



**IDENTIFICACIÓN Y CUANTIFICACIÓN DE LOS
CONTAMINANTES CANCERÍGENOS -HIDROCARBUROS
AROMÁTICOS POLICÍCLICOS (HAP)- ASOCIADOS A
MATERIAL PARTICULADO (PM_{2.5}) EN BARRANQUILLA Y
SU EVALUACIÓN EN LA ACTIVIDAD HEMOLÍTICA**

CARLOS ANDRÉS GUERRA MANJARRÉS

Universidad del Norte

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental

Barranquilla – Atlántico

2023

**IDENTIFICACIÓN Y CUANTIFICACIÓN DE LOS
CONTAMINANTES CANCERÍGENOS -HIDROCARBUROS
AROMÁTICOS POLICÍCLICOS (HAP)- ASOCIADOS A
MATERIAL PARTICULADO (PM_{2.5}) EN BARRANQUILLA Y
SU EVALUACIÓN EN LA ACTIVIDAD HEMOLÍTICA**

CARLOS ANDRÉS GUERRA MANJARRÉS

Tesis o trabajo de investigación presentado como requisito para optar por el título de
Magister en Ingeniería Civil con énfasis en Ingeniería Ambiental

Directora:

Ing. Dayana Agudelo Castañeda, M.Sc., Ph.D.

Co-Director:

Químico Amner Muñoz Acevedo, M.Sc., Ph.D.

Universidad del Norte

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental

Barranquilla – Atlántico

2023

TABLA DE CONTENIDO

TABLA DE CONTENIDO	3
1. INTRODUCCIÓN	8
2. JUSTIFICACIÓN.....	10
3. OBJETIVOS	12
Objetivo General	12
Objetivos Específicos.....	12
4. ESTADO DEL ARTE	13
5. MARCO CONCEPTUAL	18
6. METODOLOGIA.....	20
Diseño de Experimentos	20
Área de Estudio	23
Muestreador de material particulado.....	27
Pre-muestreo	27
Muestreo.....	27
Etapa laboratorio	29
Extracción Soxhlet.....	29
Extracción Ultrasonido	30
Identificación Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos	31
Análisis por GC-MS	¡Error! Marcador no definido.
Actividad Hemolítica	32
7. RESULTADOS Y ANALISIS	34
Barrido Longitudes Onda Antraceno y Naftaleno	¡Error! Marcador no definido.
Evaluación Actividad Hemolitica en heritrocitos humanos	¡Error! Marcador no definido.
8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	57
9. REFERENCIAS.....	59
10. ANEXOS	69
Muestreo.....	69
Procesamiento Datos Concentración PM _{2.5}	70

Dedicatoria

“Encomienda tus obras al Señor, Y tus propósitos se afianzarán. Proverbios 16:3”.

Primeramente, a Dios por darme la vida y la salud necesaria para poder realizar este proyecto; y acompañarme en los momentos de soledad y debilidad en los que he perdido la fuerza y a punto de dejar de luchar por los obstáculos que coloca la vida; sin embargo, él me ha dado la determinación de ir siempre hacia delante.

A mis padres Carlos Vicente Guerra Cantillo y Mónica Rocío Manjarrés Paternostro son los pilares de mi vida que me han guiado por el camino del bien, con respeto, amor, responsabilidad, cariño, y empeño formándome día a día para ser cada vez una mejor persona en todos los aspectos de la vida.

A mi hermana Daniela Lucía Guerra Manjarrés porque me ha enseñado a ser más tolerante, a exigirme más como persona y la auto superación, y al apoyo familiar en la buenas y malas circunstancias de la vida.

A mis familiares, en especial mi abuelita Virginia María Paternostro Gutiérrez que me ha enseñado a sacar más de una familia adelante con perseverancia, temple y determinación; como también a mi tío Vicente José Paternostro Gutiérrez quien me ha demostrado que la vida si da segundas oportunidades y las da para tener una mejor calidad de vida.

Agradecimientos

A Dios por permitirme gozar de una buena salud física mental y social en la que me ha permitido hasta el día de hoy desempeñarme de manera exitosa en todos los proyectos que se me han dado la oportunidad de realizar; sin el este trabajo no hubiese podido materializarse.

A mis padres por aconsejarme, guiarme y enderezar mi camino en el transcurso de mi corta vida, por ser ellos un gran ejemplo de vida, dedicación, empeño y arduo trabajo también es de ellos este proyecto.

A mis familiares que me han apoyado en todo momento y circunstancias de la vida que siendo para ellos un orgullo la culminación de mi carrera de maestría para mí un motivo más para no darme por vencido y seguir adelante.

A la profesora Ing. Dayana Agudelo y al Prof. Amner Muñoz por su paciencia, tolerancia, empeño, consejos para este proyecto de grado e impulsarme a formar parte de su grupo de trabajo; igualmente, en la ejecución del proyecto se reflejó la disposición y acompañamiento en todo momento por parte de ellos.

A Yulissa Quimbayo quien en este proceso educativo me acompaña desde el inicio del proyecto con su apoyo moral en los momentos difíciles y complicados de la maestría; me

ha dado el aliento de seguir adelante en todos los ámbitos de la vida adicionalmente a mejorar como ser humano.

A Martha Mendoza, Sebastián Rúgeles, Cindy Guzmán, Nubellys Peralta, Osnaider Castillo por su grata compañía, esfuerzo, dedicación, y apoyo en la ejecución y finalización de este proyecto, por todas las experiencias vividas, por sus consejos y apoyo a lo largo no sólo del proyecto sino también de toda la maestría.

Al profesor ing. Aymer Maturana que apoyó el proyecto y me impulsó como estudiante a seguir adelante, además en colaborar en la correcta ejecución del proyecto.

Al ing. Ricardo Mejía por ayudarme en diferentes campos de la maestría no solamente en la parte del proyecto, sino a nivel social, académico y personal.

A la ing. Ángela por tolerarme, ayudarme, tenerme paciencia, por todas las interrupciones que hacía en el laboratorio, por guiarnos en todos los procedimientos.

A Cindy Guzmán, Nubellys Peralta, Osnaider Castillo que me apoyaron en el laboratorio para terminar de realizar los ensayos y procedimientos para culminación del trabajo y que adicionalmente, fueron un gran apoyo para mí a nivel personal en circunstancias adversas.

A MINCIENCIAS por haberme apoyado de manera económica y logística para poder emprender este camino y culminar la maestría; además del seguimiento a cada una de las

fases presentadas en el proceso debido a la situación de salud pública a nivel mundial (Pandemia Covid).

A todas las personas que colocaron un granito de arena para poder avanzar y mejorar como ser humano y como profesional, que en algún momento de mi vida me brindaron apoyo y una voz de aliento en los instantes donde más lo necesitaba.

1. INTRODUCCIÓN

Las partículas atmosféricas finas $<2.5 \mu\text{m}$ ($\text{PM}_{2.5}$) son el mayor riesgo ambiental de salud pública a nivel mundial, relacionadas con enfermedades respiratorias (al depositarse en las vías), cardiovasculares y cáncer y causantes de 4-9 millones de muertes cada año (Agudelo-Castañeda & Teixeira, 2014; Murray et al., 2020; Pérez-Cardenas, 2017). El 99% de la población mundial (especialmente en los países de ingresos bajos/medios, incluido Colombia) vive en lugares donde los niveles de estas partículas superan los límites establecidos por la Organización Mundial de la Salud -OMS- (World Health Organization, 2022) y por lo cual, es necesario reducir las concentraciones de estas partículas (Hystad et al., 2020). Las partículas $\text{PM}_{2.5}$ además podrían transportar contaminantes orgánicos persistentes tales como los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs), los cuales también contribuirían a las enfermedades asociadas a exposición a material particulado.

Por otro parte, los HAPs tienen como origen principal la combustión incompleta o pirólisis de material orgánico, e.g., quema de carbón, madera, petróleo y gas (vehículos o industria/hogar). Estos tipos de hidrocarburos encontrados en PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$ fueron responsables de efectos mutagénicos directos/indirectos sobre individuos de una zona en la ciudad de México, según Amador-Muñoz et al. (2010). Por lo general, las concentraciones más altas de HAPs se encuentran en el $\text{PM}_{2.5}$ (fracción respirable), el cual una vez es inhalado sobrepasa la región alveolo-pulmonar donde tiene lugar el intercambio sanguíneo, y es considerada la fracción respirable de mayor riesgo. Debido a esto, surge una gran preocupación por la relación que existiría entre la exposición a los HAPs en el ambiente y el potencial de contribuir a la incidencia del cáncer en el hombre. Incluso, la Agencia

Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC) de la OMS, ha clasificado la contaminación del aire exterior como cancerígena para los seres humanos (Grupo 1) presumiblemente por la presencia de los HAPs (IARC., 2013).

