en que se emite, el medio en el que se encuentra y su perdurabilidad en ese medio. Cuando este es emitido a la atmósfera, su tiempo de residencia puede ser de segundos a 3 – 4 semanas, depende del tamaño de las partículas. En el caso de las emisiones por refinerías e incineradoras, el Pb se encuentra en forma de óxido o metálico por lo que no sufren reacciones importantes. Sin embargo, cuando el metal proviene de la combustión de la gasolina se dispersa en forma de hidroxohaluros, haluros y oxohaluros (Cotton, 1999).

### **3.3.2 Cadmio (Cd)**

El Cd es un metal pesado que se encuentra en el grupo 12 de la tabla periódica. Es un elemento resistente a la oxidación y altamente reactivo, el cual comparte muchas características fisicoquímicas con el zinc (Pérez y Azcona, 2012).

Desde hace varios años el Cd ha sido reconocido como uno de los metales pesados más tóxicos, dado a que posee 4 de las características más importantes: efectos adversos para el hombre y el medio ambiente, bioacumulación, persistencia en el ambiente y puede ser transportado a través de grandes distancias por los suelos, la atmósfera y los cursos de agua (Ramírez, 2002).

El Cd es un elemento raro de conseguir en la corteza terrestre, su concentración puede ser entre 0,15 – 0,2 ppm (Fleischer, 1974). Este se encuentra principalmente asociado a minerales de zinc, como por ejemplo la esfalerita (ZnS). Sin embargo, se puede encontrar en rocas sedimentarias, ígneas y metamórficas, en concentraciones muy bajas (Bautista, 1999).

La mayor parte de la presencia de Cd por emisiones naturales proviene de la erosión y desgaste de las rocas. Asimismo, la actividad volcánica también juega un

papel importante dentro de la presencia del cadmio en la atmósfera. La actividad antrópica puede generar Cd atmosférico, principalmente las actividades mineras, metalúrgicas, procesamiento de minerales no ferrosos, la combustión de combustibles fósiles y la incineración de residuos. ((Osorio *et al.*, 1997; Bautista, 1999; Cullen y Maldonado, 2013).

El ciclo biogeoquímico del Cd se ha visto alterado por entradas antropogénicas, principalmente desde la revolución industrial, con la quema de combustibles. Estas actividades dominan el movimiento del metal y han llevado al Cd a los lugares más remotos del planeta (Cullen y Maldonado, 2013).

El cadmio, bien sea como óxido, sulfato o cloruro, se puede encontrar en el aire como vapor o partículas, las cuales pueden ser transportadas por largas distancias en la atmósfera hasta lograr su depositación sobre las aguas o suelos (Resumen de Salud Pública: Cadmio (Cadmium) | PHS | ATSDR, s. f.)

### **3.3.3 Arsénico (As)**

El As pertenece al grupo 15 de la tabla periódica y su número atómico es el 33. En su forma inorgánica es un elemento altamente tóxico y peligroso para los seres humanos cuando se está a una exposición prolongada (OMS, 2022).

Este elemento se encuentra ampliamente distribuido en el ambiente. Generalmente, se detecta en todas sus formas y su concentración en la litosfera es de 1,5 – 2 ppm. Pueden existir alrededor de 245 minerales entre arseniatos, sulfuros y sulfosales, óxidos, silicatos, arsenitos y arseniuros. Las mayores fuentes de As en la corteza se pueden encontrar en forma de pirita, calcopirita, galena y esfalerita (Mandal y Suzuki, 2002).

El As inorgánico se ubica presentes en aguas, alimentos, suelos y aire, es así como los humanos están constantemente expuestos al elemento. Su concentración en suelos puede ser de 0,2 a 40 ppm, mientras que en el aire específicamente en las áreas urbanas su concentración es de 0,02  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (Smedley y Kinniburgh, 2002).

El origen del As en el ambiente puede provenir de fuentes naturales o antropogénicas. Las primeras incluyen todas las actividades donde el hombre no ha

intervenido, principalmente la erosión y meteorización de los suelos y rocas. Sin embargo, es importante destacar que estas emisiones naturales están intrínsecamente conectadas a la geoquímica de un emplazamiento (Lillo, 2003). Por otra parte, las actividades antrópicas que generan la presencia de As son la siderúrgica, minería, agricultura, silvicultura, desechos humanos, uso de pesticidas y ganadería. Así mismo, los combustibles fósiles contienen también concentraciones de arsénico que pueden provocar a largo plazo un enriquecimiento en la zona afectada por los gases originados en la combustión (Adriano, 2001; Fitz y Wenzel, 2002; Zhang y Selim, 2008).

La movilidad del As en la naturaleza es relativamente elevada, ya que se puede transportar en estado gaseoso, disuelto o sólido por medio de aire, suelos y agua. Su movilización es posible gracias a las transformaciones geológicas y biológicas que pueden ocurrir en las especies emitidas inicialmente. La distribución y el transporte de este elemento depende principalmente de la especie química en la que se encuentre. Por ello, el As (III) y As (V) tienen una solubilidad elevada; es decir, estas especies se distribuyen con facilidad en medios acuosos. Pueden llegar a estos, por procesos de lixiviación y oxidación-reducción. Además, en los suelos puede ocurrir la complejación o absorción del As, generando una transferencia a las plantas y los cultivos, lo que ocasiona la entrada del arsénico a la cadena alimenticia (Mudhoo *et al.*, 2011).

### **3.4 Actividades portuarias que causan contaminación a nivel atmosférico**

Los puertos marítimos son unas de las zonas de mayor importancia económica para los países. Actualmente, casi toda la comercialización mundial se realiza por la vía marítima. Por ello, se ha generado una afectación en la calidad de aire en estas zonas (ISGlobal, 2023).

Las actividades portuarias pueden incluir tanto simples operaciones de manipulación de carga hasta operaciones comerciales e industriales que se combinan con el manejo de la carga. Sin importar la complejidad de las operaciones realizadas, cada una de ellas aporta a la contaminación atmosférica, debido a las emisiones que se generan (Proyecto GFE-UNDP-IMO GloMEEP e IAPH, 2018).

Las actividades portuarias se clasifican según su tipo de fuente si son fijas o móviles. En el caso de las móviles, se tienen buques de navegación marítima, equipo de manipulación de la carga, transporte ferroviario y vehículos, que además se pueden relacionar directamente a los combustibles que utilizan (diésel, fueloil, gas, gasolina). Mientras que en las fijas se incluyen plantas eléctricas, instalaciones industriales y de fabricación, oficinas administrativas y red eléctrica. Asimismo, se pueden asociar a las energías que estas utilizan (carbón, electricidad, energías renovables y gas natural) (Proyecto GFE-UNDP-IMO GloMEEP e IAPH, 2018).

### 3.5 Normativa nacional e internacional sobre calidad de aire

Debido a los daños que causan las partículas atmosféricas a los seres humanos y el medio ambiente en general, se han establecido a nivel mundial límites máximos de concentración permitidos. Entre las normativas internacionales se puede destacar la *Guía de calidad del aire relativa al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre*, de la Organización Mundial de la Salud 2005. En ella se encuentran concentraciones recomendadas de cuatro contaminantes atmosféricos comunes; sin embargo, para efectos de este proyecto el material particulado es el de mayor relevancia. Para partículas finas (PM<sub>2,5</sub>) se establece una media anual de 10 µg/m<sup>3</sup>, mientras que para las gruesas (PM<sub>10</sub>) la media es de 20 µg/m<sup>3</sup>. En la tabla 1 se muestran los valores anteriormente mencionados.

**Tabla 1:** Límites de calidad del aire para el material particulado (Modificado de: OMS, 2005).

Contaminantes	Límites (µg /m <sup>3</sup> )	Tiempo
Partículas finas (PM <sub>2,5</sub> )	10	Media anual
	20	Media de 24 horas
Partículas gruesas (PM <sub>10</sub> )	20	Media anual
	50	Media de 24 horas

Así mismo, cada país establece por sí mismo sus límites máximos permisibles para los contaminantes atmosféricos. Estas normas nacionales pueden variar en función del enfoque adoptado, su finalidad es equilibrar los riesgos para la salud, aspectos económicos y otros diversos sociales. Así mismo, estos dependen de la capacidad nacional en relación con la gestión de la calidad del aire y el desarrollo (OMS, 2005). En Venezuela está vigente el *DECRETO N°638: Normas sobre calidad del aire y control de la contaminación atmosférica*, establecido por el presidente Carlos Andrés Pérez el 26 de abril de 1995. El Artículo N°5 establece la clasificación de las zonas de acuerdo a los intervalos de concentración de PTS, reflejados en la tabla 2.

**Tabla 2:** Clasificación de zonas de acuerdo con los rangos de concentraciones (PTS) (Modificado de: Art. 5. Decreto 638, 1995).

Partículas ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Zonas
<75	Aire limpio
75-200	Aire moderadamente contaminado
201-300	Aire altamente contaminado
>300	Aire muy contaminado

Por su parte, en el Capítulo II se establecen los límites de calidad de aire para contaminantes ambientales, para efectos de este proyecto se muestran en la tabla 3. Es importante resaltar que la legislación para calidad de aire en Venezuela no contempla límites para  $\text{PM}_{10}$ ,  $\text{PM}_{2.5}$  y otros contaminantes.

**Tabla 3:** Límites de calidad del aire (Modificado de: Art. 5. Decreto 638, 1995).

Contaminantes	Límites ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Porcentaje excedencia en lapso de muestreo	Periodo de medición (horas)
Partículas totales suspendidas	75	50%	24
	150	5%	24
	200	2%	24
	260	0,50%	24
Plomo en partículas suspendidas	1,5	50%	24
	2	5%	24

También, está el decreto sobre la calidad del aire ambiente y a una atmósfera más limpia en Europa (2024) donde se establecen las concentraciones permisibles de diferentes metales pesados, en la tabla 4 se reflejan los metales de interés para esta investigación.

**Tabla 4:** Valores límite para la protección de la salud humana (Modificado de: DIRECTIVA (UE) 2024/2881 DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO. (2024). Sobre la calidad del aire ambiente y a una atmósfera más limpia en Europa).

Contaminantes	Concentración ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Periodo de medición (años)
Plomo (Pb)	0,5	1
Arsénico (As)	0,006	1
Cadmio (Cd)	0,005	1

Una vez discutidos los fundamentos teóricos que fundamenta este proyecto, se procede a describir los antecedentes que sustentan esta investigación:

## 4. ANTECEDENTES

A continuación, se describen algunos trabajos previos tanto nacionales como internacionales relacionados con este proyecto de investigación, los cuales sirven como base y soporte del mismo.

### 4.1 Nacionales

**Rodríguez et al. (2016)**, basaron su investigación en la determinación de la concentración de PTS producto de las actividades portuarias realizadas en el Puerto de La Guaira. Los autores utilizaron el método de muestreo de gran volumen y el método analítico gravimétrico con un periodo de 24 horas de medición. El muestreo se realizó en 3 puntos con 7 días de duración cada uno, obteniendo 21 muestras en total. Los resultados obtenidos de las mediciones de PTS durante todo el periodo indican una concentración promedio en el área de  $111\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Este valor se encuentra dentro del rango de concentración de  $75\text{-}200\mu\text{g}/\text{m}^3$  clasificando al Puerto de La Guaira con un aire moderadamente contaminado por PTS según lo establecido en el art. 5 del Decreto 638.

**Burgos (2017)**, caracterizó química y morfológicamente por medio de Microscopia Electrónica las PTS, captadas en 2 zonas del eje Charallave-Ocumare, en el estado Miranda. Las muestras fueron captadas durante el periodo de sequía. El autor determinó que las diferentes morfologías y sus composiciones asociadas a los diferentes procesos de formación, como es el caso de las partículas esféricas y cenósferas (espongiformes o esféricas huecas), ambas características de la combustión. Además, notó la presencia de algunos elementos como K, C, O, Ca, Al, Cl, Si, Fe y Ti. De igual manera, el estudio corroboró que las actividades industriales tienen gran influencia en la calidad de aire, ya que en la estación Pitahaya (Charallave) ubicada en una zona industrial, la concentración de PTS fue de  $72\mu\text{g}/\text{m}^3$ , mientras que en el Aeropuerto Metropolitano el valor fue de  $51\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Concluyendo así que los niveles de concentración de PTS en la atmósfera de las dos zonas estudiadas, están influenciadas en gran medida, por las actividades humanas, así como fuentes móviles (avionetas y vehículos), fuentes fijas (sector industrial, cementeras), quema de

vertederos a cielo abierto, aerosoles marinos, emisiones de origen vegetal y la geología local.

**Guerrero (2017)**, determinó la concentración de mercurio asociado a las partículas atmosféricas presentes en el Aeropuerto Metropolitano de Caracas en Ocumare del Tuy y la zona industrial de Charallave (Pitahaya), estado Miranda. La media geométrica en la estación del Aeropuerto Metropolitano fue de  $51 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y para en Pitahaya fue de  $72 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , encontrándose ambos valores por debajo del límite establecido por el Decreto 638,  $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Por su parte, las concentraciones de mercurio asociado a las partículas fueron de  $38 \text{pg}/\text{m}^3$  y  $20 \text{pg}/\text{m}^3$  respectivamente, lo que sugiere que existe una o varias fuentes(s) de mercurio hacia la atmósfera adyacentes a ambas estaciones de muestreo.

**Borrego (2020)**, evaluó la concentración de mercurio en suelos, PTS y partículas sedimentables en la zona industrial de Ocumare del Tuy. El promedio geométrico para las PTS fue de  $69 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , encontrándose este valor por debajo de  $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$  que es el límite establecido en el Decreto 638. En cuanto a las concentraciones de mercurio obtenidas en la zona, muestran un promedio de  $12 \pm 7 \text{pg}/\text{m}^3$  para las partículas totales suspendidas y de  $19 \pm 13 \text{ng Hg}/\text{g}$  para las muestras de partículas sedimentables. Además, el autor determinó que el 79% de las muestras de partículas totales suspendidas que excedieron el límite máximo diario permitido, establecido en el art. 3 del Decreto 638, fueron captadas en días soleados. Mientras que el 92% de aquellas muestras que no superan este límite permisible, fueron recolectadas en días lluviosos. Concluyendo que las condiciones meteorológicas influyen en la concentración de partículas totales suspendidas. Así mismo, indicó que la fábrica de cemento cerca de la zona de muestreo es una de las principales fuentes fijas de emisión de PTS a la atmósfera.

## 4.2 Internacionales

**Zhao et al. (2013)**, caracterizaron los contaminantes atmosféricos e identificaron la contribución de las emisiones del tráfico marítimo en el puerto de Shanghái, China.

Para ello, tomaron muestras de PTS y PM<sub>2.5</sub>, donde se analizaron los siguientes elementos V, Ni, Al, Fe, Si, Ca, Na, Mg, Mn, Zn, Co y Cr. La metodología usada para el análisis de los metales fue la digestión acida usando una mezcla de HNO<sub>3</sub> y HF, posteriormente ser determinados mediante un espectrómetro de emisión óptica de plasma acoplado inductivamente. Como resultado obtuvieron una concentración media diaria para PTS 62,60 µg/m<sup>3</sup> y para PM<sub>2.5</sub> 114,39 µg/m<sup>3</sup>. Las concentraciones de Ca, Al, Fe, Si y Na oscilaron entre 14,3 y 20,3 µg/m<sup>3</sup> y para Zn, Mg, Cr, Mn y Co fueron inferiores a 10 µg/m<sup>3</sup>.

**Zhang et al. (2014)**, evaluaron las características de las partículas atmosféricas y los metales pesados en invierno en las agrupaciones de ciudades de Chang-Zhuzhou-Xiangtan, China. Para ello, usaron filtros de fibra de vidrio y captaron las partículas suspendidas totales (PTS) y PM<sub>10</sub> en las ciudades de Changsha, Zhuzhou y Xiangtan de diciembre de 2011 a enero de 2012. Analizaron los siguientes metales pesados Cd, Pb, Cr y As. Los autores usaron para los análisis de metales pesados la técnica de espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente. Los resultados de la concentración promedio de las PTS en Changsha, Zhuzhou y Xiangtan fue de 183 ± 73, 201 ± 84 y 190 ± 66 µg/m<sup>3</sup> respectivamente, mientras que para PM<sub>10</sub> fue de 171 ± 82, 178 ± 65 y 179 ± 55 µg/m<sup>3</sup> respectivamente. En cuanto a los metales pesados, en las muestras de PTS, la concentración de Cr, As, Cd y Pb fue de 28,8-56,5; 18,1-76,3; 3,9-26,1 y 148,0-460,9 ng/m<sup>3</sup>, respectivamente y en las muestras de PM<sub>10</sub> fue de 16,4-42,1; 15,5-67,9; 3,3-22,2 y 127,9-389,3 ng/m<sup>3</sup>, respectivamente.

**Miranda y Arriaga (2016)**, el objetivo del trabajo era determinar el nivel de concentración de metales pesados en el aire, en los distritos de Callería, Yarinacocha y Manantay, Provincia de coronel Portillo, Región de Ucayali, México. El muestreo se realizó en 14 puntos elegidos estratégicamente en la ciudad de Pucallpa. Los resultados de las concentraciones de metales obtenidos los compararon con la Normatividad de Criterios de Calidad de Aire Ambiental – AAQC 24 h de Canadá. Basado en ello los metales Fe (25,2µg/m<sup>3</sup>), Cd (3,7µg/m<sup>3</sup>), Cr(8,9µg/m<sup>3</sup>), Mn(3,0µg/m<sup>3</sup>) y Pb(23,8µg/m<sup>3</sup>) sobrepasan los límites permitidos en esta norma, en cambio el Zn (90µg/m<sup>3</sup>) y el Cu (7,4µg/m<sup>3</sup>) se encontraban dentro del valor permitido. Los autores

obtuvieron que el Pb era el metal con mayor concentración dentro de las muestras, lo que llevo a concluir que el contenido de este se encuentra asociado al combustible.

