

UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA

FACULTAD DE CIENCIAS

LICENCIATURA EN GEOQUÍMICA

PROYECTO GEOQUÍMICO II



“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.”

Trabajo Especial de Grado
presentado ante la ilustre
Universidad Central de
Venezuela por la **Br. Emily
Alejandra Guerrero Avila**
como requisito para aprobar
la asignatura Proyecto
Geoquímico II y optar al
Título de Licenciada en
Geoquímica

CARACAS, MAYO DE 2017

UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA

FACULTAD DE CIENCIAS

LICENCIATURA EN GEOQUÍMICA

PROYECTO GEOQUÍMICO II



“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.”

TUTORES:

Prof. Williams Meléndez.

MSc. Adolfo Girón.

PRESENTADO POR:

Emily Alejandra

Guerrero Avila

CARACAS, MAYO DE 2017

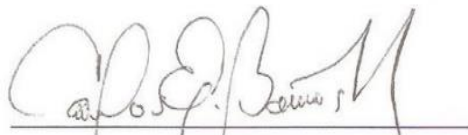


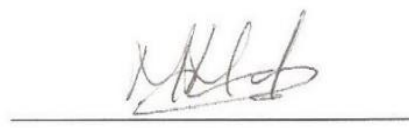
ACTA

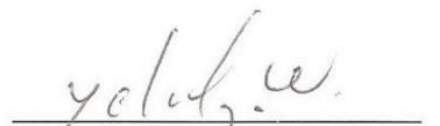
Los abajo firmantes asignados por la Universidad Central de Venezuela, como integrantes del jurado examinador del Trabajo Especial de Grado, titulado:

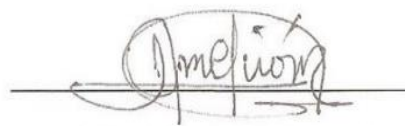
**“ESTUDIO DE LA CONCENTRACIÓN DE MERCURIO (Hg)
ASOCIADO A LAS PARTÍCULAS TOTALES SUSPENDIDAS (PTS), EN
LA ATMÓSFERA DEL AEROPUERTO METROPOLITANO DE
CARACAS EN OCUMARE DEL TUY Y LA ZONA INDUSTRIAL DE
CHARALLAVE, SECTOR PITAHAYA, ESTADO MIRANDA.”**

Presentado por la Br. Emily Guerrero, certificamos que este trabajo cumple con los requisitos exigidos por nuestra Magna casa de Estudio para optar por el título de Licenciado en Geoquímica.



Profesor Carlos Barrios
(Jurado)

Profesora María Fernanda
Hernández
(Jurado)

Profesor Williams Meléndez
(Tutor)

Magister Adolfo Girón
(Tutor)



*CON AMOR Y CARIÑO,
DEDICO ESTE GRAN
ESFUERZO A MIS
PADRES Y HERMANOS*



Agradecimientos

Al escribir estos agradecimientos, recordé todo lo que viví, no sólo en la realización de mi proyecto de investigación, sino en todos los momentos buenos y no tan buenos por los que pasé a lo largo de mi carrera, aquellas lecciones que aprendí, aquellas dificultades que superé, son tantas cosas que es imposible no recordarlas y no atribuírselas a quienes hicieron que la carga fuese más liviana, que los retos fuesen superados, que las adversidades sólo eran momentáneas ¡Un sinfín de cosas! A esas personas que influyeron en mi crecimiento, que están presentes quiero dedicarles unas bellas palabras que vienen de lo más profundo de mi corazón:

A mis padres y hermanos, especialmente a mi papá, quien me dio su apoyo incondicional y se ha comportado como el mejor de los padres. Este esfuerzo no compensa todo lo que haces por mí papá, gracias!

A Dailyn y a Gabriela mis amigas y hermanas, gracias por su ayuda.

Existen personas que conocemos en el camino de nuestra formación y es sorprendente como influyen en nuestro crecimiento personal a Nataly y, Daniela, gracias por sus colaboraciones en mis salidas de campo.

También expreso mis más sinceros agradecimientos a mis tutores, el MSc. Adolfo Girón y el Profesor Williams Meléndez, gracias por haberme dado la oportunidad de realizar este proyecto junto a ustedes, gracias por haberme guiado, por su paciencia ¡Muchas Gracias!

Del mismo modo, quiero agradecer a la ilustre Universidad Central de Venezuela, la casa que vence las sombras, símbolo de libertad, enseñanza quien me dio la oportunidad de formar parte de esta gran casa de estudios.

De igual forma, agradezco a la Facultad de Ciencias, al I.C.T y a todos los profesores que influyeron en mi educación.

Por último, agradezco a Dios por esta experiencia, por darme la oportunidad de vivir y conocer a todas estas maravillosas personas que hoy en día llevo en mi corazón.



RESUMEN

La contaminación atmosférica es uno de los mayores problemas que afecta la calidad del aire por la emisión de sustancias tóxicas, en forma de partículas atmosféricas, provenientes de actividades industriales. Además, su composición genera un problema adicional, ya que estas pueden contener una gran variedad de sustancias tóxicas, entre ellas el Mercurio (Hg), metal tóxico de preocupación mundial.

En Venezuela la actividad industrial se ha desarrollado significativamente en los últimos 50 años, tal es el caso de Ocumare del Tuy y Charallave del estado Miranda. Mediante un plan de muestreo comprendido desde el 09 de marzo hasta 08 de abril del año 2017, fueron captadas 20 muestras de PTS a través de 2 (dos) HighVol marca Grabesys, para determinar la concentración promedio de PTS de acuerdo a lo estipulado en la Norma COVENIN 2060:1996. También, se determinó la concentración promedio de Hg asociado a estas bajo la técnica de espectrometría de absorción atómica con descomposición térmica basada en el DMA, y el método IO – 3,1 de la EPA.

En la zona industrial de Charallave, se obtuvo una concentración promedio de PTS de $72 \mu\text{g}/\text{m}^3$, y en el Aeropuerto Metropolitano de Caracas en Ocumare del Tuy de $51 \mu\text{g}/\text{m}^3$, siendo la zona de Charallave aquella que presentó la mayor concentración de PTS, y de acuerdo con el límite permisible de $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ que establece el Decreto 638, la tendencia de estos resultados, durante el periodo de muestreo es estar por debajo del límite.

Sin embargo, el promedio de las concentraciones de Hg reportadas en la estación de muestreo de Ocumare del Tuy fue de $38 \text{ pg}/\text{m}^3$ y $20 \text{ pg}/\text{m}^3$ para el caso de la zona industrial de Charallave, indicando que las PTS captadas en Ocumare del Tuy están más enriquecidas de este elemento con respecto a las PTS obtenidas en Charallave. Por otra parte, el valor de R^2 igual a 0,0003 indica que no existe correlación entre las concentraciones de Hg de ambos sitios de



muestreo, por lo que se concluye que existe un aporte de Hg en Ocumare del Tuy mayor y netamente independiente de Charallave.

Palabras clave: Calidad del aire, contaminación atmosférica, PTS, mercurio atmosférico, mercurio asociado a partícula.



CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN	14
2.	OBJETIVOS.....	17
2.1.	General.....	17
2.2.	Específicos	17
3.	MARCO TEÓRICO	18
3.1.	Partículas atmosféricas	18
3.2.	Clasificación	18
3.2.1.	Origen.....	18
3.2.2.	Naturaleza física:	20
3.2.3.	Tamaño aerodinámico	20
3.2.4.	Reactividad	21
3.2.5.	Naturaleza química.....	21
3.3.	Proceso de formación de las partículas:.....	22
3.3.1.	Modo nucleación ($D \leq 0,02 \mu\text{m}$).....	22
3.3.2.	Modo Aitken ($D = 0,02 \mu\text{m} - 0,1 \mu\text{m}$).....	22
3.3.3.	Modo de acumulación ($D 0,1 - 1 \mu\text{m}$).....	22
3.3.4.	Modo grueso ($D > 1 \mu\text{m}$).....	23
3.4.	Efectos en la salud humana	24
3.5.	Normativas nacionales	25
3.6.	Propiedades físicas y químicas del Hg.....	27
3.7.	Fuentes antrópicas de Hg	30
3.8.	Mercurio (Hg) atmosférico	33
3.9.	Ciclo biogeoquímico del Hg.....	35
3.10.	Toxicología.....	37
3.11.	Normativas nacionales	38
4.	DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	40
4.1.	Ubicación.....	40
4.2.	Descripción litológica.....	41
4.3.	Clima	42



4.4.	Relieve	42
4.5.	Hidrografía.....	43
4.6.	Patrones de vientos.....	43
5.	ANTECEDENTES.....	44
5.1.	Nacionales.....	44
5.2.	Internacionales	47
6.	METODOLOGÍA	50
6.1.	Etapas de pre-campo	50
6.2.	Etapas de campo	51
6.2.1.	Muestreador de alto volumen:	51
6.2.2.	Calibración del muestreador	53
6.2.3.	Recolección de las muestras	55
6.3.	Etapas de laboratorio	57
6.3.1.	Determinación de la concentración de PTS.....	57
7.	PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	63
7.1.	Concentraciones de PTS.....	64
7.2.	Análisis de Hg enlazado PTS en los sitios de muestreo.....	72
8.	CONCLUSIONES:	83
9.	RECOMENDACIONES:.....	85
10.	BIBLIOGRAFÍA.....	86
11.	APÉNDICE	90



ÍNDICE DE TABLAS:

Tabla 1: <i>Clasificación de zonas de acuerdo con los rangos de concentraciones de partículas totales suspendidas (PTS), calculadas en base a promedios anuales (Tomado de Decreto 638, 1995).....</i>	26
Tabla 2: <i>Porcentaje de excedencia de muestras en un estudio determinado para cada rango de concentración (Tomado de Decreto 638, 1995).</i>	26
Tabla 3: <i>Propiedades físicas del mercurio (Tomado de Nordbeg G., et al. 2015).</i>	27
Tabla 4: <i>Fuentes y usos del mercurio (Hg) con respecto a su química (Tomado de Jiménez A., 2005; Ferreira L., et al. (2011).</i>	29
Tabla 5: <i>Niveles máximos permisibles del mercurio inorgánico con efectos cancerígenos (Tomado de Resolución 601, 2006).</i>	39
Tabla 6: <i>Concentración de PTS en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ obtenidas en el Aeropuerto Metropolitano de Caracas - Ocumare del Tuy, estado Miranda. Del 09 de marzo hasta el 08 de abril del año 2017.....</i>	64
Tabla 7: <i>Concentración de PTS obtenidas en la zona industrial de Charallave, sector Pitahaya, estado Miranda. Del 10 de marzo hasta el 08 de abril del año 2017.</i>	67
Tabla 8: <i>Concentración de Hg asociado a PTS, obtenido en el Aeropuerto Metropolitano de Caracas – Ocumare del Tuy. Del 09 de marzo hasta el 08 de abril del año 2017.</i>	73
Tabla 9: <i>Concentración de Hg en PTS, muestreado en la zona industrial de Charallave, sector Pitahaya, estado Miranda. Del 10 de marzo hasta el 08 de abril del año 2017.</i>	75



ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Concentraciones diarias de PTS obtenidas en el Aeropuerto Metropolitano de Caracas, Ocumare del Tuy, estado Miranda. Del 09 de marzo hasta el 08 de abril del año 2017.	65
Gráfico 2: Concentraciones diarias de PTS obtenidas en la zona industrial de Charallave, sector Pitahaya, estado Miranda. Marzo – abril de 2017..	68
Gráfico 3: Correlación lineal entre las concentraciones de PTS obtenidas en la zona industrial de Charallave, sector Pitahaya, frente a las concentraciones obtenidas en la estación del Aeropuerto Metropolitano de Caracas en Ocumare del Tuy. Del 09 de marzo hasta el 08 de abril del año 2017.	70
Gráfico 4: Valores individuales de la concentración de PTS en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ obtenidos en la zona industrial de Charallave y el Aeropuerto Metropolitano de Caracas. Del 09 de marzo hasta el 08 de abril del año 2017.	71
Gráfico 5: Concentración de Hg asociado a PTS en pg/m^3 muestreado en el Aeropuerto Metropolitano de Caracas, Ocumare del Tuy, estado Miranda. Del 09 de marzo hasta el 08 de abril del año 2017.	74
Gráfico 6: Concentración de Hg asociado a PTS, muestreado en la zona industrial de Charallave, estado Miranda. Del 10 de marzo hasta el 08 de abril del año 2017.	76
Gráfico 7: Correlación de la concentración de PTS vs concentración de Hg en el Aeropuerto Metropolitano de Caracas, Ocumare del Tuy, estado Miranda. Del 09 de marzo hasta el 08 de abril del año 2017.	78
Gráfico 8: Correlación de la concentración de PTS vs concentración de Hg en la zona industrial de Charallave, sector Pitahaya, estado Miranda. Del 10 de marzo hasta el 08 de abril del año 2017.	79
Gráfico 9: Correlación lineal de la concentración de Hg obtenida en la zona industrial de Charallave Vs la concentración de Hg obtenido en el	



Aeropuerto Metropolitano de Caracas en Ocumare del Tuy. Del 09 de marzo hasta el 08 de abril del año 2017..... 80

Gráfico 10: *Valores individuales de la concentración de Hg unido a partícula, obtenida en la zona industrial de Charallave Vs la concentración de Hg obtenido en el Aeropuerto Metropolitano de Caracas en Ocumare del Tuy. Del 09 de marzo hasta el 08 de abril del año 2017. 81*

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: *Nivel de ingreso de las partículas atmosféricas al sistema respiratorio humano en función del tamaño (Tomado de la: USEPA). 24*

Figura 2 *Distribución global de las emisiones antropogénicas de Hg al aire de diferentes sectores (Tomado de Xu J., 2014)..... 33*

Figura 3: *Esquema simplificado de las transformaciones del Hg en el ambiente (Tomado de Pirrone N, Manson R., 2009). 35*

Figura 4: *Ubicación geográfica de la zona de estudio. 41*

Figura 5: *Caseta del muestreador de alto volumen (Tomado de: Norma COVENÍN: 2060:1996). 52*

Figura 6: *Unidad de calibración (Tomado de Norma COVENÍN 2060:1996). 54*

Figura 7: *muestreador de alto volumen (Hi-vol. Sampler) Marca General Metal Works (GMW), Grabesy, ubicado en Aliven, Charallave, estado Miranda. Del 09 de marzo hasta el 08 de abril del año 2017. 56*

Figura 8: *Muestreador de alto volumen (Hi – vol. Sampler) Marca General Metal Works (GMW) Grabesy ubicado en el Aeropuerto Metropolitano de Caracas, Ocumare del Tuy estado Miranda. Del 09 de marzo hasta el 08 de abril del año 2017. 57*

Figura 9: *Analizador de mercurio..... 60*



TABLA DE ECUACIONES

Ecuación 1: <i>Hg en la atmósfera</i>	37
Ecuación 2: <i>Reacción del Hg con el Ozono (O_3)</i>	37
Ecuación 3: <i>Cambio de estado del Hg</i>	37
Ecuación 4: <i>Reacción del Hg con sulfito (SO_3^{2-})</i>	37
Ecuación 5: <i>Flujo corregido a condiciones de medición (Q_{cm}):</i>	58
Ecuación 6: <i>Volumen de aire muestreado, corregido a condiciones estándar.</i>	59
Ecuación 7: <i>Concentración de PTS.</i>	59

Esquemas

Esquema 1: <i>Análisis de Hg por el DMA.</i>	61
---	----



1. INTRODUCCIÓN

La atmósfera es un sistema dinámico que está en constante interacción con la vegetación, los océanos, y los organismos biológicos. La misma se compone, principalmente por N_2 , O_2 , Ar, CO_2 y una proporción muy pequeña de otros gases como lo son el Ne, He, CH_4 , Kr y H_2 . Estos gases juegan un papel muy importante en el balance de la radiación de la Tierra y las propiedades químicas de la atmósfera. De igual forma, contiene vapor de agua que juega un papel importante en el ciclo hidrológico, lo que propicia el desarrollo de muchos procesos dentro del sistema, (Seinfeld J., & Pandis S., 2006); además, está compuesta por material particulado que puede estar presente de forma natural en los ecosistemas por procesos como las emisiones volcánicas, erosión de los suelos y rocas, tormentas de polvo, transporte de la sal marina, emisiones de material biológico fraccionado (polen y bacterias), incendios forestales (Schuman U., 2006), combustiones espontáneas y como resultado de las actividades antrópicas. Estas son esenciales dentro de la atmósfera, ya que contribuyen a que se produzcan las reacciones entre gases en el aire y sirven de núcleos de condensación del vapor de agua para permitir la formación de las nubes e influyen en el balance radiativo de la Tierra. (Piña A., 2011)

Sin embargo, así como tienen sus influencias positivas, también pueden generar efectos perjudiciales sobre el medio ambiente cuando sus componentes sobrepasan los límites permisibles establecidos por algunas normativas ambientales como lo es Organización Mundial para la Salud (OMS). Un ejemplo de ello lo constituye el cambio climático global debido a la modificación de las condiciones meteorológicas, y al mismo tiempo reducción de la visibilidad, estas últimas han tenido lugar como consecuencia de la capacidad que tienen las mismas de absorber la energía emitida por el sol, y el daño sobre la capa de ozono disminuyendo a su vez, su capacidad protectora de los rayos ultravioletas, además de generar graves consecuencias en la salud del hombre. (Piña A., 2011)



En los últimos 200 años, a nivel mundial la actividad industrial se ha desarrollado de forma considerable como consecuencia del crecimiento poblacional, y para la satisfacción de sus necesidades, el hombre ha creado industrias, entre ellas las plantas de cemento que disponen de hornos de calentamiento y calcinación, en donde deben ser introducidos combustibles fósiles que permita llevar a cabo el proceso industrial. Sin embargo, estudios como el de Trezza M; Scian A., 2003, demuestran que para mejorar la eficacia de los procesos industriales, tales combustibles fósiles han sido mezclados con otros combustibles denominados alternativos o residuales y alguno de ellos puede contener Hg como bombillos ahorradores, residuos de pintura, cauchos gastados, biomasa como astillas de madera, papel tratado, desechos sólidos urbanos y residuos médicos, cuya incineración produce grandes cantidades de partículas atmosféricas y Hg asociado a estas, ambos de origen antrópico que son introducidas a la atmósfera a través de los ductos conectados a los hornos de calcinación, convirtiendo la atmósfera en un receptor de todos estos contaminantes y contribuyendo al mismo tiempo a disminuir su calidad y a alterar el equilibrio natural de la misma.

Además de su tamaño, la composición química de estas partículas atmosféricas pueden generar un problema adicional, porque pueden contener compuestos orgánicos halogenados como dibenzotiofenos, naftalenos policlorados, bencenos clorados, bifenilos policlorados (PCBs) en su mayoría cancerígenos, otros contaminantes como HCl, HBr, SO_x, HAPs, COVs (contaminantes orgánicos volátiles); además de una gran variedad de metales pesados altamente tóxicos, entre ellos el mercurio (Hg) que puede estar contenido en algunos combustibles alternativos ya mencionados, y ser introducido en la atmósfera mediante las PTS, ya que este se adsorbe al material particulado, y por el tamaño aerodinámico de las PTS su capacidad de ingreso al sistema respiratorio es mayor, representando un grave problema a nivel mundial. (Tangri N., 2005, Restrepo J., 2012)



En Venezuela, la actividad industrial ha crecido de forma considerable a lo largo y ancho del país, tal es el caso de Ocumare del Tuy y Charallave, ambos en el estado Miranda, en donde destacan los municipios Tomás Lander de los Valles del Tuy, ya que se encuentra ubicada la Fábrica de Cemento, planta Ocumare del Tuy, además se desarrolla la quema de basura y la actividad aérea que pudiesen estar introduciendo concentraciones significativas de PTS y Hg asociado a estas. También en el municipio Cristóbal Rojas en Charallave, sector Pitahaya se encuentra ubicada la industria de Aliven, el cual fue observado en la etapa de campo la emisión de material particulado hacia la atmósfera, a través de los ductos, cuyos habitantes de la zona aseveran que la empresa constantemente emite material particulado y es mayor la emisión durante las noches y en los días de lluviosos.

En adición a esto, Sánchez S., 2016, determinó concentraciones importantes de Hg sobre los suelos y partículas sedimentadas adyacentes a estas zonas industriales de los municipios mencionados, y concluyó que la presencia de Hg no está asociada a la litología presente en la zona, por lo que sugiere que el aporte del mismo debe provenir de emisiones antrópicas. Además, en dicha zona son pocos los estudios que se han realizado en cuanto a calidad de aire se refiere. Debido a esto han surgido varias interrogantes para tratar de encontrar el origen de este metal en la zona industrial de Charallave – Ocumare. Esta situación permite plantear las siguientes preguntas:

- ¿Existirá una emisión significativa de las PTS en la atmósfera de la zona industrial de Ocumare del Tuy y Charallave, estado Miranda?
- ¿Existirá una concentración significativa de mercurio (Hg) en las PTS presentes en la atmósfera de la zona industrial de Ocumare del Tuy y Charallave, estado Miranda?

Para llevar a cabo este estudio se han planteado los siguientes objetivos:



2. OBJETIVOS

2.1. General

Estudiar 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.