En este trabajo se determinó la concentración del PM_{2.5} en la ciudad de Barranquilla, en dos puntos de monitoreo durante 20 días, y sus medidas fueron comparadas con los parámetros de criterio de calidad del aire (máximos permisibles de los contaminantes bajo Res. 2254/2017). Adicionalmente, se identificaron y cuantificaron los HAPs presentes en el material particulado siendo de mayor interés los 17 prioritarios (carcinogénicos) por la EPA. Finalmente, se estableció la capacidad hemolítica para cada una de las muestras de PM para determinar algún tipo de afectación en la sangre.

2. JUSTIFICACIÓN

La contaminación atmosférica es la presencia de gases/vapores, partículas sólidas/líquidas en suspensión, material biológico o energía que cuando están presentes en la atmósfera en una concentración determinada y por tiempo suficiente, bajo ciertas condiciones, tienden a interferir con el confort humano (salud) y causan impacto a nivel ambiental. La contaminación con partículas produce efectos sanitarios incluso en muy bajas concentraciones (World Health Organization, 2018). Según la directriz de 2021 de la OMS, se deben determinar las concentraciones de partículas más bajas posibles y resalta que la superación de los nuevos niveles estaría asociada a riesgos significativos para la salud, ya que existe una relación directa entre la exposición a concentraciones de partículas finas (PM_{2.5}) y el aumento de la morbi-/mortalidad diaria/largo plazo (World Health Organization, 2018). El material particulado está asociado epidemiológicamente con enfermedades cardio-pulmonares/vasculares, así como con muertes de personas que tienen condiciones preexistentes (Hystad et al., 2020). Asociado a este material particulado se encuentran los HAPs que son carcinógenos, e.g., el benzo(a)pireno, que además de permanecer suspendido en el aire también afectan la mutagenicidad en suelo y agua (Zuluaga Quintero et al., 2009). Al revisar la literatura científica se encontró que existen pocos estudios de calidad del aire en Barranquilla, en una de ellas se resaltó la estimación de fuentes de material particulado PM₁₀/metales pesados, además de la evaluación de contaminantes de las estaciones de monitoreos establecidas por la autoridad ambiental en la ciudad (Duarte González, 2020); sin embargo, no se encontró alguno sobre la determinación de los HAPs en aire.

Por lo cual surge la siguiente pregunta de investigación: ¿Cuáles serían las concentraciones tanto de material $PM_{2.5}$ y de HAPs asociados al material en el aire de la ciudad de Barranquilla y podrían éstos causar hemólisis?

3. OBJETIVOS

Objetivo General

- ✓ Identificar/cuantificar HAPs asociados a material particulado (PM_{2.5}) en Barranquilla, así como la evaluación de su actividad hemolítica.

Objetivos Específicos

1. Determinar las concentraciones de material particulado PM_{2.5} en la ciudad de Barranquilla.
2. Establecer métodos de extracción de los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) asociados a material particulado (PM_{2.5}).
3. Determinar las concentraciones de HAPS asociados al PM_{2.5} en el área de estudio.
4. Evaluar en linfocitos humanos, los efectos hemolíticos de los (HAPs) material particulado proveniente de zonas de alta contaminación de Barranquilla.

4. ESTADO DEL ARTE

El material particulado es uno de los contaminantes monitoreados de diferentes formas, e.g., analizadores automáticos, atenuadores de rayos β , muestreadores de alto volumen; adicionalmente, se caracterizan químicamente a las muestras con el fin de conocer contenido mineral/orgánico e identificar las posibles fuentes de emisión del contaminante (Suárez & Pérez, 2006). Algunos reportes de la literatura se presentan a continuación. Así, Rojas & Galvis (2005) midieron el material PM_{10} y $PM_{2.5}$ en varias estaciones de monitoreo de calidad del aire en Bogotá (Colombia) usando monitores automáticos junto con la determinación gravimétrica de referencia. Ellos encontraron diferencias de *ca.* 10%, con cierta variabilidad en los resultados individualmente, relacionándose esto con las actividades antrópicas, tanto industriales como móviles, así como la meteorología.

Por su parte, Echeverri Londoño & Maya Vasco (2008) midieron simultáneamente materiales PM_{10} y $PM_{2.5}$ empleando muestreadores de alto y bajo volumen, respectivamente, en 8 sitios diferentes (divididos en 4 zonas) de la ciudad de Medellín (Colombia), entre febrero-octubre de 2007; según sus hallazgos, sólo dos sitios presentaron un día con concentraciones que excedieron la norma diaria de calidad del aire.

En cuanto a la extracción e identificación de HAPs presentes en el material particulado se obtienen extractos con diclorometano y/o acetona enriquecidos (concentrados) con ellos (por Soxhlet/ultrasonido) y se emplea cromatografía de gases con detector de ionización en llama y/o selectivo de masas (GC-FID/MSD) junto con un estándar certificado de HAPs (Quijano Parra & Meléndez Gélvez, 2014). La determinación de compuestos orgánicos e inorgánicos permite asociar posibles fuentes generadoras (Ñanco Ñanco, 2018).

En ese orden de ideas, el reporte de Del Águila López (2018) en el que se determinaron HAPs en filtros para PM₁₀ tomados en varios puntos de la ciudad Lima (Perú) se identificaron benzo[*a*]pireno, criseno benzo[*b*]fluoranteno, benzo[*k*]fluoranteno, indeno[1,2,3-*cd*]pireno y benzo[*g,h,i*]perileno, con lo cual se reforzó la hipótesis de que dichos compuestos fueron generados por el parque automotor.

Asimismo, Jamhari et al. (2014) cuantificaron y hallaron la distribución de HAPs en PM₁₀ atrapadas con muestreadores de alto volumen (filtro de fibra de vidrio) durante 24 h (septiembre 2010 - abril 2011), en áreas semi-/urbanas e industriales de Malasia. De acuerdo con los autores, el 80% de los HAPs identificados estuvieron constituidos por 5-6 anillos, e.g., benzo[*a*]pireno (BaP), indeno [1,2,3-*cd*]pireno (IcP), benzo[*b*]fluoranteno (BbF), Benz[*k*]fluoranteno (BkF) y benzo[*g,h,i*]perileno (BgP).

De la misma manera, Liu et al. (2018) analizaron las concentraciones de los HAPs unidos al PM_{2.5} en cuatro periodos, en un distrito altamente industrializado de la ciudad de Shanghái (China) y aplicando los modelos de trayectoria integrada lagrangiana híbrida de una sola partícula (HYSPLIT) y de factorización matricial positiva (PMF) se pudieron rastrear e identificar el área de contaminación potencial del PM_{2.5} y las fuentes potenciales, correspondientemente. Así también, se estableció la relación entre los HAPs y los parámetros meteorológicos. Los resultados relevantes fueron las concentraciones determinadas para PM_{2.5} (~15-186 µg/m³) y HAPs (~3-124 ng/m³).

Otro estudio llevado a cabo en la ciudad de Nanjing (China), fue divulgado por Chen et al. (2017) donde recolectaron muestras de PM_{2.5} y determinaron los 16 HAPs prioritarios para la EPA. Los resultados relevantes fueron que las concentraciones tanto de HAPs como de BaP fueron 4±1 ng/m³ y 0.29±0.08 ng/m³, respectivamente, y que los niveles más altos

fueron en horas de la mañana, horas pico laborales y de tráfico. Además, que según los índices de diagnóstico, los gases de escape especialmente la de los vehículos diésel son la principal fuente de generación de los HAPs.

Las concentraciones de HAPs ligadas al PM₁₀ y PM_{2.5} en el área metropolitana de la ciudad de Belgrado (Serbia) recolectados con equipos de alto volumen (filtros de cuarzo) entre 2010-2011, fueron halladas por Cvetković et al. (2015). Los autores determinaron que las concentraciones variaron entre las temporadas sin- y con calefacción entre ca. 5-7 ng/m³ y 50-100 ng/m³, correspondientemente, y para la identificación de las posibles fuentes de emisión aplicaron PMF y relación de diagnóstico.

En último lugar, Yue et al. (2015) reportaron el contenido de 18 HAPs en muestras de PM₁₀ y PM_{2.5} recolectadas en un sitio residencial de Taiwán; las concentraciones de HAPs variaron entre 38-270 ng/m³ (PM_{2.5}) y 44-341 ng/m³ (PM₁₀) y el posible origen era durante la combustión de carbón.

En la **Tabla 1**, se resumen los reportes de la literatura científica consultada sobre las concentraciones de material PM_{2.5} y de HAPs. Se listan ciudades del mundo y la locación de muestreo, técnicas químicas de análisis y métodos de muestreo del PM.