**Alankarage y Juhasz (2022)**, estudiaron las concentraciones de Pb asociados a PTS y PM<sub>10</sub> en la zona de Port Pirie, Australia. Las muestras analizadas fueron tomadas en el periodo de 2009 a 2020 enfocándose principalmente en las muestras de 2017 y 2020. La concentración de plomo en las PTS de 2009-2020 fue variable, obteniendo una media de 0,57 µg/m<sup>3</sup>; sin embargo, no notaron disminución significativa de la concentración de Pb cuando compararon los valores de 2017 (0,486 µg/m<sup>3</sup>) y 2020 (0,346 µg/m<sup>3</sup>). Por otra parte, los valores de Pb para PM<sub>10</sub> fueron de 0,080 µg/m<sup>3</sup> en 2017 y 0,060 µg/m<sup>3</sup> en 2020, concluyendo que la diferencia tampoco era significativa.

## 5. ZONA DE ESTUDIO

En este apartado se describe la ubicación de la zona de estudio y algunos aspectos importantes como el clima y los patrones de vientos en esta área.

### 5.1 Ubicación

La zona de estudio se encuentra ubicada en el Puerto de La Guaira, Av. Soubllette, municipio Vargas, estado La Guaira, Venezuela. Sus coordenadas son 10° 36' 10" N; 66° 55' 59" O (BoliPuertos, s.f.). El mapa de ubicación de la zona se puede observar en la figura 4.



**Figura 4:** Ubicación del Puerto de La Guaira (Elaborado en Google Earth, 2024).

### 5.2 Clima

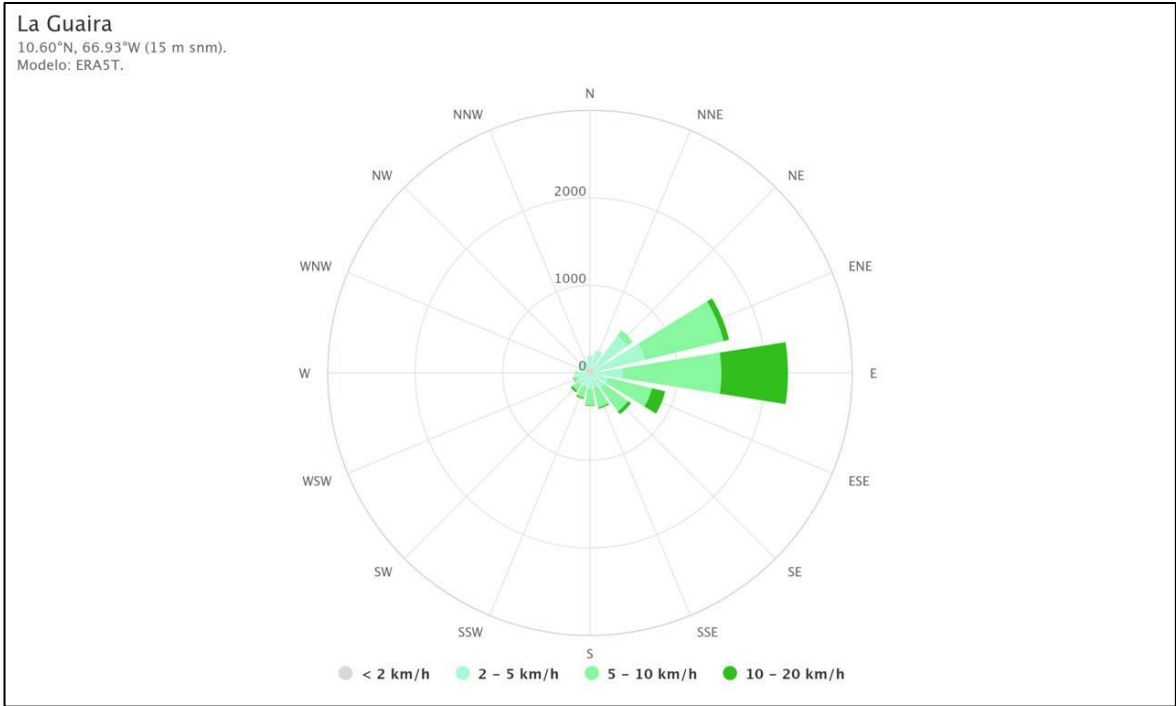
El estado La Guaira tiene un clima del tipo Sabana Tropical, con una temperatura promedio anual de 28°C, además de ser un ambiente con alta humedad. Solo cuenta con 2 estaciones en el año sequia comprendida entre los meses de enero – abril y lluvia que se ubica entre mayo – diciembre (Figura 5), su promedio de precipitaciones anual es de 600 – 800 mm (BoliPuertos, s.f.).



Figura 5: Climograma del estado La Guaira (1986-2015) (Tomado del INAMEH, s.f.).

### 5.3 Patrones de viento

No existe información suficiente sobre los patrones de vientos en la zona de estudio. Sin embargo, se puede decir, que son vientos alisos con una dirección constante que va desde la altas presiones subtropicales hasta las bajas presiones ecuatoriales (Fernández y Ramírez, 1991; BoliPuertos, s.f.). Aunque se tienen unos datos simulados de la dirección de los vientos basados en los registros históricos del estado (figura 6). La velocidad del viento en el área de interés es de 3.0 m/s para La Guaira (BoliPuertos, s.f.).



**Figura 6:** Rosa de los vientos para La Guaira (Tomado de Datos Climáticos y Meteorológicos Históricos Simulados Para la Guaira, s. f.).

## **6. MARCO METODOLÓGICO**

La metodología experimental que se llevó a cabo en la presente investigación, para evaluar de la concentración de PTS y la de los metales pesados (Pb, As y Cd) asociados a esta, se dividió en 3 etapas:

### **6.1 Etapa de pre campo**

Consistió en la recolección de información de interés de la zona de estudio mediante la búsqueda de antecedentes, mapas del área e incluso realizar una visita previa a las áreas donde se quiere instalar el muestreador. Esto nos permite establecer la ubicación del equipo y el tiempo de muestreo.

El muestreo se llevó a cabo según lo establecido en el Decreto N° 638, que establece que el lapso de muestreo comprenderá un tiempo mínimo de cuatro (4) semanas, una cantidad mínima de veinte (20) muestras efectivas, con una frecuencia mínima de captación de una (1) muestra cada tres (3) días, para estudios que se realicen en un lapso menor de seis (6) meses.

Por otra parte, para la instalación del equipo se siguió lo dictado en la norma COVENIN 2060:1996, donde se indica que el muestreador debe estar a una altura mínima de 2 m y máxima de 15 m sobre el nivel del suelo. Adicionalmente, tiene que estar separado de paredes, techos o cualquier obstáculo que restrinja el aire por un mínimo de 2 m.

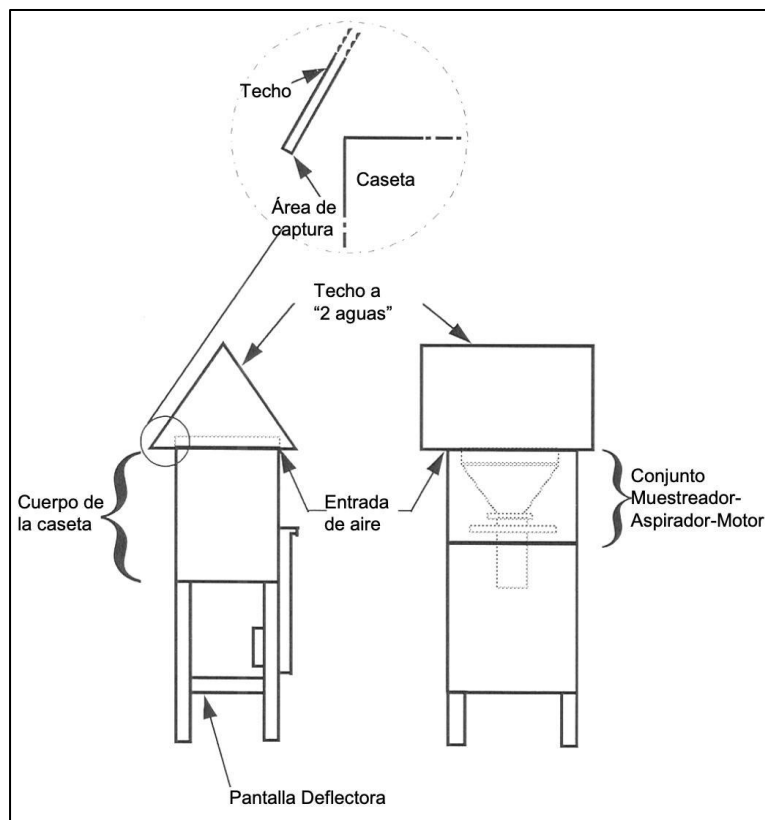
Para fines de este proyecto, el equipo que se utilizó para realizar el muestreo fue un muestreador de gran volumen, mejor conocido como Hi Vol, marca General Metal Works (GMW), Graseby (Figura 7). Además, los filtros que se usaron fueron de fibra de vidrio, marca Whatman de tamaño 20,3 x 25,4 cm.



**Figura 7:** Muestreador de gran volumen, marca General Metal Works (GMW), Graseby.

## 6.2 Etapa de campo

Esta etapa consistió en la instalación del muestreador de alto volumen (figura 8) en la zona establecida para la captación de muestras.

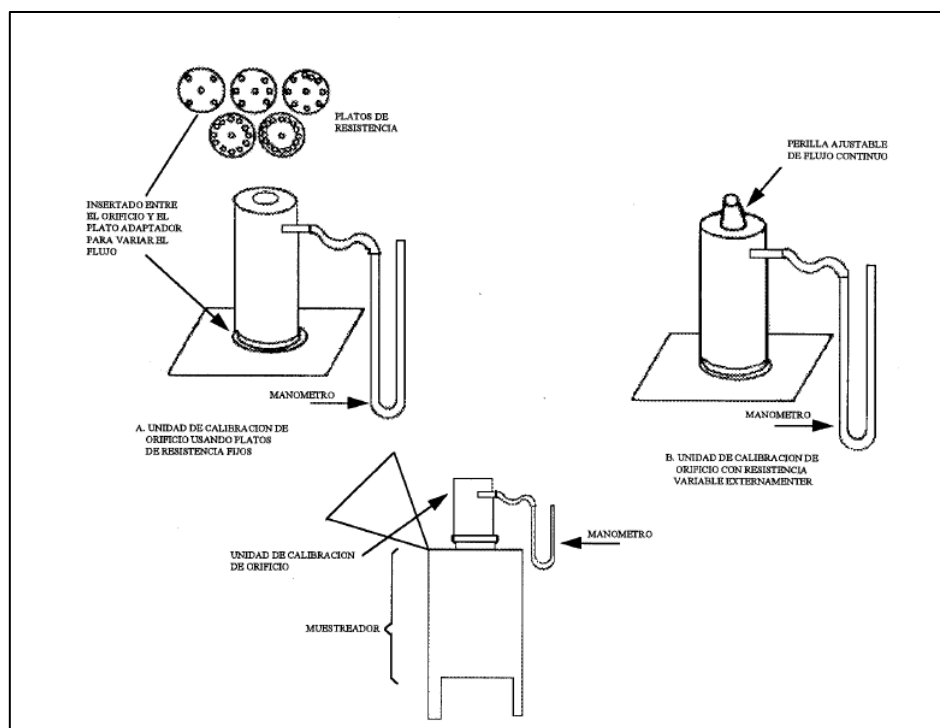


**Figura 8:** Caseta del Hi Vol (Tomado de: Norma COVENIN 2060:2005).

Antes de empezar el muestreo fue calibrado el equipo bajo las condiciones de la zona de estudio.

### **6.2.1 Calibración del muestreador**

Para realizar la calibración se utilizó un calibrador de resistencia variable, el cual se colocó sobre la placa adaptadora en una posición de máxima abertura y operando a un flujo máximo, este registro sobre una carta circular que se ubica en el registrador de la caseta (figura 9). Luego, se fue cerrando progresivamente la abertura del calibrador hasta llegar a 5 valores distintos de flujo.



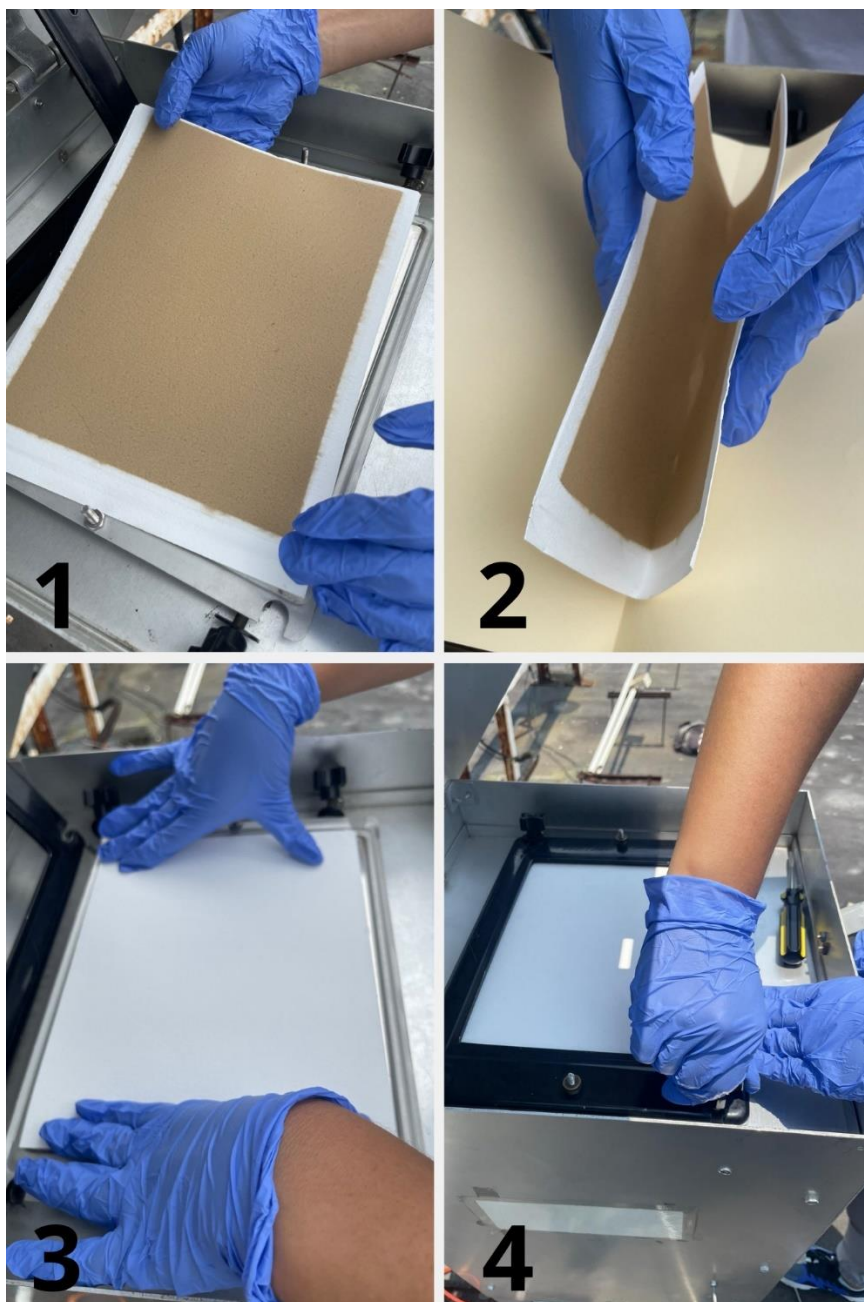
**Figura 9:** Unidad de calibración (Tomado de Norma COVENIN 2060:1996).

Esta calibración se realizó con la finalidad de garantizar un muestreo representativo y bajo las condiciones de la zona de estudio. Además, permitió construir una curva de calibración (apéndice 4) para conocer los valores verdaderos del flujo. Es importante acotar que cada kit de calibración posee una curva y ecuación de calibración (MAVDT, 2008).

### **6.2.2 Captación de muestras**

Siguiendo el protocolo establecido en el Decreto 638, el número mínimo de muestras efectivas que se colectaron fue de 20 con una frecuencia mínima de 1 muestra cada 3 días, para muestreos de 4 semanas mínimo.

El proceso para los cambios de filtros durante el monitoreo, se ve reflejo en la figura 10.