2.2. Específicos

- ❖ Cuantificar las partículas totales suspendidas (PTS), presentes en la atmósfera del Aeropuerto Metropolitano de Caracas, en Ocumare del Tuy y en Aliven situado en Charallave, estado Miranda.
- ❖ Determinar la concentración de Hg en las PTS de la atmósfera de la zona industrial de Ocumare del Tuy y Charallave, estado Miranda.
- ❖ Evaluar la(s) posible(s) fuente(s) de emisión, relacionando la concentración de Hg con la concentración de las PTS, de los distintos puntos de muestreo.



A continuación se describen los conceptos básicos relacionados con las PTS y Hg, así como también los efectos que ambos repercuten sobre el medio ambiente y la salud del hombre. Dichos conceptos servirán de sustento a esta investigación para la posterior interpretación de los datos.

3. MARCO TEÓRICO

La atmósfera está compuesta por una mezcla de gases y material particulado que se define a continuación:

3.1. Partículas atmosféricas

Son una mezcla compleja de partículas sólidas y gaseosas, con una composición química variada y una distribución de tamaño aerodinámico que oscila entre 0,005 y 500 μm y que puede dispersarse en el aire. (Seinfeld J y Pandis S., 2006; Piña A., 2011; Schuman U., 2012)

Las partículas atmosféricas reúnen una serie de características que permite clasificarlas de acuerdo a una serie de parámetros. A partir de su clasificación se puede establecer un conocimiento más claro de las fuentes emisoras de partículas atmosféricas. (Piña A., 2011)

3.2. Clasificación

De acuerdo con Schuman U., 2012; Piña A., 2011, se pueden clasificar las partículas atmosféricas de acuerdo a su:

3.2.1. Origen

Cuando provienen de fenómenos naturales como la erosión del suelo, transporte de los aerosoles oceánicos, erupciones volcánicas, emisiones de



material biológico fraccionado (polen, restos de insectos, plantas, animales o de piel humana), incendios forestales (no inducidos) y espontáneos. Estas fuentes generan preferentemente partículas gruesas. (Piña A., 2011)

Por otro lado, pueden ser de origen antrópico, las cuales son introducidas a la atmósfera, principalmente por actividades industriales. Un ejemplo de ello lo constituye la quema de combustibles fósiles y alternativos, además se generan por emisiones vehiculares, actividad minero-metalúrgica e incendios forestales inducidos, en los cuales pueden ser emitidas partículas finas ($< 2,5 \mu\text{m}$). Generalmente estas partículas son las que tienen un mayor efecto sobre la salud humana y traen como consecuencia distintas repercusiones sobre la atmósfera.

Las fuentes naturales y antrópicas pueden ser clasificadas en 2 tipos, denominadas fijas y móviles. Las primeras son aquellas que se localizan en una zona específica y no presentan movilidad en su ubicación. Para fuentes antrópicas corresponden aquellos establecimientos que tienen el propósito de ejecutar operaciones industriales (industrias químicas, farmacéuticas, las destinadas a la generación de cemento y las plantas generadoras de energía). Las fuentes naturales incluyen, emisiones volcánicas, aerosol marino, erosión de rocas y suelos. Para el caso de las fuentes móviles las cuales corresponden a emisores que se desplazan y no permanecen en un mismo punto, se tienen las emisiones vehiculares, ferrocarriles, aviones y helicópteros. (Piña A., 2011)



3.2.2. Naturaleza física:

Atendiendo a su estado físico, estas pueden ser sólidas y gaseosas. En estado sólido son partículas finas cuyo tamaño les permite estar un tiempo determinado en la atmósfera. En estado gaseoso son diminutas gotas (aerosoles) los cuales forman partes de las neblinas, nieblas y vapor de agua. (Schuman U., 2012)

3.2.3. Tamaño aerodinámico

El tamaño de las partículas varía normalmente de 0,005 a 500 μm y conforme a esto pueden ser clasificadas como partículas sedimentables y PTS. Aquellas que poseen un diámetro aerodinámico $> 100 \mu\text{m}$ son definidas como partículas sedimentables que permanecen por cortos períodos en la atmósfera, con respecto a las denominadas PTS que permanecen por largos períodos en la atmósfera y se agrupan todas las partículas con un diámetro aerodinámico $< 100 \mu\text{m}$. Dentro de las PTS están definidos 3 tamaños de partículas, en función de la capacidad de ingreso en el sistema respiratorio del hombre, unas denominadas partículas ultrafinas o $\text{PM}_{0,1}$ que son aquellas que tienen un diámetro aerodinámico $< 0,1 \mu\text{m}$, aquellas que van desde 0,1 hasta 2,5 μm son denominadas partículas finas o $\text{PM}_{2,5}$. Estas últimas se difunden o desplazan en el aire como si fuesen moléculas de gases y tienen una baja velocidad de sedimentación, por lo tanto pueden recorrer largas distancias antes de sedimentarse. Aquellas partículas que son $> 2,5 \mu\text{m}$ hasta 10 μm son definidas como partículas gruesas o PM_{10} . Las PTS que tienen un diámetro aerodinámico por encima de PM_{10} son denominadas partículas extragruesas. (Piña A., 2011)



3.2.4. Reactividad

Las partículas atmosféricas surgen a partir de una variedad de fuentes y procesos de formación. De acuerdo a su origen, las mismas pueden ser clasificadas como primarias y secundarias. Las partículas de origen primario son introducidas en la atmósfera directamente desde su fuente que puede ser natural y antrópico, ésta incluye material del suelo, minerales de rocas, sales marinas, partículas biogénicas tal como polen o bacterias y hollín (carbón elemental incluyendo material orgánico), mientras que las partículas secundarias se forman a partir de la condensación de vapores (precursores gaseosos) o por reacciones entre partículas primarias. (Schuman U., 2012)

3.2.5. Naturaleza química

Pueden ser clasificadas como orgánicas e inorgánicas y ambas están relacionadas con su fuente de emisión. Las partículas orgánicas son formadas a partir de hidrocarburos gaseosos biogénicos o antropogénicos. Las partículas de naturaleza inorgánica están compuestas por metales, minerales, aniones, cationes, sulfatos, dióxido de azufre, nitratos, entre otros. (Schuman U., 2012)

Una vez que las partículas atmosféricas han sido introducidas a la atmósfera desde su fuente, experimentan una serie de reacciones sucesivas que permiten incrementar su tamaño. De acuerdo con Schuman U., 2012, los mecanismos de formación son los siguientes:



3.3. Proceso de formación de las partículas:

3.3.1. Modo nucleación ($D \leq 0,02 \mu\text{m}$)

Están contenidas las partículas que se forman a partir de la condensación de vapores, cuya formación depende de la presión, descenso en la temperatura e incremento de la humedad relativa, donde tiene lugar la conversión gas – partícula. Este tipo de nucleación se le denomina nucleación homogénea. Generalmente los precursores gaseosos que tienen la capacidad para formar partículas por nucleación homogénea son el H_2SO_4 , NH_3 , hidrocarburos y vapor de agua. Existe otro tipo de nucleación denominada nucleación heterogénea y tienen lugar cuando otras partículas finas se adhieren a gotas de vapor. Estas tienen una vida media de solo horas ya que rápidamente se coagulan o aumentan de tamaño porque otras sustancias se coagulan sobre ellas. (Schuman U., 2012)

3.3.2. Modo Aitken ($D = 0,02 \mu\text{m} - 0,1 \mu\text{m}$)

Incluye partículas primarias que son introducidas directamente en la atmósfera por fuentes naturales o antrópicas y también partículas secundarias que se generan como consecuencia de la coagulación de las partículas formadas por el mecanismo de nucleación. El tiempo de vida de estas es mucho más prolongado que las anteriores. (Schuman U., 2012)

3.3.3. Modo de acumulación ($D 0,1 - 1 \mu\text{m}$)

Consiste en partículas formadas a partir de la coagulación de las partículas generadas en el modo Aitken y las partículas emitidas directamente desde fuentes primarias como la quema de la vegetación o combustibles fósiles. (Schuman U., 2012)



3.3.4. Modo grueso ($D > 1 \mu\text{m}$)

Contiene todas las partículas mayores a $1 \mu\text{m}$ de diámetro, estas partículas son generadas particularmente por procesos mecánicos, como el polvo arrastrado por el viento, aerosol marino, restos de plantas o se emiten desde los volcanes o de los incendios de la biomasa. Las partículas gruesas generadas por estos procesos de formación o las emitidas desde su fuente se pueden separar en partículas de menor tamaño por procesos mecánicos. (Schuman U., 2012)

Las partículas atmosféricas que se mantienen en suspensión poseen un mayor tiempo de residencia en la atmósfera, por lo tanto son las que tienen un carácter negativo sobre el medio ambiente y la salud humana. Esta última se ve marcada en gran medida por las PTS ultrafinas, ya que generan mucho más daño en el sistema respiratorio, debido a su tamaño aerodinámico, pudiendo ingresar hasta la sangre a través de los alvéolos. (Piña A., 2011)

De acuerdo a la figura 1 tomada de las normas EPA, se describe a continuación las regiones del sistema respiratorio donde pueden penetrar las partículas atmosféricas:

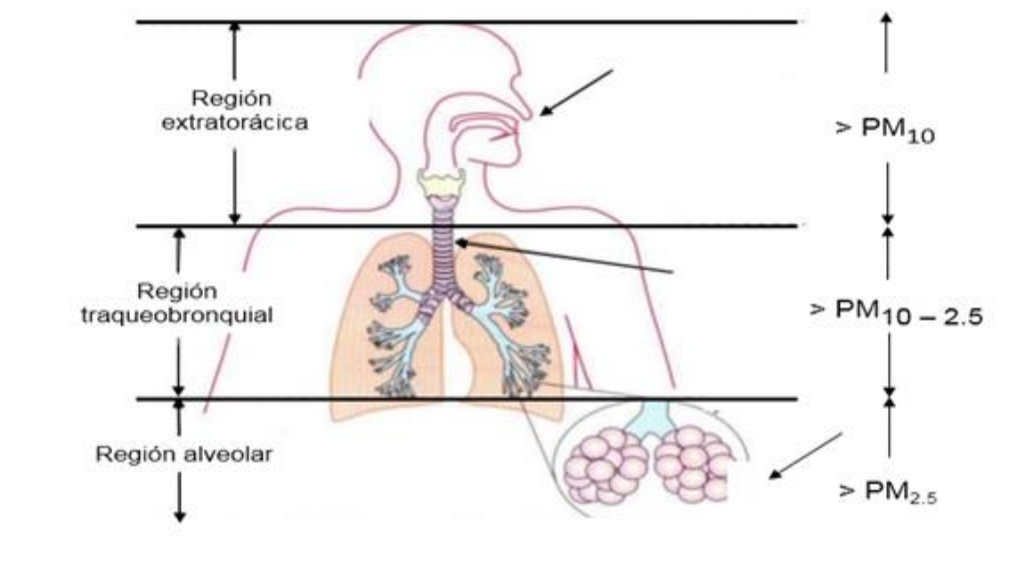


Figura 1: Nivel de ingreso de las partículas atmosféricas al sistema respiratorio humano en función del tamaño (Tomado de la: USEPA).

3.4. Efectos en la salud humana

Las personas con enfermedades cardíacas, pulmonares, asmáticas, adultos mayores y niños son las más propensas a tener problemas de salud como consecuencia de las partículas presentes en el aire. Los efectos de las partículas atmosféricas en la salud humana se describen en función de su tamaño, ya que su capacidad de ingreso será mayor a medida que el tamaño sea más fino. Las partículas con un diámetro aerodinámico mayor a $10\text{ }\mu\text{m}$ o extragruesas llegan a la boca y nariz pero son expulsadas hasta en un 99% a partir de mecanismos de eliminación del sistema respiratorio. Aquellas con un diámetro aerodinámico $\leq 10\text{ }\mu\text{m}$ o gruesas se adhieren a la membrana pero se eliminan en la parte baja del tracto respiratorio. Las partículas comprendidas entre $0,1$ a $2,5\text{ }\mu\text{m}$ o finas pasan por la tráquea hasta depositarse en los pulmones donde producen el daño. Las partículas



< 0,1 μm o ultrafinas pueden pasar al alveolo pulmonar hasta llegar a la sangre. (Piña A., 2011)

En función del daño que generan estas partículas en el medio ambiente y sobre la salud del hombre, algunos países han adoptado normas que regulan los valores permisibles de las partículas atmosféricas que el hombre introduce al medio ambiente a partir de las operaciones industriales o por otras actividades que involucren la transferencia de materia y energía al medio ambiente. Sin embargo, sólo establecen un límite máximo del contenido del sólido en el aire sin tener en cuenta la composición química de los mismos. Tales normativas se describen a continuación:

3.5. Normativas nacionales

El 26 de abril de 1995, bajo la presidencia de Rafael Caldera y en ejercicio de las atribuciones conferidas por los artículo 190, ordinal 10º, de la Constitución y de conformidad con lo establecido en los artículos 4º, 19, 20 y 21 de la Ley Orgánica del Ambiente, en Consejo de Ministros, se decretó la Ley **SOBRE LA CALIDAD DEL AIRE Y CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA** denominado Decreto 638. El artículo 5 de Decreto, tiene por objeto establecer las normas para el mejoramiento de la calidad del aire, prevención y control de la contaminación atmosférica producida por fuentes fijas y móviles capaces de generar emisiones gaseosas y partículas atmosféricas (Tabla 1).



Tabla 1: *Clasificación de zonas de acuerdo con los rangos de concentraciones de partículas totales suspendidas (PTS), calculadas en base a promedios anuales (Tomado de Decreto 638, 1995).*

PTS $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Zona
< 75	Aire limpio
75 – 200	Aire moderadamente contaminado
201 – 300	Aire altamente contaminado
>300	Aire muy contaminado

De acuerdo al artículo 3 de tal Decreto, establece el porcentaje de excedencia de muestras en un estudio determinado para cada rango de concentración (Tabla 2):

Tabla 2: *Porcentaje de excedencia de muestras en un estudio determinado para cada rango de concentración (Tomado de Decreto 638, 1995).*

PTS $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Porcentaje de excedencia de muestras en un estudio determinado
< 75	50 %
75 – 200	5 %
201 – 300	2 %
>300	0,50 %

Como se mencionó anteriormente, el tamaño de las PTS genera diversas consecuencias en la salud humana, además de esto, su composición genera un problema adicional debido a que estas pueden contener diversos componentes orgánicos en su mayoría cancerígenos, así



como también diversos metales tóxicos entre ellos el Hg, el cual no tiene ninguna función metabólica sobre el ser humano y demás seres vivos.

El Hg posee una serie de características que lo diferencian de los otros metales y por poseer una alta presión de vapor esto le confiere una mayor capacidad de transporte en la atmósfera. Tales características se describen a continuación:

3.6. Propiedades físicas y químicas del Hg

El mercurio cuyo símbolo es Hg, es el único metal que tiene la propiedad de permanecer en estado líquido a temperatura ambiente, es de color plateado, de alta movilidad, muy volátil, forma un vapor monoatómico y tiene una presión de vapor de $1,3 \times 10^{-3}$ mm a 20 °C lo que le permite estar en forma gaseosa en el ambiente. Es muy soluble tanto en líquidos polares como en no polares y es inerte frente a los ácidos no oxidantes (Cotton A., y Wilkinson G., 2004). Sus características más resaltantes son expresadas en la tabla 3:

Tabla 3: Propiedades físicas del mercurio (Tomado de Nordbeg G., et al. 2015).

Peso atómico	200,6 g/mol
Punto de fusión	38,9 °C
Punto de ebullición	356,6 °C
Densidad	13,6 g/cm ³



Este metal puede estar presente en los ecosistemas tanto por fuentes naturales, así como las creadas por el hombre (Pirrone N, Manson R., 2009) Las principales fuentes naturales de Hg incluyen los procesos geológicos como lo son la desgasificación de la corteza terrestre, tanto de las profundidades del océano hasta por emisiones volcánicas, y por meteorización y erosión de fuentes litológicas. (Pirrone N, Manson R., 2009).

Las principales fuentes antrópicas que introducen Hg al ambiente son la minería, agricultura y el sector industrial (Pirrone N, Manson R., 2009). Esta última se considera como la principal fuente de contaminación que incluye la quema de combustibles fósiles como el carbón, el procesamiento alcalino del cloro, fabricación de papel, incineración de desechos tanto urbanos como médicos, plantas metalúrgicas y durante la producción de cemento, que a través de sus emisiones atmosféricas es introducido a la atmósfera y en función de su ciclo geoquímico puede ser incorporado además en los, suelos, sedimentos, agua, biota e incluso en el hombre. (Pirrone N, Manson R., 2009)

En el ambiente, el Hg se presenta en sus tres estados de oxidación: elemento metálico (Hg^0), sales inorgánicas que incluyen las especies mercuriosas (Hg^{+1}), mercúricas (Hg^{+2}) y compuestos orgánicos (metilmercurio, etilmercurio y fenilmercurio). Estas formas y sus compuestos pueden estar presentes en la atmósfera ya sea en fase gaseosa, líquida y sólida, ésta última asociada a partículas atmosféricas. (Jiménez A., 2005)

Dentro de las actividades industriales que desarrolla el hombre, el Hg^0 y sus derivados orgánicos e inorgánicos poseen un uso específico que se presentan en la tabla 4:



Tabla 4: Fuentes y usos del mercurio (Hg) con respecto a su química
(Tomado de Jiménez A., 2005; Ferreira L., et al. (2011).

Forma química	Uso
Mercurio elemental (Hg^0)	Industria cloro alcalina
	Amalgamas dentales
	Minería
	Equipos eléctricos (baterías, interruptores, lámparas ultravioletas y fluorescentes)
	Catalizador en las industrias
	Instrumentos de medición (termómetros, manómetros, termostatos)
Mercurio Inorgánico Hg^{+2}	Equipos eléctricos (baterías)
	Impregnación de la madera
	Productos médicos
	Productos para el cuidado de la piel
Mercurio Inorgánico Hg_2^{+2}	Equipos eléctricos
	Productos médicos
Compuestos Orgánicos de Mercurio (COM)	Fungicidas
	Pesticidas
	Pigmentos (pinturas)
	Productos médicos

. Una vez que las especies de Hg expuestas en la tabla 4, son liberadas a la atmósfera, pueden ser dispersadas o transportadas a grandes distancias antes de ser depositadas en la superficie de los distintos compartimientos ambientales (hidrosfera, biosfera y atmósfera) y debido a su interacción con estos medios, en ocasiones favorecen su movilización en el ambiente. (Gutiérrez M., et al. 1997).



3.7. Fuentes antrópicas de Hg

Una de las industrias que emite mayor cantidad de partículas al ambiente son las industrias de concreto, las cuales utilizan combustibles fósiles como el carbón, petróleo, gas natural o una combinación de ellos, en los cuales el Hg está presente de forma natural en concentraciones traza y es liberado a la atmósfera a partir de la combustión en los hornos de cemento. En estos, las temperaturas alcanzan hasta 1500°C, energía necesaria para la transformación de la materia prima (rocas carbonáticas y agregados) en clinker que da a lugar el cemento, pero para mejorar las propiedades de este último en cuanto a su dureza, resistencia y compactación, estos combustibles fósiles han sido mezclados con otros combustibles no fósiles o alternativos, que poseen un contenido sustancial de Hg. (Gaona X., 2004; Trezza M., Scian A., 2003).

Las industrias destinadas a la producción de cemento no son las únicas fuentes de emisión de Hg a partir de la quema de combustibles alternativos, también se incluyen incineradoras de residuos médicos y municipales cuya función es eliminar o reducir materiales una vez finalizada su vida útil como los nombrados en la tabla 4. (Gaona X., 2004)

Los crematorios también son fuentes potenciales de Hg sobre la atmósfera y tiene lugar cuando son cremados los cadáveres cuyas piezas dentales contienen amalgamas de mercurio el cual es introducido en el sistema a través de su volatilización por las altas temperaturas (Gaona X., 2004).

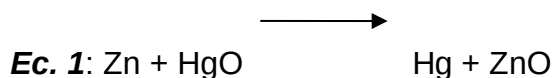
Los incendios producidos sobre yacimientos de carbón y la quema de sus respectivos residuos han proliferado en todo el mundo, principalmente como consecuencia de la actividad humana. La quema de carbón emite, además de enormes cantidades de gases invernaderos como lo son el metano (CH₄), dióxido de carbono CO₂, monóxido de carbono (CO),



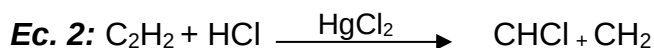
aerosoles atmosféricos, compuestos de azufre e hidrocarburos incluyendo n-alcanos, iso-alcanos, ciclo-alcanos, compuestos aromáticos de alquilo, alquenos, cetonas, éteres, halogenados y mercurio. (Pirrone N., Mason R., 2009)

Las quema de residuos sobre vertederos emiten las mayores cantidades de mercurio a la atmósfera, debido a que estos son grandes acumulaciones de diversos tipos de residuos provenientes de cualquier región adyacente a la misma y pueden contener una gran variedad de materiales, tal como los que se describen en la tabla 4, cuya quema produce un gran volumen de partículas atmosféricas que pueden contener concentraciones importantes de Hg. (Pirrone N., Mason R., 2009)

Las Pilas son otro medio de incorporación de mercurio al ambiente. Aunque muchos países han prohibido su utilización, existe un uso bastante generalizado de ellas a partir de celdas de Zn/Hg con un cátodo de HgO y el ánodo Zn. Siendo la reacción global la mostrada en la Ec. 1: (Gaona X., 2004)



Algunas de las sales de mercurio son utilizadas como *catalizadores* en la industria para la producción de cloruro de vinilo, acetato de vinilo y acetaldehído a partir del acetileno (Ec. 2). (Gaona X., 2004)





El Hg también es usado para la fabricación de rellenos dentales. Actualmente su uso ha disminuido debido a los importantes efectos negativos que este genera sobre la salud, sin embargo anteriormente se generaba una aleación de 66,7 – 74,5 % de Ag, 0,06% de Cu y 1,9% de Zn, mezclada con mercurio elemental Hg^0 , aproximadamente 1:1 en peso para dar una amalgama dental. (Gaona X., 2004)

En la agricultura son utilizados los compuestos órgano-mercuriales en el tratamiento de enfermedades de los cereales, empleándose con mayor frecuencia en semillas almacenadas, en céspedes como herbicida, en cereales, patatas, remolachas y hortalizas y plantas ornamentales. El peligro está en que, de esta manera, el mercurio puede entrar en la cadena de alimentación humana, lo que puede generar episodios de intoxicación. (Ferreira L., et al. 2011)

En función de las actividades antropogénicas que contribuyen con la introducción del Hg a la atmósfera descritas anteriormente, se ilustra a continuación la distribución global de emisiones de Hg de cada uno de estos sectores (Figura 2).