Tabla 1. Comparación de concentraciones y métodos de análisis de PM_{2.5} y HAPs

Ciudad /local	PM ₁₀ y PM _{2.5} (µg/m ³)	HAPs (ng/m ³)	Muestreador	Método de análisis	Locación/tipo de fuente	Referencia
San Juan (Argent.)	36±5 (PM _{2.5}) y 63±9 (PM ₁₀)	BbFA (0.38), BahA (0.31) y BghiP (0.61)	Impact. bajo vln, biológ.	US, FR-X, HPLC	Zona urbana, circulación tránsito vehicular	(Sammaritano, 2018)
Njombe (Tanzania)	14 (PM _{2.5})	1	PMASS	GC-MS	Zona urbana, residencias y una escuela	(N et al., 2019)
Florida (USA)	2.5±0.7 g/kg	7.1±0.9 y 8±3 mg/kg	Factores de emisión	Factores de emisión	Zona rural, cosechas caña de azúcar	(Hall et al., 2012)
Monterrey (México)	Diarias - 8-76 y 10-51 (PM _{2.5}); anuales - 35±20 y 22±9 (PM _{2.5}) para zonas 1 y 2	0.6-3.4 y 0.7-6.1	Partisol alto vln	US, HPLC	Zona urbana, instituciones públicas	(González Cárdenas et al., 2020)

Beijing (China)	102 (PM _{2.5}) y 145 (PM ₁₀)	Se determinaron metales: Ba, Zn, Mn, Sr, Cu, Pb, Cr, V, Ni, Cd y Sb	Partisol	FR-X SEM	Zona urbana, área densamente poblada/residencial	(Gao & Ji, 2018)
Beijín (China)	22-29 (PM _{2.5})	NA	Partisol	No se obtiene información	Global, hemisferio norte	(Sahu et al., 2020)
San Marcos (Guatem.)	0.11 mg/m ³ (PM _{2.5} , personal)	NA	Tipo ciclón	Registrador datos electroquímico pasivo	Zona urbana, residencial dentro de casas	(McCracken et al., 2013)
India	163 (PM _{2.5})	NA	UCB de partículas PATs	Gravimetría, modelo regresión	Zona rural y urbana dentro de cocinas de residencias	(Balakrishnan et al., 2013)
Villa del Rosario (Colombia)	NA	Naftaleno, metil naftaleno, pireno, fenantreno, fluoreno	Medidor bajo vln con flujo volumétrico	US, GC	Zona urbana	(Parra et al., 2017)
Kenia	8146 (PM _{2.5})	NA	muestreador pasivo	Información no suministrada	Zona rural, dentro de los hogares	(Menya, 2014)

US: Ultrasonido; FR-X: fluorescencia de rayos-X; HPLC: cromatografía de líquidos de alta eficiencia; GC: cromatografía de gases; MS: espectrometría de masas; SEM: microscopía electrónica de barrido.

Finalmente, Fernández-Amado et al. (2016) mencionó que otras metodologías analíticas se han desarrollado para la determinación de HAPs en muestras PM₁₀ utilizando cromatografía de líquidos (HPLC) reduciendo el número de tratamientos de las muestras, los volúmenes a utilizar y el tiempo de análisis.

Si se considera el estudio *in vitro* de citotoxicidad en células humanas, sobre ellas se han evaluado diversos tipos de compuestos: fármacos/drogas/cosméticos, agroquímicos, alimentos, etc. En la década de los 70's se realizó un estudio sobre las estructuras que se asemejan a los núcleos pero sin proteínas y se liberaban al lizar suavemente estas células en soluciones que contenían detergentes no iónicos y altas concentraciones de sal (Cook et al., 1976). Este fue uno de los primeros indicios a la técnica. Así, Monroy et al. (2005) aplicaron el método *in vitro* en células humanas (normales y de fibrosarcoma) expuestas a diferentes concentraciones de glifosato, analizando la viabilidad celular con los colorantes de tinción crisol-violeta y azul de tripano (de exclusión). Es importante mencionar el ensayo de citotoxicidad no radiactivo y en tiempo real, en donde se utiliza un lector multimodal de imágenes celulares. Es una alternativa que permite monitorear con gran

precisión la lisis de las células diana a través del tiempo y se realiza en placas de 96 pocillos en condiciones de cultivos optimizadas a 37 °C, con 5% CO₂ (Fassy et al., 2017).

5. MARCO CONCEPTUAL

Material particulado: El material particulado atmosférico (PM) se define como el conjunto de partículas sólidas y/o líquidas (a excepción del agua pura) presentes en suspensión en la atmósfera. El término adicionalmente, engloba tanto las partículas en suspensión como las partículas sedimentables, caracterizadas por un corto tiempo de residencia en la atmósfera (Ministerio de Educación y Ciencia , 2004).

El PM tiene diversas clasificaciones, e.g., según el diámetro aerodinámico, el cual describe la capacidad de transporte en la atmósfera y/o capacidad de inhalación a través del sistema respiratorio del organismo (Esworthy, 2014). Las partículas gruesas y finas tienen diámetros aerodinámicos $\leq 10 \mu\text{m}$ y $\leq 2.5 \mu\text{m}$, respectivamente. Estas partículas provienen de fuentes diferentes, i.e., polvos de caminos, polvos de agricultura, lechos de ríos, sitios de construcción, operaciones de minería y otras actividades similares (Juda-Rezler et al., 2011).

De las fuentes que generan PM de emisión directa a la atmósfera o por conversión de precursores gaseosos se mencionan al amoníaco, compuestos orgánicos no volátiles, óxidos de nitrógeno y azufre, que pueden ser aportados de manera natural o antropogénica (Atkinson et al., 2010). Cuando son naturales pueden provenir de incendios forestales, tormentas de polvo, volcanes, vegetación viva y rocío (Solomon et al., 2001). Mientras que, si son antropogénicas podrían provenir de actividades industriales y agrícolas, erosión de pavimentos por el tráfico, combustión de carbón, petróleo, biomasa (Srimuruganandam & Shiva Nagendra, 2012).

PM_{2.5}: Son partículas inhalables finas que tienen diámetros, por lo general, iguales o menores a 2.5 µm (EPA, 2022).

Hidrocarburos aromáticos policíclicos: Son una agrupación de hidrocarburos (átomos de H y C) que contienen dos o más núcleos aromáticos *orto*-fusionados. Se forman principalmente durante la combustión incompleta o pirólisis de materia orgánica (Nutrición, 2017).

Citotoxicidad: Es la alteración de las funciones básicas de las células por una sustancia química que genera un daño que puede ser detectado (Gallegos-Hernandez, 2018).

Hemólisis: Describe cuando sucede la disrupción de la membrana celular de un eritrocito y causa la liberación de la hemoglobina (Jaime Perez & Gomez Almaguer, 2012).

Ultrasonido: Son ondas mecánicas longitudinales (inaudibles) con frecuencias superiores para el oído humano, las cuales se alternan entre ciclos de expansión/compresión, generando burbujas en medio líquido. La formación, crecimiento e implosión de estas burbujas se conoce como cavitación y resulta en cambios extremos en temperaturas/presiones locales lo que facilita reacciones químicas e impulsa procesos de extracción/derivatización. La cavitación depende altamente de la intensidad/frecuencia del ultrasonido, el tiempo/temperatura de reacción y propiedades del solvente (viscosidad, volatilidad, etc.) (de Castro & Priego Capote, 2007)

6. METODOLOGÍA

Diseño de experimentos

Para la presente investigación se utilizó como uno de los métodos de extracción la asistida por baño ultrasónico (Branson Ultrasonics™ CPX-952-338R), al cual se le aplicó el modelo de Box-Behnken de tres niveles de superficie de respuesta con 17 corridas. Los tres factores que se definieron para el proceso fueron la temperatura de extracción (40 °C, 50 °C y 60 °C), tiempo de extracción (10 min, 20 min y 30 min) y la relación muestra:solvente (1:10, 1:20, 1:30). Los valores óptimos con base en la superficie de respuesta para la tres variables (T, t, relación m:s) fueron 56 °C, 17 min y 1:20 (g:mL), con 6.06% como la mejor respuesta obtenida para (y) (Prakash Maran et al., 2013)

Previamente, a la aplicación del diseño de experimento para la extracción con ultrasonido, se efectuaron una serie de mediciones usando estándares de naftaleno y antraceno (HPAs), preparadas a diferentes concentraciones (250 ppm, 10 ppm, 5 ppm y 1 ppm) e impregnadas (24 h, con evaporación de solvente) en el mismo tipo de filtro que se utilizó para los muestreos del PM, para seleccionar el solvente (diclorometano, etanol, acetonitrilo y hexano) más apropiado para el experimento. El monitoreo de esta parte del experimento se llevó a cabo utilizando espectrofotometría UV/Vis cada vez que un extracto era obtenido para cada solvente. Las mediciones se realizaron por duplicado y se estimó el porcentaje de recuperación en cada proceso.

Las etapas del proceso con ultrasonido fueron: (i) extracción por lotes 3x10 mL para cada solvente, garantizando una extracción ca. 99% y (ii) aplicación del modelo de Box-Behnken. Como un resultado del modelo se pudo determinar que el solvente con mayor porcentaje de recuperación fue el hexano, con un valor de 86 ± 3 %, siendo superior a los demás solventes (**Tabla 2**) y por lo tanto, escogido para el diseño de experimento.