*Figura 10: Proceso del cambio de filtros en el Puerto de La Guaira.*

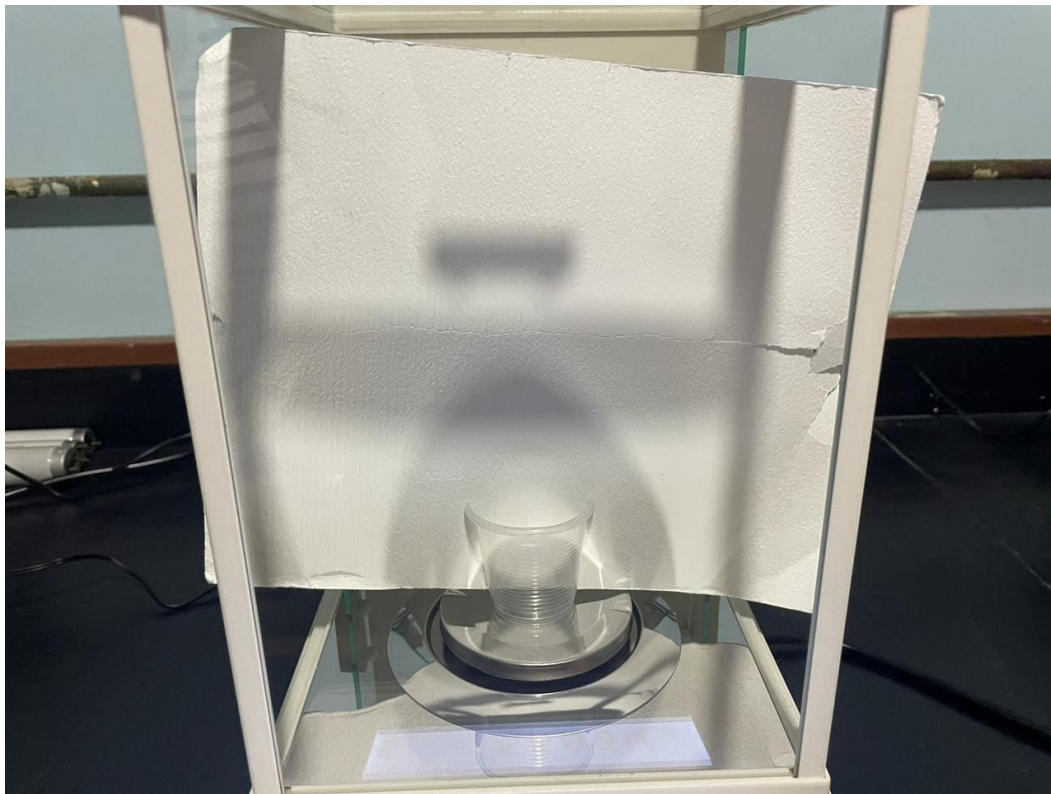
### **6.1.1 Acondicionamiento de filtros**

Según la norma COVENIN 2060:1996 los filtros que se utilizaron para la captación de muestras deben tener un acondicionamiento previo. En primer lugar, se revisaron los filtros para evitar que estuviesen dañados o sucios. Posteriormente, los filtros elegidos se introdujeron dentro de una carpeta y se llevaron a una cámara de

acondicionamiento por al menos 24h. Esta debe poseer un agente desecante que ayude a mantener el ambiente con una humedad menor al  $50\% \pm 5\%$ .

### **6.1.2 Pesaje de filtros**

Después de que los filtros se acondicionaron se deben pesar (figura 11) en una balanza analítica de cuatro cifras decimales, dentro de un rango de 30 segundos luego de retirarlos del desecador. Luego de lograr el peso constante, se registraron los valores en una planilla y se procedió a guardar el filtro nuevamente en una carpeta para evitar su contaminación. Para manipular los filtros se utilizaron guantes para prevenir la contaminación de los mismos por grasas naturales de la piel (norma COVENIN 2060:1996).



**Figura 11:** Pesaje del filtro en la balanza analítica.

### 6.3 Etapa de laboratorio

Esta es la última fase del marco metodológico y se dividió en 2 partes, determinación de PTS y determinación de metales pesados (Pb, As, Cd) asociados a ellas.

#### 6.3.1 Determinación de PTS

Luego de captadas las muestras, los filtros se llevaron nuevamente por 24 h al desecador para posteriormente ser pesados . De esta forma, por medio de la diferencia de pesos se determinó la concentración de PTS que se recolectaron. El valor que se obtuvo se dividió entre el volumen corregido de aire muestreado.

Las ecuaciones 1, 2, 3 y 4 describen los cálculos que se realizaron para obtener la concentración de las PTS (norma COVENIN 2060:1996). En los apéndices 8, 9,10 y 11 se aprecian los modelos de cálculos.

#### Cálculo del flujo corregido (Qcm)

$$Q_{cm} = Q_{cf} \times \sqrt{\frac{T_{cc}}{T_{cf}} \times \frac{P_{cf}}{P_{cc}}} \quad (Ec. 1)$$

Donde:

**Qcf:** flujo a condiciones de fabricación del calibrador (m<sup>3</sup>/min). Se obtiene a partir de la curva de calibración.

**Tcc:** temperatura a condiciones de calibración (K).

**Tcf:** temperatura a condiciones de fabricación del calibrador (K).

**Pcf:** presión a condiciones de fabricación del calibrador (mmHg).

**Pcc:** presión a condiciones de calibración (mmHg)

#### Cálculo del volumen corregido a condiciones estándar (Vest)

$$V_{est} = Q_{est} \times t \quad (Ec. 2)$$

Donde:

**Qest:** flujo corregido a condiciones estándar (m<sup>3</sup>/min)

### **Cálculo del flujo corregido a condiciones estándar**

$$Q_{est} = Q_{cm} \times \left( \frac{T_{est}}{T_{cc}} \times \frac{P_{cc}}{P_{est}} \right) \quad (Ec. 3)$$

Donde:

**Test:** temperatura a condiciones estándar (298 K).

**Tcc:** temperaturas a condiciones de calibración (K)

**Pest:** presión a condiciones estándar (760mmHg).

**Pcc:** presión a condiciones de medición (mmHg)

### **Cálculo de la concentración de PTS**

$$PTS = \frac{\text{Peso final del filtro} - \text{peso inicial del filtro}}{V_{est}} \times 10^{-6} \quad (Ec. 4)$$

#### **6.3.2 Determinación de metales pesados (Pb, As, Cd)**

Para la determinación de los metales pesados en el material particulado se utilizó la siguiente metodología.

Se tomaron los filtros y de cada uno de ellos se cortó 1 tira de 20,00 cm de largo x 2,54 cm de ancho, representando un área conocida (50,8 cm<sup>2</sup>), según lo establecido en el método EPA- IO 3.1.

Posteriormente, se procedió a digerir la tira con analito utilizando una solución de agua regia conformada por 9mL de HCl y 3mL de HNO<sub>3</sub> concentrados. Se introdujo la tira en un beaker, se agregó la mezcla de ácidos y se llevó a una plancha de calentamiento con una temperatura de entre 90 – 130 °C por 1h aproximadamente (figura 12).



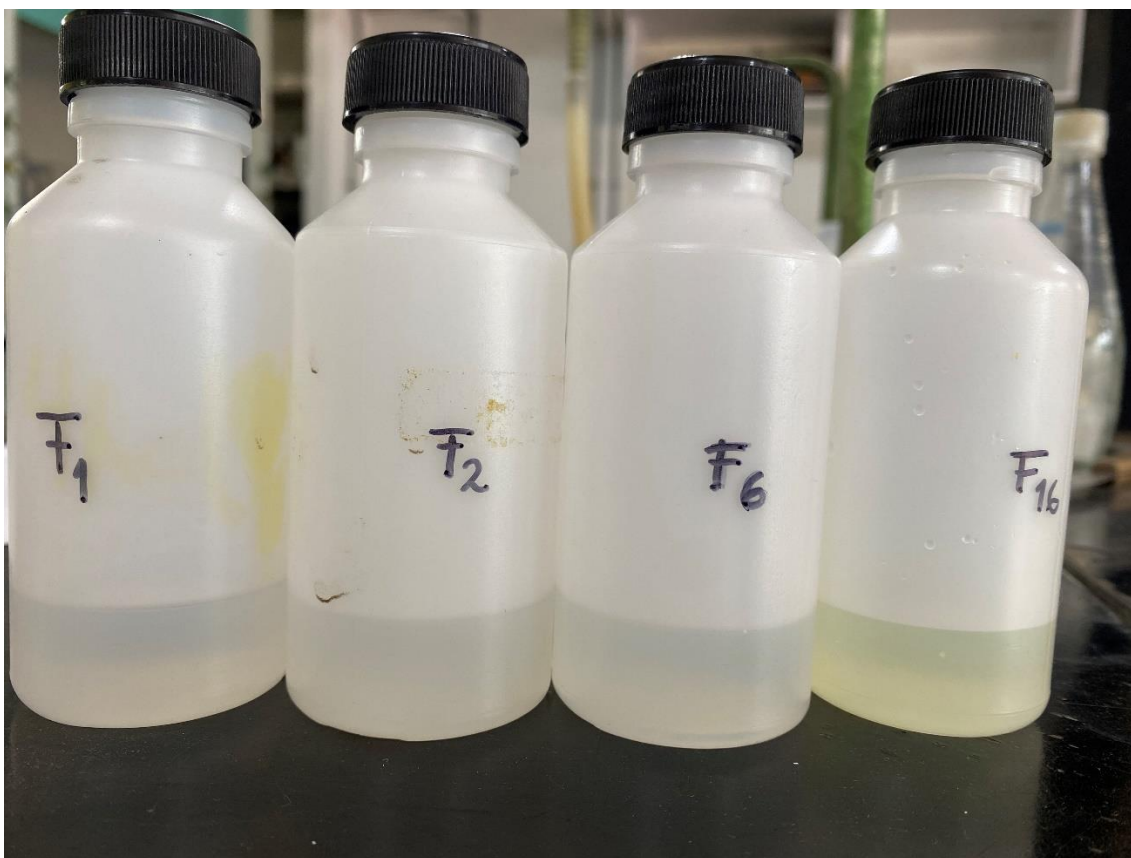
**Figura 12:** Digestión ácida.

Luego, se dejó enfriar la disolución, se filtró y se colocó en un balón aforado de 25 mL aforándolo con agua destilada (figura 13).



**Figura 13:** Filtrado de muestra.

Finalmente, la disolución fue trasvasada a envases plásticos (figura 14), para después ser enviadas al laboratorio “SERVICIOS INTEGRALES RORI, C.A.” para su análisis.



**Figura 14:** Muestras envasadas.

Igualmente, fue realizado un blanco en el análisis de los metales. Para ello, fue tomado una tira de filtro no cargado y sometido a los mismos procedimientos que fueron sometidos la tira de los filtros cargados.

Por otra parte, para obtener la concentración de los metales pesados en la zona de estudio fue utilizados el procedimiento establecido en la norma COVENIN 2465-87, utilizando las ecuaciones 5 y 6. En los apéndices 12 y 13 se aprecian los modelos de cálculos.

#### **Cálculo del factor (F) del área del filtro**

$$F = \frac{D}{C} \quad (\text{Ec. 5})$$

Donde:

**F:** factor del área del filtro.

**D:** área del filtro utilizable (cm).

**C:** área de la tira del filtro analizada (cm).

**Cálculo de la concentración del analito (x) para cada muestra o filtro expuesto**

$$CxM = \frac{(Cx * F * Vaf) - Cxi}{Va} \quad (Ec. 6)$$

Donde:

**CxM:** concentración del analito en cada muestra, expresado en µg/m<sup>3</sup>.

**Cx:** contenido del analito en las tiras del filtro expuesto, en mg/L.

**Cxi:** concentración de la tira del filtro sin exponer.

**Vaf:** volumen final de solución de la tira de filtro expuesto, en L.

**Va:** volumen de aire corregido en condiciones normales, en m<sup>3</sup>.

**6.3.3 Tratamiento estadístico**

El tratamiento estadístico de los datos se elaboró por medio de un análisis por triplicado de un mismo filtro, con la finalidad de poder determinar la reproducibilidad de la metodología y la precisión de los datos.

Los valores de concentración de los metales pesados (As, Cd y Pb) se usaron para realizar una estadística paramétrica, donde se calculó promedio (Ec. 7), desviación estándar (Ec. 8) y coeficiente de varianza (Ec. 9). Posteriormente, estos valores obtenidos fueron reflejados en tablas.

**Cálculo de promedio**

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N} \quad (Ec. 7)$$

Donde:

$\bar{x}$ : Media del conjunto de datos (promedio).

$x_i$ : Valor de un conjunto de datos.

$N$ : Número de datos.

### **Cálculo de desviación estándar**

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N-1}} \quad (Ec.8)$$

Donde:

$s$ : Desviación estándar.

### **Cálculo del coeficiente de varianza**

$$CV = \frac{s}{|\bar{x}|} (100\%) \quad (Ec.9)$$

Donde:

$CV$ : Coeficiente de varianza.

## **7. DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

A continuación, se presentan los resultados obtenidos del análisis de partículas totales suspendidas (PTS) captadas en el Puerto de La Guiara, así como el contenido de Cd, As y Pb presentes en dichas partículas.

### **7.1 Ubicación del punto de muestreo**

La elección del punto para ubicar el equipo se realizó tomando en cuenta lo estipulado en la Norma COVENIN 2060:1996. Dicho esto, las figuras 15 y 16 muestran la ubicación del muestreador de gran volumen (Hi Vol), marca General Metal Works (GMW), Graseby.

El muestreador se instaló en la terraza del edificio más alto dentro de las instalaciones de Guarda Costa (figura 15). Tenía una altura aproximada de 11 m y no contaba con ningún tipo de paredes o ventanas que pudieran intervenir en el monitoreo (figura 16). Además, era el punto estratégico ideal, porque se encontraba cerca de la zona donde llegaban y salían buques, transitaban frecuentemente vehículos de carga pesada y grúas de carga y descarga de contenedores.

Así mismo, se tuvo en consideración las direcciones del viento para hacer la elección del punto, las cuales son principalmente E-W y NE-SW. Entonces, por la forma alargada del puerto se considera que en esta ubicación confluyen ambas corrientes, permitiendo obtener un muestreo representativo de la zona y es la razón por la cual fue escogido como único punto de muestreo.



**Figura 15:** Ubicación del muestreador de alto volumen en el Puerto de La Guaira. (Elaborado en Google Earth, 2025).



**Figura 16:** Muestreador de gran volumen instalado en el Puerto de La Guaira.

## 7.2 Cuantificación de partículas totales suspendidas

El muestreo para la captación de partículas totales suspendidas se realizó dentro del periodo de lluvia y estuvo comprendido desde el 30/04/2024 hasta el 26/06/2024, obteniendo un total de 20 muestras. Las PTS fueron captadas con una frecuencia de 1 muestra cada 3 días y con una duración de  $24 \pm 1$  h.

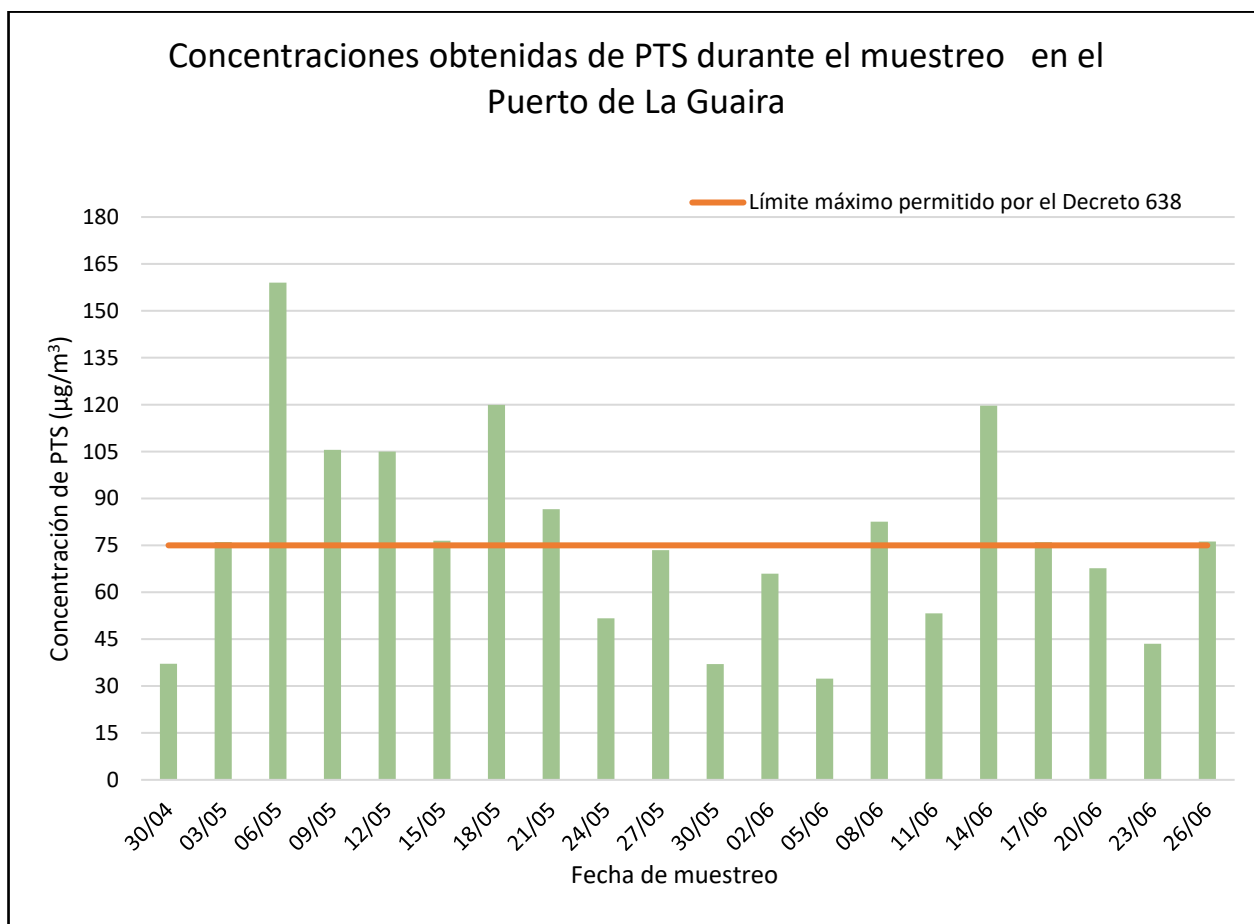
En la tabla 5, se exhiben las concentraciones de las partículas totales suspendidas captadas expresadas  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , encontrando un máximo valor de  $159 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y un mínimo de  $32 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Además, según el valor de la mediana obtenida  $76 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y el promedio geométrico  $77 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , se puede clasificar el Puerto de La Guaira como una

zona con el aire moderadamente contaminado, por lo establecido en el art. 5 del Decreto 638. Asimismo, coincide con lo concluido por Rodríguez *et al.* (2016), quienes establecieron que el aire en esta área se encontraba moderadamente contaminado.