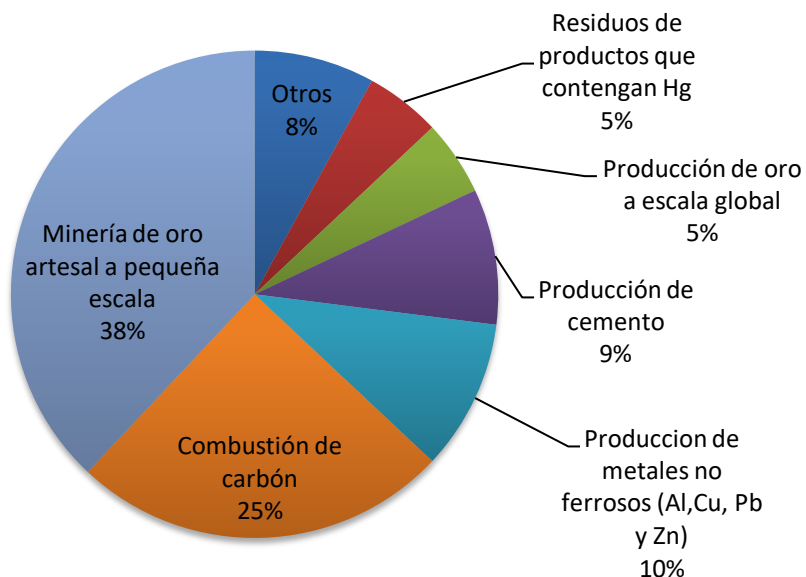


Figura 2 Distribución global de las emisiones antropogénicas de Hg al aire de diferentes sectores (Tomado de Xu J., 2014).

Las actividades antrópicas descritas en la figura 2, emiten Hg directamente hacia la atmósfera, por lo tanto, cuando este se encuentra presente en este sistema se cataloga el mismo como Hg atmosférico que se describe a continuación:

3.8. Mercurio (Hg) atmosférico

Generalmente, en la atmósfera son identificadas 2 especies de Hg atmosférico. La primera se denomina mercurio gaseoso total (TGM) que representa entre un 90 – 95% de la concentración del Hg atmosférico. (Restrepo J., 2012)

El TGM, se compone principalmente de un 95 - 97% de mercurio elemental (Hg^0) teniendo un tiempo estimado de residencia en la atmósfera entre 0,5 – 2 años. Los compuestos de Hg^{2+} son definidos como mercurio gaseoso reactivo, conocido también, por sus siglas en inglés como RGM, ya que tienen la capacidad de ser reducidos en soluciones acuosas; esta



especie mercúrica está presente en el aire como cloruro, hidróxido, sulfato y sulfito. La literatura indica que el HgCl_2 (cloruro de mercurio +2) es el compuesto predominante de Hg^{+2} y representa el 3% del TGM. También los compuestos orgánicos de mercurio (COM) pueden aparecer en fase gaseosa como metilmercurio, etilmercurio, dimetilmercurio y fenilmercurio y constituyen únicamente entre 0,3 -1% del TGM. (Restrepo J., 2012)

Además del TGM, el Hg atmosférico tiene otro componente importante que es el mercurio particulado total (TPM) que constituye una pequeña fracción del Hg atmosférico que va desde el 5 – 10% del Hg en el aire, el cual consiste en mercurio Hg^0 y sales insolubles de Hg^{+2} , ambas especies enlazadas o adsorbidas por material particulado. El TPM tiene un tiempo de vida media de una (1) a dos (2) semanas. (Restrepo J., 2012)

En áreas remotas sin fuentes antrópicas locales de Hg, las concentraciones de TPM son generalmente bajas y el mercurio gaseoso total aporta la mayor parte (> 99%) de la concentración de mercurio en el aire. En las regiones industrializadas, la concentración de TPM puede alcanzar aproximadamente el 40% del total de mercurio en la atmósfera, sugiriendo que el mercurio particulado es largamente de origen antropogénico (Restrepo, 2012), afectando la salud de los seres humanos debido a que el hombre puede ser receptor de Hg mediante la inhalación de partículas atmosféricas. Estas formas físicas en la que se presenta el Hg, le confiere la capacidad de ser transportado y depositado hasta 100 – 180 Km de distancia desde la fuente de emisión donde circula, además sobre los cuerpos de agua, sedimentos, suelos, biota y también puede ser reincorporado a la atmósfera o a cualquier otro de los compartimientos ambientales mencionados debido a su ciclo geoquímico que se describe a continuación (Gutiérrez M., et al. 1997):



3.9. Ciclo biogeoquímico del Hg

La figura 3 ilustra de forma esquematizada el flujo de las formas de Hg en la naturaleza. El ciclo biogeoquímico del Hg describe el conjunto de procesos y transformaciones que este experimenta a través de su circulación en los suelos, océanos y la atmósfera, debido a que este es susceptible a los procesos naturales no se acumula de forma permanente en cada uno de los compartimientos mencionados, sino que existe un flujo continuo. (Restrepo J., 2012)

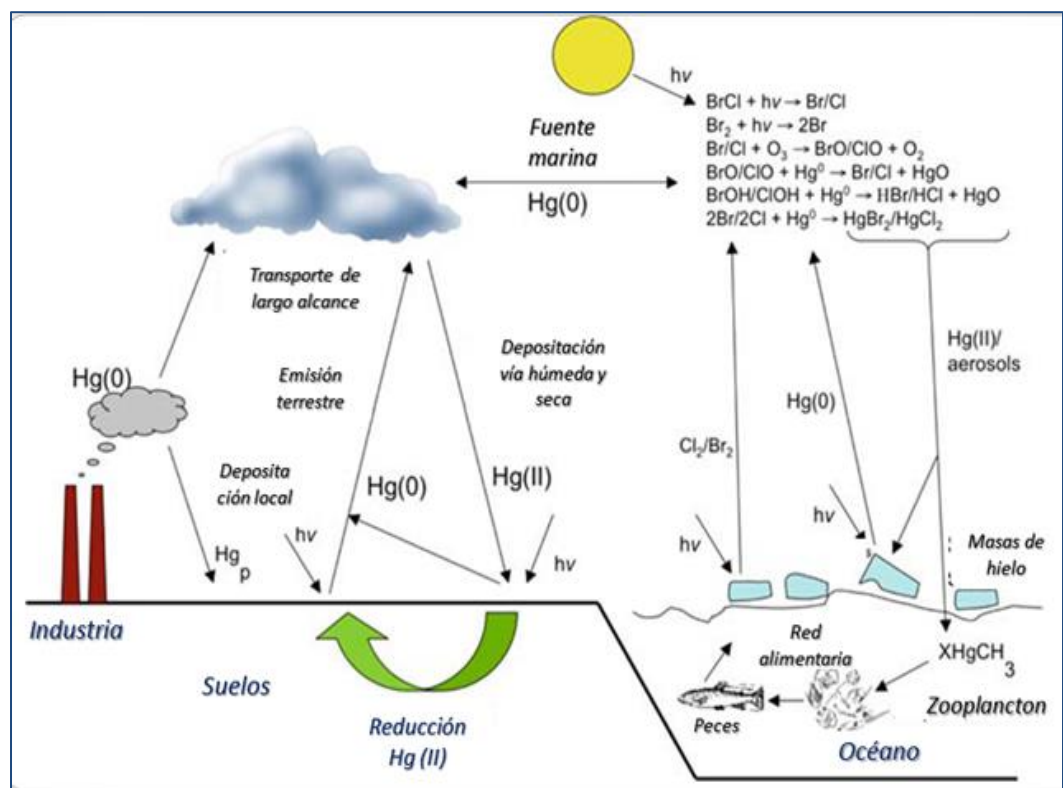


Figura 3: Esquema simplificado de las transformaciones del Hg en el ambiente (Tomado de Pirrone N, Manson R., 2009).



Desde 1890 ha sido emitido más de 200.000 toneladas de Hg a la atmósfera, aproximadamente el 95% se encuentran en los suelos terrestres, alrededor de un 3% en las aguas oceánicas y un 2% en la atmósfera (Gaona X., 2004). En este último se estima que entre el 40 – 75% de Hg presente en la atmósfera corresponde a las emisiones al aire provenientes de fuentes antrópicas como de la quema de combustibles fósiles y la incineración de residuos (Gaona, 2004). Las emisiones naturales, incluidos las erupciones volcánicas, suelos, lagos, aguas abiertas y los incendios forestales, contribuyen significativamente menos que las fuentes antropogénicas. (Gaona X., 2004)

Una vez incorporado el Hg^0 a la atmósfera, éste es depositado a partir de una serie de mecanismos que implican su conversión a mercurio inorgánico en las propias gotas de agua de las nubes, pasando de su fase gaseosa a acuosa, tal como se muestra en la ecuación 1. Por la presencia de Ozono (O_3) el $Hg^0_{(ac)}$ se transforma en la forma Hg^{+2} tal como se muestra en la ecuación 2 (Pirrone N., Manson R., 2009). Este último es arrastrado por el viento y la lluvia. Una parte del metal puede evaporarse y entrar al aire, otra fracción puede incorporarse a los suelos y formar parte de la materia orgánica o ser adsorbido por las arcillas y las plantas a través de sus raíces (Gaona X., 2004; Gutiérrez M., et al. 1997; Sánchez S., 2016), también puede ser arrastrado hasta los océanos por escorrentías a través del nivel freático, para posteriormente ser convertido en la forma orgánica metilmercurio MeHg en ambientes anóxicos especialmente por la importante acción de algunos microorganismos, como las bacterias reductoras donde puede ser reducido nuevamente a Hg^0 . Además el Hg^{+2} puede ser reducido a su forma elemental Hg^0 por la reacción iones sulfito SO_3^{2-} tal y como se muestra en la ecuación 4. (Restrepo J., 2012; Gaona X., 2004; Gutiérrez M., et al. 1997; Ferreira L., et al. 2011)



Ecuación 1: *Hg en la atmósfera* $Hg_{(g)}^0 \leftrightarrow Hg_{(ac)}^0$

Ecuación 2: *Reacción del Hg con el Ozono (O_3)*. $Hg_{(ac)}^0 + O^{3+} \leftrightarrow Hg_{(ac)}^{2+}$

Ecuación 3: *Cambio de estado del Hg*. $Hg_{(ac)}^{2+} + \frac{\text{polvo}}{\text{evaporación}} \leftrightarrow Hg_{\downarrow}^{2+}$

Ecuación 4: *Reacción del Hg con sulfito (SO_3^{2-})*. $Hg_{(ac)}^{2+} + SO_3^{2-} \leftrightarrow Hg_{(ac)}^0$

El Hg es un contaminante persistente, tóxico y bioacumulativo de interés mundial. El carácter tóxico a la exposición de Hg, va a estar determinado principalmente por su forma química. Las formas orgánicas de Hg son las más tóxicas con respecto a las especies inorgánicas o la especie elemental. Sus efectos sobre el cuerpo humano dependerán en gran medida de su acumulación y transporte sobre los distintos órganos del cuerpo (Gutiérrez M., et al. 1997). De acuerdo a lo dicho anteriormente, se describe a continuación, la manera en que el Hg es incorporado en el cuerpo humano y cómo se moviliza dentro del mismo.

3.10. Toxicología

El vapor de Hg^0 puede ser incorporado al cuerpo humano por vía digestiva donde sólo se absorbe el 0,1%, la absorción transdérmica también es mínima y es cuando respiramos que ingresan las mayores concentraciones de esta especie en nuestro cuerpo. (Nordbeg G., et al. 2015)

Una vez absorbido el mercurio elemental Hg^0 se distribuye fácilmente a través del cuerpo que atraviesa tanto la placenta y la barrera hematoencefálica, además es incorporado en nuestra sangre y en pocos minutos es oxidado a la forma inorgánica divalente (Hg^{+2}) por el peróxido de hidrógeno (H_2O_2) presente en la mayoría de los tejidos. Sin embargo antes de la oxidación una fracción del vapor de Hg^0 es atrapada en la membrana alveolar pulmonar y otra es absorbida desde los pulmones hasta



el cerebro, el cual queda atrapado en las células del sistema nervioso central (SNC). Este elemento puede ser excretado a través de las heces, orina, el aire exhalado, sudor y saliva (Nordbeg G., et al. 2015; USEPA., 1997).

Por su parte, una fracción del ión divalente presente en el organismo puede formar compuestos con las proteínas, causando que su movilidad en el cuerpo sea limitada. También altas proporciones del ión divalente son encontradas en los riñones, principalmente en el túbulo contorneado, además se une a las zonas periportales en el hígado, en la membrana del tracto intestinal, piel y testículos. La principal ruta de excreción es a través de las heces. (Nordbeg G., et al. 2015)

El MeHg comúnmente se encuentra presente en peces y plantas e ingresa al cuerpo humano a través de la ingesta de estos. Una vez incorporado en el sistema, este es más absorbido a las células rojas de la sangre con respecto al mercurio inorgánico. El MeHg tiene la capacidad de atravesar la placenta en el caso de mujeres embarazadas, además se acumula en el cerebro y en los cabellos (Nordbeg G., et al. 2015). Dentro del cerebro y las células rojas el MeHg puede someterse a desmetilación, transformándose a mercurio inorgánico, el cual tiene menor capacidad de atravesar las membranas celulares. Una fracción de MeHg es principalmente excretado del cuerpo humano en la bilis a través de las heces y leche materna, una fracción no excretada puede ser re-absorbida por el intestino (Nordbeg G., et al. 2015; USEPA, 1997).

3.11. Normativas nacionales

Considerando los efectos dañinos que causa el Hg sobre el ser humano, existen normativas nacionales como la Norma Venezolana COVENIN 2253:2001, que establece los niveles permisibles para la



exposición a vapores de mercurio elemental (Hg^0) y no asociado a partículas atmosféricas. Estas son formas químicas diferentes y no tienen el mismo comportamiento y propiedades químicas en la atmósfera, por lo tanto no se pueden comparar las concentraciones obtenidas de Hg asociado a partículas con las que establece esta Norma para Hg^0 . Es por ello que se ha acudido a utilizar normativas internacionales que se describen a continuación:

1.1. Normativas Internacionales:

El 04 de abril de 2006 el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, de la República de Colombia crea la resolución 601 “Norma de Calidad del Aire o Nivel de Inmisión”, con el propósito de garantizar un ambiente sano y minimizar los riesgos sobre la salud humana que puedan ser causados por la concentración de contaminantes en el aire, la cual se presentan los niveles máximos permisibles de contaminantes no convencionales en la atmósfera con efectos cancerígenos, entre ellos el Hg inorgánico (ver tabla 5).

Tabla 5: *Niveles máximos permisibles del mercurio inorgánico con efectos cancerígenos (Tomado de Resolución 601, 2006).*

Contaminante no convencional	Límite máximo permisible	Tiempo de exposición
Mercurio inorgánico	$1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ó 1×10^6	1 año



4. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

4.1. Ubicación

Los Valles del Tuy es una sub-región perteneciente al estado Miranda, ubicada al centro norte de Venezuela, comprendida entre las coordenadas 67°00' y 66°30' de longitud oeste y 10°00' y 10°30' de latitud norte. (Betancourt, 2012). Se compone por 6 municipios, de los cuales destacan el municipio Tomás Lander y el municipio Cristóbal Rojas porque Sánchez en el 2015 encontró valores positivos de mercurio. Ambos municipios se encuentran unidos por diversas vías, como la carretera nacional Ocumare - Charallave vía "Pitahaya" (Figura 4). Además están establecidas industrias que emiten hacia la atmósfera material particulado a través de sus chimeneas, entre ellas destacan Aliven situada en el municipio Cristóbal Rojas, la Corporación Socialista de Cemento en el municipio Tomás Lander, también se produce la quema de vertederos de basura y se desarrolla la actividad aeronáutica (Gobernación de Miranda, 2008).

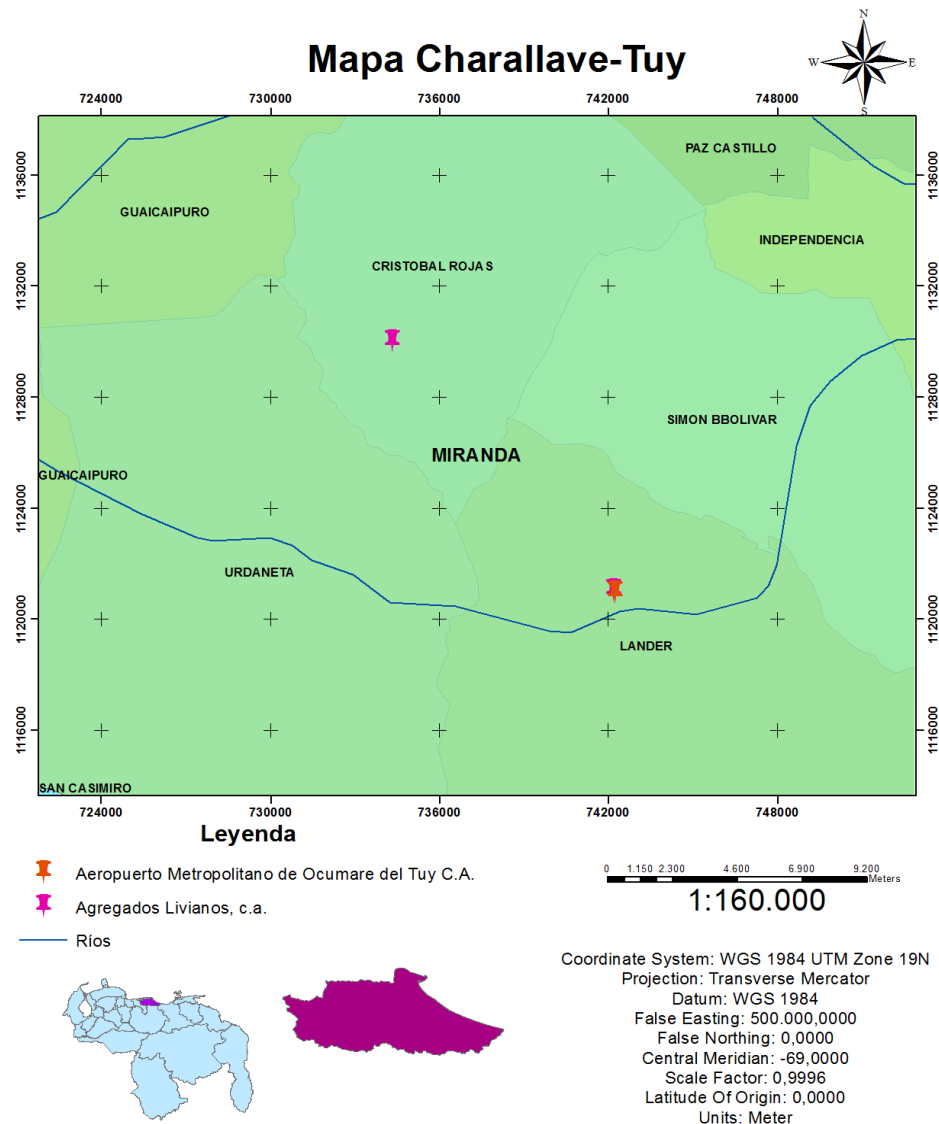


Figura 4: Ubicación geográfica de la zona de estudio.

4.2. Descripción litológica

La Formación Tuy cubre aproximadamente el 70% de la cuenca Santa Lucía-Ocumare del Tuy, en una poligonal con vértices en Santa Lucía, Santa Teresa, Ocumare del Tuy, Cúa, Charallave y Suapire, y en parte al noreste de Santa Teresa (municipios Paz Castillo, Lander y Urdaneta del estado Miranda). Según Picard X., Pimentel N., 1968 citado en el Código



Geológico de Venezuela por PDVSA INTEVEP, la Formación Tuy se caracteriza por una intercalación constante y monótona de capas gruesas, generalmente de 1 a 3 metros de espesor de gravas heterogéneas y conglomerados líticos mal consolidados, con matriz limo arcillosa abundante y a veces con cemento calcáreo, intercaladas con arcillas, lutitas y cantidades menores de margas y arenisca por rocas metamórficas, algunos granos subangulares de rocas de color verde, más duras y menos esquistas, y cantos grandes de cuarzo angular. Los cantos provienen de las formaciones Las Mercedes, Chuspita y Las Brisas hacia el norte de Suapire y Santa Lucía; Rocas de Conoropa, Formación Urape, Conglomerado de Charallave, Formación Paracotos y Grupo Villa de Cura en el resto de la cuenca.