Tabla 2. Eficiencia de extracción de los solventes

Solvente	Prom. %Recup.	Desviación estándar	Varianza
----------	------------------	------------------------	----------

Hexano	86	3	7
Acetonitrilo	73	1	2
Etanol	73	2	3
Diclorometano	72	4	16

La unidad experimental problema consistió en el **% de recuperación del HAP (%Rec)**, donde las variables controlables y no controlables tienen una influencia sobre la variable respuesta.

Entre las variables controlables están:

x1= Temperatura de extracción (T, °C)

x2= Tiempo de extracción (t, min)

x3= Relación filtro:solvente (1:X, adimensional)

Las variables no controlables podrían ser

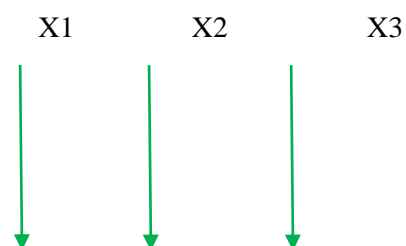
z1= concentración del hidrocarburo (cantidad de naftaleno/antraceno)

z2= pérdidas de energía (vatios)

z3= evaporación del solvente (mL)

Variable respuesta

y= Rendimiento de extracción (%)



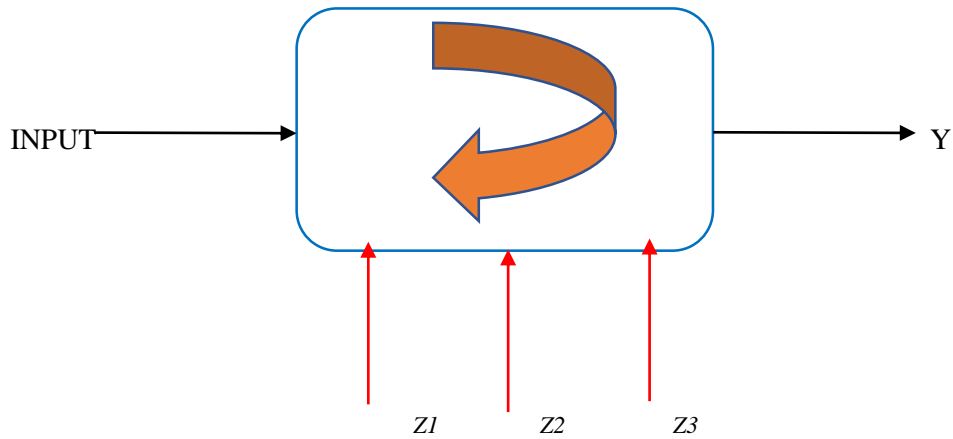


Figura 1. Unidad experimental DOE

Para el diseño de experimento Box-Behnken y su análisis se empleó el *software Design Expert* con el cual se obtuvo la superficie de respuesta con los mejores valores de los factores. La información de entrada, alimentación y respuesta para las corridas por Box-Behnken en el software se listan en las **Tablas 3-5**. Finalmente, el software estimó el polinomio de mayor orden con los términos adicionales significativos.

Tabla 3. Parámetros de entrada Design Expert

Name	Units	Type	Changes	Std. Dev.	Low	High
Temp	°C	Factor	Easy	0	50	70
Tiemp	min	Factor	Easy	0	15	60
Rela	g:mL	Factor	Easy	0	10	30
Rec	%	Response		1.22957	83	95

Tabla 4. Corridas Diseño Box-Behnken

Corrida	Temperatura de extracción(°c)	Tiempo de extracción(minutos)	Relación solido-liquido(g/ml)
1	70	15	1:20
2	50	15	1:20

3	60	60	1:30
4	60	15	1:30
5	70	45	1:10
6	50	60	1:20
7	50	45	1:30
8	60	60	1:10
09	60	15	1:10
10	60	45	1:20
11	60	45	1:20
12	50	45	1:10
13	60	45	1:20
14	60	45	1:20
15	60	45	1:20
16	70	60	1:20
17	70	45	1:30

Tabla 5. Respuesta diseño Box-Behnken

Std	Run	Factor 1 A: Temp °C	Factor 2 B: Tiemp min	Factor 3 C: Rela g:mL	Response 1 Rec %
1	1	50	15	20	83
16	2	60	45	20	84
15	3	60	45	20	87
8	4	70	45	30	85
4	5	70	60	20	90
12	6	60	60	30	92
6	7	70	45	10	86
11	8	60	15	30	85
17	9	60	45	20	85
14	10	60	45	20	84
7	11	50	45	30	85
3	12	50	60	20	91
10	13	60	60	10	95
13	14	60	45	20	84
2	15	70	15	20	84
9	16	60	15	10	83
5	17	50	45	10	85

Área de Estudio

Se escogieron dos puntos de muestreo del material PM_{2.5}, en el distrito de Barranquilla, siguiendo y teniendo en cuenta el protocolo de monitoreo de calidad de aire (Ministerio de Ambiente, 2010), así como la ubicación, disponibilidad de energía eléctrica, seguridad de

los equipos, área estratégica con respecto a los parámetros de diseño de la norma. Uno de los puntos estuvo en el área metropolitana de la ciudad, en el barrio Ciudadela 20 de Julio con latitud $10^{\circ}55'43.42''\text{N}$ y longitud $74^{\circ}48'23.52''\text{O}$ (**Figura 2**), cercana a otra estación de calidad de aire. El otro punto se ubicó en la Universidad del Norte, la cual tiene una estación de monitoreo de calidad del aire con latitud $11^{\circ} 1'11.93''\text{N}$ y longitud $74^{\circ}50'47.64''\text{O}$ (**Figura 3**). El monitoreo se realizó por 20 días durante 24 h y posteriormente, los filtros cargados con el PM se transportaron directamente a los laboratorios de la Universidad del Norte.



Figura 2. Ubicación estación de monitoreo 1 - Barrio Ciudadela 20 de Julio

Los puntos de monitoreo fueron escogidos que proporcionaran información/datos de las áreas (200 m² o de varios km² - emplazamientos orientados al tráfico o fondo urbano, respectivamente) situadas dentro de las zonas y que concentraran más de 50.000 habitantes, con el fin de establecer su exposición y mayor riesgo comparadas con áreas menos pobladas; así como que se evitara la medición de microambientes pequeños en las inmediaciones. Además, se realizó una microlocalización con ciertas consideraciones: los tomamuestras no se ubicaron cerca de las salidas de aire acondicionado/ventilaciones de edificios; no se emplearon generadores eléctricos para las estaciones; se evitaron zonas de parqueo, depósitos de sustancias químicas/combustibles, sitios muy cercanos de acumulaciones de residuos sólidos/líquidos (Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, 2007).

Adicionalmente, se establecieron 138 fuentes fijas en la ciudad como generadoras potenciales de PM, predominando el gas natural (caldera) y en menor medida el carbón (horno). También, se identificaron fuentes de emisión de área, e.g., la Sociedad Portuaria de Barranquilla, con empresas que se encuentran ubicadas al oeste de la ciudad y con cercanía/influencia sobre la estación de la Ciudadela 20 de Julio. En cuanto a las emisiones por vía para PM, las mayores fueron la avenida murillo toro (calle 45) y circunvalar; y calle 30 junto con la avenida cordialidad, las cuales se encuentran cercanas al punto uno. Es importante mencionar que se encontró correlación entre los datos obtenidos; esto es, la mayor concentración de PM fue para la estación Ciudadela 20 de Julio comparada con la estación de la Universidad del Norte debido a que en el primer punto de muestreo hay mayor influencia tanto en fuentes fijas como móviles (Bermejo Rolong & Romo Padilla, 2021).

Muestreador de material particulado

Fue utilizado un muestreador de aire de alto volumen $PM_{2.5}$ de la marca *Tisch Environmental*, el cual cuenta con boquillas (40) selectivas a partículas $<2.5 \mu m$ de diámetro aerodinámico y cuyo diseño permite que los PM penetren en el filtro en todas las direcciones. Adicionalmente, fueron usados filtros de microfibras de cuarzo QM-A Whatman (con 5% borosilicato) para control de trazas/impurezas en aire/gas, con alta velocidad de filtración y alta eficiencia en la retención de partículas pequeñas, con las siguientes especificaciones técnicas: retención de partículas de $2.2 \mu m$; velocidad de filtración de 100 s/100 mL; espesor de $475 \mu m$; área de $203 \text{ mm} \times 254 \text{ mm}$ y peso de 87 g/m^2 .

Pre-muestreo

Inicialmente se realizó un pre-muestreo con el propósito de establecer tiempos tanto en la fase de campo como en los análisis de laboratorio. Para la toma de muestras diarias se determinó el tiempo y trayecto recorrido óptimos, para lo cual se recogió primero la muestra en la estación uno y después en la estación 2 después de las 24 h con depósito final de las muestras en los laboratorios de UniNorte, en horas de la mañana, evitando las horas pico para el traslado.