**Tabla 5: Concentración de PTS en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  obtenidas en el Puerto de La Guaira**

Fecha Inicio	Peso de filtro (g)		Peso de las partículas contenidas en los filtros ( $\mu\text{g}$ )	Volumen muestreado (Vest) ( $\text{m}^3$ )	PTS ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
	Inicial	Final			
30/04/2024	2,75687	2,81618	59310	1597	37
03/05/2024	4,4855	4,5868	101340	1332	76
06/05/2024	4,4581	4,6901	231970	1459	159
09/05/2024	4,5162	4,6761	159840	1514	106
12/05/2024	4,4940	4,6490	154940	1476	105
15/05/2024	2,9068	3,0125	105720	1382	77
18/05/2024	2,7755	2,9695	193990	1618	120
21/05/2024	2,7471	2,8769	129750	1499	87
24/05/2024	2,7992	2,8776	78350	1516	52
27/05/2024	2,7989	2,9182	119270	1624	73
30/05/2024	2,79674	2,85085	54110	1462	37
02/06/2024	2,79674	2,88889	92150	1397	66
05/06/2024	2,80564	2,86142	55780	1723	32
08/06/2024	2,78857	2,9153	126730	1535	83
11/06/2024	2,80056	2,8806	80040	1504	53
14/06/2024	2,78774	2,98193	194190	1622	120
17/06/2024	2,79106	2,91309	122030	1605	76
20/06/2024	2,7920	2,9030	110960	1639	68
23/06/2024	2,7872	2,85613	68970	1585	44
26/06/2024	2,7942	2,90762	113450	1488	76
<b>Mediana (<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)</b>					<b>76</b>
<b>Promedio geométrico (<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)</b>					<b>77</b>
<b>Rango (<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)</b>					<b>32 - 159</b>

El gráfico 1, muestra el comportamiento de las PTS durante el periodo de muestreo y en apéndice 7 se reflejan las actividades desarrolladas en el puerto. Se puede apreciar que 11 muestras superan el valor límite inferior permitido de  $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$  establecido en nuestra normativa (decreto 638). Esto corresponde a un 55 % de total de las muestras captadas, lo cual supera el porcentaje de excedencia de 50 % establecido en el Art. 3 del decreto nacional 638. A su vez, iguala al porcentaje de excedencia del 5% establecido en este mismo artículo.



**Gráfico 1:** Concentraciones obtenidas de partículas totales suspendidas en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  captadas en el Puerto de La Guaira.

Durante el muestreo realizado en el Puerto de La Guaira se observaron diferentes actividades. En la tabla 6 se aprecian cuales fueron cada una de ellas y como estas fueron clasificadas. La clasificación de movimiento de transporte marítimo (M.T.M) se refiere a la llegada y salida de barcos, mientras que la carga y descarga de

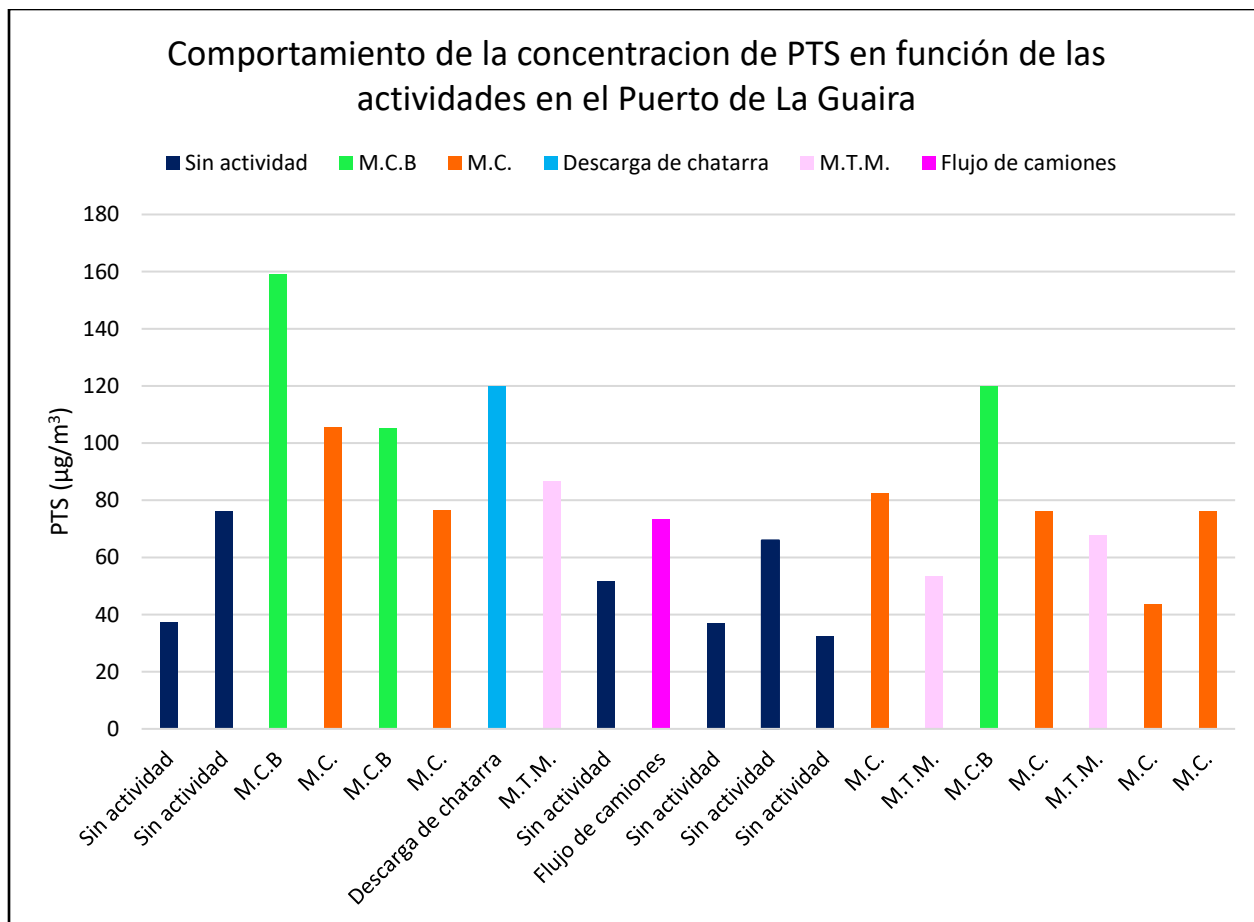
estos buques fueron agrupados como movimiento de contenedores (M.C). Así mismo, existen días donde tenemos la combinación de ambas actividades mencionadas anteriormente, en este caso fueron englobadas como movimiento de contenedores y barcos (M.C.B). Por su parte, los días sin actividad fueron clasificados así, porque no se observaron las actividades cotidianas en la zona muestreada. De igual manera, hay que destacar que la fecha marcada como quema de residuo corresponde a una incineración observada desde las instalaciones del puerto, es decir, se llevó a cabo en los urbanismos cercanos.

**Tabla 6:** Actividades observadas durante el monitoreo en el Puerto de La Guaira

Fecha Inicio	Observaciones	Clasificación de las actividades
30/04/2024	Fuertes corrientes de viento. Sin actividad	Sin actividad
03/05/2024	Baja corriente viento, ambiente húmedo. Sin actividad	Sin actividad
06/05/2024	Baja corriente de viento, ambiente húmedo. Llegada y salida de buques, movimiento de contenedores.	Movimiento de contenedores y barco (M.C.B)
09/05/2024	Baja corriente de viento, nublado. Descarga de buques.	Movimiento de contenedores (M.C)
12/05/2024	Fuertes corrientes de viento. Descarga de barcos y movimiento de contenedores.	Movimiento de contenedores y barco (M.C.B)
15/05/2024	Fuertes corrientes de viento. Descarga de barcos	Movimiento de contenedores (M.C)
18/05/2024	Baja corriente de viento, descarga de chatarra.	Descarga de chatarra
21/05/2024	Salida de barcos, bajas corrientes de viento.	Movimiento de transporte marítimo (M.T.M)
24/05/2024	Nublado, moderadas corrientes de viento. Sin actividad	Sin actividad
27/05/2024	Baja corriente de viento, clima húmedo. Alto flujo vehicular.	Flujo de camiones
30/05/2024	Nublado, baja corriente de viento. Sin actividad	Sin actividad
02/06/2024	Baja corriente de viento. Quema de residuos en el continente	Sin actividad
05/06/2024	Poco viento. Sin actividad	Sin actividad
08/06/2024	Fuertes corrientes de viento, clima húmedo. Descarga de barcos.	Movimiento de contenedores (M.C)
11/06/2024	Moderadas corrientes de viento, llegada de buques cargados.	Movimiento de transporte marítimo (M.T.M)
14/06/2024	Llegada de buques.	Movimiento de contenedores y barco (M.C.B)
17/06/2024	Descarga de buques.	Movimiento de contenedores (M.C)

20/06/2024	Llegada de tanques de guerra, salida de un barco	Movimiento de transporte marítimo (M.T.M)
23/06/2024	Bajas corrientes de viento, clima nublado. Carga de barco con camiones.	Movimiento de contenedores (M.C)
26/06/2024	Bajas corrientes de viento, carga de barcos.	Movimiento de contenedores (M.C)

El gráfico 2 representa como las actividades se relacionan con la concentración de PTS obtenidas. Se puede observar que el mayor aporte de partículas totales suspendidas proviene de las actividades que se desarrollan dentro del puerto, siendo la principal el movimiento de contenedores y barcos, posteriormente seguiría movimiento de contenedores y, por último, movimiento de transporte marítimo. Sin embargo, es importante resaltar la descarga de chatarra, ya que también tuvo una contribución significativa de PTS. Además, el gráfico 3 permite representar que el 92% de las muestras que superan el valor permitido fueron tomadas en días donde hubo actividad en el área.



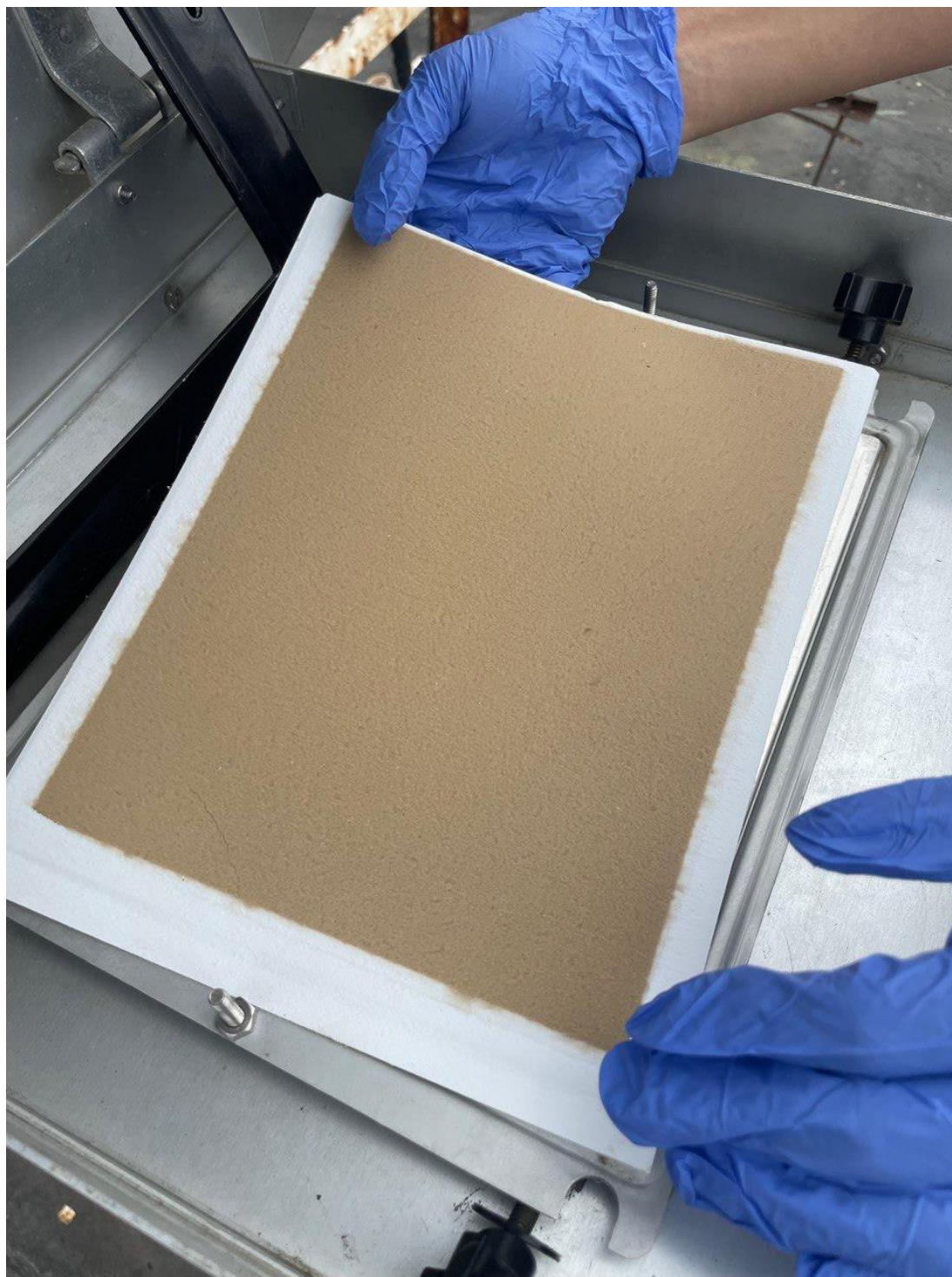
M.T.M: Mov. de transporte marítimo, M.C: Mov. de contenedores, M.C.B: Mov. de contenedores y barcos.

**Gráfico 2:** Actividades del Puerto de La Guaira vs la concentración de PTS ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

Según las tendencias observadas anteriormente se puede decir que los niveles de concentración de las partículas están principalmente controlados por las actividades desarrolladas en el puerto, especialmente en los días donde se observó tanto movimiento de contenedores y llegada o salida de barcos (M.C.B). Es importante destacar que estas actividades tuvieron un comportamiento periódico durante el muestreo, siendo la más repetida el movimiento de contenedores. Por ello, se obtuvieron mayormente filtros de color grisáceo (figura 17) con la excepción de algunos filtros que tuvieron una coloración grisácea – marrón y marrón (figura 18). Esta última coloración coincidió con la presencia de un buque que se encontraba descargando chatarra (figura 19) transportando las partículas por acción del viento desde zonas aledañas al punto de muestreo.



**Figura 17:** Filtro de coloración grisácea.



**Figura 18:** Filtro de coloración marrón.



*Figura 19: Barco descargando chatarra en el puerto.*

### **7.3 Niveles de Pb, As y Cd asociados a las PTS**

La tabla 7 presenta las concentraciones de Pb, As y Cd asociados a las PTS obtenidas en el Puerto de La Guaira, durante el periodo de muestreo desde el 30 de abril hasta el 26 de junio del 2024.

**Tabla 7:** Concentración de Pb, As, Cd asociado a PTS en el Puerto de La Guaira

Fecha Inicio	As ± 0,02 (µg/m <sup>3</sup> )	Cd ± 0,001 (µg/m <sup>3</sup> )	Pb ± 0,002 (µg/m <sup>3</sup> )
30/04/2024	0,24	0,001	0,002
03/05/2024	0,18	0,010	0,016
06/05/2024	0,05	0,008	0,005
09/05/2024	0,01	0,006	0,004
12/05/2024	0,09	0,011	0,011
15/05/2024	0,18	0,007	0,004
18/05/2024	0,04	0,004	0,013
21/05/2024	0,12	0,013	0,001
24/05/2024	0,11	0,013	0,015
27/05/2024	0,07	0,009	0,007
30/05/2024	0,07	0,013	0,014
02/06/2024	0,29	0,005	0,016
05/06/2024	0,09	0,008	0,005
08/06/2024	0,16	0,011	0,006
11/06/2024	0,13	0,013	0,001
14/06/2024	0,10	0,008	0,012
17/06/2024	0,09	0,005	0,001
20/06/2024	0,04	0,002	0,005
23/06/2024	0,12	0,003	0,006
26/06/2024	0,29	0,002	0,010
<b>Mediana</b>	<b>0,10</b>	<b>0,008</b>	<b>0,006</b>
<b>Promedio geométrico</b>	<b>0,12</b>	<b>0,008</b>	<b>0,008</b>
<b>Rango</b>	<b>0,01 – 0,29</b>	<b>0,001 – 0,013</b>	<b>0,001 – 0,016</b>

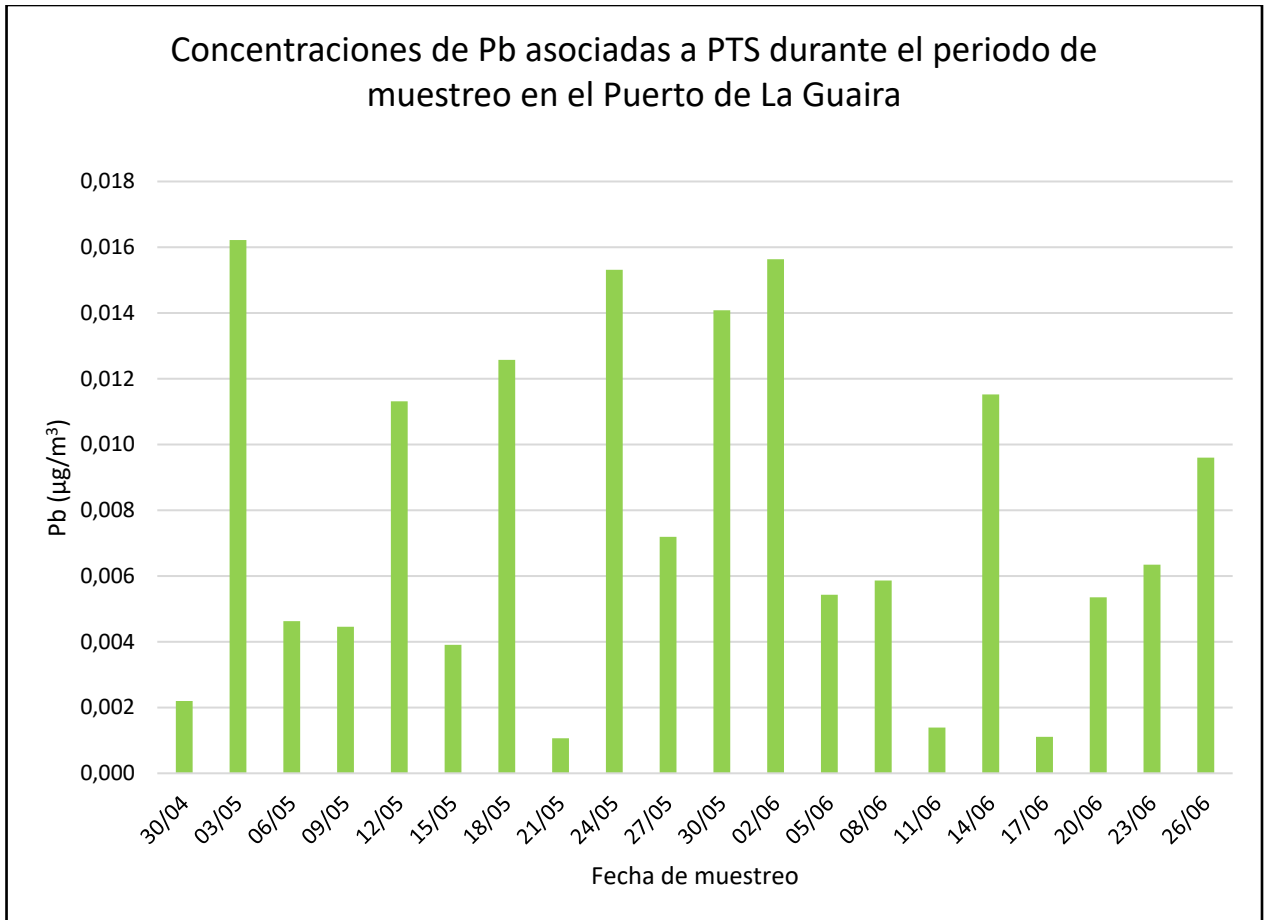
Los resultados obtenidos en el periodo de muestreo indican la presencia de Pb, As y Cd asociados a las PTS. Los valores de As y Cd únicamente serán comparados con la normativa de calidad de aire de la Unión Europea (UE), ya que Venezuela no

cuenta con una normativa que regule las concentraciones de dichos metales en el territorio nacional. Por su parte, el Pb será comparado tanto con el valor establecido en el Decreto 638 “Normas sobre calidad del aire y control de la contaminación atmosférica”, como con la norma de calidad de aire de la UE.