4.3. Clima

Los valores de temperatura oscilan desde 25 a 30 °C mientras que los regímenes de precipitación anuales son de 800 a 2000 m., La zona se encuentra caracterizada por dos períodos: una seca que abarca los meses entre enero hasta abril, con un promedio anual de precipitación de 10% y una húmeda, entre los meses de junio a noviembre, con un promedio anual de precipitación de 76% y en los meses de transición precipita aproximadamente el 14%. (Zambrano S., 1970; López J., et al. 1971)

4.4. Relieve

Los Valles del Tuy constituyen una depresión dentro de la Cordillera de la Costa, entre las Serranías del Litoral y del interior, al norte y al sur respectivamente. Las poblaciones de Cúa, Santa Teresa del Tuy y Ocumare del Tuy están asentadas sobre los remanentes más altos de



terrazas, que conciernen a cerros o lomas de topes sumamente planos y ligeramente inclinados hacia el sur (Gobernación de Miranda, 2008).

4.5. Hidrografía

Un rasgo geológico importante es la cuenca del río Tuy que puede ser dividida en tres partes: 1) Alto Tuy (Colonia Tovar- El Consejo), comprendiendo el área drenada por el río Tuy y sus afluentes, desde su nacimiento en el Pico Codazzi hasta su desvío al este de la población El Consejo (área aproximada de 210 Km²), 2).Tuy Medio (El Consejo- Vigía) con un área aproximada de 3620 Km² y 3) Bajo Tuy (Vigía- Boca de Páparo) área aproximada 3130 Km². (Zambrano S.,1970)

4.6. Patrones de vientos

Actualmente, el estado no posee una base de datos que describa la velocidad, dirección y sentido de los vientos, al menos en la zona de estudio. De acuerdo con López J., et al. 1971, presentó valores detallados de los diversos elementos climatológicos en Los Valles Del Tuy. Según los datos recolectados para ese entonces, se observaron vientos en todas las direcciones de la rosa de los vientos, prevaleciendo notablemente los de componente ESTE.



5. ANTECEDENTES

A continuación se describen algunos estudios nacionales e internacionales relacionados con este proyecto de investigación y que sirven como base y soporte del mismo.

5.1. Nacionales

Burgos A., 2018, caracterizó partículas totales suspendidas (PTS) en función de su morfología y composición elemental, a través de Microscopía Electrónica de Barrido con Espectroscopía Dispersiva de Energía de Rayos X (SEM-EDX), en veinte (20) muestras colectadas con muestreadores de alto volumen, en filtros de fibra de vidrio, en dos zonas del eje Charallave-Ocumare del estado Miranda, específicamente en el sector Pitahaya y el Aeropuerto Metropolitano. El autor, determinó que las diferentes morfologías y sus composiciones asociadas pueden ser características de los diferentes procesos de formación, según el origen con el que estén relacionados, como es el caso de las partículas esféricas y cenósferas, ambas características de la combustión. Así mismo, él encontró que las partículas totales suspendidas que contribuyen en los puntos de muestreo, son de origen natural y antrópicos, provenientes de aerosoles marinos, la corteza terrestre, industrias, quema de desechos y biomasa, avionetas, automóviles y la vegetación. De igual forma, él comprobó que las emisiones industriales tienen una gran influencia en la calidad del aire, ya que en la estación de Pitahaya-Charallave, ubicada en una zona industrial, las concentraciones de PTS estuvieron considerablemente por encima de las concentraciones encontradas en el aeropuerto, con una media geométrica de $72 \mu\text{m}/\text{m}^3$ y $51 \mu\text{m}/\text{m}^3$ respectivamente.

Cardozo R., 2010. En la población de El Callao, estado Bolívar, se practica la minería extractiva artesanal en gran escala y se presumen



elevados niveles de Mercurio (Hg) en el aire de la región, siendo de gran interés los ámbitos de las Unidades Educativas Bolivarianas debido a que los niños permanecen gran parte del día en sus instalaciones expuestos al producto aéreo de la actividad minera. El autor, evaluó la exposición de niños de edades comprendidas entre 6 y 13 años, debido al riesgo de toxicidad reportado por la inhalación de mercurio y sus especies inorgánicas. Estos efectos han sido especificados a nivel del Sistema Nervioso Central lo cual hace que esta población sea sumamente vulnerable ya que se encuentran en desarrollo de sus funciones motoras.

Las muestras de aire fueron recolectadas según la Norma del Instituto Nacional de Salud y Seguridad Ocupacional (NIOSH), N° 6009 con una variación del método de digestión y cuantificación por Espectroscopía de Fluorescencia Atómica con generación de vapor frío (CV-AFS por sus siglas en inglés). El autor, muestreó un total de 11 Unidades Educativas Bolivarianas de diferentes zonas de la población de El Callao, y encontró valores entre 0,09 y 0,9 $\mu\text{g Hg}/\text{m}^3$. De acuerdo al autor, algunos de estos valores se encuentran por encima del valor de Nivel de Riesgo Mínimo (MRL por sus siglas en inglés) de 0,2 $\mu\text{g Hg}/\text{m}^3$, propuesto por la Agencia para Sustancias Tóxicas y Registro de Enfermedades (ATSDR).

Sánchez S., 2016, realizó la determinación de mercurio en muestras de suelos y material particulado sedimentado en la zona industrial Charallave-Ocumare, estado Miranda, con el fin de establecer posibles zonas contaminadas por las actividades antrópicas que se llevan a cabo en los alrededores. La metodología planteada consistió en recolectar muestras de material particulado con tamaños menores a 63 μm , depositado en calles, techos de vehículos, hojas y árboles, en 16 puntos diferentes. Así mismo fueron captadas 19 muestras de suelos con tamaños de partículas menores a 2 mm a tres profundidades (5, 10 y 15 cm). En la mayoría de los casos, la campaña de muestreo fue realizada el 3 de junio de 2014, a lo largo de



la zona industrial Charallave-Ocumare, dividida en zona Norte y zona Sur. Ambos tipos de muestras fueron analizadas mediante un analizador directo de mercurio modelo *DMA-80*.

Las concentraciones de mercurio medidas por el autor, por zonas mostraron un mayor contenido de este metal en las muestras de material particulado sedimentado, hacia la zona sur corresponde el intervalo de 15 – 66 ng Hg/g, con respecto a la zona Norte de 7 – 25 ng Hg/g, siendo la zona de Ocumare la que presentó mayores concentraciones de Hg en dichas muestras. En las muestras de suelos el autor apreció lo opuesto; es decir, un incremento en las concentraciones de Hg hacia la Zona Norte con respecto a la zona Sur. Para los dos tipos de muestras empleados en esta investigación fueron generados los mapas de isoconcentración correspondientes, en los cuales se aprecia la similitud de que las mayores concentraciones de Hg se encuentran ubicadas alrededor de los focos de emisiones principales de ambas zonas, una industria cementera (zona Sur) y una industria de agregados livianos (zona Norte).

A través de esto y el hecho de que en la zona no existen yacimientos de sulfuros masivos como un aporte natural de Hg, el autor pudo inferir que los valores encontrados de este metal pudieran ser por fuentes antrópicas. Las concentraciones de mercurio obtenidas para los suelos fueron comparadas con los estándares internacionales propuestos por Canadá, China, EEUU, el Reino Unido y el PNUMA, con el objeto de identificar zonas contaminadas con este metal, puesto que en Venezuela no existe una regulación en cuanto a la cantidad máxima permisible de Hg en los suelos. El autor obtuvo que todas las concentraciones de Hg se encontraron dentro de los límites máximos establecidos para el Reino Unido y el PNUMA, lo que conlleva a una situación de alerta, ya que es a partir de estos límites de Hg cuando los suelos pueden empezar a perder su funcionalidad, atacando primero la capacidad de estos de sustentar organismos vivos (Santos F., *et al.* 2010).



Zambrano C., 2005, determinó la composición química en muestras de partículas totales suspendidas (PTS) en la atmósfera de Puerto Ordaz, captadas durante los años 2002 y 2003. Los resultados obtenidos para las concentraciones de PTS indicaron que los mayores valores de concentración de PTS ocurren durante los meses de enero a mayo los cuales corresponden al período de sequía en Ciudad Guayana.

5.2. Internacionales

Hernández G., 2012, determinó la distribución del Hg (total) en suelos, sedimentos terreros, en la región minera de San Joaquín, Querétaro, México, señalando las áreas más contaminadas. Así mismo, estableció un vínculo en los contenidos de mercurio total en la relación suelo-maíz-agua de lluvia-vapor de Hg. El autor identificó cuatro áreas con contenidos de Hg en suelos por encima de lo permitido por la Normativa Oficial Mexicana conocida por sus siglas como la NOM y la Organización Mundial de la salud (WHO por sus siglas en inglés): Azogues y Ranas - San Joaquín (>300 mg/kg) y Calabacillas-Santa Rita y La Lana (30,1-300 mg/kg). Los suelos de estas áreas proporcionan al maíz (*Zea mays*), cantidades significativas de Hg total a través de mecanismos de traslocación (0,2-8,7 mg/kg en raíces y 0,2-8,2 mg/kg en tallo y hoja); en grano las cantidades oscilan entre 0,04-0,87 mg/kg (0,5 mg/kg es el máximo permitido). La cuantificación del mercurio sobre estas estructuras vegetales se realizó mediante un espectrómetro de masas de analizador cuadrupolar con plasma acoplado por inducción (Q-ICPMS) Thermo Series-XII, equipado con una celda de colisión/reacción (He, N₂, NH₃ y O₂) para reducir interferencias espectrales. Las muestras de lluvia se filtraron a través de una membrana de policarbonato de 0,4 µm de poro, usando un sistema de filtración magnético (Gelman de 47 mm), el autor obtuvo una fracción soluble y los residuos que permanecieron retenidos en el filtro (fracción insoluble) se sometieron a



digestión ácida, en un sistema de digestión con horno de microondas CEM MARSX press. Ambas fracciones (solubles e insolubles) se mantuvieron en refrigeración a 4 °C hasta su cuantificación. La cuantificación del mercurio se realizó a través de la técnica de Espectrofotometría de Emisión Atómica con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-OES).

En la fracción insoluble del agua de lluvia, la concentración promedio fue de 67,47 µg/L; en la fracción soluble se tuvo un promedio de 36,49 µg/L. El vapor de Hg contenidos de mercurio se detectó a partir de un equipo TEKRAN Modelo 2537A. El promedio diario de vapor de Hg fue de 67 ng/m³ durante los 38 días de lectura, con un intervalo de 40 a 100 ng/m³, lo que demuestra una gran diferencia en la cantidad de volatilización del Hg. Los suelos, sedimentos y terreros de cinabrio, constituyen la fuente que provee de Hg al maíz a través de mecanismos de translocación y material particulado hacia la atmósfera arrastrado por el viento y redepositado a sotavento. Las lecturas que se obtuvieron de vapor de Hg resultaron más altas de lo recomendable. Los resultados obtenidos en el sistema estudiado, denotan concentraciones por encima del límite permisible.

Olivero J., 2013, en su trabajo de investigación tuvo como objetivo determinar los niveles de mercurio total (Hg-t) en el aire en zonas de minería aurífera del sur de Bolívar, en particular en el Distrito Minero de San Martín de Loba, en los municipios de San Martín de Loba y Barranco de Loba (Mina Santa Cruz), Colombia. El análisis *in situ* fue realizado por espectroscopía de absorción atómica, empleando un analizador portátil de mercurio RA 915+. En Mina Santa Cruz, uno de los asentamientos mineros más importante de Colombia, los niveles de Hg-t en aire variaron entre 163,7 y 40.455 ng/m³, mientras que en la cabecera municipal de San Martín de Loba oscilaron entre 223,6 y 27,140 ng/m³. En aquellos sitios en los que hubo proceso de quema de amalgama al momento de las mediciones, las concentraciones de Hg alcanzaron valores de 40,455 ng/m³. De acuerdo



con el autor, estos datos implican una exposición ocupacional severa al Hg para los operadores, y ambiental para los ciudadanos que habitan en poblaciones cercanas a las minas. En consecuencia, es de importancia regular y controlar el uso del Hg en la minería del oro, evitando un impacto crónico del metal sobre la salud de las personas y el ambiente.

Quijano A., et al. 2010, para evaluar la calidad del aire en la ciudad de Pamplona - Norte de Santander Colombia, realizó el monitoreo de la fracción respirable PM 2,5 utilizando un equipo semiautomático medidor de Material Particulado PM 2,5 Partisol-2025 PLUS de la Ruprecht-Patashnick, siguiendo los lineamientos de la OMS y la EPA. Las muestras ambientales obtenidas con el muestreador Partisol 2025 Plus, operando 24 horas continuas, con una frecuencia de seis días durante el período comprendido entre Julio del 2007 y diciembre de 2008, a través de las técnicas gravimétricas el autor la determinó la masa final y obtuvo la concentración diaria de PM 2,5. Por Absorción Atómica, Difracción de rayos X y Fluorescencia de rayos X (FRX) el autor analizó químicamente el material particulado fracción respirable PM2.5 y encontró metales cuyas concentraciones fueron: **Cr** 0,8854; **Fe** 22,97; **K** 651,34; **Mn** 0,3385; **Ni** 0,2729; **Pb** 1,02; **Zn** 245,83, asociados a fuentes antropogénicas y de origen natural. Además determinaron de forma cualitativa sulfatos que pudiesen estar generados por las fuentes antropogénicas como la quema de los combustibles que se utilizan en esta ciudad (gasolina, diésel).



6. METODOLOGÍA

La metodología experimental llevada a cabo en la presente investigación, para la determinación de la concentración de PTS y de la concentración de Hg asociado a estas se dividió en 4 etapas:

6.1. **Etapas de pre-campo**

Consistió en la recopilación de la información general de la zona, esto incluyó: mapas donde se refleja la ubicación geográfica de la zona de estudio, número de fuentes de emisión y ubicación correspondiente, revisión bibliográfica que sirvió de soporte para la posterior interpretación de los datos, información acerca de la dirección, sentido del flujo de vientos. A su vez, se estableció el tiempo de muestreo y número de muestras

6.1.1. Tiempo de muestreo número de muestras

Fueron captadas 10 muestras por cada sitio de muestreo. Cada una de ellas se tomó cada 3 días de forma simultánea, durante 30 días. Por cuestiones de logística que va desde la falta de insumos y costos de los análisis, no se pudieron captar las 20 muestras que indica el Decreto 638 de las normas COVENIN.

6.1.2. Acondicionamiento de los filtros

Antes de la captación, los filtros se colocaron en un desecador durante 24 horas para garantizar una humedad relativa menor a $50 \pm 5\%$, en una sala con una temperatura $< 30^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$, luego estos se pesaron en una balanza analítica con apreciación $\pm 0,0001 \text{ g}$ (ver apéndice 9 y 10).



6.2. Etapa de campo

Consistió en la selección de los sitios de muestreo para obtener muestras representativas del sitio de interés. Para la recolección de las muestras se siguió lo recomendado por la Norma Venezolana COVENIN 2060:1996 que incluye lo siguiente:

6.2.1. Muestreador de alto volumen:

Estos muestreadores fueron utilizados para captar PTS con diámetros $< 60 \mu\text{m}$ sobre un medio filtrante a un flujo tal que permita recolectar tales partículas. En la figura 5 se muestra la estructura del muestreador.

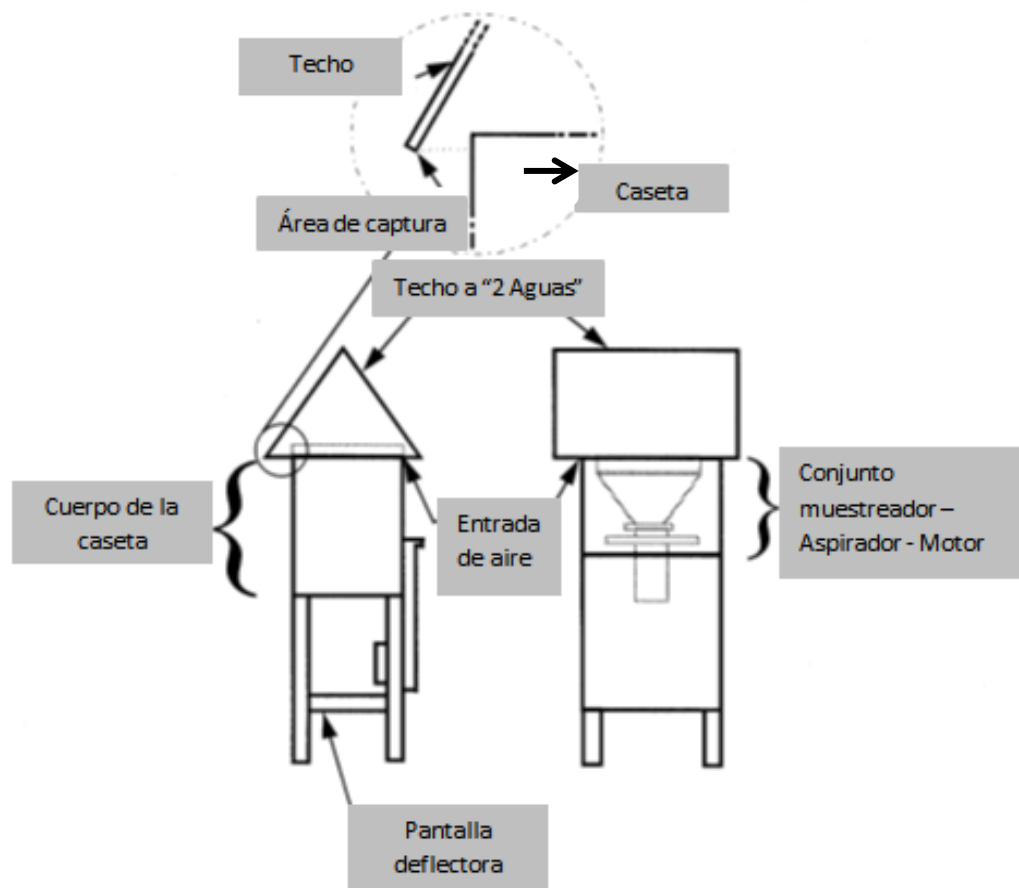


Figura 5: Caseta del muestreador de alto volumen (Tomado de: Norma COVENÍN: 2060:1996).

Para el muestreo, se utilizaron 2 muestreadores de alto volumen (Hi-vol. Sampler) Marca General Metal Works (GMW), Grabesy. Estos equipos están diseñados para la captación de partículas totales suspendidas a través de un filtro de fibra de vidrio con unas dimensiones de $20,3 \pm 0,2 \times 25,4 \pm 0,2$ cm, inerte, baja higroscopicidad, alta estabilidad mecánica, además con una eficiencia de colección de partículas de un 99,97 % para un diámetro de $0,3 \mu\text{m}$.



Para que el equipo operara de manera correcta en campo, fue necesaria su correcta calibración que se realizó de la siguiente forma:

6.2.2. Calibración del muestreador

Para calibrar el equipo se utilizó un calibrador de resistencia variable sobre la placa adaptadora, en una posición de máxima abertura y operando a un flujo máximo (ver figura 6), el cual fue registrado sobre una carta circular que se ubicó sobre el registrador de la caseta. Además, se observó la primera lectura del manómetro conectado al adaptador, luego se cerró progresivamente el área de abertura del calibrador y al mismo tiempo se tomó nota de las lecturas correspondientes hasta completar 6 (seis) valores. El objetivo de este procedimiento fue comprobar que el equipo operaba de forma constante a un flujo determinado durante un tiempo establecido de $24 \text{ h} \pm 1 \text{ h}$ a criterio del operador. Antes y después del calibrado se midió la presión y la temperatura ambiente. Luego en un gráfico de pulgadas de agua Vs- pie^3/min de aire dado en el manual se busca el flujo actual.

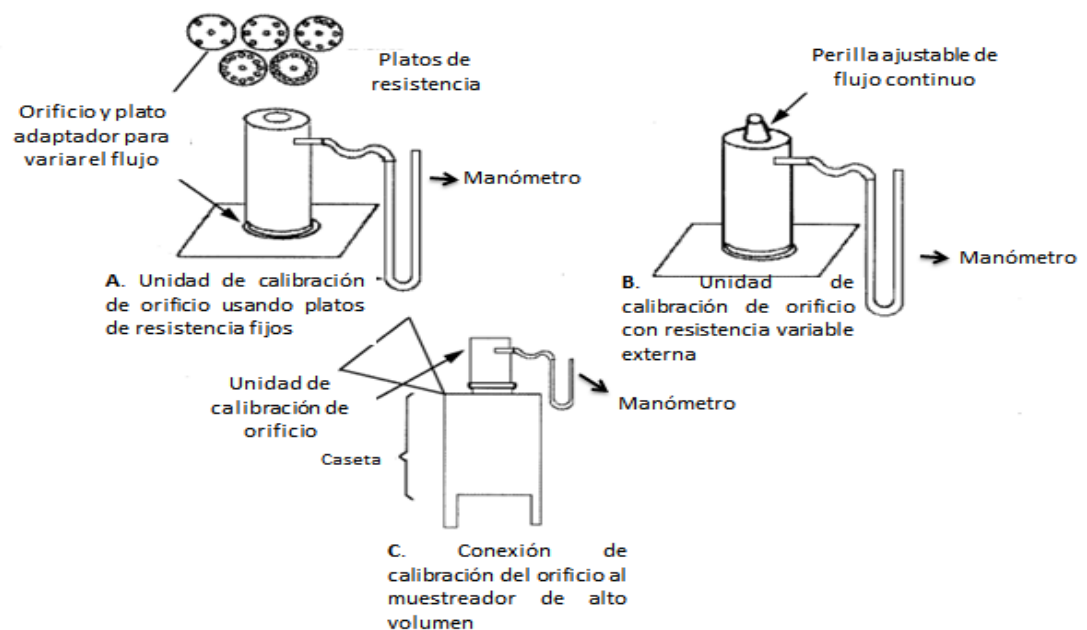


Figura 6: Unidad de calibración (Tomado de Norma COVENÍN 2060:1996).