Muestreo

Una vez se realizó el montaje de los equipos de alto volumen en las estaciones de monitoreo (**Figuras 5 y 6**) se procedió a los acondicionamientos correspondientes según lo estipulado por EPA (1993). Seguidamente, los filtros en condiciones óptimas (sin humedad y perforaciones) fueron enumerados (código interno) y se desecaron con humedad relativa de $20-45 \pm 5\%$ a 24°C , hasta obtener peso constante.



Figura 5. Estación 1 Ciudadela 20 de julio



Figura 6. Estación 2 Universidad del Norte



Figura 7. Recolección de Muestra

Etapa laboratorio

Extracción Soxhlet

La extracción de los HAPs se realizó conforme a los métodos EPA TO-13A/3540C (Environmental Protection Agency, 1996) ,empleando extracción Soxhlet. Para lo cual, cada filtro con PM_{2.5} cortado en piezas de 1 cm² fue adicionado al dedal Soxhlet y extraído con n-hexano (200 mL) a reflujo por 24 h .Después de la extracción exhaustiva, el extracto fue rotoevaporado hasta sequedad, separado y pre-concentrado mediante un paso de *clean-up* utilizando sílica gel y eluyentes de diferentes polaridades (ASTM, 2004; USEPA, 1999; Teixeira et al., 2011, 2012).



Figura 8. Equipo Soxhlet

Extracción ultrasonido

Con fines comparativos se realizó extracción de los HAPs mediante ultrasonido con base en el método EPA 3550A (Environmental Protection Agency, 2007) pero usando las condiciones optimizadas por el DOE. Así, cada filtro con PM_{2.5} cortado en piezas de 1 cm² fue colocado en un frasco Shot de 100 mL con tapa, al cual se le adicionó n-hexano (40 mL). Inmediatamente, la mezcla fue sometida a ultrasonido por 60 min, a 60 °C; este proceso se repitió dos veces más. Una vez se unificaron los extractos, se concentró hasta 1 mL y transfirió a un vial (2 mL) hasta su análisis por GC-MS.



Figura 9. Baño por Ultrasonido

Identificación de los HAPs por GC-MS

Para la identificación y cuantificación de los HAPs presentes en el PM_{2.5} del aire, extraídos por Soxhlet/ultrasonido así como de las fracciones, se utilizó un cromatógrafo de gases Trace 1310 acoplado a un espectrómetro de masas ISQ Series (Thermo Fisher Scientific, Inc.), con puerto de inyección *split/splitless* (relación *split* - 5:1), automuestreador líquido (AI/AS 1310 Series, Thermo Fisher Scientific). Las separaciones de las mezclas se obtuvieron: (i.) en una columna Rxi[®]-1MS (30 m x 0.25 mm I.D. x 0.5 µm df, Restek Co., Bellefonte), con fase estacionaria entrecruzada no-polar de poli(dimetilsiloxano), y (ii.) con programación lineal de temperatura en el horno GC: 85 °C (1 min) hasta 310 °C (5 min) a 4 °C/min. Helio (99.999 %) se empleó como gas de arrastre (flujo constante, 1.0 mL/min) y las temperaturas de la línea de transferencia y la fuente de iones fueron ajustadas a 250 °C y 230 °C, respectivamente.

Los espectros de masas fueron adquiridos mediante ionización electrónica (EI, 70 eV) empleando un analizador másico cuadrupolar en los modos de barrido completo de

radiofrecuencias (*full scan*, m/z 45-450) y monitoreo del ion seleccionado (SIM). Los datos cromatográficos y espectroscópicos fueron procesados usando los softwares Thermo Xcalibur™ (Versión 2.2 SP1.48, Thermo Fisher Scientific, Inc.) y AMDIS (*Automated Mass Spectral Deconvolution and Identification System*, Build 130.53, Versión 2.70).

Los constituyentes orgánicos fueron identificados/confirmados por comparación de sus espectros de masas con aquellos de la base de datos/librerías espectrales disponibles (NIST11, NIST Retention Index and Wiley9) junto con los de las mezclas de los patrones certificados [(hidrocarburos lineales C₁₀-C₄₀ (16 constituyentes - ref. # 68281, Sigma Aldrich) y SV Calibration Mix # 6/610 PAH Mix (16 constituyentes - cat. # 31011, Restek)]. Además, se calcularon para cada componente los índices de retención lineal con temperatura programada (I_R) y se usaron para comparar con los I_R reportados en la literatura científica existente.

Actividad hemolítica

La metodología utilizada para evaluar la actividad hemolítica fue la propuesta por Yang et al. (2005) con modificaciones, para lo cual se aislaron eritrocitos humanos (RBC: *Red Blood Cells*) a partir de sangre periférica de un paciente sano (25-30 años). Inicialmente, la sangre fue lavada (con *buffer* de PBS, pH 7.4, tres veces), centrifugada (2500 rpm, 10 10 min) y separada del plasma sanguíneo; la fracción rica en eritrocitos fue re-suspendida en una solución hasta 4% ($4.5-4.8 \times 10^5$ células/ μL) en PBS. Seguidamente, los extractos de las muestras de calidad de aire (100 μL) junto con dodecilsulfato de sodio (SDS, 1000 mg/L - control positivo) y DMSO (0.5 % - control negativo) se incubaron en una placa de 96 pozos a 37°C (30 min) con la sln eritrocítica (100 μL). Una vez, finalizó la incubación, la placa se centrifugó a 2500 rpm (10 min) y 100 μL del sobrenadante de cada pozo fue colocado en

una nueva placa para su posterior medición/lectura a 540 nm en un lector multipozos (FLUOstar Omega). Todos los ensayos se realizaron por triplicado. La **Figura 10** muestra el líquido sobrenadante después del proceso de hemólisis de las muestras bajo estudio.

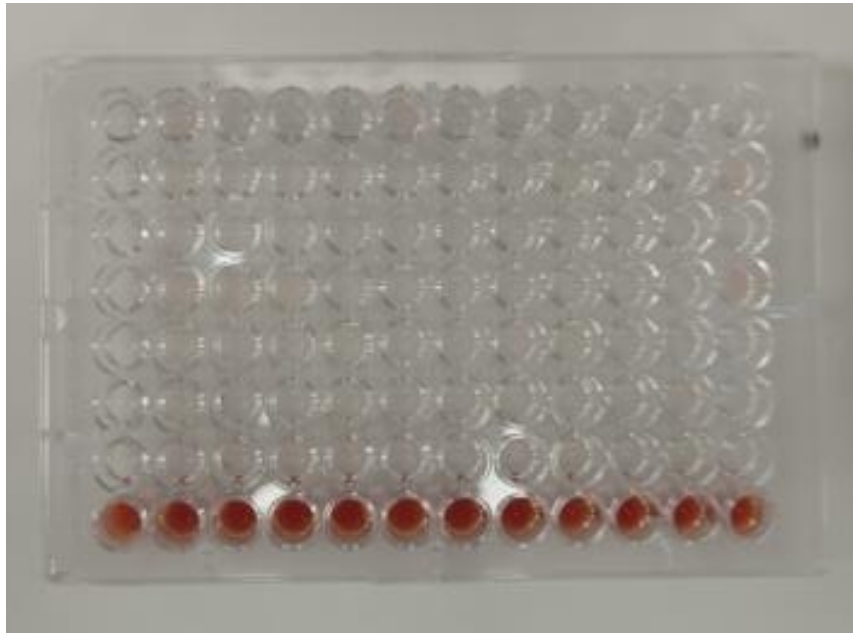


Figura 10. Sobrenadante retirado después del proceso hemolítico

7. RESULTADOS Y ANALISIS

En el siguiente apartado se registran los resultados obtenidos de la presente investigación. Luego de realizar el monitoreo durante el periodo de estudio, se procedió a obtener los pesos de PM en cada estación. Las cantidades de masa, como la diferencia entre los pesos, fueron analizadas mediante la curva de normalidad con el software R Studio y aplicando las pruebas de Shapiro-Wilk, Jarque-Bera, Frosini, Geary, Hegazy-Green, Skewness, Spiegelhalter, Weisberg-Bingham, etc. La **Tabla 6** muestra los valores en diferencia de pesos.