### **7.3.1 Plomo (Pb)**

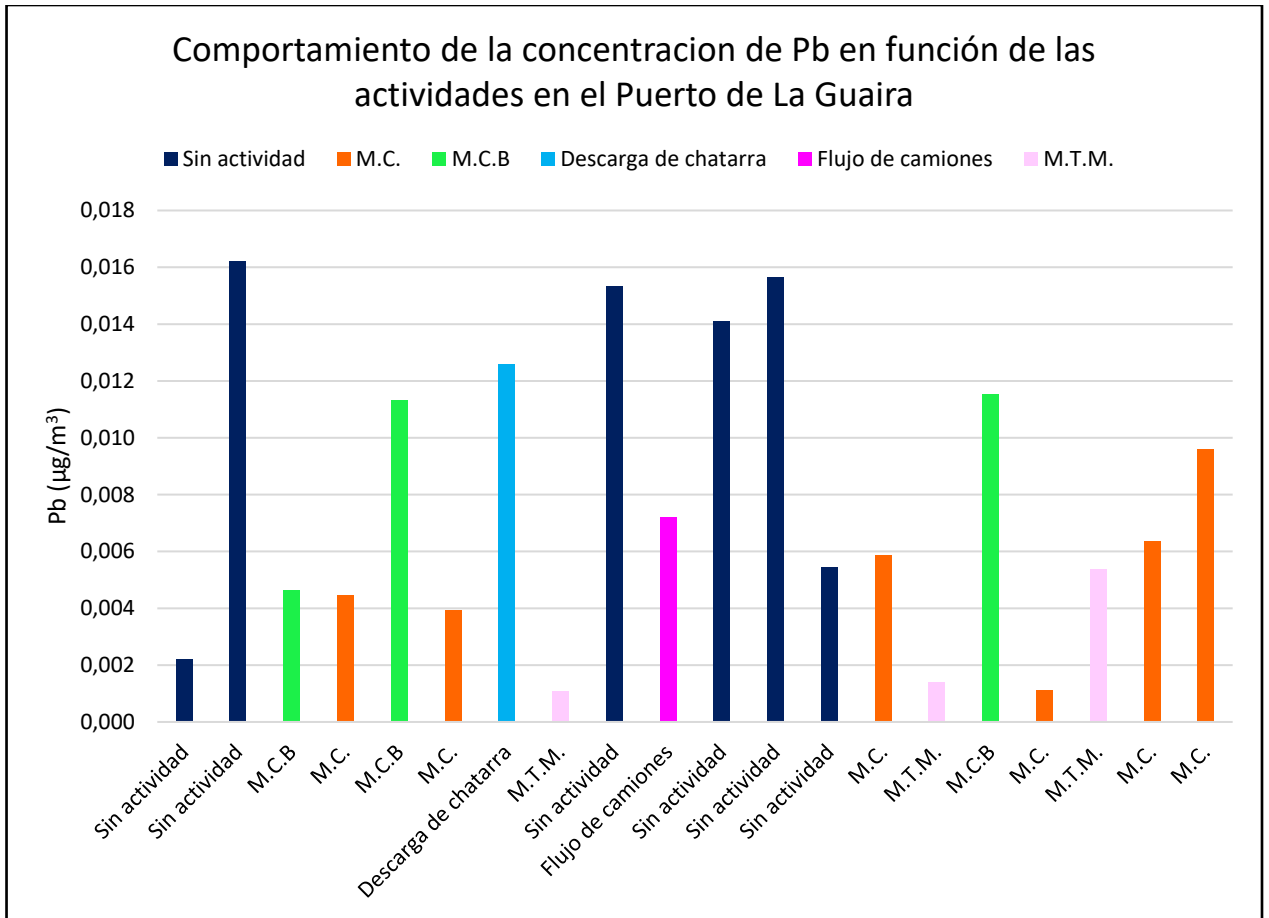
La concentración de Pb obtenida del análisis de las 20 muestras de partículas captadas presenta un valor máximo  $0,016 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y un mínimo de  $0,001 \mu\text{g}/\text{m}^3$  con una mediana de  $0,006 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y un promedio geométrico de  $0,008 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Según lo establecido en el Decreto 638, el valor límite permisible para el Pb en 24h es de  $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Por lo tanto, al compararlo con los resultados obtenidos se puede decir que ninguno sobrepasa dicho valor. Sin embargo, es importante resaltar que este valor fue estipulado en el año 1995 cuando aún la gasolina tenía plomo como uno de sus principales componentes. Por su lado, el máximo permitido por la U.E. es de  $0,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , y al igual que con la normativa nacional ninguno de los valores supera este valor (ver gráfico 3).



**Gráfico 3:** Concentraciones obtenidas de Pb asociado a PTS en µg/m<sup>3</sup> en el Puerto de La Guaira.

El gráfico 4 permite observar la relación entre las actividades y las concentraciones de plomo. Este nos ayuda a observar que las mayores concentraciones están asociadas a días sin actividad y la quema de residuos, debido al parecido entre las concentraciones podemos inferir que estos altos niveles de Pb provienen principalmente de las actividades antrópicas practicadas cerca de la zona. Sin embargo, no se puede descartar la posibilidad de que también exista el aporte de alguna otra actividad desarrollada en el área de estudio que genere un aporte de este metal al ambiente. El plomo es un elemento que suele estar presente en pinturas, pigmentos y en algunos lubricantes y aceites para carros. Además, el desgaste de los neumáticos de los automóviles también puede generar la emisión de este al medio ambiente (Machado *et al.*, 2008).



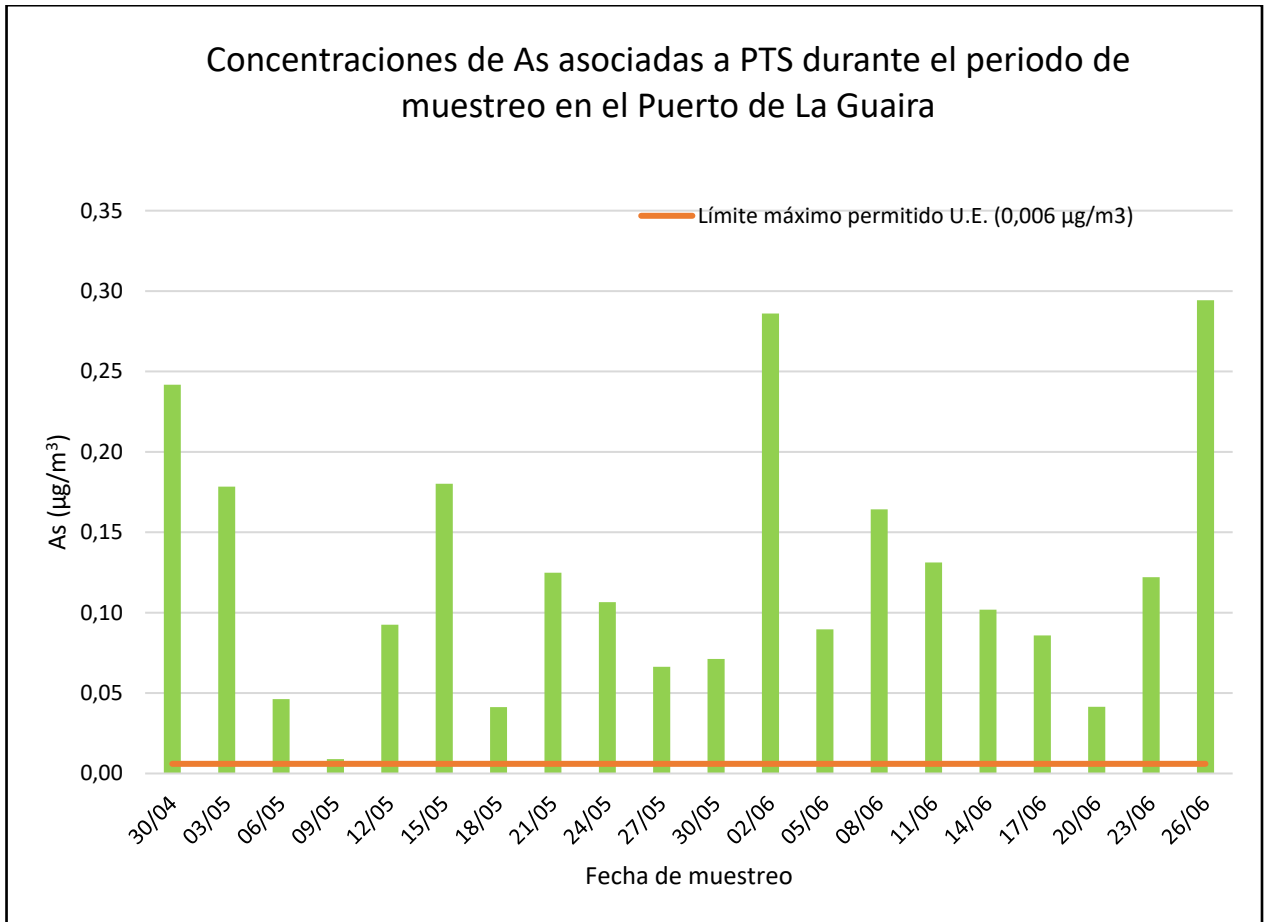
M.T.M: Mov. de transporte marítimo, M.C: Mov. de contenedores, M.C.B: Mov. de contenedores y barcos.

**Gráfico 4:** Relación de la concentración de Pb con respecto a las actividades observadas en el Puerto de La Guaira.

### 7.3.2 Arsénico (As)

La concentración de As obtenida de las 20 muestras analizadas presenta un valor mínimo de 0,01 µg/m³ y un máximo de 0,29 µg/m³ con una mediana de 0,10 µg/m³. También se obtuvo un promedio geométrico de 0,12 µg/m³.

Según la normativa de la Unión Europea el límite permitido para As es de 0,006 µg/m³, el gráfico 5 permite observar que todas las muestras analizadas superan este valor. Es importante resaltar que la mediana de As se ubica 17 veces por arriba máximo establecido, mientras que el promedio esta 20 veces mayor. Esto indica una concentración elevada de dicho metal en el aire, poniendo en riesgo la salud pública de las personas que hacen vida en el puerto o cercano a este. Por lo que urge implementar medidas estrictas para controlar y reducir las emisiones contaminantes, garantizando así un aire más limpio y seguro para la población.

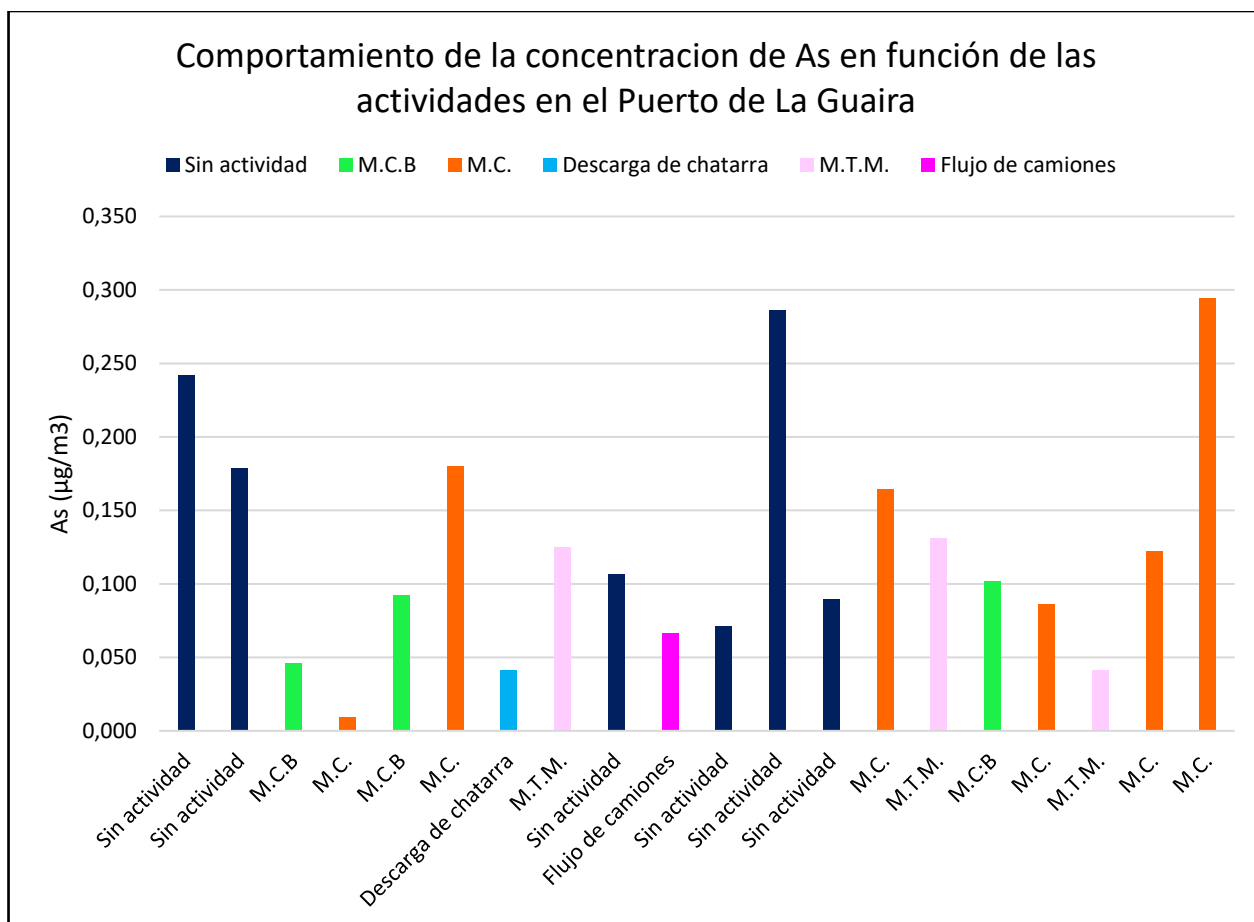


**Gráfico 5:** Concentraciones obtenidas de As asociado a PTS en el Puerto de La Guaira.

El gráfico 6 muestra la relación entre As y las actividades registradas durante el muestreo. El aporte principal de este metal proviene de los días donde hubo movimiento de contenedores, lo cual se relaciona con el manejo de las grúas utilizadas durante el proceso, ya que pueden generar este elemento bien sea por la quema incompleta del diésel, por fricción del material o por la falta de mantenimiento en las maquinarias. Asimismo, existe una contribución significativa de arsénico en días donde no se observaron actividades dentro del área de estudio, la causa de ello puede provenir de factores externos a las actividades desarrolladas en el puerto y que, por acciones del viento y su dirección llegaron dichas partículas a esta área.

El As es un metal pesado que suele estar presente como un remanente dentro de la incineración de residuos y la quema incompleta del diésel. Además, es utilizado

en pesticidas, en la industria de pinturas y en la fabricación de piezas para artefactos electrónicos como microondas, baterías, láseres y luces LED (University Of Maine, 2015). Por lo tanto, la actividad que mayor aporte del elemento tuvo fue el movimiento de contenedores y actividades antrópicas cercanas a la zona.



M.T.M: Mov. de transporte marítimo, M.C: Mov. de contenedores, M.C.B: Mov. de contenedores y barcos.