En el caso de la zona industrial de Charallave, sector Pitahaya ($10^{\circ} 8' 3''$ N y $66^{\circ} 47' 16''$ W), la caseta para el muestreo se ubicó en un área con pavimento, protegido de acciones vandálicas, a una altura de aproximadamente 7 metros desde la base, sin obstrucciones cercanas que restringieran el flujo libre de aire (ver figura 7).

El segundo muestreador se situó en las instalaciones del Aeropuerto Metropolitano de Caracas en Ocumare del Tuy ($10^{\circ} 11' 59''$ N $66^{\circ} 51' 47''$ W), de igual manera en un área sin obstrucciones alrededor que impidieran el flujo de aire (ver figura 8).

Ambos muestreadores fueron ubicados tomando en consideración lo establecido en la Norma COVENIN 2060.



6.2.3. Recolección de las muestras

Fueron captadas 10 muestras por cada sitio de muestreo. Cada una de ellas se tomó cada 3 días de forma simultánea, para un total de 30 días. Por cuestiones de logística que va desde la falta de insumos y costos de los análisis, no se pudieron captar las 20 muestras que indica el Decreto 638 de las normas COVENIN.

Antes y después de la captación, los filtros se colocaron en un desecador durante 24 horas para garantizar una humedad relativa menor a $50 \pm 5\%$, en una sala con una temperatura $< 30^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$, luego y se pesó en una balanza analítica con apreciación $\pm 0,0001 \text{ g}$.



Figura 7: Muestreador de alto volumen (Hi-vol. Sampler) Marca General Metal Works (GMW), Grabesy, ubicado en Aliven, Charallave, estado Miranda. Del 09 de marzo hasta el 08 de abril del año 2017.



Figura 8: *Muestreador de alto volumen (Hi – vol. Sampler) Marca General Metal Works (GMW) Grabes ubicado en el Aeropuerto Metropolitano de Caracas, Ocumare del Tuy estado Miranda. Del 09 de marzo hasta el 08 de abril del año 2017.*

6.3. Etapa de laboratorio

6.3.1. Determinación de la concentración de PTS

Una vez captadas las muestras, se procedió a colocarlas en un desecador durante 24 horas. Por diferencia del peso del filtro antes y después de captar las PTS, se obtuvo el peso neto de las partículas recolectadas en el filtro de fibra de vidrio. Esta diferencia se dividió por el volumen de aire muestreado corregido a las condiciones estándar y la concentración se expresó en $\mu\text{g PTS}/\text{m}^3$. Las ecuaciones que se muestran a continuación, describen el procedimiento para corregir el volumen de aire muestreado por el equipo y para la determinación de la concentración de PTS.



Ecuación 5: *Flujo corregido a condiciones de medición (Q_{cm}):*

$$Q_{cm} = Q_{cf} * \left(\frac{T_{cm}}{T_{cf}} * \frac{P_{cf}}{P_{cc}} \right)^{1/2}$$

Donde:

- Q_{cf} es el flujo a condiciones de fabricación del calibrador, en m^3/min , el cual se calculó a través de las curvas de calibración de los datos obtenidos en campo (apéndices 3 y 7).
- T_{cm} es la temperatura a condiciones de calibración en campo, en $^{\circ}K$.
- T_{cf} es la temperatura a condiciones de fabricación del calibrador, en $^{\circ}K$.
- P_{cf} es la presión a condiciones de fabricación del calibrador, en mmHg.
- P_{cc} es la presión a condiciones de muestreo, en mmHg.

Una vez obtenidos los flujos corregidos a condiciones de muestreo, con la siguiente expresión se obtienen los flujos corregidos a condiciones estándar (Q_{est})

Ec 2: Flujos corregidos a condiciones estándar (298 $^{\circ}K$ y 769 mmHg).

$$Q_{est} = Q_{cm} * \left(\frac{T_{est}}{T_{cc}} * \frac{P_{cc}}{P_{est}} \right)$$

Donde:

- T_{est} es la temperatura en condiciones estándar (298 $^{\circ}K$).
- T_{cc} es la temperatura en condiciones de calibración en $^{\circ}K$.
- P_{est} es la presión en condiciones estándar (760 mmHg).
- P_{cc} es la presión en condiciones de medición, en mmHg



Finalmente obtenido el Q_{est} (ver apéndices 13 y 14), se multiplicó por el tiempo en el que el equipo operó para obtener el volumen de aire muestreado por el equipo y corregido a condiciones estándar V_{est} :

Ecuación 6: *Volumen de aire muestreado, corregido a condiciones estándar.*

$$V_{est} = Q_{st} * t$$

Una vez obtenido el V_{est} (ver apéndices 13 y 14), mediante la siguiente relación se determinó la concentración de PTS:

Ecuación 7: *Concentración de PTS.*

$$[PTS] = \frac{\text{peso del filtro con PTS (g)} - \text{peso del filtro sin PTS (g)}}{V_{est}} = \frac{\mu g}{m^3}$$

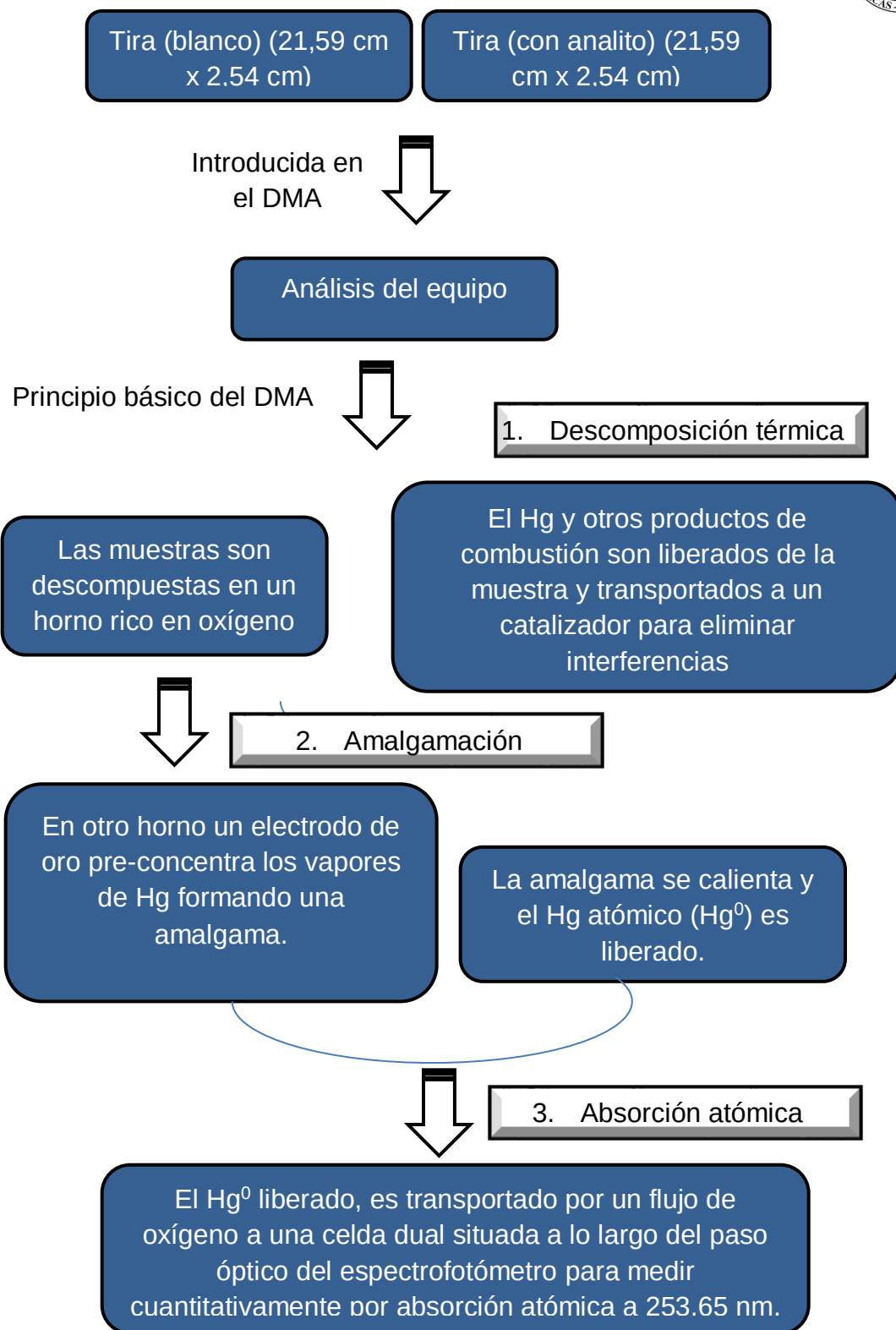
6.3.2. Determinación del contenido de Hg asociado a partículas atmosféricas en los filtros expuestos

Para la determinación del contenido de Hg en las muestras obtenidas de PTS se utilizó un analizador de mercurio modelo DMA~80 marca Milestone (ver figura 9), el mismo emplea la técnica de espectrometría de absorción atómica con descomposición térmica y amalgamación para el análisis de mercurio total, debido a que este elemento posee una alta presión de vapor a temperatura ambiente, y con este método se logra una buena determinación. La calibración del mismo es apreciable en el apéndice 15.



Figura 9: *Analizador de mercurio.*

El procedimiento comenzó colocando una tira sin analito de dimensión 21,59 cm x 2,54 cm, el cual fue recortada de un filtro escogido de forma aleatoria y posteriormente fue introducida directamente en el equipo. El esquema 1 mostrado a continuación, describe el proceso de análisis de las muestras.



Esquema 1: Análisis de Hg por el DMA.



Una vez obtenido el contenido de Hg en cada tira de las correspondientes muestras y del blanco, los cuales son apreciables en los apéndices 16, 17 y 18, a partir de tales valores, se determinó la concentración de Hg en el área total de los filtros expuestos, bajo los procedimientos establecidos por la Agencia de Protección Ambiental (EPA) en el método EPA- IO 3.1. “Selección, preparación y extracción de material filtrado”1999, que proviene del Capítulo IO-3: “Determinación de la concentración de especies químicas en partículas suspendidas colectadas en filtros” descritos en el apéndice 19.



7. PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

A continuación, se muestran los resultados obtenidos de la evaluación de las concentraciones de partículas totales suspendidas (PTS) y mercurio enlazado a partícula en la atmósfera de la zona industrial de Charallave, sector Pitahaya y en el Aeropuerto Metropolitano de Caracas en Ocumare del Tuy, ambos sitios ubicados en el estado Miranda, Venezuela.

El monitoreo duró 30 días, comprendido desde el 09 de marzo hasta 08 de abril del año 2017. Los resultados obtenidos de las PTS fueron comparados con las concentraciones ambientales permisibles de PTS que establecen los artículos 3 y 5 de la normativa venezolana Decreto 638 “Normas sobre la calidad del aire y control de la contaminación atmosférica” de fecha 25 de abril de 1995. Sin embargo, es importante resaltar que con el número de muestras obtenidas es imposible clasificar la zona de acuerdo a lo que establece el Decreto. También, se contemplan las correlaciones encontradas entre las diferentes variables estudiadas.

Así mismo, se presentan y discuten los resultados de las concentraciones de Hg asociadas a las PTS y su relación con la concentración total de partículas sedimentables para estimar las posibles fuentes.

Por otra parte, en Venezuela no existe una normativa que regule las concentraciones de Hg asociado a partícula en el ambiente, por lo tanto, se compararon las concentraciones obtenidas de Hg(p) con la Resolución 601 de las Normas de Calidad del aire o Nivel de Inmisión de fecha 04 de abril de 2006 que establece la República de Colombia.



7.1. Concentraciones de PTS

En la tabla 6 y gráfico 1 están contenidos e ilustrados los resultados de las concentraciones de PTS expresadas en $\mu\text{g}/\text{m}^3$, la fecha de toma de cada muestra y el volumen de aire muestreado por el equipo, corregido a condiciones estándar, obtenidas en el Aeropuerto Metropolitano de Caracas ubicado en Ocumare del Tuy, estado Miranda.

Tabla 6: *Concentración de PTS en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ obtenidas en el Aeropuerto Metropolitano de Caracas - Ocumare del Tuy, estado Miranda. Del 09 de marzo hasta el 08 de abril del año 2017.*

Muestras	Inicio de toma de muestra	Volumen de aire muestreado	PTS
#	Fecha	m^3	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
1	09/03/2017	2543,58	49
3	10/03/2017	1736,54	56
5	15/03/2017	2543,58	74
7	18/03/2017	2543,58	49
9	21/03/2017	2294,07	65
11	25/03/2017	2451,96	20
13	28/03/2017	2590,88	32
15	01/04/2017	2496,27	61
17	05/04/2017	2496,27	91
19	08/04/2017	2590,88	54
Promedio geométrico			51

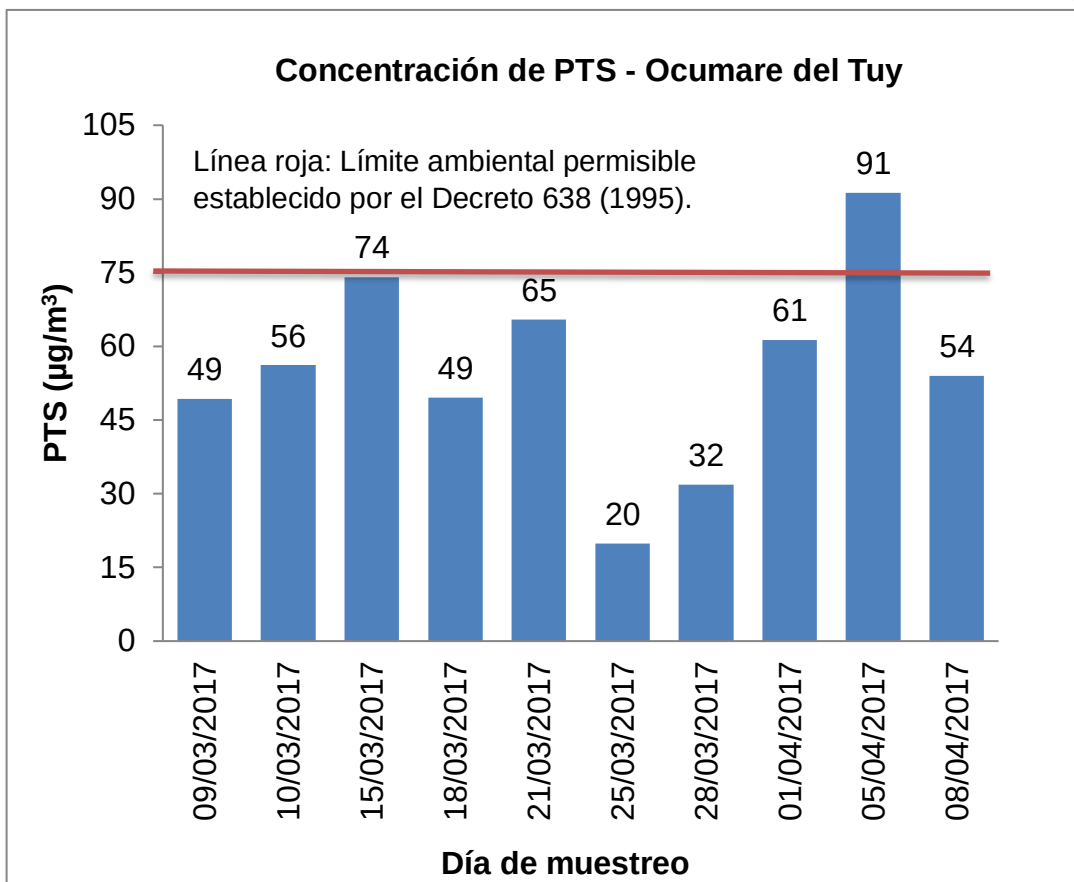


Gráfico 1: Concentraciones diarias de PTS obtenidas en el Aeropuerto Metropolitano de Caracas, Ocumare del Tuy, estado Miranda. Del 09 de marzo hasta el 08 de abril del año 2017.

Se observa que hay una variación de las concentraciones de PTS en la zona de estudio durante el lapso de muestreo, que puede ser atribuible a las condiciones meteorológicas y a las diferentes fuentes de emisión de partículas, tanto naturales y antrópicas que impactan la zona de estudio.

El promedio geométrico obtenido durante el lapso de muestreo fue de $51 \mu\text{g}/\text{m}^3$, con un valor máximo de $91 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y un valor mínimo de $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (ver gráfico 1). Al comparar los resultados obtenidos de las PTS con lo establecido en el artículo 3 del Decreto 638 (Tabla 2), encontramos que el 10% del porcentaje de excedencia están por debajo del 50 % que establece



la norma, es decir, sólo un (1) valor sobrepasa el límite inferior de $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ representada por la línea roja. Esto nos indica que no se superan los valores de los otros porcentajes de excedencia que establece el Decreto (ver tabla 2). Es importante resaltar que es imposible clasificar la zona según el artículo 5 que presenta el Decreto 638, porque no tenemos un promedio anual, ya que esta investigación fue exploratoria, es decir, no fueron considerados los periodos climatológicos característicos de la zona (sequía y lluvia) y el número de muestras no es suficiente para definir una clasificación en cuanto a calidad del aire se refiere, según nuestra norma venezolana. Sin embargo, durante el lapso de muestreo, la tendencia de la concentración promedio de PTS obtenida ($51 \mu\text{g}/\text{m}^3$) es estar por debajo de $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$, nivel de concentración que la norma establece como aire limpio.

En la Tabla 7 están contenidos los resultados de las concentraciones de PTS expresadas en $\mu\text{g}/\text{m}^3$, obtenidas en la estación de muestreo de Charallave, la fecha de toma de cada muestra, y el volumen de aire muestreado por el equipo ya corregido. Además, estos resultados están ilustrados en el gráfico 2.



Tabla 7: Concentración de PTS obtenidas en la zona industrial de Charallave, sector Pitahaya, estado Miranda. Del 10 de marzo hasta el 08 de abril del año 2017.

Muestras	Inicio de toma de muestra	Volumen de aire muestreado	PTS
#	Fecha	m ³	µg/m ³
2	10/03/2017	2004	57
4	13/03/2017	2046	60
6	16/03/2017	2046	36
8	18/03/2017	2046	50
10	21/03/2017	2004	96
12	25/03/2017	2088	81
14	28/03/2017	2046	47
16	01/04/2017	2004	106
18	05/04/2017	2046	120
20	08/04/2017	2004	138
Promedio geométrico			72 µg/m ³

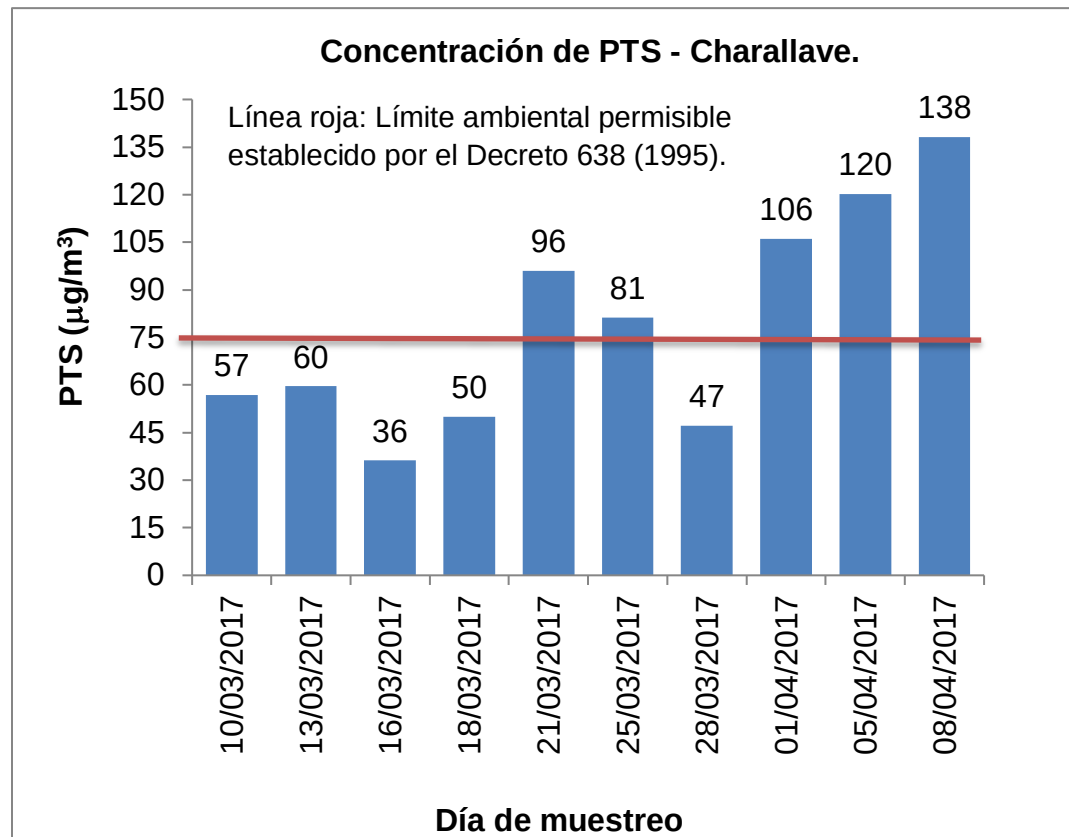


Gráfico 2: Concentraciones diarias de PTS obtenidas en la zona industrial de Charallave, sector Pitahaya, estado Miranda. Marzo – abril de 2017.