Tabla 6. Valores de diferencia de los pesos antes y después del muestreo (g)

Fecha	Estación 1 Ciudadela 20 de julio	Estación 2 Universidad del Norte
26/02/2020	0.0054	0.0279
27/02/2020	0.0035	0.0221
28/02/2020	0.0251	0.0287
29/02/2020	0.0113	0.0272
1/03/2020	0.0108	0.0235
2/03/2020	0.0162	0.0325
3/03/2020	0.0187	0.0222
4/03/2020	0.0188	0.0225
5/03/2020	0.0177	0.0168
6/03/2020	0.0112	0.0148
7/03/2020	0.0094	0.0266
8/03/2020	0.0156	0.0354
9/03/2020	0.0033	0.0397
10/03/2020	0.0059	0.0256
11/03/2020	0.0031	0.0159
12/03/2020	0.0164	0.0183
13/03/2020	0.0041	0.0272
14/03/2020	0.0125	0.0158
15/03/2020	0.0084	0.0107
16/03/2020	0.0179	0.0255

En la **Figura 11** se pueden observar los gráficos Q-Q normales de la distribución de probabilidad basado en la prueba de Shapiro-Wilk ($p > 0.05$). Los valores p para las

estaciones 1 y 2 fueron 0.8 y 0.29, respectivamente, con lo cual, se acepta que las muestras tuvieron una distribución normal. Adicionalmente, se aplicaron otras pruebas para confirmar la normalidad de los datos y validez de la H_0 , e.g., Jarque-Bera ajustado ($p > 0.05$) con valores p de 0.87 (estación 1) y 0.48 (estación 2); Frosini - valores p de 0.74 y 0.41; Hegazy-Green - valores p de 0.68 y 0.35; Geary - valores p de 0.58 y 0.35, Skewness - valores p de 0.73 y 0.60; Spiegelhalter - valores p de 0.69 y 0.62; Weisberg-Bingham - valores p de 0.78 y 0.36.

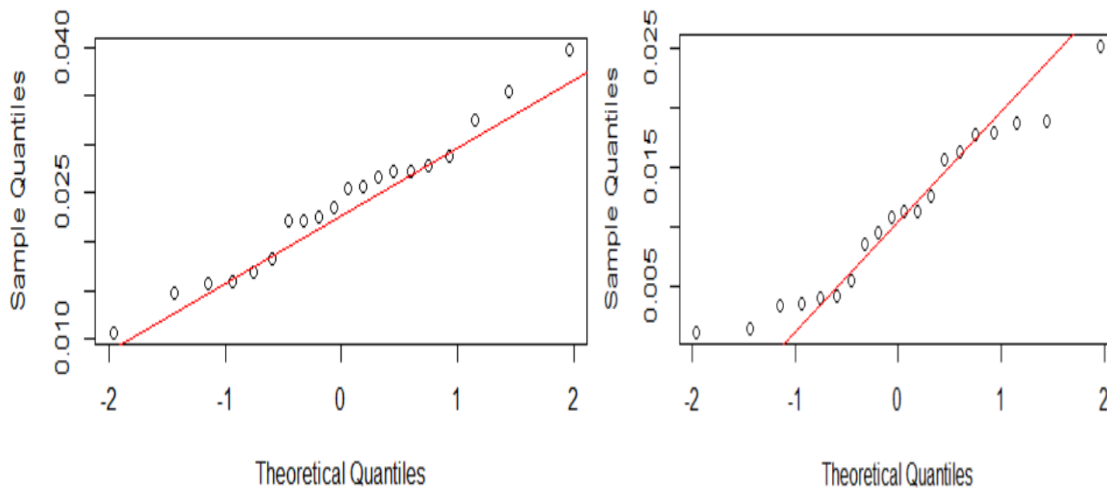


Figura 11. Gráficos Q-Q normales para estación 1 y 2

Los histogramas, en los cuales se confirman las frecuencias de los datos que siguen distribuciones normales se presentan a continuación (**Figura 12**).

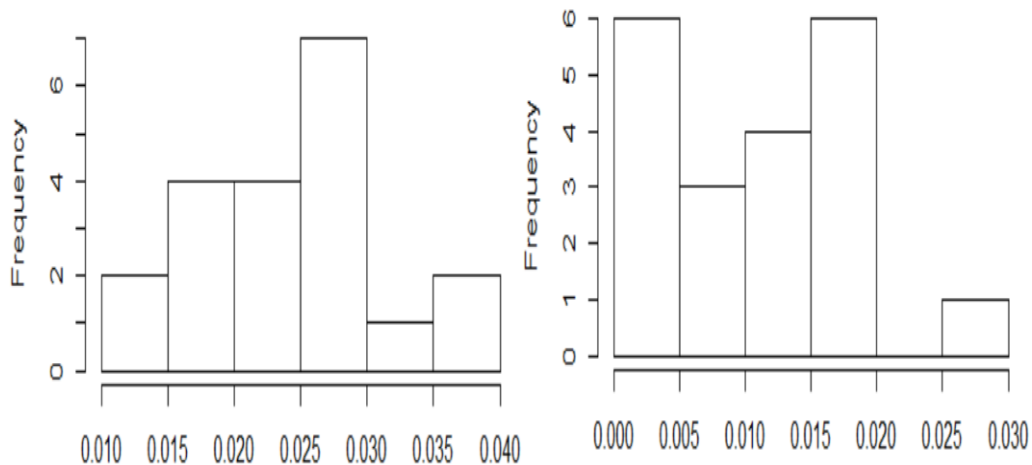


Figura 12. Histogramas estaciones 1 y 2

En la **Tabla 7** se registran los resultados de la estadística descriptiva obtenida de las diferencias de pesos de los PM determinados en las dos estaciones de muestreo. De acuerdo con esta **Tabla 7** los valores de la media, mediana y moda de la estación 1 fueron mayores que la de la estación 2. Según la desviación estándar, los datos de la estación 1 fueron ligeramente más dispersos que la de la estación 2. Y, la diferencia es poco significativa del error típico de ambas estaciones.

Tabla 7. Estadística descriptiva de diferencia de pesos PM (g) antes y después del muestreo

	Estación 1 Barrio Ciudadela	Estación 2 Universidad Del Norte
Media	0.024	0.012
Error típico	0.002	0.001
Mediana	0.025	0.011
Moda	0.027	#N/D
Desviación estándar	0.007	0.006
Varianza de la muestra	0.000	0.000
Curtosis	-0.055	-0.825
Coefficiente de asimetría	0.242	0.215
Rango	0.029	0.022
Mínimo	0.011	0.003
Máximo	0.040	0.025
Suma	0.479	0.235
Cuenta	20.000	20.000
Nivel de confianza (95%)	0.003	0.003

Adicionalmente, las concentraciones calculadas para PM_{2.5} de las dos estaciones se presentan en la **Tabla 8**. Los valores promedio fueron 15.1 µg/m³ y 7.4 µg/m³ para la estaciones 1 y 2, respectivamente.

Tabla 8. Concentraciones de PM_{2.5} (µg/m³) en las estaciones 1 y 2

Fecha	Estación 1 Ciudadela 20 de Julio	Estación 2 Universidad del Norte
26/02/2020	17.50	3.42
27/02/2020	13.87	2.20
28/02/2020	17.99	16.11
29/02/2020	17.30	6.89
1/03/2020	14.89	6.69
2/03/2020	20.56	10.12
3/03/2020	13.99	11.91
4/03/2020	14.12	11.78
5/03/2020	10.51	11.23
6/03/2020	9.29	7.23
7/03/2020	16.90	5.90
8/03/2020	22.26	9.75
9/03/2020	24.89	2.07
10/03/2020	16.15	3.84
11/03/2020	9.99	2.01
12/03/2020	11.49	9.96
13/03/2020	17.04	2.67
14/03/2020	10.01	7.64
15/03/2020	6.74	5.31
16/03/2020	16.25	10.81

Además, se observó que los días de menor y mayor atrapamiento (concentración) de PM_{2.5} fueron: estación 1 - 15/03/2020 (6.74 µg/m³) y 9/03/2020 (24.89 µg/m³); estación 2 - 09/03/2020 (2.01 µg/m³) y 28/02/2020 (16.11 µg/m³). La comparación de los valores de concentración en el período de monitoreo con la resolución 2254 de 2017 (valor máximo de PM_{2.5}: 37 µg/m³) puso de manifiesto que en ninguno de los días considerados, la concentración del PM excedió los valores máximos permisibles. Asimismo, la comparación de los datos inter-estaciones, mostró que la estación 1 (correspondiente al sector industrial)

En la **Figura 13** se exhiben los diagramas de caja para los puntos de medición, incluyendo los valores mínimos/máximos. Además, se pudo identificar que la concentración de PM_{2.5} excedió en algunos casos el valor de la media anual (15 µg/m³) según la norma vigente de calidad de aire (resolución 2254 de 2017).