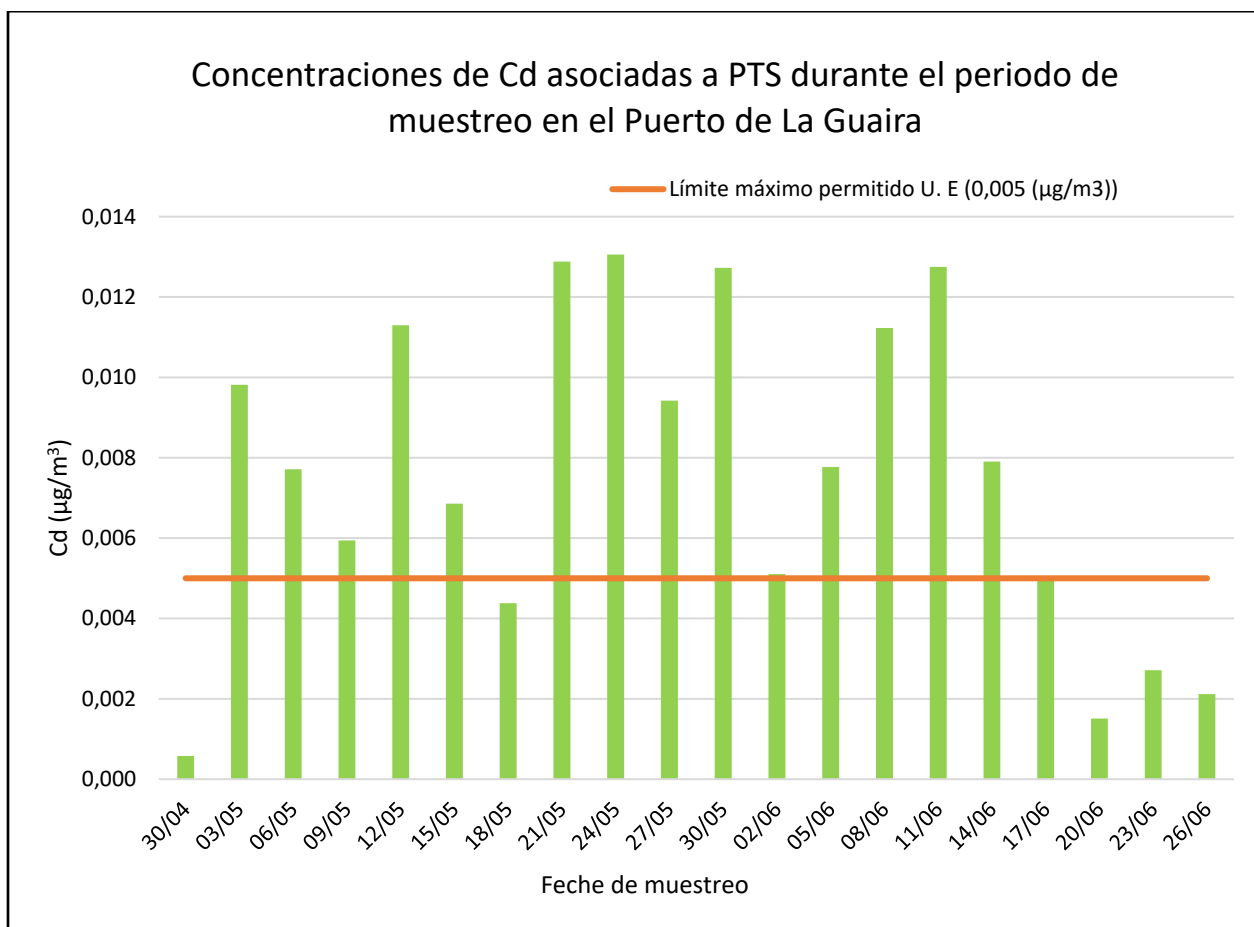
**Gráfico 6:** Relación entre la concentración de As con respecto a las actividades

### 7.3.3 Cadmio (Cd)

La concentración de Cd obtenida del análisis de las 20 muestras captadas presenta una mediana y promedio de 0,008 µg/m³, junto con un mínimo de 0,001 µg/m³ y un valor máximo de 0,013 µg/m³.

Según la Unión Europea, el máximo permitido para el Cd es de 0,005 µg/m³, por lo que observando el gráfico 7 se puede apreciar que 13 muestras se ubican por

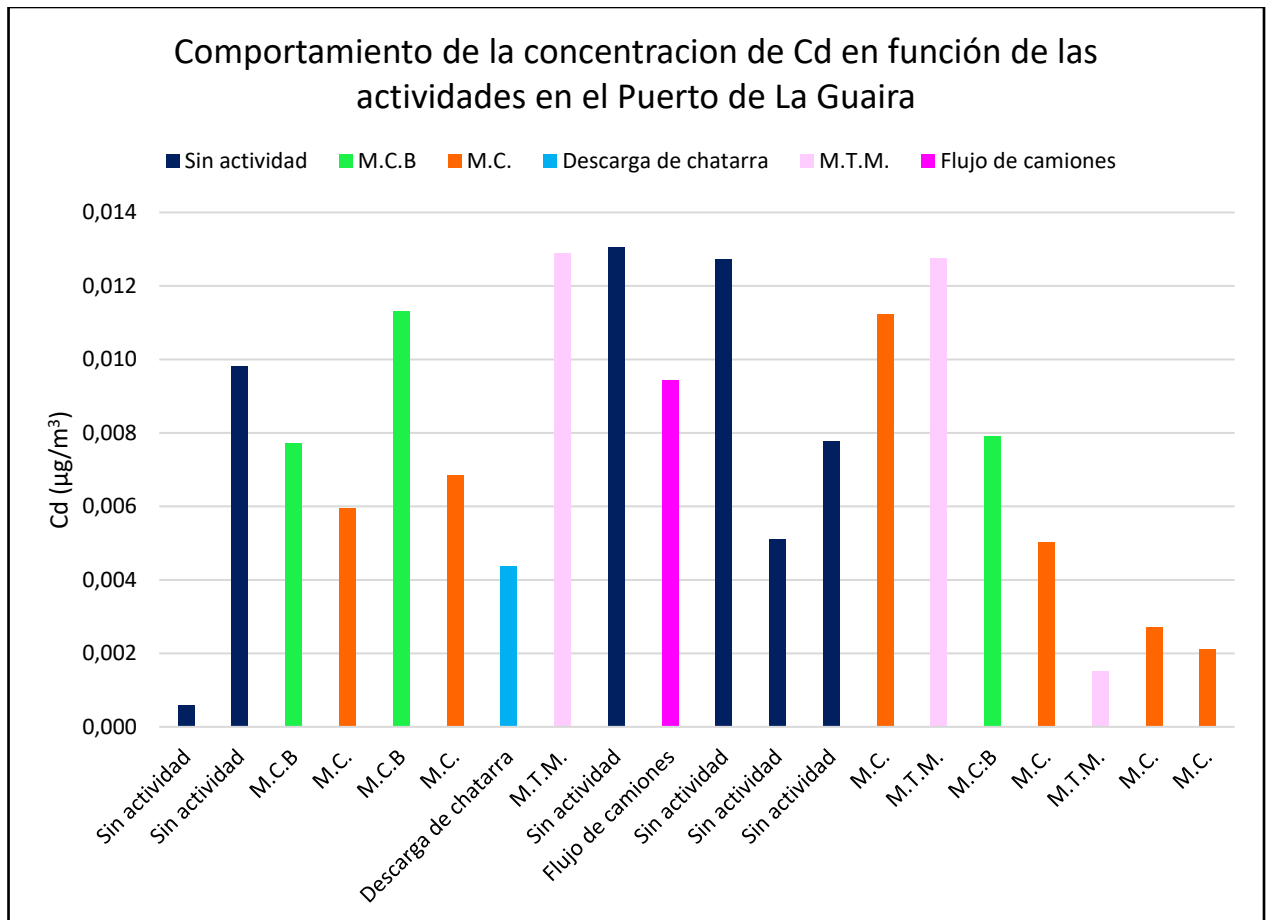
encima de este valor y 7 de ellas están por debajo. Por su parte, el valor de la mediana y el promedio es 1,6 veces mayor que límite permitido, indicando así una contaminación del aire por este metal. Esto puede traer consigo ciertas consecuencias de salud para la población, por lo que es importante tomar medidas para controlar y disminuir las emisiones de Cd.



**Gráfico 7:** Concentraciones obtenidas de Cd asociado a PTS en el Puerto de La Guaira.

El gráfico 8 refleja como es el comportamiento del Cd con respecto a las actividades que se desarrollaron en la zona portuaria de La Guaira. Lo que se observa es que este metal se encuentra en altas concentraciones independientemente de la actividad observada en los días de muestreo, por lo que, se puede decir que hay actividades antrópicas que estén generando la liberación del Cd a la atmósfera.

El Cd es un metal que puede estar presente en distintos productos de uso cotidiano, como puede ser fertilizantes, plaguicidas y material hecho de PVC. Además de ser utilizado comúnmente en baterías recargables, pigmentos, en semiconductores para la industria electrónica y aleaciones metálicas usadas en soldadura (Esparza, 2003; UNEP, s.f.).



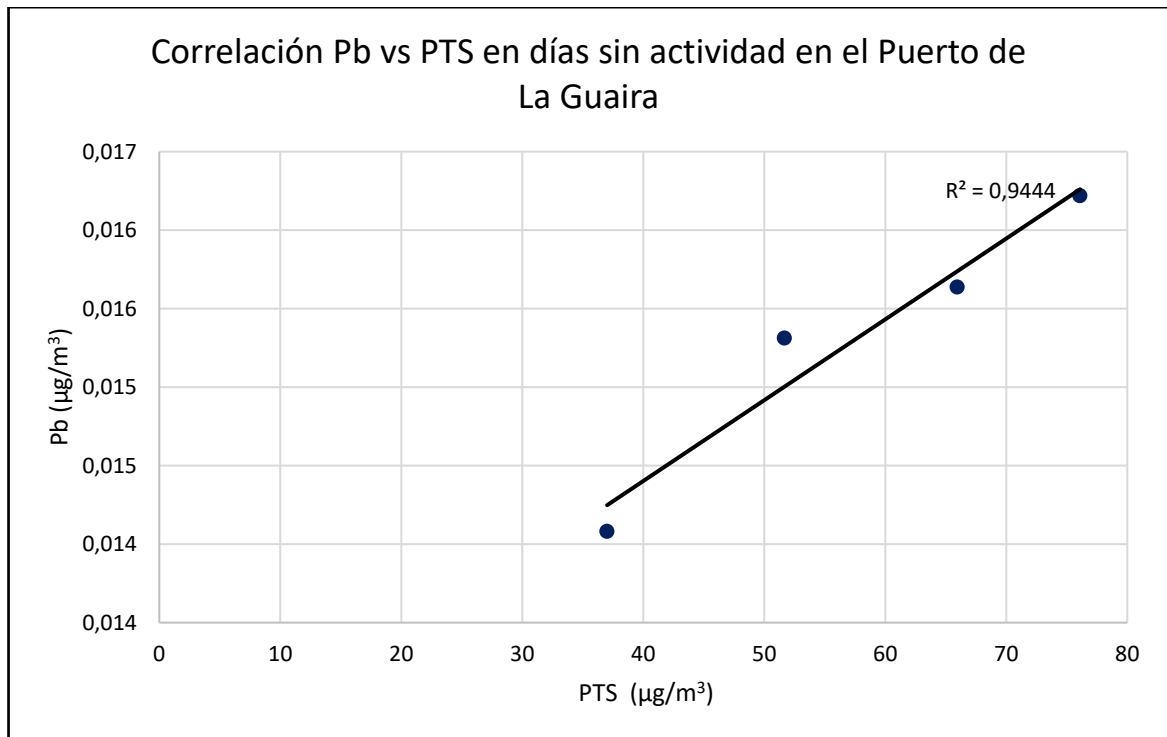
M.T.M: Mov. de transporte marítimo, M.C: Mov. de contenedores, M.C.B: Mov. de contenedores y barcos.

**Gráfico 8:** Relación de la concentración de Cd con respecto a las actividades observadas en el Puerto de La Guaira.

#### 7.4 Correlaciones entre metales y partículas totales suspendidas (PTS)

El gráfico 9 refleja la correlación que existe entre días sin actividad dentro del puerto. Como se puede observar su  $R^2= 0,944$  demuestra un crecimiento proporcional entre las concentraciones de Pb y las de PTS, lo que quiere decir que en esos días específicamente existe una fuente de emisión proveniente del continente que genera un aporte de plomo que correlaciona positivamente con la concentración de partículas

totales suspendidas de esos días, la cual puede ser alguna industria cercana al área de estudio que genere dichos contaminantes. Los otros días sin actividad son descartados de esta relación, ya que posiblemente provienen de una fuente de emisión diferente y por ello, no tienen el mismo comportamiento, además, son los días en que se evidencia la menor concentración de emisiones de plomo.



Azul: Sin actividad

**Gráfico 9:** Relación de las concentraciones de Pb y PTS en días sin actividad en la zona de estudio

En el caso de la correlación entre As y Cd con las PTS y las diversas actividades observadas en la zona de estudio, no se evidenció una relación positiva entre las variables. Esto quiere decir que las fuentes de emisión de los metales no es la misma fuente que para las PTS.

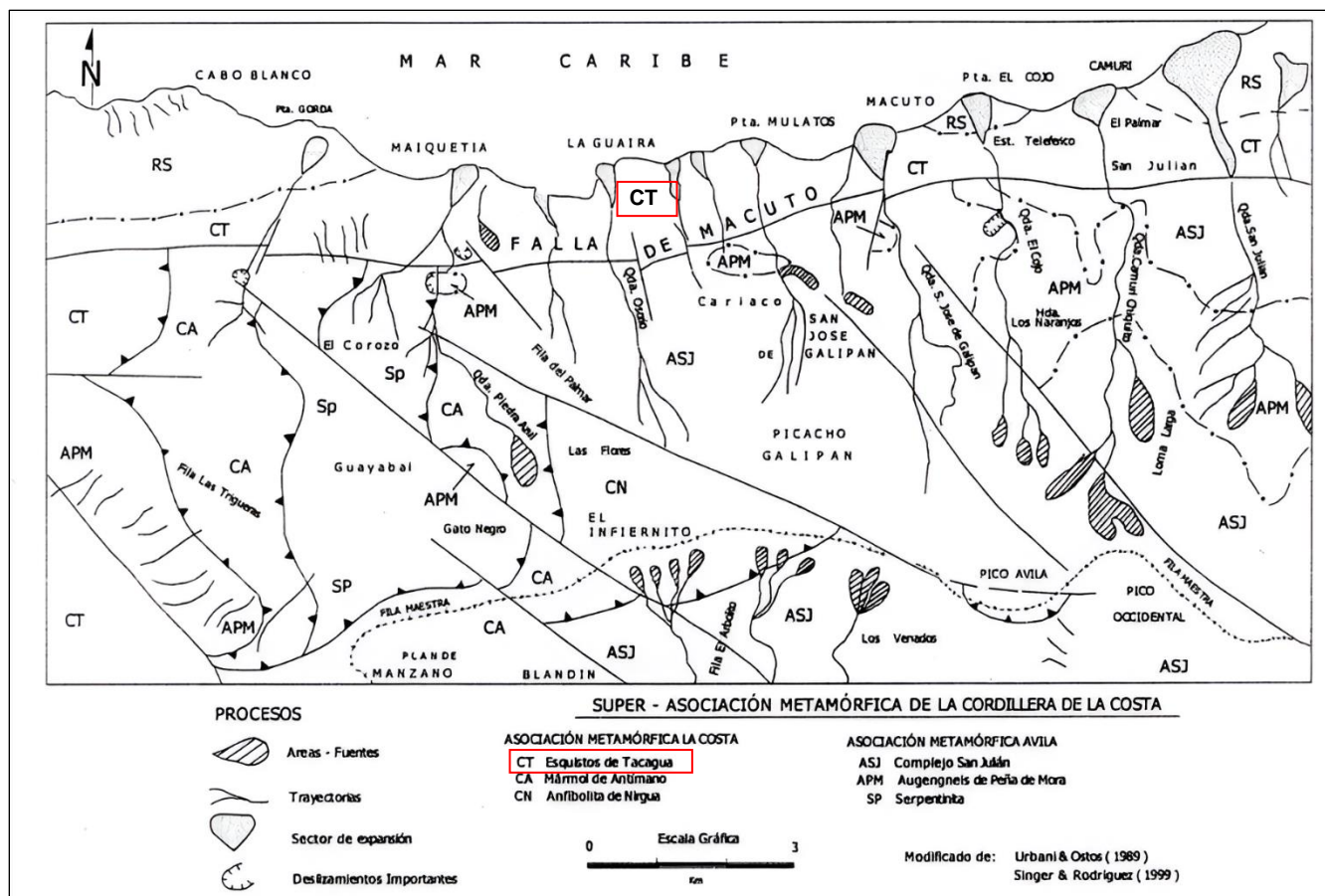
## **7.5 Correlaciones entre metales**

Se elaboraron todas las correlaciones posibles entre las concentraciones de As, Cd y Pb, pero no se obtuvo ninguna relación que diera indicio sobre si estos han sido emitidos por una misma fuente.

## **7.6 Aporte litológico**

En un ámbito litológico La Guaira se encuentra controlada por la Asociación Metamórfica Ávila y la Asociación Metamórfica La Costa, siendo esta última la relevante para nuestra área de estudio. Esta se constituye por el Esquisto de Tacagua, la Anfibolita de Nirgua y el Mármol de Antímano.

De manera local, la litología que predomina es el Esquisto de Tacagua (figura 20). Este se encuentra constituido principalmente por 3 tipos de rocas: esquistos formados por cuarzo, muscovita, pequeñas cantidades de grafito y calcita o anfibolita en concentraciones variables; rocas epidóticas y mármol más o menos puro con gradación a esquistos calcíticos. Por lo tanto, se puede decir que la litología de la zona no tiene un aporte significativo o de relevancia de estos metales al ambiente.



**Figura 20:** Mapa Geológico desde-Punta Gorda a Camurí mostrando la litología asociada a la zona de estudio. Modificado de Urbani & Ostos (1989) y Singer & Rodríguez (1999).