En el gráfico 2 se observa que para la zona de estudio, se obtuvieron valores de concentraciones de PTS muy variables, y la mayoría de los valores (05) sobrepasan el límite permisible ($75 \mu\text{g}/\text{m}^3$), establecido en las Normas Venezolanas (Decreto 638, 1995).

Esta tendencia reflejada, puede ser conferida en primer lugar a la cercanía de las fuentes de emisión con el punto de muestreo, además del rendimiento diario de las actividades que contribuyen a la incorporación de material particulado hacia la atmósfera y condiciones meteorológicas.

El promedio geométrico obtenido durante el lapso de muestreo fue de $72 \mu\text{g}/\text{m}^3$, con un valor mínimo de $36 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y un valor máximo de $138 \mu\text{g}/\text{m}^3$;



de acuerdo con la Norma venezolana (Decreto 638, 1995) (Tabla 1) define como concentración máxima anual de PTS, para definir áreas de aire limpio $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Cabe destacar que tal concentración es un promedio anual. Aunque este trabajo es del tipo exploratorio, es decir, no se consideran ambos periodos climatológicos, y el número de muestras no es suficiente para definir una clasificación en cuanto a calidad del aire se refiere, pero en función de lo que establece la Norma, con los datos obtenidos dentro del lapso de muestreo, hay valores (05) que se acercan y a su vez, sobrepasan el límite anual.

El gráfico 3 presentado a continuación, muestra que no existe correlación entre las concentraciones de PTS emitidas en la zona industrial de Charallave frente a las obtenidas en la estación de muestreo de Ocumare del Tuy. El coeficiente de correlación (R^2) igual a 0,0909 indica que existe una alta dispersión entre las concentraciones de PTS obtenidas en ambas zonas de muestreo, indicando que las fuentes que emiten material particulado a la atmósfera de cada zona de estudio son independientes, por lo tanto, se trata de 2 poblaciones netamente distintas, ya que el valor de R^2 es muy pequeño.

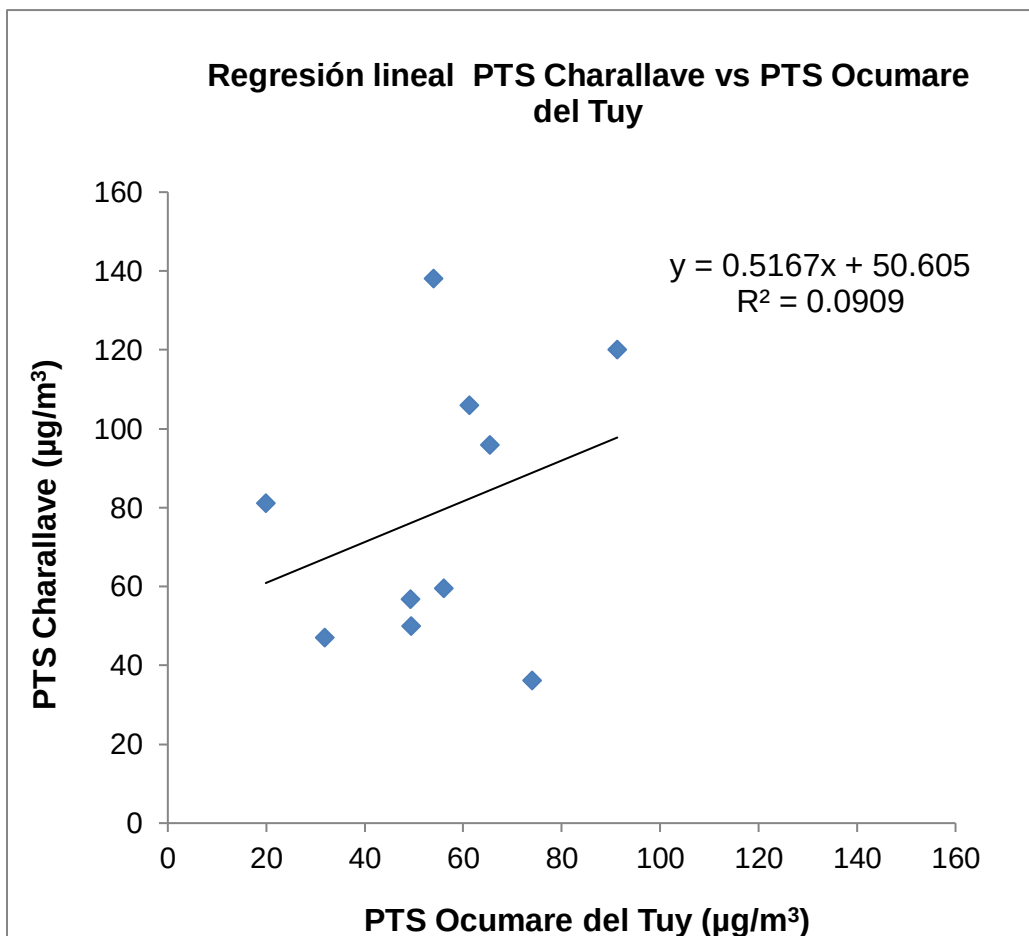


Gráfico 3: *Correlación lineal entre las concentraciones de PTS obtenidas en la zona industrial de Charallave, sector Pitahaya, frente a las concentraciones obtenidas en la estación del Aeropuerto Metropolitano de Caracas en Ocumare del Tuy. Del 09 de marzo hasta el 08 de abril del año 2017.*

El gráfico 4 mostrado a continuación, nos permite visualizar cuál zona de estudio estuvo más expuesta a mayores concentraciones de PTS en el lapso de muestreo. Este gráfico, nos permite comparar las concentraciones individuales de PTS obtenidas en las estaciones de muestreo de Charallave frente a las obtenidas en la estación de muestreo de Ocumare del Tuy. Se observa que en la atmósfera de la zona industrial de Charallave fueron obtenidas las mayores concentraciones de PTS, con exactitud cinco (05)



muestras superan el límite permisible de $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ representada por la línea de color negro, mientras que en la estación de muestreo de Ocumare del Tuy solo una (01) muestra supera este valor, siendo la atmósfera de la zona industrial de Charallave aquella que estuvo más expuesta a mayores concentraciones de PTS que en la estación de Ocumare del Tuy.

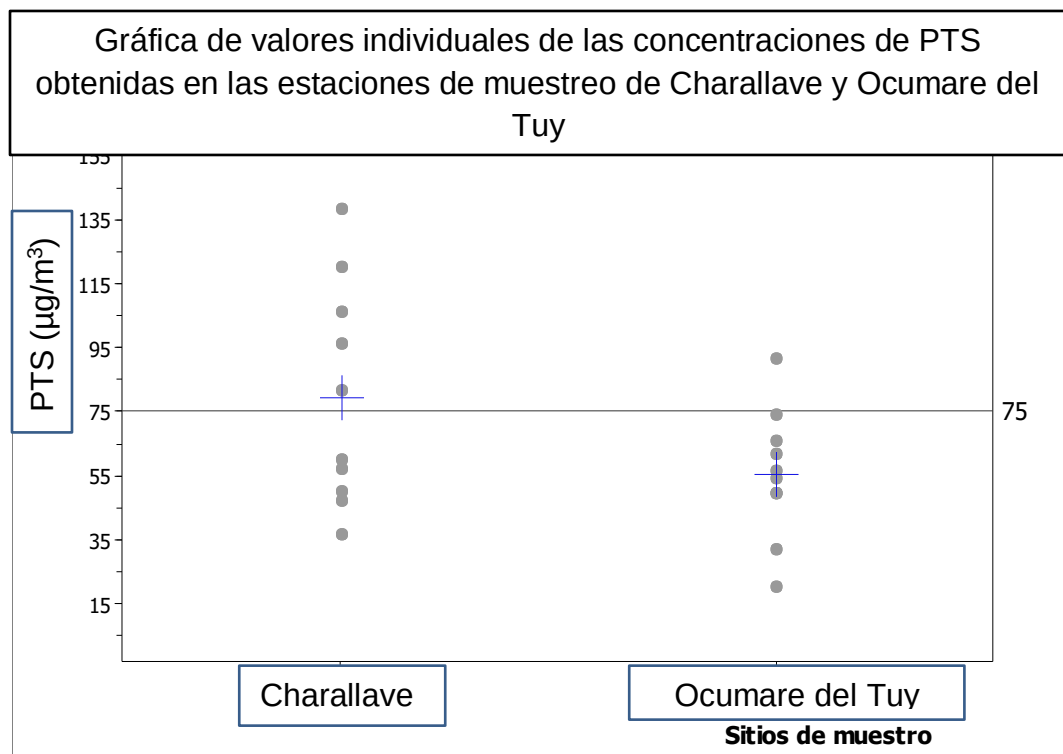


Gráfico 4: Valores individuales de la concentración de PTS en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ obtenidos en la zona industrial de Charallave y el Aeropuerto Metropolitano de Caracas. Del 09 de marzo hasta el 08 de abril del año 2017.

Esta tendencia reflejada en la estación de muestreo de Charallave puede ser atribuible a la cercanía de las actividades industriales que emiten partículas atmosféricas con el punto de muestreo, como la industria de Aliven, en la cual se observó en la etapa de campo que esta emite considerablemente material particulado a través de los ductos. Además, los habitantes de la zona aseguran que esta industria opera tanto de día como



de noche, y es en horario nocturno que se emiten mayores cantidades de material particulado, inclusive en los días lluviosos. En adición a esto, los habitantes de la zona aseveran padecer consecuencias por parte de las partículas atmosféricas.

A continuación, se discuten los resultados obtenidos de Hg asociado a PTS:

7.2. Análisis de Hg enlazado PTS en los sitios de muestreo

Las tablas 8 y 9 presentan las concentraciones de Hg asociado a las PTS ,obtenidas en la estación de muestreo de Charallave y en el Aeropuerto Metropolitano de Caracas ubicado en Ocumare del Tuy, ambos en el estado Miranda, desde el 09 de marzo hasta el 08 de abril del año 2017. Además estos resultados se ilustran en los gráficos 5 y 6.



Tabla 8: Concentración de Hg asociado a PTS, obtenido en el Aeropuerto Metropolitano de Caracas – Ocumare del Tuy. Del 09 de marzo hasta el 08 de abril del año 2017.

Muestra	Inicio de toma de muestra	Concentración de contenido en los filtros expuestos
#	Fecha	pg/m ³
1	09/03/2017	79
3	10/03/2017	70
5	15/03/2017	56
7	18/03/2017	28
9	21/03/2017	No determinado
11	25/03/2017	18
13	28/03/2017	15
15	01/04/2017	30
17	05/04/2017	38
19	08/04/2017	8
	Promedio aritmético	38

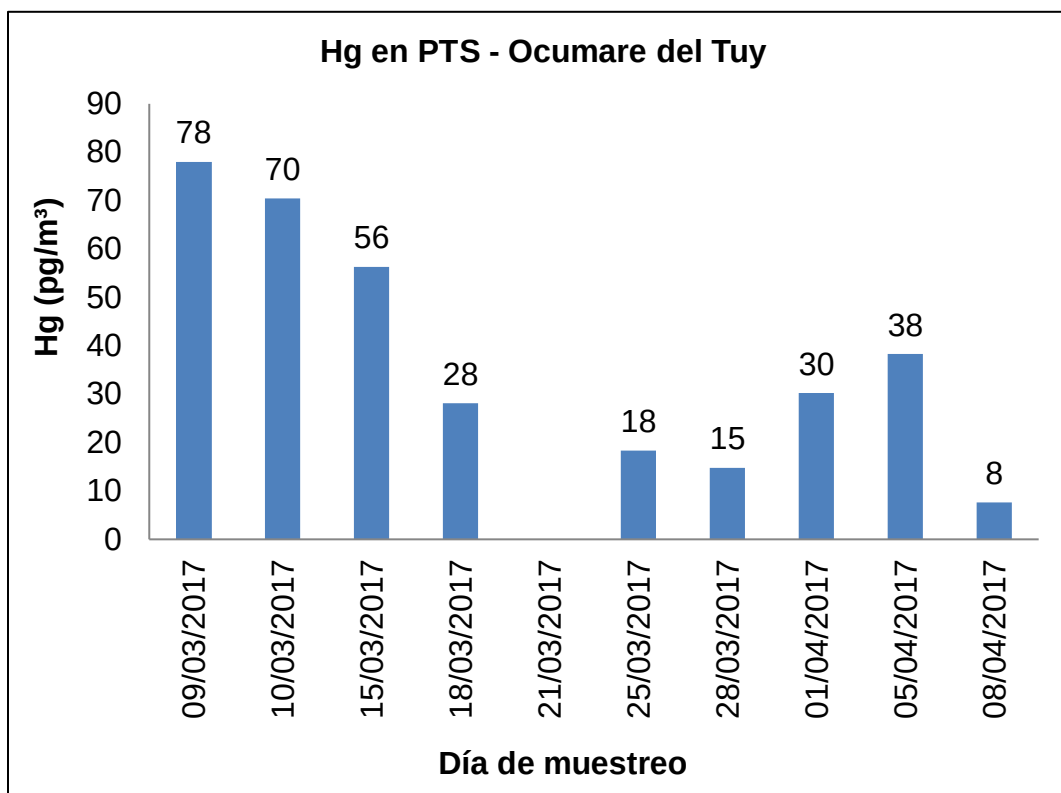


Gráfico 5: Concentración de Hg asociado a PTS en pg/m³ muestreado en el Aeropuerto Metropolitano de Caracas, Ocumare del Tuy, estado Miranda. Del 09 de marzo hasta el 08 de abril del año 2017.



Tabla 9: Concentración de Hg en PTS, muestreado en la zona industrial de Charallave, sector Pitahaya, estado Miranda. Del 10 de marzo hasta el 08 de abril del año 2017.

Muestras	Inicio de toma de muestra	Concentración de Hg contenido en los filtros expuestos
#	Fecha	pg/m ³
2	10/03/2017	16
4	13/03/2017	23
6	16/03/2017	16
8	18/03/2017	No determinado
10	21/03/2017	26
12	25/03/2017	25
14	28/03/2017	12
16	01/04/2017	18
18	05/04/2017	18
20	08/04/2017	25
	Promedio aritmético	20

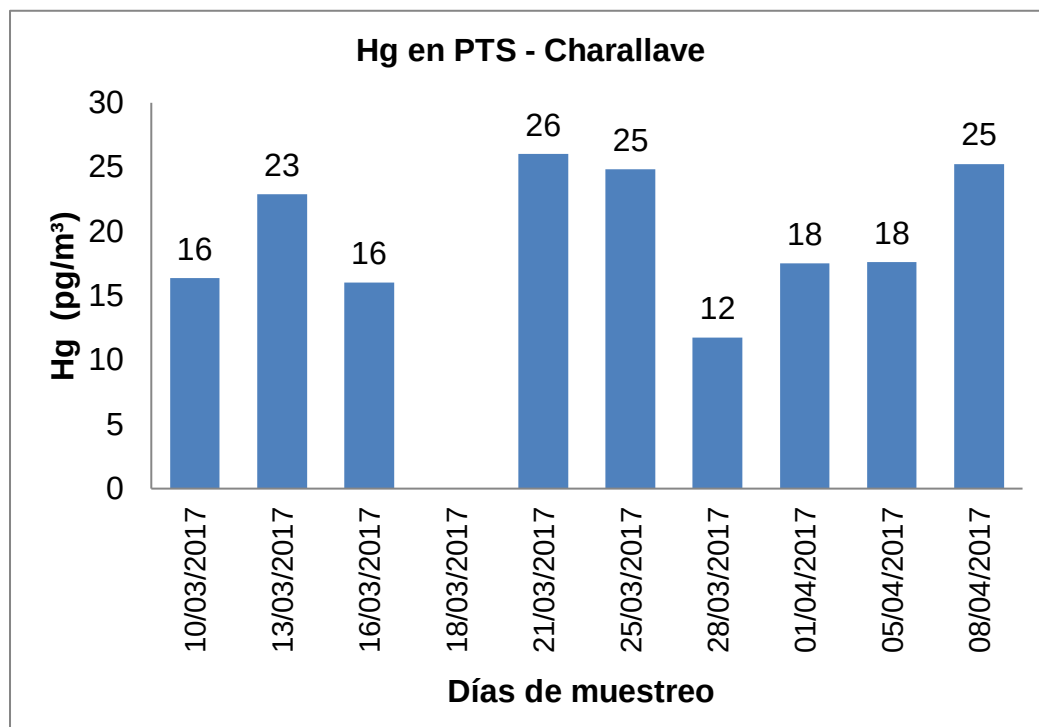


Gráfico 6: Concentración de Hg asociado a PTS, muestreado en la zona industrial de Charallave, estado Miranda. Del 10 de marzo hasta el 08 de abril del año 2017.

Los resultados indican la presencia de Hg asociado a PTS en ambas zonas de estudio, como en nuestro país no existen normativas que regulen las concentraciones admisibles de Hg enlazado a partículas atmosféricas en el aire, se compararon estos datos con el límite máximo permisible de mercurio inorgánico enlazado a partículas atmosféricas que establece la Resolución 601 de las normas colombianas denominada “Norma de Calidad del Aire o Nivel de Inmisión” de fecha 04 de abril de 2006 correspondiente a $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ o $1 \times 10^6 \text{ pg}/\text{m}^3$. Ninguna de las concentraciones obtenidas en ambas zonas de estudio durante el lapso de muestreo sobrepasa el límite permisible.



Sin embargo, las concentraciones obtenidas de Hg asociado a partícula en este trabajo de investigación son similares a las concentraciones de Hg asociadas a material particulado, determinadas en la fracción $< PM_{2.5}$ y en PTS de un estudio realizado por Keeler G., Glinsorn G., y Pirrone N., (1995) en la zona industrial de la ciudad de Detroit del estado de Michigan, durante 18 días del mes de marzo de 1994, con 18 muestras captadas (09 correspondiente a la fracción $PM_{2.5}$ y 09 muestras de PTS). El promedio aritmético de Hg asociado a la fracción $PM_{2.5}$ y a PTS reportado en este análisis fue de 94 pg/m^3 , con un mínimo de 22 pg/m^3 , y un máximo de 225 pg/m^3 , ellos concluyen que son concentraciones típicas que provienen de fuentes antrópicas. Además, como en la zona no existen fuentes naturales que expliquen la presencia de Hg en el sistema, podemos asegurar que este proviene de las actividades antropogénicas características de la zona.

Los gráficos 7 y 8 que se muestran a continuación, ilustran la tendencia que existe entre la concentración de PTS frente a la concentración de Hg asociado a estas en ambos sitios de muestreo, con el fin de comprobar si las fuentes de emisión de PTS y de Hg enlazado a estas hacia la atmósfera de los dos puntos de muestreo guardan relación entre sí.

El coeficiente de correlación (R^2) igual 0,113 obtenido en la zona de muestreo de Ocumare del Tuy (ver gráfico 7) y el correspondiente a la estación de muestreo de Charallave 0,2105 (ver gráfico 8) indican que existe una importante dispersión de los puntos sobre las rectas. Esto señala que no existe relación entre la concentración de Hg enlazado a partícula con las fuentes cercanas que emiten PTS hacia la atmósfera de las zonas de estudio.

Esta tendencia reflejada por un lado indica que probablemente pudiesen existir en cada zona de los puntos de muestreo, fuentes de Hg independientes a las fuentes que emiten PTS al sistema. Por otro lado, la alta dispersión obtenida puede ser atribuida por la lejanía de las fuentes de



emisión de partículas con el punto de muestreo, las variaciones de la dirección, velocidad y sentido de los vientos pueden incidir sobre el transporte de las PTS al momento de ser captadas por el equipo, el tiempo de residencia del TPM de una a dos semanas, por la influencia no de una sino de varias fuentes antropogénicas y naturales de PTS.