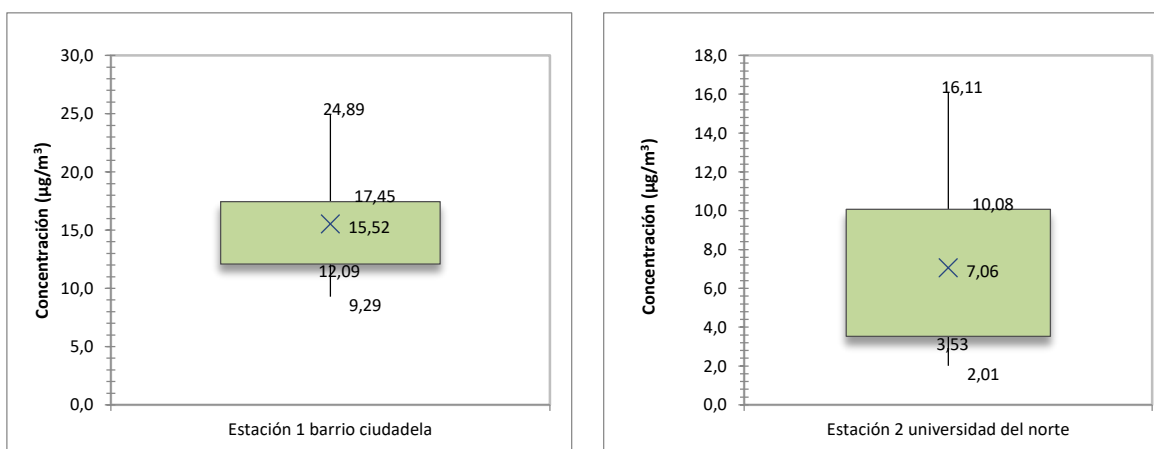


Figura 14. Diagrama de cajas de PM_{2.5}

Por otro lado, como etapa preliminar a la optimización por ultrasonido se escogió un constituyente estructuralmente menos complejo perteneciente a la familia de los HAP. Para esto, se evaluaron a naftaleno y antraceno a 1-10 ppm y se analizaron a través de espectroscopía UV-Vis. La molécula seleccionada fue el antraceno (**Figura 15**), cuya máxima longitud de onda fue 221 nm (a 1 ppm), la cual se utilizó para cada medición realizada durante el DOE.

Seguidamente, se analizaron los resultados relacionados con la optimización para la extracción de antraceno (HAPs) mediante ultrasonido con hexano. La **Tabla 9** muestra el ajuste del modelo secuencial con la suma de cuadrados ajustado para el valor p (< 0.05), con la variable respuesta % de recuperación. Así, el modelo que mejor se ajustó a los datos fue el cuadrático y con base en él, se llevó a cabo el ANOVA (**Tabla 10**).

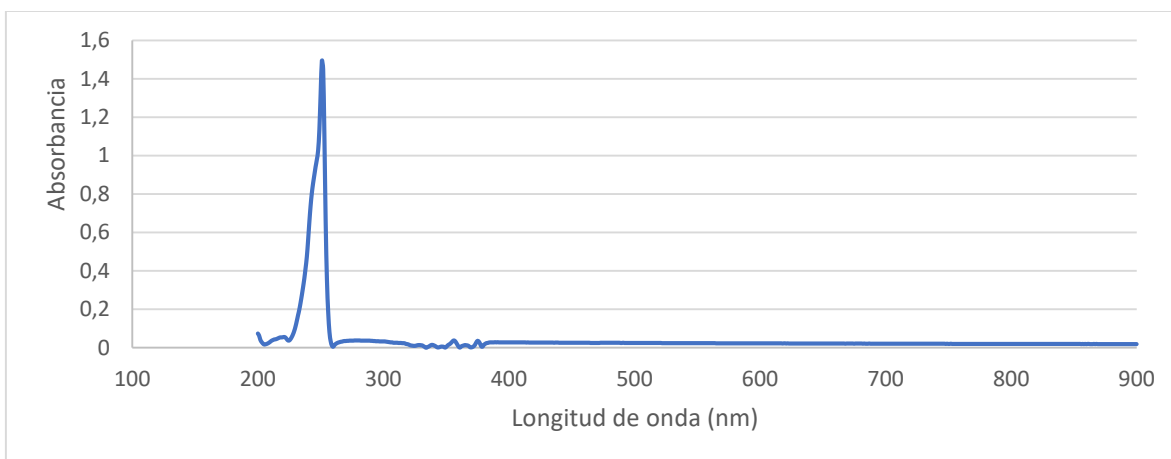


Figura 15. Barrido UV-Vis para antraceno a 5 ppm.

Tabla 9. Resumen de ajuste para % de recuperación

Fuente	Valor-p secuencial	Valor-p falta de ajuste	R ² ajustado	
Lineal	0.0229	0.0521	0.3945	
2FI	0.8528	0.0313	0.2697	
Cuadrático	0.0013	0.5803	0.8765	Sugerido
Cúbico	0.5803		0.8611	Aliased

De acuerdo con la **Tabla 10**, el valor 13.62 para F fue indicativo de significancia, confirmado por el valor p de 0.0012 ($p < 0.05$). Adicional los términos B y B² del modelo fueron significativos. Para el parámetro falta de ajuste con valor de 0.58 fue no significativo comparado con el valor del error puro, lo cual resultaría bueno para el modelo.

Por otra parte, en la **Tabla 11** se registran los coeficientes en términos de factores codificados. La estimación del coeficiente representa el cambio esperado en la respuesta por cambio unitario en el valor del factor cuando todos los factores restantes se mantienen constantes; i.e., cuanto mayor es el VIF, menor será la correlación de factores. Como regla general, los VIF inferiores a 10 son tolerables.

Tabla 10. ANOVA para modelo cuadrático para los valores de % de recuperación

Fuente	Suma de cuadrados	df	Cuadrado medio	Valor-F	Valor-p	
Modelo	185.30	9	20.59	13.62	0.0012	significativo
A-Temp	0.2961	1	0.2961	0.1958	0.6715	
B-Tiemp	136.13	1	136.13	90.04	< 0.0001	
C-Rela	0.0211	1	0.0211	0.0139	0.9094	
AB	0.7961	1	0.7961	0.5265	0.4916	
AC	0.2500	1	0.2500	0.1654	0.6964	
BC	5.92	1	5.92	3.92	0.0883	
A²	1.78	1	1.78	1.18	0.3140	
B²	71.01	1	71.01	46.97	0.0002	
C²	5.09	1	5.09	3.37	0.1090	
Residual	10.58	7	1.51			
Falta de ajuste	3.78	3	1.26	0.7417	0.5803	no significativo
Error puro	6.80	4	1.70			
Cor Total	195.88	16				

Tabla 11. Coeficientes en términos de factores codificados

Factor	Coefficient Estimate	df	Standard Error	95% Low	CI 95% High	CI	VIF
Intercept	82.90	1	0.6102	81.45	84.34		
A-Temp	0.1974	1	0.4460	-0.8573	1.25		1.05
B-Tiemp	4.13	1	0.4347	3.10	5.15		1.06
C-Rela	-0.0526	1	0.4460	-1.11	1.00		1.05
AB	-0.4342	1	0.5984	-1.85	0.9808		1.05
AC	-0.2500	1	0.6148	-1.70	1.20		1.00
BC	-1.18	1	0.5984	-2.60	0.2308		1.05
A²	-0.6500	1	0.5992	-2.07	0.7669		1.01
B²	4.75	1	0.6936	3.11	6.39		1.06
C²	1.10	1	0.5992	-0.3169	2.52		1.01

La **Tabla 12** contiene los términos de factores codificados para la ecuación final, siendo los más relevantes A, B, B² y C². Los niveles altos y bajos de los factores se codifican como +1 y -1, respectivamente.

Tabla 12. Ecuación final en términos de factores codificados

Rec	=
+82.90	
+0.1974	A
+4.13	B
-0.0526	C
-0.4342	AB
-0.2500	AC
-1.18	BC
-0.6500	A²
+4.75	B²
+1.10	C²

La **Figura 16** presenta el gráfico comparativo de los percentiles de la distribución normal teóricos y observados, relacionado con la normalidad de los residuos, la cual fue aproximadamente lineal y, por lo tanto, se verificaría el supuesto de distribución normal. Mientras que, la **Figura 17** exhibe la relación de los residuos contra los valores predictivos, confirmando para cada corrida que los residuos estuvieron distribuidos aleatoriamente y que no se encontraron datos atípicos.