### 7.7 Tratamiento estadístico de los datos

Con la finalidad de corroborar la reproducibilidad de la técnica de análisis, se escogió una de las muestras captadas para hacer por triplicado. La muestra elegida para el análisis por triplicado fue F16, de donde se obtuvo la concentración de cada uno de los metales (Pb, As y Cd) para posteriormente calcular, promedio, desviación estándar y coeficiente de varianza (tabla 8).

**Tabla 8:** Tratamiento estadístico de los datos.

Muestra	Metal	Concentración ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Promedio	Desv. Est.	C.V (%)
F16	As	0,10 0,09 0,06	0,08	0,02	24,06
	Cd	0,008 0,009 0,008	0,008	0,001	5,064
	Pb	0,012 0,010 0,006	0,009	0,003	29,31

Observando los resultados, se puede decir que el Cd tiene una alta precisión entre sus valores, con una desviación estándar baja 0,001. Asimismo, el As y el Pb tienen un coeficiente de varianza de 24,06 y 29,31 respectivamente, que, a pesar de ser un poco elevados, aún se encuentran dentro de un rango aceptado (30%) para muestras con matrices complejas como el aire en análisis ambientales (Barwick *et al.* (2014); PhillipCapital (s. f.)). Por lo que, se puede decir que la técnica utilizada es reproducible para estos metales. Adicionalmente, estos valores reflejan que el As puede ser más susceptible a los errores de manipulación de las muestras en el laboratorio, posiblemente por su volatilidad pueden sufrir cambios de concentración por pequeñas diferencias de temperatura al momento del análisis. Para el caso del Pb, se puede deber a la falta de homogeneidad del tamaño de partículas a lo largo del filtro, ya que no hay evidencia suficiente para determinar a qué tamaño se asocia mejor este metal. Por lo que se recomienda tener esta variabilidad en cuenta para futuros estudios.

## 7.8 Impacto ambiental

El aire del Puerto de La Guaira se encuentra moderadamente contaminado por partículas totales suspendidas, según lo planteado en el Art. 5 del Decreto 638. La principal fuente de emisión de estas partículas son las actividades desarrolladas dentro de las instalaciones del puerto. Los niveles de PTS en la atmósfera pueden traer consigo ciertas complicaciones para la salud de los seres humanos, especialmente en el sistema respiratorio, ocasionando enfermedades como asma, bronquitis y neumonía.

El puerto es un área bastante concurrida por personas, bien sea trabajadores o residentes de la zona, por ello, surge la necesidad de tomar medidas para disminuir los niveles de partículas en el aire. Ya que la inhalación cotidiana de estas puede generar complicaciones en su salud.

Por su parte, también existe una contaminación por metales pesados, específicamente por As y Cd, los cuales superan los límites establecidos por la Unión Europea en 17 y 1,6 veces respectivamente. La presencia de ellos es alarmante, ya que son elevadamente tóxicos cuando se tiene una exposición prolongada a los mismos, ocasionando afecciones en el sistema gastrointestinal, neurológica, óseo y cardiovascular, incluso en algunos casos puede existir riesgo de cáncer. Los elevados niveles de arsénico provienen principalmente de las actividades desarrolladas en el puerto.

Por su parte, para lograr mitigar los niveles de cadmio, lo primero es identificar de donde proviene, ya que sus resultados indican que hay presencia del mismo independientemente de la actividad que se realice, por lo que se sugiere elaborar un monitoreo constante de este metal para encontrar la fuente de emisión y así, poder tomar medidas para su disminución. A su vez, las concentraciones de Pb se encuentran por debajo de los límites establecidos por la normativa nacional (decreto 638) y la Unión Europea, sin embargo, es de gran interés que se realice un estudio de monitoreo constante del mismo y así prevenir un aumento de sus niveles.

De igual manera, surge la necesidad de actualizar nuestra normativa de calidad de aire, ya que esta fue elaborada para el año 1995 y se encuentra obsoleta con respecto a las normativas ambientales internacionales. Tomando en cuenta que solo contamos con valores límites para PTS y desde hace unos cuantos años se utilizan las  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ . Además, no existe un límite máximo permitido ni para cadmio, ni para arsénico.

## 8. CONCLUSIONES

1. La mediana de la concentración de PTS es  $76 \mu\text{g}/\text{m}^3$  con un promedio de  $77 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y un rango de 32 a  $159 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Por lo que el aire en el Puerto de La Guaira se clasifica según el Decreto 638 como un aire moderadamente contaminado.
2. Las actividades desarrolladas en el Puerto de La Guaira son la principal causa de contaminación de PTS, ya que el 55% de las muestras que superan el límite establecido en el Decreto 638 ( $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) fueron tomadas en días donde se observaron actividades.
3. El Pb tuvo una mediana de  $0,006 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y un promedio de  $0,008 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , con un rango de  $0,001-0,016 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Estas concentraciones no sobrepasan los límites establecidos por el Decreto 638 ( $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) y la Norma sobre la calidad del aire ambiente y a una atmósfera más limpia en Europa ( $0,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ).
4. La emisión de Pb en el área de estudio proviene principalmente de las actividades antrópicas realizadas en zonas aledañas al puerto.
5. El valor mínimo de As fue de  $0,01 \mu\text{g}/\text{m}^3$  con un máximo de  $0,29 \mu\text{g}/\text{m}^3$  con una mediana y un promedio de  $0,10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y  $0,12 \mu\text{g}/\text{m}^3$  respectivamente. Dichas concentraciones sobrepasan 17 y 20 veces el valor límite establecido por la Unión Europea ( $0,006 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ).
6. Cd tiene una mediana y un promedio de  $0,008 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , con un mínimo de  $0,001 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y un valor máximo de  $0,013 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Siendo 13 de las 20 muestras las que superan 1,6 veces el límite permisible por la Unión Europea ( $0,005 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ).
7. El mayor aporte de As a la atmósfera del Puerto de La Guaira, esta principalmente controlado por las actividades realizadas en la zona. Mientras que el Cd tiene una fuente de emisión desconocida que debe provenir de actividades elaboradas en el continente.

## 9. RECOMENDACIONES

1. Realizar un estudio con más estaciones de monitoreo para la captación de partículas totales suspendidas, que abarque el periodo de sequía y lluvia, para tener una mejor clasificación de la calidad del aire de la zona de estudio.
2. Extender esta investigación a otros puertos importantes del país, para establecer una línea base de toda la zona costera del territorio nacional.
3. Caracterizar las fracciones  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  para identificar en cada tamaño el contenido de Pb, As, Cd, entre otros metales.
4. Elaborar un estudio de microscopia electrónica para clasificar morfológicamente las partículas atmosféricas y de esta manera lograr determinar su fuente exacta de emisión.
5. Determinar los niveles de mercurio (Hg) presentes en el particulado atmosférico del puerto de La Guaira.
6. Realizar monitoreos constantes de las concentraciones de los metales pesados, específicamente para el As y el Cd, que son los 2 elementos que sobrepasan los valores establecidos por la Unión Europea. Además de implementar medidas que controlen la emisión de dichos metales, para mitigar el impacto que tienen sobre la salud de la población.
7. Determinar en campo durante cada día de monitoreo las variables meteorológicas de temperatura, dirección del viento, % de humedad en el aire y presión, para evaluar la influencia de estas variables en la concentración de las partículas atmosféricas y conocer la dirección predominantes del viento y su velocidad.

## 10. BIBLIOGRAFÍA

- Adriano D. (2001). *Trace elements in terrestrial environments*. Biogeochemistry, bioavailability and risks of metals. Springer-Verlag, New York.
- Alankarage, D., y Juhasz, A. L. (2022). Impact of smelter re-development on spatial and temporal airborne Pb concentrations. *Environmental Pollution*, 311, 119952. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119952>
- Alberich, A. (2010). *Nuevas estrategias electroanalíticas y quimiométricas aplicadas a sistemas de difícil resolución. Complejación de fitoquelatinas con plomo*. [Tesis Doctoral, Departament de Química Analítica. Universitat de Barcelona] Barcelona.
- Artiñano, B., Salvador, D., Alonso, X., y Alastuey, A. (2003). Anthropogenic and natural influence of PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> aerosol in Madrid (Spain): Analysis of high concentration episodes. *Environmental Pollution*, 125(3), 453-465. [https://doi.org/10.1016/s0269-7491\(03\)00078-2](https://doi.org/10.1016/s0269-7491(03)00078-2)
- Bautista, F. (1999). *Introducción al estudio de la contaminación del suelo por metales*, Vol.1. UADY.
- Bolivariana de Puertos (Bolipuertos). (s.f.). *Puerto de La Guaira*. Disponible en: <http://extranet.bolipuertos.gob.ve/Puertos/LaGuaira.aspx> (Consulta: 2024, julio 10)
- Barwick, V, et al. (2014). *The Fitness for Purpose of Analytical Methods A Laboratory Guide to Method Validation and Related Topics Second edition. Eurachem Guide*.
- Borrego, K. (2020). *Evaluación de los niveles de mercurio (Hg) en suelo, partículas sedimentables y partículas totales suspendidas (PTS) en la zona industrial de Ocumare del Tuy, Estado Miranda*. [Tesis de grado, Universidad Central de Venezuela] Caracas.

- Brusseau, M., Matthias, A., Comrie, A., y Musil, S. (2019). Atmospheric Pollution. *Environmental and Pollution Science*, 293-309.
- Burgos, A. (2017). *Caracterización química y morfológica a través de Microscopía Electrónica de partículas totales suspendidas (PTS) captadas en dos zonas del eje Charallave-Ocumare, Edo. Miranda*. [Tesis de grado, Universidad Central de Venezuela] Caracas
- Camilloni, I., y Vera, C. (2012). *La atmósfera. Explora Las ciencias en el mundo contemporáneo*.
- Caracas / Maiquetía Aerop. Intl. Simón Bolívar | Historial Meteorológico | Meteostat. (2024, 30 abril). [https://meteostat.net/es/station/80415?t=2024-04-30/2024-06-26#google\\_vignette](https://meteostat.net/es/station/80415?t=2024-04-30/2024-06-26#google_vignette)
- Chaffee, M., Hoffman, J., Tidball, R., y Van Gosen, B. (1997). Discriminating between natural and anthropogenic anomalies in the surficial environment in Yellowstone National Park, Idaho, Montana, and Wyoming. *In 4th International symposium on environmental geochemistry, proceedings: US Geological Survey Open-File Report*, pp. 97-496.
- Chaffee, M., y Carlson, R. (1998). Environmental geochemistry in Yellowstone National Park: Distinguishing natural and anthropogenic anomalies. *Yellowstone Science*, 6(2), 29.
- Chávez, L., et al. (2017). Enfermedad renal crónica en México y su relación con los metales pesados, *Revista Médica del IMSS*; Vol. 55, Issue 6, p725-734, 10p.
- Concon, J. (2009). Heavy metals in food. *Food Toxicology, Part B: Contaminants and Additives*. New York, Dekker, 3(4), p.1043-1045.
- Cotton, F. (1999) *Advanced Inorganic Chemistry*. 6th Edition.
- Cullen, J., y Maldonado, T. (2013). *Cadmium: from toxicity to essentiality, metal ions in life sciences*. Capítulo 2, Canadá, Springer Science and Business Media.

- Datos climáticos y meteorológicos históricos simulados para La Guaira. (s. f.). Meteoblue. [https://www.meteoblue.com/es/tiempo/historyclimate/climatemoded/la-guaira\\_venezuela\\_3637721](https://www.meteoblue.com/es/tiempo/historyclimate/climatemoded/la-guaira_venezuela_3637721)
- Decreto 638. (1995). *Normas sobre calidad del aire y control de la contaminación atmosférica*. Caracas, Venezuela.
- DIRECTIVA (UE) 2024/2881 DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO. (2024). Sobre la calidad del aire ambiente y a una atmósfera más limpia en Europa.
- Domínguez, H. (2004) *Nuestra Atmósfera: Cómo comprender Los Cambios climáticos*. LD Books.
- Environmental Protection Agency - EPA. (1999). "Selección, preparación y extracción de material filtrado". Método IO -3.1: *Métodos de análisis para la determinación de la concentración de especies químicas en partículas suspendidas colectadas en filtros*. 30 p.
- Environmental Protection Agency - EPA. (2018). *Health and Environmental Effects of Particulate Matter*. Documento en línea. Disponible en: <https://www.epa.gov/pm-pollution/health-and-environmental-effects-particulate-matter-pm> (Consulta: 2024, junio 20).
- Farfán, M., Páramo, V., Sánchez, A., y Velázquez, G. (2011). *Guía metodológica para la estimación de emisiones de PM<sub>2.5</sub>*. Secretaría de medio ambiente y recursos naturales, instituto nacional de ecología.
- Fernández, W., y Ramírez, P. (1991). El Niño, la Oscilación del Sur y sus efectos en Costa Rica: una revisión. *Tecnología en Marcha*, 11(1), 3-10.
- Ferrís et al., (s.f.). *Polución atmosférica por contaminantes químicos*. Recuperado de: <https://www.pehsu.org/az/pdf/atmosfera.pdf>
- Fitz, W., y Wenzel, W. (2002). Arsenic transformations in the soil-rhizosphere-plant system: fundamentals and potential application to phytoremediation. *Journal of Biotechnology*, 99: 259-278.

- Fleischer, M. (1974). Environmental Impact of Cadmium: A Review by the Panel on Hazardous Trace Substances, *Environmental Health Perspectives*. Vol. 7, 1974, pp. 253-323.
- Forbes, P., y Garland, R. (2016). Outdoor Air Pollution. *Comprehensive Analytical Chemistry*, Volume 73, pp 73–96.
- García, H. (2002). Hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) y metales en partículas atmosféricas en áreas industriales y urbanas. *Material particulado atmosférico y salud*. Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia.
- Gregorauskiene, V., y Kaduñas, V. (1997). Experience and goals of geochemical mapping for environmental protection in Lithuania. *J. Geochem. Explor*, 60, 67-76.
- Guerrero, E. (2017). *Estudio de la concentración de mercurio (Hg) asociado a las partículas totales suspendidas (PTS), en la atmósfera del Aeropuerto Metropolitano de Caracas en Ocumare del Tuy y la zona industrial de Charallave, sector Pitahaya, estado Miranda*. [Tesis de grado, Universidad Central de Venezuela] Caracas.
- Health Effects Institute (HEI). (2013). *Review Panel on Ultrafine Particles. Understanding the Health Effects of Ambient Ultrafine Particles*. HEI Perspectives 3.
- Heyder, J. (2004). Deposition of Inhaled Particles in the Human Respiratory Tract and Consequences for Regional Targeting in Respiratory Drug Delivery. *Proceedings Of the American Thoracic Society*, 1(4), 315-320.
- Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMEH). (s.f.). Climograma. Recuperado de: <http://www.inameh.gob.ve/web/climogra.php>
- International Programme on Chemical Safety (IPCS). (2002). *Environmental health criteria: Copper*. Geneva: World Health Organization. Ginebra (Suiza): 118(1), p. 234-252.

- ISGLOBAL. (2023). *Transporte marítimo: la contaminación olvidada*. Disponible en: <https://www.isglobal.org/healthisglobal/-/custom-blog-portlet/transporte-maritimo-la-contaminacion-olvidada>
- Kumar, N., y Jha, A. K. (2023). *Lead Toxicity: Challenges and Solution*. Springer.
- Lillo, J. (2003). Peligros geoquímicos: arsénico de origen natural en las aguas. *Escuela Superior de Ciencias Experimentales y Medio Ambiente*.
- Linares, E. (2021). *Metodología para el diagnóstico ambiental comunitario con fines investigativos desde el posgrado académico*. Universidad y Sociedad, 309-319.
- Londoño, L., Londoño, P., y Muñoz, F. (2016). Los riesgos de los metales pesados en la salud humana y animal. *Biotecnología en el Sect. Agropecu. y Agroindustrial*, vol. 14, no. 2, p. 145.
- Machado, A., García, N., García, C., Acosta, L., Córdova, A., Linares, M., Giraldoth, D., y Velásquez, H. (2008). contaminación por metales (Pb, Zn, Ni y Cr) en aire, sedimentos viales y suelo en una zona de alto tráfico vehicular. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 24(4), 171-182.
- Mandal, B., y Suzuki, K. (2002). Arsenic round the world: a review. *Talanta*, 58(1), 201-235. [https://doi.org/10.1016/s0039-9140\(02\)00268-0](https://doi.org/10.1016/s0039-9140(02)00268-0)
- Marcos, R., y Valderrama, R. (2012). *Contaminación del aire por material particulado*. Centro de Desarrollo e investigación en termofluidos (CEDIT). Departamento de ingeniería Mecánica de Fluidos (DAIMF).
- Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial de Colombia - MAVDT. (2008). *Protocolo para el monitoreo y seguimiento de calidad del aire*. Bogotá, Colombia.
- Ministerio del Ambiente (MINAM). (2018). *Guía para la elaboración de la línea base en el marco del Sistema Nacional de Evaluación del Impacto Ambiental - SEIA*. Lima.