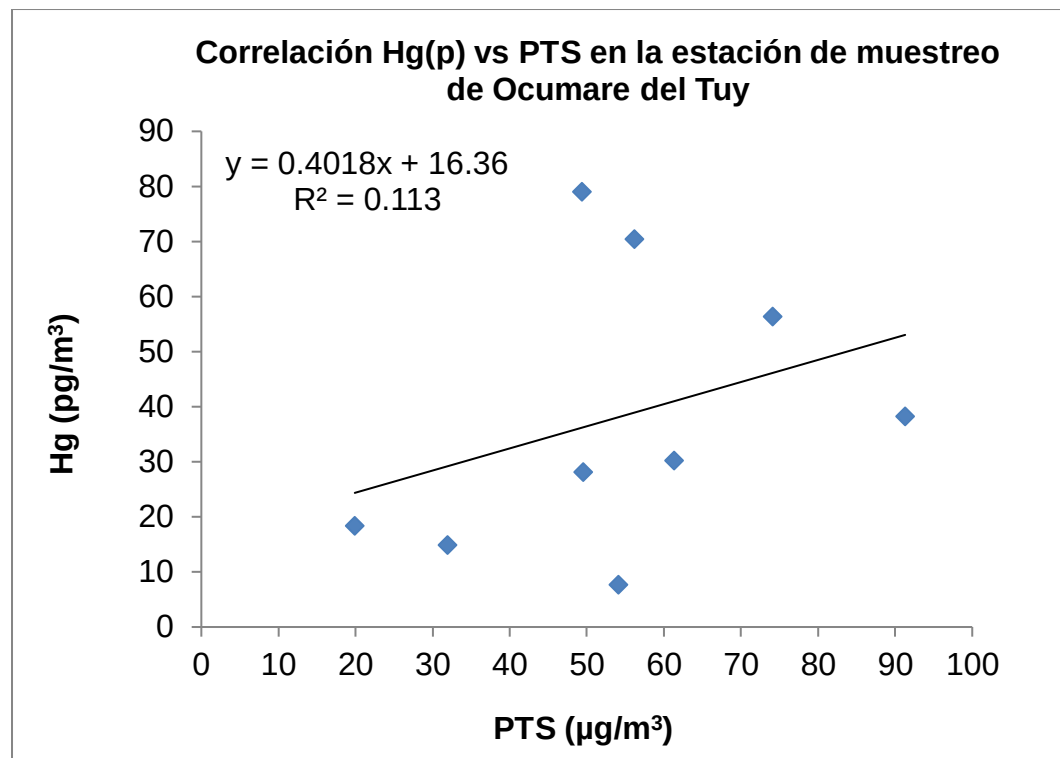


Gráfico 7: Correlación de la concentración de PTS vs concentración de Hg en el Aeropuerto Metropolitano de Caracas, Ocumare del Tuy, estado Miranda. Del 09 de marzo hasta el 08 de abril del año 2017.

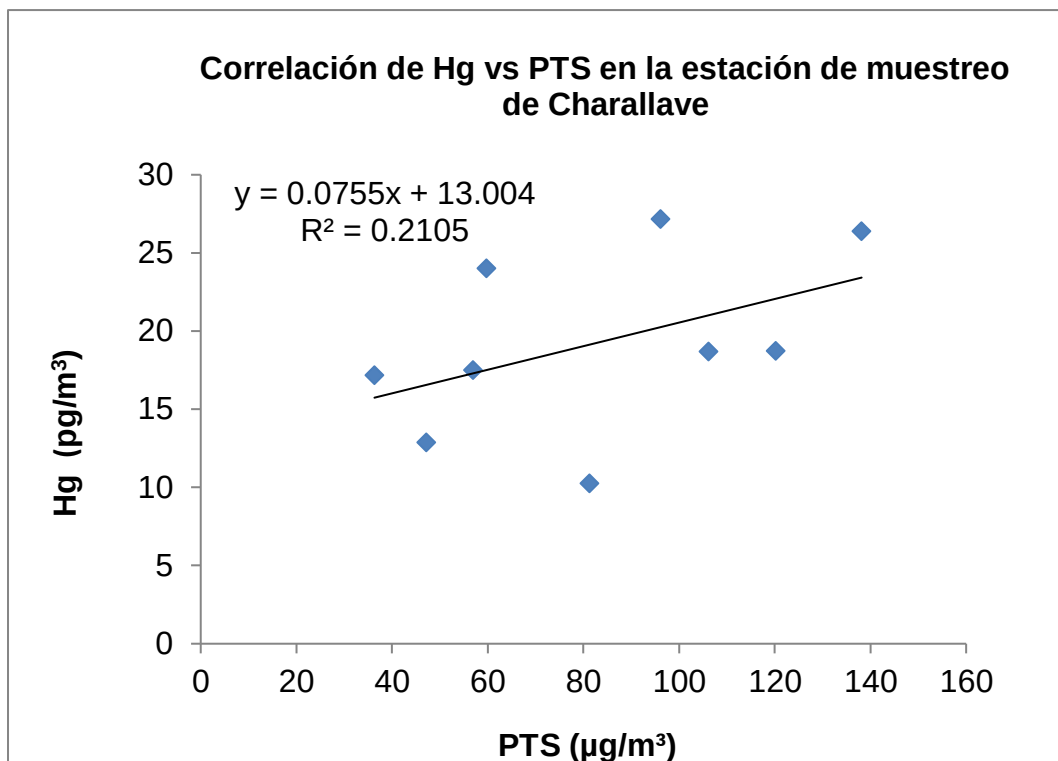


Gráfico 8: *Correlación de la concentración de PTS vs concentración de Hg en la zona industrial de Charallave, sector Pitahaya, estado Miranda. Del 10 de marzo hasta el 08 de abril del año 2017.*

El gráfico 9 mostrado a continuación, ilustra la relación de las concentraciones de Hg asociado a partícula obtenidas en la zona industrial de Charallave y en el Aeropuerto Metropolitano de Caracas en Ocumare del Tuy, esto con el fin de determinar si la concentración de Hg asociado a partícula, obtenido en ambos sitios de muestreo provienen de una misma fuente.

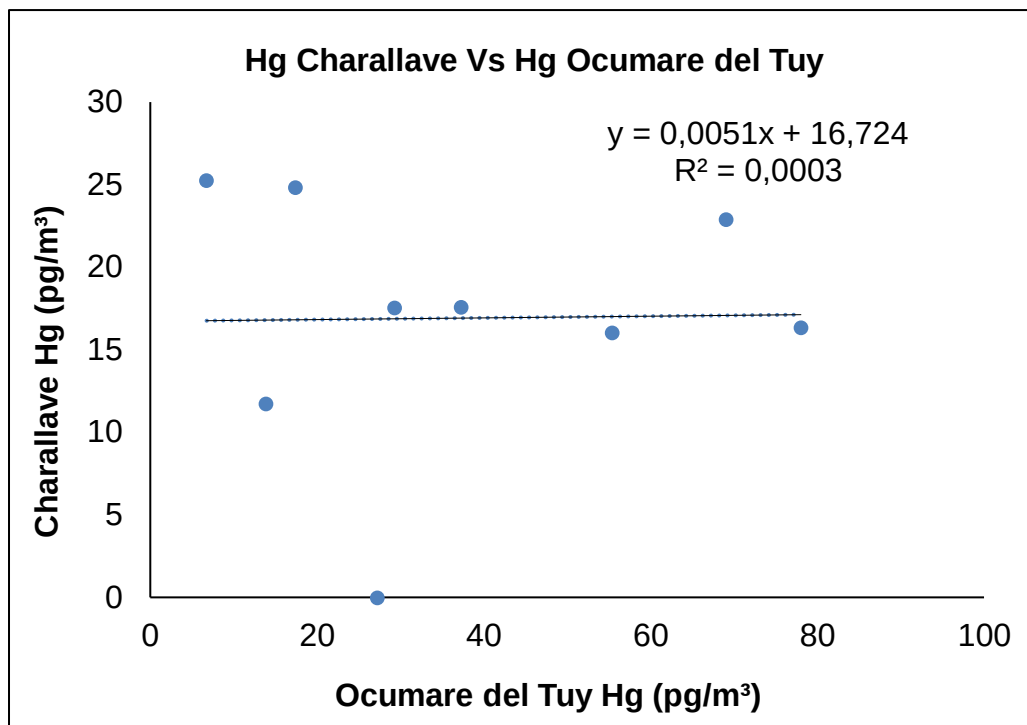


Gráfico 9: *Correlación lineal de la concentración de Hg obtenida en la zona industrial de Charallave Vs la concentración de Hg obtenido en el Aeropuerto Metropolitano de Caracas en Ocumare del Tuy. Del 09 de marzo hasta el 08 de abril del año 2017.*

La tendencia obtenida durante el lapso de muestreo, indica probablemente, que la(s) fuente(s) que emite Hg al sistema en cada sitio de muestreo sean independientes entre sí, esto es corroborado por el bajo coeficiente de correlación obtenido igual a 0,0003, por lo tanto se puede inferir que existe más de una influencia de Hg en la zona.

Ahora bien, el gráfico 10 que se muestra a continuación, ilustra las concentraciones individuales de Hg enlazado a partícula, obtenidas para los puntos de muestreo de Charallave y Ocumare del Tuy, con el fin de comparar ambas zonas y apreciar cuál de ellas estuvo expuesta a mayores concentraciones de Hg unido a partícula durante el lapso de muestreo.



Claramente se observa que la zona de muestreo en Ocumare del Tuy presentó las mayores concentraciones de Hg unido a partícula con respecto a la zona de muestreo de Charallave. Aunque el gráfico 1, ya descrito anteriormente, indique (de acuerdo con el número de mediciones y dentro del lapso de estudio) que se obtuvieron las menores concentraciones de PTS en la atmósfera de la zona de muestreo de Ocumare del Tuy, la tendencia reflejada en el gráfico 10 señala que estas PTS se encuentran enriquecidas de Hg con respecto a las obtenidas en la zona de muestreo de Charallave.

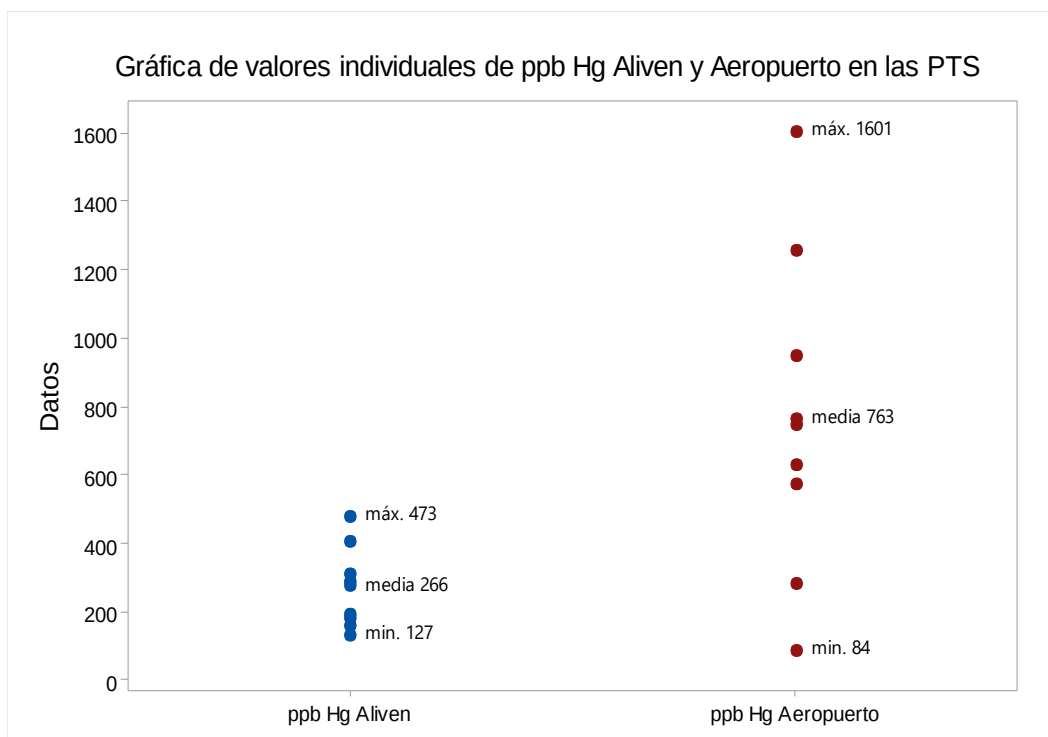


Gráfico 10: Valores individuales de la concentración de Hg unido a partícula, obtenida en la zona industrial de Charallave Vs la concentración de Hg obtenido en el Aeropuerto Metropolitano de Caracas en Ocumare del Tuy. Del 09 de marzo hasta el 08 de abril del año 2017.



Esta tendencia obtenida sugiere que probablemente existe una o varias influencia(s) de Hg hacia la atmósfera de origen antrópico adyacentes al Aeropuerto Metropolitano de Caracas en Ocumare del Tuy cuyo aporte es mayor que en la zona industrial de Charallave y de origen antrópico, ya que como se mencionó anteriormente, la litología característica del área no explica la presencia de este metal en el sistema, y a pesar de, que las concentraciones obtenidas de Hg asociado a partículas atmosféricas, durante el tiempo de muestreo no sobrepasen hoy en día el permisible de $1 \times 10^6 \text{ pg/m}^3$ que establece la Resolución 601 de las normas colombianas en ambos sitios de muestreo no significa que en algún futuro la situación sea distinta.

El análisis de los resultados de PTS y Hg asociado a estas, nos permiten concluir lo siguiente:



8. CONCLUSIONES:

A pesar de que el número de muestras captadas en la zona industrial de Charallave, sector Pitahaya y en el Aeropuerto Metropolitano de Caracas no aportan suficiente información para clasificar las zonas en cuanto a calidad de aire se refiere, de acuerdo a lo que establece el Decreto 638, las conclusiones que se presentan a continuación, están basadas en la información obtenida del análisis de las 20 muestras obtenidas durante 4 semanas de muestreo.

1. La media geométrica de los datos obtenidos a partir del análisis de 10 muestras de PTS captadas durante 4 semanas de muestreo en la estación de monitoreo del Aeropuerto Metropolitano de Caracas en Ocumare del Tuy fue de $51 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y la tendencia es estar por debajo del límite permisible de ($75 \mu\text{g}/\text{m}^3$) que establece el Decreto 638.
2. La media geométrica de los datos obtenidos a partir del análisis de 10 muestras de PTS, captadas en la estación de monitoreo de la zona industrial de Charallave, sector Pitahaya fue de $72 \mu\text{g}/\text{m}^3$. La tendencia de este valor es estar por debajo de lo que establece el Decreto 638.
3. La baja correlación lineal observada de la concentración de PTS obtenidas de las zonas de muestreo de Charallave y Ocumare del Tuy para el lapso de muestreo de 4 semanas, indican que las fuentes emisoras de PTS son diferentes.
4. De los sitios de muestreo evaluados, la zona industrial de Charallave, sector Pitahaya, se emiten mayores cantidades de PTS comparadas con las encontradas en el Aeropuerto Metropolitano de Caracas en Ocumare del Tuy.

Para Hg asociado a partícula se concluye lo siguiente:



5. Si bien, es cierto que debido al número de muestras no se puede concluir que existe una clara contaminación por Hg, pero es posible indicar que existen fuentes antrópicas emitiendo Hg a la atmósfera ya que no existen fuentes naturales de este elemento en las zonas de estudio.
6. En la zona del Aeropuerto Metropolitano de Caracas se encontraron las mayores concentraciones de Hg asociado a partículas, con las encontradas en la zona industrial de Charallave, sector Pitahaya.
7. Las fuentes que emiten Hg asociado a partículas en las atmosferas de las zonas de muestreo son independientes.
8. En el Aeropuerto Metropolitano de Caracas en Ocumare del Tuy existe un aporte de Hg asociado a partículas, mayor que en la zona industrial de Charallave, sector Pitahaya.

Con el fin de mejorar y obtener mayor información sobre la problemática que existe en las zonas de estudio realizada esta investigación, se recomienda lo siguiente:



9. RECOMENDACIONES:

1. Realizar un estudio más extenso de PTS que comprendan las variaciones climatológicas y estacionales características de la zona para establecer una clasificación en cuanto a calidad de aire se refiere.
2. Caracterizar las partículas en PM_{10} y $PM_{2.5}$ y determinar en cada tamaño el contenido de Hg(p) y de otras especies dañinas
3. Estudiar las concentraciones de otros metales, o compuestos orgánicos que afecten la salud del ser humano y el equilibrio del ambiente.
4. Realizar un muestreo en donde se consideren más de 2 estaciones de captación de muestras, alrededor de las fuentes existentes de emisión, para detectar las variaciones de concentración de PTS y descartar las posibles fuentes de Hg.



10. BIBLIOGRAFÍA.

1. Betancourt D., (2012). *Estudio de la calidad química y tipos de agua subterránea en el sector Santa Lucía de los Valles del Tuy, estado Miranda.* (Tesis de Grado) Facultad de Ciencias. Universidad Central de Venezuela. Caracas.
2. Burgos A., (2018). *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) Facultad de Ciencias. Universidad Central de Venezuela. Caracas.
3. Cardozo R., (2010). *Evaluación de los niveles mercuriales en el aire de aulas en unidades educativas de El Callao, estado Bolívar.* (Tesis de Grado) Facultad de Ciencias. Universidad Central de Venezuela. Caracas.
4. Cotton F., Wilkinson G., (2004). *Química inorgánica básica.* Recuperado de <https://books.google.co.ve/books?isbn=9681800524>
5. PDVESA INTEVEP. (2011). Código geológico de Venezuela: *Formación Tuy.* [Página web en línea]. Disponible: <http://www.pdv.com/lexico/2edic/t58e.htm> [Consulta: 2016, abril 07].
6. Decreto 638. (1995). [Documento en línea]. Disponible: <http://es.slideshare.net/slawkosysak/decreto-638-normas-sobre-calidad-del-aire-y-control-de-la-contaminacion-atmosferica> [Consulta: 2016, mayo 10].
7. Ferreira L., Durán R., Pallares M., (2011). *El mercurio como contaminante ambiental y agente neurotóxico.* Universidad de Vigo. España. 246 p.
8. Ferrís J., Ortega J., Ortí A., López J., García J., Cánovas A., Aliaga J., Alcón J., Beseler B., Andreu E., Molini N. *Polución atmosférica por*



- contaminantes químicos. [Documento en línea]. Disponible: <http://www.pehsu.org/az/pdf/atmosfera.pdf> [Consulta: 2016, mayo 10].
9. Gaona, X. (2004). *El mercurio como contaminante global. Desarrollo de metodologías para su determinación en suelos contaminados y estrategias para la reducción de su liberación al medio ambiente*. (Tesis Doctoral) Universidad Autónoma de Barcelona. España.
 10. Gobierno de Miranda. (2015). [Página web en línea]. Disponible: http://sistemas.miranda.gob.ve/estadisticas_miranda/files/2008/anuario/1.2.4.pdf [Consulta: 2016, abril 07].
 11. Gutiérrez M., Bucio L., Souza V., (1997). *Mercury*. [Documento en línea]. Disponible: <http://www.bvsde.paho.org/bvstox/fulltext/toxico/toxico-03a12.pdf> [Consulta: 2016, abril 27].
 12. Keeler G., Glinsorn G., Pirrone N., (1995). *Particulate Mercury in the Atmosphere: Its Significance, Transport, Transformation and Sources*. The University of Michigan, Air Quality Laboratory. The United States.
 13. Jiménez A., (2005). *Interacción del mercurio con los componentes de las aguas residuales*. (Tesis de Grado). Universidad Nacional de Colombia. Bogotá.
 14. López J., Monteaguta A., (1971). *Informe climatológico en el Valle del Tuy triángulo Santa Teresa – Ocumare – Charallave*. Ministerio de Obras Hidráulicas. Departamento de información básica. División de Hidrología.
 15. Nordbeg G.; Fowler B.; Nordbeg M., (2015). *Handbook on the toxicology of metals Fourth Edition*. The United States. 1542 p
 16. Norma Venezolana COVENIN 2253:2001. [Documento en línea]. Disponible: <http://www.medicinalaboraldevenezuela.com.ve/archivo/covenin/aire-ventilacion/2253->



2001 Concentraciones ambientales de sustancias quimicas.pdf

[Consulta: 2016, abril 22].

17. Norma Venezolana COVENIN 2060:1996. [Documento en línea]. Disponible: http://www.medicinalaboraldevenezuela.com.ve/archivo/covenin/aire-ventilacion/2060-1996_Determinacion_de_las_particulas_totales_en_la_atmosfera.pdf
[Consulta: 2016, abril 22].
18. Pirrone N., Manson R., (2009). *Mercury Fate and Transport in the Global Atmosphere*. Springer Dordrecht Heidelberg. London, New York. 636.
19. 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 Luís Potosí. México. 173 p.
20. Quijano A., et al. (2010). *Caracterización fisicoquímica del material particulado fracción respirable PM_{2.5} en Pamplona - Norte de Santander - Colombia*. Revista de la Facultad de Ciencias Básicas, vol. 8. Universidad de Pamplona, Colombia. 1-20 p
21. Restrepo J., (2012). *Emisiones atmosféricas de mercurio provenientes de la quema de biomasa en la región de rio Branco, estado de Acre – Brasil*. (Tesis de Grado) Universidad del Valle. Colombia. 93 p.
22. Sánchez S., (2016). *“Estudio de la concentración de mercurio en muestras de suelos y material particulado sedimentado, producto de la actividad industrial en la zona Charallave-Ocumare, estado Miranda*. (Tesis de Grado) Universidad Central de Venezuela. Caracas.
23. Santos F., García A., Alonso P., Contreras F., Adams M., (2010). *Distribution and mobility of mercury in soils of a gold mining region, Cuyuni river basin, Venezuela*. Journal of Environmental Management 92, 1268-1276 p.