- Miranda, E., y Arriaga, L. (2016). *Evaluación del nivel de concentración de metales pesados en el aire, en los distritos de Callería, Yarinacocha y Manantay, Provincia de Coronel Portillo – Ucayali – Pucallpa – Perú*. Ciencia y Desarrollo.
- Molina, M., y Molina, L. (2001). *Estrategia integral de Gestión de la calidad del Aire*. Gaceta Ecológica, núm. 57, trimestral, 2000, pp. 28-37.
- Mudhoo, A., Sharma, S., Garg, V., y Tseng, C. (2011) Arsenic: An overview of applications, health, and environmental concerns and removal processes. *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol*, 41, 435-519.
- Nava, R., y Méndez, A. (2011). Efectos neurotóxicos de metales pesados (cadmio, plomo, arsénico y talio). *Neurociencias*. 16(3): 140-147.
- Nievas, H., et al. (2013). Línea de Base Ambiental de Agua y Sedimento de Escorrentía Superficial para la Quebrada Alipán, Sierra de Velasco, La Rioja. *Revista de la Asociación Argentina*, 3(70), pp. 351-365.
- Norma Venezolana COVENIN 2060:1996. (1996). [Documento en línea]. Disponible en: [http://fastmed.com.ve/wp-content/uploads/2014/07/2060-1996\\_Determinacion\\_de\\_las\\_particulas\\_totales\\_en\\_la\\_atmosfera.pdf](http://fastmed.com.ve/wp-content/uploads/2014/07/2060-1996_Determinacion_de_las_particulas_totales_en_la_atmosfera.pdf) (Consulta: 2024, mayo 20).
- Norma Venezolana COVENIN 2465-87. (1987). *Partículas suspendidas en la atmósfera. Determinación de plomo por espectrofotometría de absorción atómica. Método de referencia*. Venezuela
- Organización Mundial de la Salud (OMS). (2016). *Intoxicación por plomo y salud*. Disponible en: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/lead-poisoning-and-health> (Consulta: 2024, junio 20).
- Organización Mundial de la Salud (OMS). (2022) Arsénico. Disponible en: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/arsenic> (Consulta: 2024, julio 05).

- Orozco, C., et al. (2004). *Contaminación Ambiental (Una visión desde la Química)*. 1a edición.
- Osorio, L., Tovar, A., y Fortoul, T. (1997). *Introducción a la toxicología ambiental*. Capítulo 13 p. 211-26. Metepec; ECO; 1997.
- Penner, J., et al. (2001) *Aerosols, their direct and indirect effects*. In *Climate Change. The Scientific Basis*. Cambridge University Press. pp 289-348.
- Pérez, P., y Azcona, M. (2012). Los efectos del cadmio en la salud. *Revista de Especialidades Médico-Quirúrgicas*, 17(3).
- Piña, A. (2011). *¿Cómo son las partículas atmosféricas antropogénicas y cuál es su relación con los distintos tipos de fuentes contaminantes?* Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- PhillipCapital. (s. f.). Coefficient of Variation (CV). POEMS. Disponible en: [https://www-poems-com-sg.translate.google.com/glossary/financial-acronyms/coefficient-of-variation/? x tr sl=en& x tr tl=es& x tr hl=es& x tr pto=sge#advantages-of-cv](https://www-poems-com-sg.translate.google.com/glossary/financial-acronyms/coefficient-of-variation/?x_tr_sl=en&x_tr_tl=es&x_tr_hl=es&x_tr_pto=sge#advantages-of-cv) (Consulta: 2025, 20 de julio)
- Proyecto GFE-UNDP-IMO GloMEEP e IAPH. (2018). Herramientas para las emisiones portuarias, Guía N° 1: Evaluación de las emisiones portuarias.
- Querol, X., Rodríguez, S., Alastuey, A., Kallos G., y Kakaliagou O. (2001). Saharan dust contributions to PM<sub>10</sub> and TSP levels in Southern and Eastern Spain. *Atmospheric Environment*. 35(14), 2433-2447. [https://doi.org/10.1016/s1352-2310\(00\)00496-9](https://doi.org/10.1016/s1352-2310(00)00496-9)
- Ramírez, A., 2002, *Toxicología del Cadmio. Conceptos Actuales para Evaluar Exposición Ambiental u Ocupacional con Indicadores Biológicos*, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Vol. 63, N° 1, p. 51-64.
- Resumen de Salud Pública: *Cadmio (Cadmium)* | PHS | ATSDR. (s. f.). Disponible en: [https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es\\_phs5.html#:~:text=El%20cadmio%20\(co](https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs5.html#:~:text=El%20cadmio%20(co)

[mo%20%C3%B3xido%2C%20cloruro,del%20suelo%20o%20del%20agua](#)

(Consulta: 2024, junio 20).

- Rodríguez, D., Meneses, N., Loaiza, L., y Alvarado, J. (2016). Monitoreo de partículas totales suspendidas en el aire en el Puerto de La Guaira, estado Vargas, Venezuela. *Ingenium*, vol. 17, n. °34, pp. 90-112.
- Romero, K. (2009). Contaminación por metales pesados. *Revista Científica Ciencia Médica*, vol. 12, núm. 1, 2009, pp. 45-46.
- Salminen, R., y Gregorauskien, V. (2000). Considerations regarding the definition of a geochemical baseline of elements in the surficial materials in areas differing in basic geology. *Applied Geochemistry*, 15(5), 647-653. [https://doi.org/10.1016/s0883-2927\(99\)00077-3](https://doi.org/10.1016/s0883-2927(99)00077-3)
- Salminen, R., y Tarvainen, T., 1997. The problem of defining geochemical baselines: a case study of selected elements and geological materials in Finland. *J. Geochem. Explor.* 60 (1), 91-98. [https://doi.org/10.1016/s0375-6742\(97\)00028-9](https://doi.org/10.1016/s0375-6742(97)00028-9)
- Schuman, U. (2012). *Atmospheric physics: Background – methods – trends*. Springer. Germany. 865 p.
- Seinfeld, J., y Pandis, S., (2006). *Atmospheric chemistry and physics: From air pollution to climate change*, Second edition.
- Selin, N. (2009). Global Biogeochemical Cycling of Mercury: A Review. *Annual Review of Environment and Resources*, 34(1), 43–63. <https://doi.org/10.1146/annurev.environ.051308.084314>
- SEMARNAT, SINAICA e INECC. (2018a). *Manuales de la calidad del aire*. Obtenido de Manual 1: Principios de medición de la calidad del aire. [Documento en línea] Disponible en: <https://sinaica.inecc.gob.mx/archivo/guias/1-%20Principios%20de%20Medici%C3%B3n%20de%20la%20Calidad%20del%20Aire.pdf>

- Shoemaker, A., (2017). *Línea de Base Ambiental Comunitaria. ¿Qué es lo que las comunidades pueden hacer para generar sus propias líneas de base ambiental?*, 1(3), pp. 1-30.
- Singh, A., Sharma, R., Agrawal, M., y Marshall, F. Health risk assessment of heavy metals via dietary intake of foodstuffs from the wastewater irrigated site of a dry tropical rea of India. *Food and Chemical Toxicology*, 48(1), p. 611-619.
- Smedley, P., y Kinniburgh, D. (2002). A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters. *Applied Geochemistry*, 17, 517–568.
- Smichowski, P., y Gómez, D. (2015). Spectroscopic and Chromatographic Techniques and Methodologies for the Determination of Metals, Metalloids and Ions in Atmospheric Aerosols. *Comprehensive analytical chemistry*, pp. 239-266.
- Sosa, B., Porta, A., Colman, J., Banda, R. y Massolo, L. (2017). Human health risk due to variations in PM10-PM2.5 and associated PAHs levels. *Atmospheric Environment*, 160, 27-35. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.04.004>
- Spedding, D. (1981). *Contaminación atmosférica*. Reverte.
- Velasco, M. (2005). *La calidad de aire asociado a metales pesados en la ciudad de Manizales*. [Trabajo de especialización. Universidad Nacional de Colombia. Manizales]
- Where Arsenic Comes From - Arsenic - University of Maine. (2015, 26 marzo). Arsenic. <https://umaine.edu/arsenic/where-arsenic-comes-from/>
- Zhang, H., y Selim, H. (2008). Reaction and transport of arsenic in soils: equilibrium and kinetic modeling. *Advances in Agronomy*, 98, 45-115. [https://doi.org/10.1016/s0065-2113\(08\)00202-2](https://doi.org/10.1016/s0065-2113(08)00202-2)
- Zhang, K., Chai, F., Zheng, Z., Yang, Q., Li, J., Wang, J., y Zhang, Y. (2014). Characteristics of atmospheric particles and heavy metals in winter in Chang-Zhu-Tan city clusters, China. *Journal Of Environmental Sciences*, 26(1), 147-153. [https://doi.org/10.1016/s1001-0742\(13\)60391-5](https://doi.org/10.1016/s1001-0742(13)60391-5)

Zhao, M., Zhang, Y., Ma, W., Fu, Q., Yang, X., Li, C., Zhou, B., Yu, Q., y Chen, L. (2013). Characteristics and ship traffic source identification of air pollutants in China's largest port. *Atmospheric Environment*, 64, 277-286.

<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.10.007>

Zhong, S. (2017). *Atmospheric aerosols*. [Documento en línea]. Disponible en: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/9781118786352.wbieg0304>

(Consulta: 2024, junio 18).

## 11. APÉNDICE

### *Apéndice 1: Condiciones para la calibración en el Puerto de La Guaira*

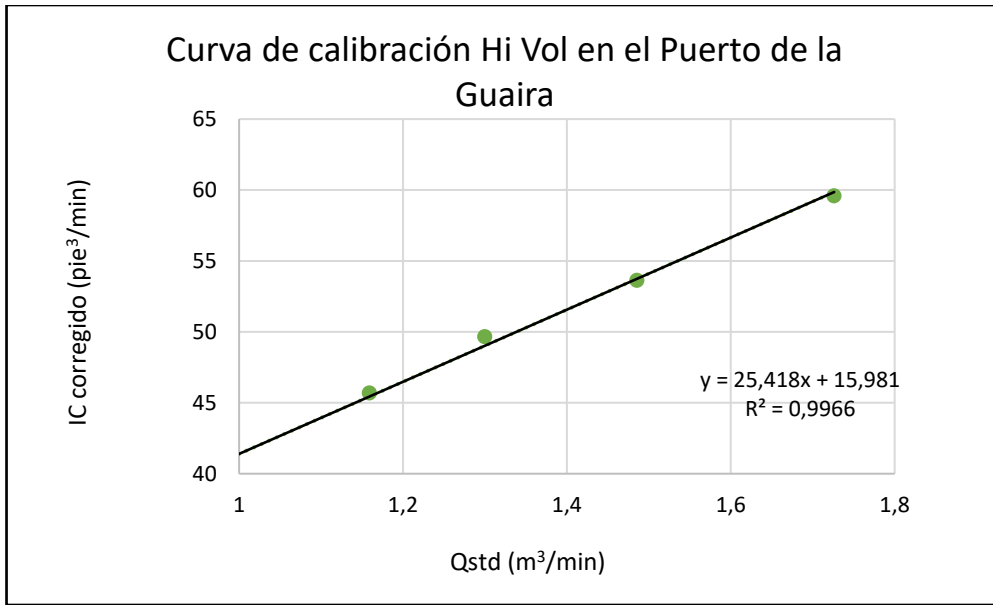
Condiciones del sitio de muestreo			
Presión barométrica (in Hg)	29,92	Presión corregida (mm Hg):	760
Temperatura (°C)	29	Temperatura (K):	302,2
Presión promd (in Hg)	29,92	Presión promd corregida (mmHg)	760
Temperatura promd (°C)	29	Temperatura promd corregida (K)	302,2

### *Apéndice 2: Datos del calibrador ubicado en el Puerto de La Guaira*

Datos del calibrador			
Marca	Andersen Instruments	Qstd pendiente	1,53370
Modelo	G28A	Qstd Intercepto	-0,05769
Nº Serial	1115	Fecha de la calibración	16-feb-99

### *Apéndice 3: Datos para la curva de calibración del muestreador de gran volumen en el Puerto de La Guaira*

Calibración						
Nº de mediciones	H2O (pulgadas)	Qstd (m <sup>3</sup> /min)	I (pie <sup>3</sup> /min) carta circular	IC (pie <sup>3</sup> /min) corregido	Regresión Lineal	
1	6,8	1,726	60	59,59	Pendiente:	25,4180
2	5	1,486	54	53,63	Intercepto:	15,9813
3	3,8	1,300	50	49,66	Coef.Corr.	0,9966
4	3	1,159	46	45,68		
5	2	0,953	40	39,72		



**Apéndice 4:** Curva de calibración del muestreador de gran volumen en el Puerto de La Guaira

El apéndice 4 ilustra las mediciones obtenidas durante la calibración del muestreador de gran volumen en el sitio de muestreo. La curva presenta una tendencia lineal, lo cual es comprobable mediante su coeficiente de correlación ( $R^2 = 0,9966$ ) cuya valor es muy cercano a 1. Esto indica que el equipo está en óptimas condiciones para realizar el muestreo, ya que el certificado de calibración estipula que el  $R^2$  debe estar por encima de 0,97.



SERVICIOS INTEGRALES RORI, C.A.  
J-401086306

Centro Banaven, Av. Ernesto Blohm y La Estancia,  
Chua, Caracas, Venezuela.

MUESTRA	Arsénico (ppm)	Cadmio (ppm)	Plomo (ppm)
Blanco	0	0 (0,01 ppb)	0 (0,02 ppb)
F4	0,060	0,040	0,030
F2	1,056	0,058	0,096
F9	0,7180	0,088	0,103
F3	0,300	0,050	0,030
F5	0,6065	0,074	0,074
F1	1,716	0,004	0,016
F6	1,107	0,042	0,024
F7	0,297	0,032	0,090
F11	0,463	0,083	0,092
F16	0,734	0,057	0,083
F8	0,831	0,086	0,007
F13	0,686	0,060	0,042
F10	0,4787	0,068	0,052
F15	0,877	0,085	0,009
F12	1,776	0,032	0,097
F17	0,612	0,036	0,008
F20	1,946	0,014	0,064
F14	1,121	0,077	0,040
F21	0,627	0,063	0,070
F22	0,447	0,061	0,085
F19	0,860	0,019	0,045
F18	0,302	0,011	0,039

  
Paulino J. Betancourt-Figueroa



**Apéndice 5:** Reporte de "SERVICIOS INTEGRALES RORI C.A." del análisis de Pb, Cd y As en las PTS de el Puerto de La Guaira.

**Apéndice 6: Observaciones sobre el muestreo de captación de partículas totales suspendidas en el Puerto de La Guaira**

Fecha Inicio	PTS (µg/m <sup>3</sup> )	Sol/Lluvia	Actividad en el puerto	Color del filtro	Observaciones
30/04/2024	37	Sol	No	Grisáceo	Fuertes corrientes de viento. No hubo actividad relevante en el puerto.
03/05/2024	76	Sol	No	Grisáceo	Baja corriente viento, ambiente húmedo. No hubo actividad relevante en el puerto.
06/05/2024	159	Sol	Si	Marrón	Baja corriente de viento, ambiente húmedo. Salida de buques, movimiento de contenedores.
09/05/2024	106	Lluvia	Si	Grisáceo-marrón	Baja corriente de viento, nublado. Descarga de buques.
12/05/2024	105	Sol	Si	Grisáceo-Marrón	Fuertes corrientes de viento. Llegada de barco, movimiento de contenedores.
15/05/2024	77	Sol	Si	Grisáceo	Fuertes corrientes de viento. Movimiento de contenedores
18/05/2024	120	Lluvia	Si	Marrón	Baja corriente de viento, nublado. Descarga de chatarra.
21/05/2024	87	Sol	Si	Grisáceo	Bajas corrientes de viento. Salida de barcos.
24/05/2024	52	Sol	No	Grisáceo	Nublado, moderadas corrientes de viento. No hubo actividad relevante en el puerto.
27/05/2024	73	Sol	Si	Grisáceo	Baja corriente de viento, clima húmedo. Flujo de camiones.
30/05/2024	37	Lluvia	No	Grisáceo	Nublado, baja corriente de viento. No hubo actividad relevante en el puerto.
02/06/2024	66	Sol	Si	Grisáceo	Baja corriente de viento. Quema de residuos cercano al puerto.
05/06/2024	32	Sol	No	Grisáceo	No hubo actividad relevante en el puerto.
08/06/2024	83	Sol	Si	Grisáceo	Fuertes corrientes de viento, clima húmedo. Movimiento de contenedores.
11/06/2024	53	Lluvia	Si	Grisáceo	Moderadas corrientes de viento, llegada de buques.
14/06/2024	120	Sol	Si	Grisáceo	Movimiento de contenedores y llegada de barcos.
17/06/2024	76	Sol	Si	Grisáceo	Movimiento de contenedores
20/06/2024	68	Sol	Si	Grisáceo	Poca nubosidad. Llegada de tanques de guerra, salida de barco.
23/06/2024	44	Lluvia	Si	Grisáceo	Bajas corrientes de viento, clima nublado. Carga de barco con camiones.
26/06/2024	76	Sol	Si	Grisáceo	Bajas corrientes de viento, Carga de contenedores.

**Apéndice 7:** Cálculo del flujo corregido ( $Q_{cm}$ )

$$Q_{cm} = 44,2 \times \sqrt{\frac{302,2}{298} \times \frac{760}{760}} = 43,89 \text{ pie}^3 / \text{min}$$

**Apéndice 8:** Cálculo del volumen corregido a condiciones estándar ( $V_{est}$ )

$$V_{est} = 1,225 \times 1456 = 1783,6 \text{ m}^3$$

**Apéndice 9:** Cálculo del flujo corregido a condiciones estándar ( $Q_{est}$ )

$$Q_{est} = 43,89 \times \left( \frac{298}{302,2} \times \frac{760}{760} \right) = 1,225 \text{ m}^3 / \text{min}$$

Para transformar de  $\text{pie}^3$  a  $\text{m}^3$  se divide el resultado por 35,310734.

**Apéndice 10:** Cálculo de la concentración de PTS

$$PTS = \frac{2,8162 - 2,7569}{1596} \times 10^6 = 37,16 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$$

**Apéndice 11:** Cálculo del factor ( $F$ ) del área del filtro

$$F = \frac{464,515 \text{ cm}}{50,8 \text{ cm}} = 9$$

**Apéndice 12:** Cálculo de la concentración del analito ( $x$ ) para cada muestra o filtro expuesto

$$CxM = \frac{(Cx * 9 * 0,025L) - 0}{1597}$$

**CxM:** concentración del analito en cada muestra, expresado en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

**Cx:** contenido del analito en las tiras del filtro expuesto, en  $\text{mg}/\text{L}$