24. Schuman U., (2012). *Atmospheric physics: Background – methods – trends*. Springer. Germany. 865 p.
25. Seinfeld J., Pandis S., (2006). *Atmospheric chemistry and physics: From air pollution to climate change (Second edition)*. The United States. 1232 p.
26. Tangri N., (2005). *Incineración de residuos: una tecnología muriendo*. GAIA. Buenos Aires, Argentina. 133p.
27. Trezza M., Scian A., (2001). *Estudio comparativo de clinkers producidos con diferentes reemplazos de combustibles residuales*. Facultad de Ingeniería – UNCPBA. Argentina.
28. United States Environmental Protection Agency. [Documento en línea]. Disponible:
<http://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/2000EIY1.PDF?Dockey=2000EIY1.PDF>
E [Consulta: 2016, mayo 03].
29. United States Environmental Protection Agency. (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
30. Xu J., Bravo A., Lagerkvist A., Bertilsson S., Sjöblom R., Kumpiene J. (2014). *Sources and remediation techniques for mercury contaminated soil*. Environment International 74, 42-53 p.
31. Zambrano C., (2005). *Estudio geoquímico de las partículas suspendidas en la atmósfera de Pto. Ordaz*. (Tesis Doctoral), Universidad Central de Venezuela. Caracas.
32. Zambrano S., (1970). *Estudio fisiográfico regional de la cuenca del Río Tuy*. Boletín de Geología, 3, 21,206 p.



11. APÉNDICE

Apéndice 1: Condiciones del sitio de muestreo (Aeropuerto Metropolitano de Caracas, Ocumare del Tuy).

Presión barométrica (in Hg): 29,25	Presión corregida (mm Hg): 743,0
Temperatura (Deg C): 33,5	Temperatura (Deg K): 306,7
Presión promedio (in Hg): N/D*	Presión promedio corregida (mm Hg):743,0
Temperatura promedio (Deg C): N/D*	Temperatura promedio: (Deg K): 273,2
*N/D: No determinado	

Apéndice 2: Datos del calibrador ubicado en el Aeropuerto Metropolitano de Caracas en Ocumare del Tuy, estado Miranda.

Marca: Andersen	Q_{std} pendiente: 1,53370
Modelo: G28A	Q_{std} Intercepto: -0,05769
Serial#: 1115	Fecha de calibración 16-feb-99



Apéndice 3: Q_{cf} y flujos corregidos correspondientes al muestreador de alto volumen situado en el Aeropuerto Metropolitano de Caracas, Ocumare del Tuy, estado Miranda. Marzo 2017.

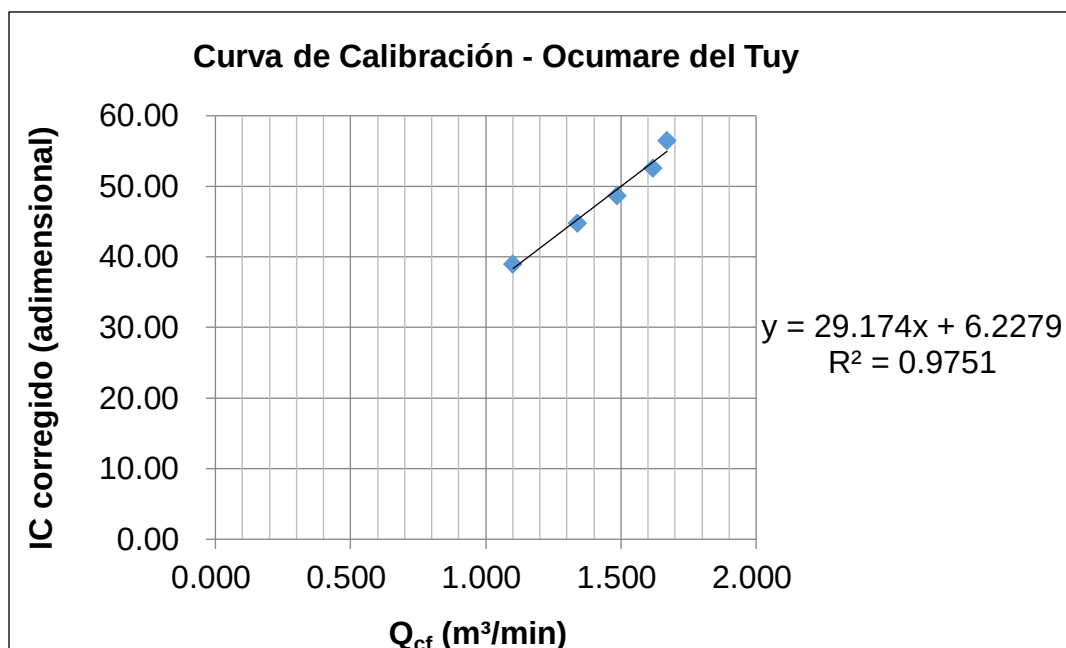
Mediciones	H ₂ O	Q_{cf}^*	I*	IC*
#	(in)	(m ³ /min)	(carta circular)	(carta circular)
1	2,8	1,101	40	38,99
2	4,2	1,34	46	44,84
3	5,2	1,487	50	48,73
4	6,2	1,62	54	52,63
5	6,6	1,67	58	56,53

* Q_{cf} = rata de flujo estándar.

*I = respuesta de la carta durante la medición.

*IC = respuesta de la carta corregida.

*In = pulgadas de agua.



Apéndice 4: Curva de calibración del muestreador de alto volumen de PTS ubicado en el Aeropuerto Metropolitano de Caracas en Ocumare del Tuy.



Apéndice 5: Condiciones del sitio de muestreo (zona industrial de Charallave, sector Pitahaya).

Presión barométrica (in Hg): 28,79	Presión corregida (mm Hg): 731,3
Temperatura (Deg C): 32,2	Temperatura (Deg K): 305,4
Presión promedio (in Hg): N/D*	Presión promedio corregida (mm Hg): N/D*
Temperatura promedio (Deg C): N/D*	Temperatura promedio: (Deg K): 273,2
N/D: No determinado	

Apéndice 6: Datos del calibrador ubicado en la zona industrial de Charallave, sector Pitahaya.

Marca: Andersen	Q_{est} pendiente: 1,53370
Modelo: G28A	Q_{est} Intercepto: -0,05769
Serial#: 1115	Fecha de calibración 16-feb-99

Apéndice 7: Q_{cf} y flujos corregidos del muestreador de alto volumen situado en la zona industrial de Charallave, sector Pitahaya, estado Miranda.

Mediciones	H ₂ O	Q_{cf}	I	IC
#	(in)	(m ³ /min)	(carta circular)	(carta circular)
1	7,6	1,779	54	52,33
2	6,6	1,661	52	50,39
3	5,2	1,478	46	44,58
4	5	1,450	44	42,64

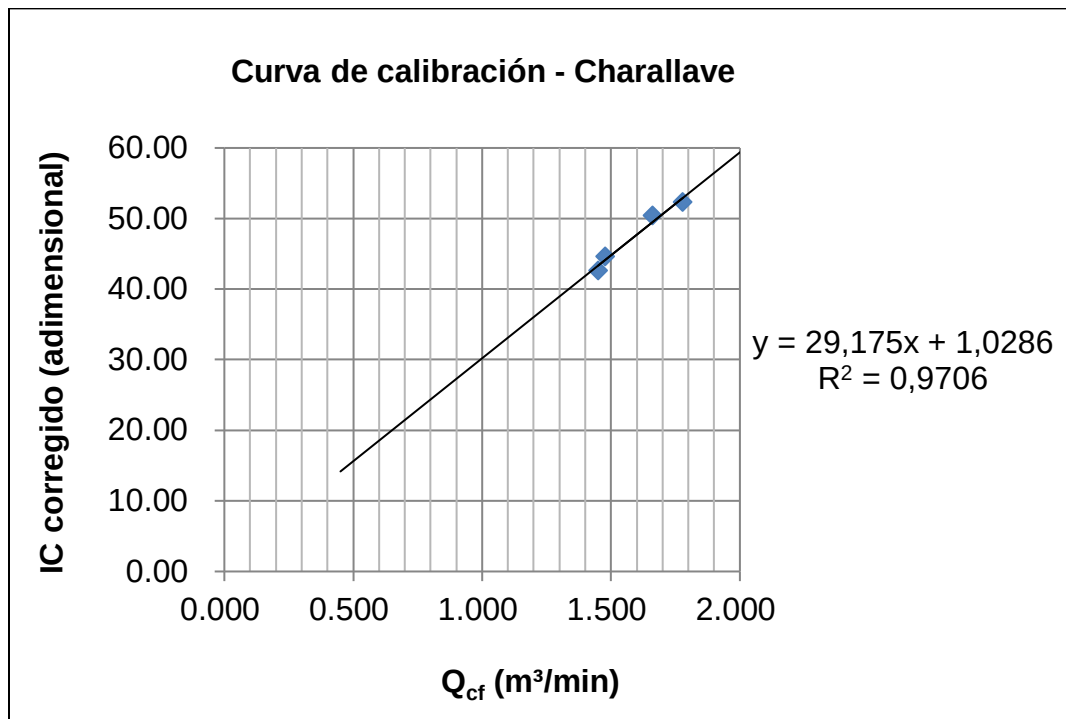
* Q_{cf} = rata de flujo estándar.

*I= respuesta de la carta durante la medición.

*IC= respuesta de la carta corregida.



*In = pulgadas de agua.



Apéndice 8: Curva de calibración del muestreador de PTS situado en la zona industrial de Charallave, sector, Pitahaya estado Miranda

Los apéndices 4 y 8, ilustran las mediciones obtenidas de la calibración de los equipos para la captación de las PTS en los sitios de muestreo. Ambas curvas de calibración, presentan una tendencia lineal, prueba de ello son los valores de coeficiente de correlación (R^2) 0,9751 correspondiente a Ocumare del Tuy y 0,9706 para Charallave, ambos valores son bastante cercano a 1, Además de esto, el certificado de calibración del equipo establece como criterio un R^2 por encima de 0,97 para considerar que un muestreador de PTS esté en óptimas condiciones.



Apéndice 9: Peso de los filtros antes y después del muestreo. (Aeropuerto Metropolitano de Caracas en Ocumare del Tuy, estado Miranda.

N° de medición	Peso de filtro (g) $\pm$ 0,0001 g		Peso de las partículas contenidas en los filtros $\pm$ 0,000141
	Inicial	Final	μg
#			
1	2,8296	2,9550	125.400,0
3	2,8377	2,9352	97.500,0
5	2,8481	3,0366	188.500,0
7	2,8248	2,9507	125.900,0
9	2,8311	2,9812	150.100,0
11	2,8262	2,8750	48.800,0
13	2,8194	2,9020	82.600,0
15	2,8279	2,9809	153.000,0
17	2,8483	3,0762	227.900,0
19	2,8115	2,9515	140.000,0



Apéndice 10: Peso de los filtros sin el analito/con el analito correspondientes a la zona industrial de Charallave, Sector Pitahaya, estado Miranda).

Muestras	Peso de filtro (g) $\pm 0,0001g$		Peso de partículas contenido en los filtros $\pm$ 0,000141
	Inicial	Final	μg
#			
2	2,8366	2,9507	114.100,0
4	2,8795	3,0015	122.000,0
6	2,8251	2,8994	74.300,0
8	2,8231	2,9255	102.400,0
10	2,8283	3,0208	192.500,0
12	2,8166	2,9861	169.500,0
14	2,8169	2,9134	96.500,0
16	2,8254	3,0380	212.600,0
18	2,8293	3,0752	245.900,0
20	2,7261	3,0030	276.900,0

Apéndice 11: Flujos registrados por el equipo durante el muestreo, y a su vez corregidos (Aeropuerto Metropolitano de Caracas en Ocumare del Tuy, estado Miranda).

Flujo (pie^3/min)		
Inicial	Final	Q carta
60	60	60
60	60	59
60	60	60
60	60	60
59	60	62
58	60	63
59	60	61
60	60	59
60	60	59
60	60	61



Apéndice 12: Flujos registrados durante el muestreo por el equipo y corregidos (Zona industrial de Charallave, sector Pitahaya, estado Miranda).

Flujo (pie ³ /min)		
Inicial	Final	Q _{carta}
No determinado por el equipo		40
No determinado por el equipo		41
No determinado por el equipo		41
No determinado por el equipo		41
No determinado por el equipo		40
No determinado por el equipo		42
No determinado por el equipo		41
No determinado por el equipo		40
No determinado por el equipo		41
No determinado por el equipo		40

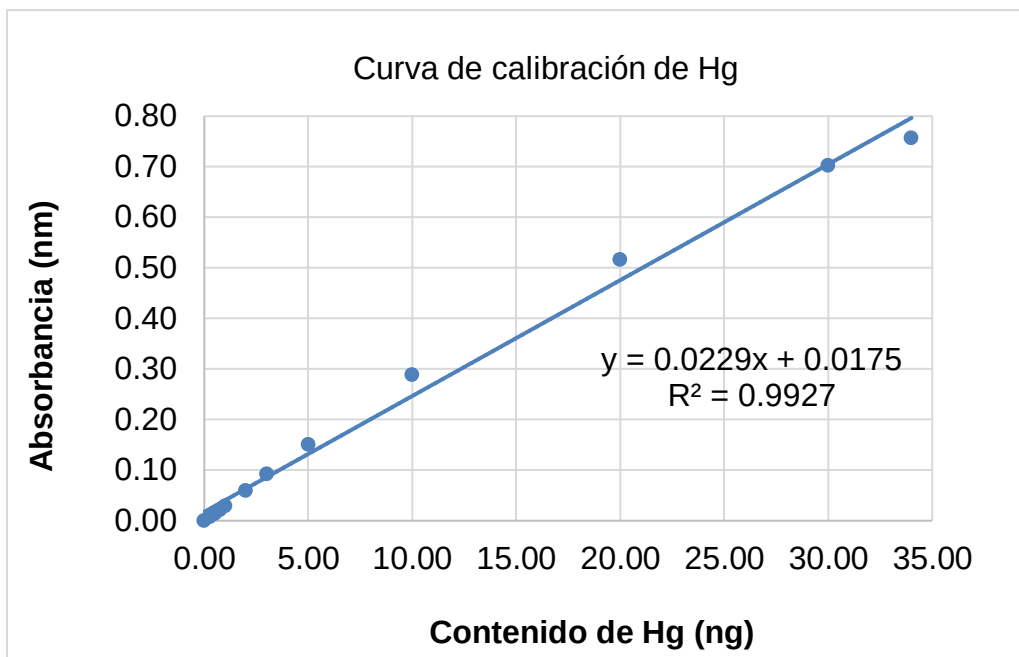
Apéndice 13: Tiempo en el que operó el equipo durante el lapso de muestreo, Q_{est} y V_{est} (Aeropuerto Metropolitano de Caracas, en Ocumare del Tuy).

Tiempo de muestreo		Q _{est}	V _{est}
Horas	min	m ³ /min	m ³
23,00	1380	1843	2543,58
16,00	960	1809	1736,54
23,00	1380	1843	2543,58
23,00	1380	1843	2543,58
20,00	1200	1912	2294,07
21,00	1260	1946	2451,96
23,00	1380	1877	2590,88
23,00	1380	1809	2496,27
23,00	1380	1809	2496,27
23,00	1380	1877	2590,88



Apéndice 14: Volumen de aire muestreado y corregido (zona industrial de Charallave, sector Pitahaya, estado Miranda).

Tiempo de muestreo		Q_{est}	V_{est}
Horas	min	m^3/min	m^3
24,00	1440	1,392	2004
24,00	1440	1,421	2046
24,00	1440	1,421	2046
24,00	1440	1,421	2046
24,00	1440	1,392	2004
24,00	1440	1,450	2088
24,00	1440	1,421	2046
24,00	1440	1,392	2004
24,00	1440	1,421	2046



Apéndice 15: Curva de calibración de Hg.

Apéndice 16: Contenido de Hg en picogramos (pg) asociado a partículas atmosféricas en la tira sin exponer,

#	pg
Blanco 1	280
Blanco 2	244
Promedio	262



Apéndice 17: Contenido de Hg en picogramos (pg) para cada tira analizada del filtro expuesto. Para la muestra 12 su promedio (zona industrial de Charallave, sector Pitahaya, estado Miranda).

# Muestras	pg
2	3903,0
4	5465,0
6	3906,0
8	No determinado
10	6053,0
12	6024,2
14	2933,0
16	4165,0
18	4263,0
20	5883,0

Apéndice 18: Contenido de Hg en picogramos (pg) para cada tira analizada del filtro expuesto. Para la muestra 5 su promedio (Aeropuerto Metropolitano de Caracas en Ocumare del Tuy, estado Miranda).

# Muestras	pg
1	22310,0
3	13590,0
5	15923,0
7	7946,0
9	No determinado
11	5001,0
13	4256,0
15	8379,0
17	10610,0
19	2206,0



Apéndice 19: Cálculo del factor del área del filtro y concentración del analito (Hg) en las partículas, de acuerdo a lo que establece el método IO – 3.1 de la EPA.

A = área total del filtro 516,128 cm².

B = área del filtro expuesta en el muestreo = 406,451 cm².

C = área de una tira del filtro, utilizada para análisis químico = 51,613 cm².

D = área sobre el cual es calculado el contenido del analito en el filtro sin exponer (blanco) y la concentración del analito en las partículas (muestras) = 464,515 cm².

* Cálculo del factor (F) del área del filtro, adimensional:

$$F = \frac{D}{C}$$

F = factor del área del filtro.

D = área del filtro utilizable (cm).

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

$$F = \frac{464,515 \text{ cm}}{51,613 \text{ cm}} \approx 9$$

* Cálculo del analito (Hg) en el área utilizable en cada filtro.

$$\text{Hg (i)} = Cb \times F$$

Hg (i) = contenido del analito en cada tira de filtro sin exponer, expresado en µg.

Cb = contenido del analito de la tira del filtro sin exponer, en µg.

$$\text{Hg (i)} = 0,000262 \text{ µg} \times 9 \approx 0,00236 \text{ µg}$$



*Cálculo del contenido del analito promedio en los filtros sin exponer (μg):

$$\overline{Hg} = \frac{\sum Hg(i)}{n}$$

Al sustituir los valores, se obtiene que:

$$\overline{Hg} = \frac{0,00236}{1} = 0,00236 \mu\text{g}$$

*Cálculo de la concentración del analito para cada muestra o filtro expuesto:

$$C_{HgM} = ((C_{Hg} \times F) - \overline{Hg})/Va$$

C_{HgM} = concentración de Hg en cada muestra, expresado en $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

C_{Hg} = contenido de Hg en las tiras del filtro expuesto, en μg .

$\overline{Hg}$ = contenido de Hg en los filtros sin exponer.

Va = volumen de aire corregido en condiciones normales, en m^3 .

Al sustituir los valores, se obtiene que:

$$C_{HgM} = ((*C_{Hg} \times 9) - 0,00236)/Va^* = [\text{Hg}] \text{ contenido en las PTS}^*$$

* C_{Hg} : ver apéndices 17 y 18.

* Va : ver apéndice 20 y 21.

* $[\text{Hg}]$ contenido en las PTS = ver apéndices 20 y 21.



Apéndice 20: Resultados de la determinación de la concentración de Hg asociado a partícula obtenido en la zona industrial de Charallave, sector Pitahaya, estado Miranda.

F	Muestras	Hg (i)	Va	[Hg] contenido en las PTS
9,000	#	pg	m ³	pg/m ³
	2	2358,0	2004,3	16
	4	2358,0	2046,0	23
	6	2358,0	2046,0	16
	8	2358,0	2046,0	No determinado
	10	2358,0	2004,0	26
	12	2358,0	2088,3	25
	14	2358,0	2046,8	12
	16	2358,0	2004,3	18
	18	2358,0	2046,0	18
	20	2358,0	2004,3	25
	Promedio	2358,0	2034	20



Apéndice 21: Resultados de la determinación de la concentración de Hg asociado a partícula obtenido en el Aeropuerto Metropolitano de Caracas, en Ocumare del Tuy, estado Miranda.

F	Muestras	Hg (i)	Va	[Hg] contenido en las PTS
9,000	#	pg	m ³	pg/m ³
	1	2358,0	2543,6	78
	3	2358,0	1736,5	70
	5	2358,0	2543,6	56
	7	2358,0	2543,6	28
	9	2358,0	2294,1	No determinado
	11	2358,0	2451,9	18
	13	2358,0	2590,9	15
	15	2358,0	2496,3	30
	17	2358,0	2496,3	38
	19	2358,0	2590,9	8
	Promedio	2358,0	2428,8	38

Apéndice 22: Determinación por quintuplicado de las muestras 5 y 12

	Aeropuerto	Aliven
Repeticiones	Muestra 5	Muestra 12
#	ng	ng
1	15,498	6,448
2	17,642	4,337
3	15,834	6,11
4	15,36	4,532
5	15,281	8,694



Apéndice 23: Validación del método analítico

Con el objetivo de evaluar cuan reproducible fue el método empleado, se determinó la concentración de Hg por quintuplicado, en las muestras 5 y 12, como se presenta a continuación. Así mismo, se comprueba que la técnica empleada es reproducible.

Sitios de muestreo	Promedio	Desviación estándar	Varianza
Ocumare del Tuy	15,92	0,98	0,968
Charallave	6,02	1,76	3,10