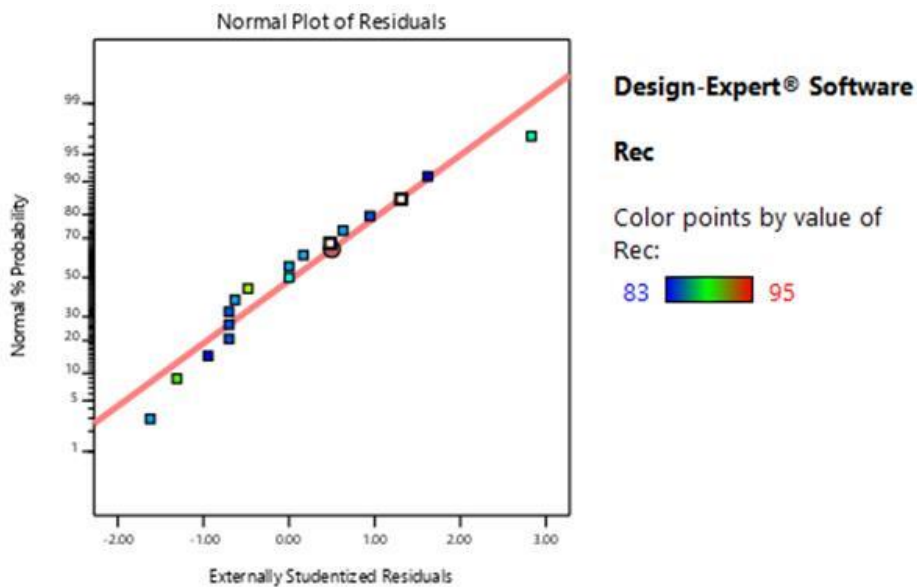


Figura 16. Normalidad de los residuos

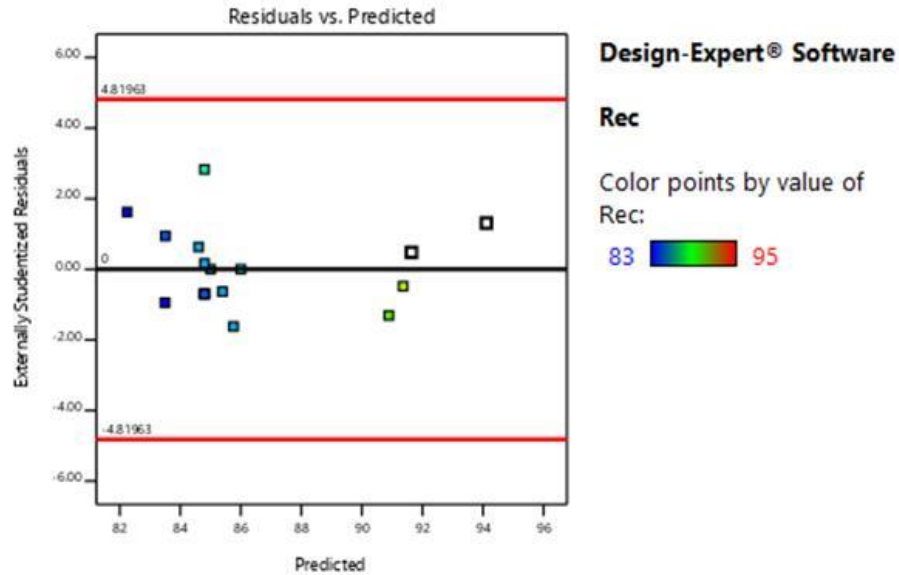


Figura 17. Residuos Vs. predicción

La **Figura 18** ilustra los residuos *versus* corridas, con la cual se verificó el supuesto de que los residuos fueron independientes entre sí, al no encontrarse ningún patrón/tendencia a través del tiempo y además que se encontraron ubicados aleatoriamente alrededor de la línea central. Por otra parte, la comparación del predicho *versus* el actual se muestra en la **Figura 19**. En esta gráfica se pudo observar que la relación entre la respuesta predicha frente al valor de respuesta real fue muy cercana, evidenciando que el modelo de predicción se ajustó en gran medida a los valores reales.

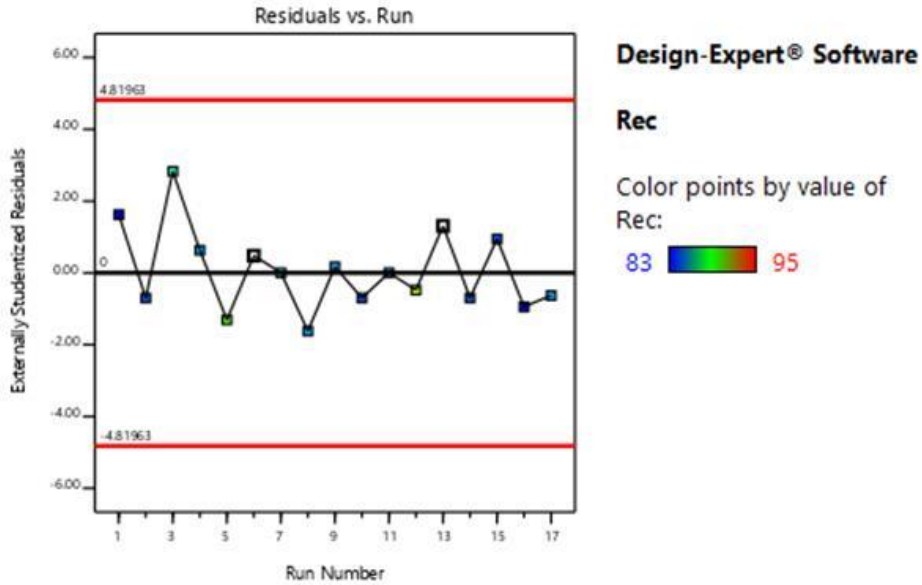


Figura 18. Residuos Vs. Corridas

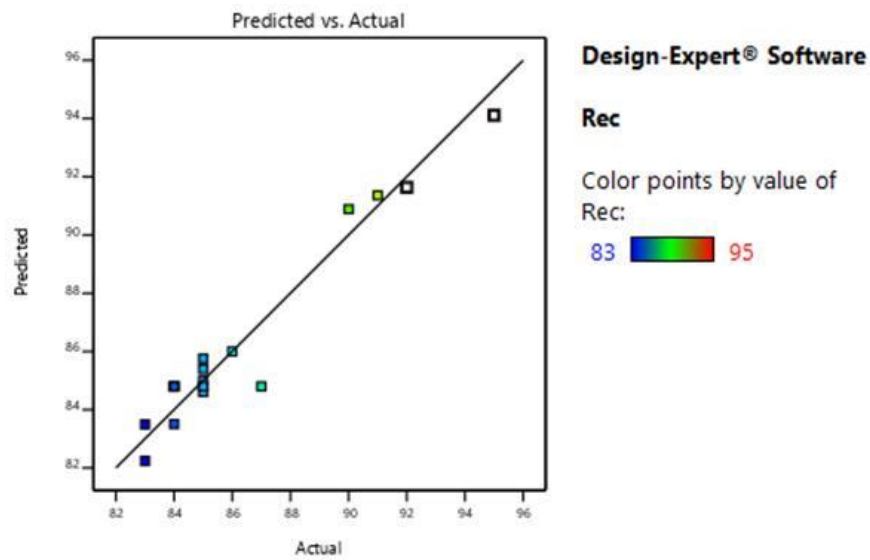


Figura 19. Predicción Vs. Actual

Finalmente, la superficie de respuesta en 3D, relacionada con las mejores condiciones para la obtención del antraceno por ultrasonido se exhibe en la **Figura 20**. El punto rojo relleno (punto óptimo) dentro de la gráfica indicó cuáles son las mejores condiciones para la mayor recuperación del HAP bajo estudio por ultrasonido, siendo la corrida 13 la que presentó el

mayor porcentaje de recuperación (95%) con 60 °C, 60 min y relación 1:10 g:mL, como variables correspondientes.

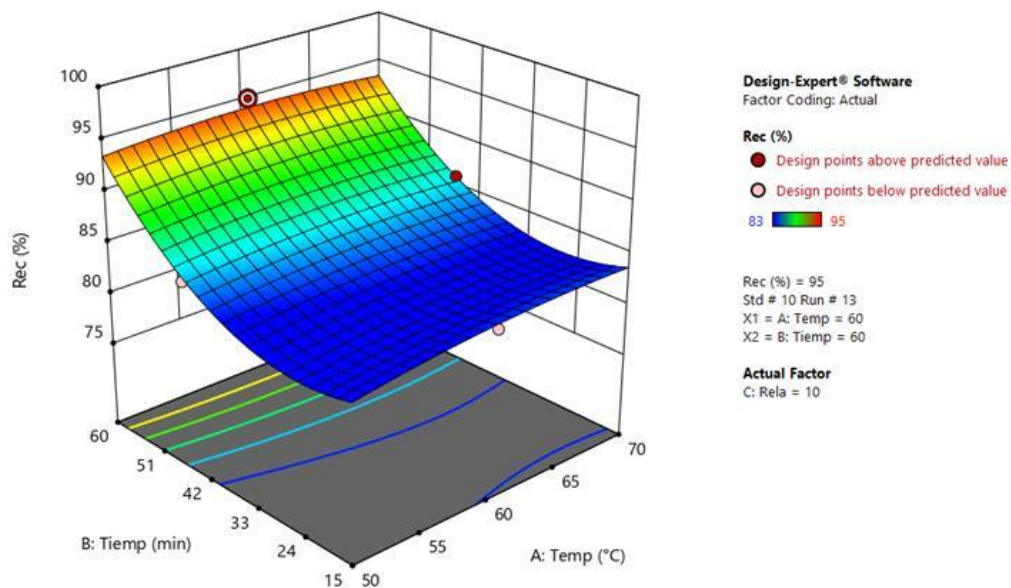


Figura 20. Superficie de respuesta

Como se mencionó previamente en la metodología, para la determinación cualitativa/cuantitativa de los HAPs se empleó el análisis por GC-MS. En la **Figura 21** se enseña la corriente iónica total (TIC-cromatograma) de la mezcla certificada con los 16 HAPs aceptados por la EPA como prioritarios. Cada HAP junto con sus iones diagnósticos, tiempo de retención y área relativa porcentual se listan en la **Tabla 13**.

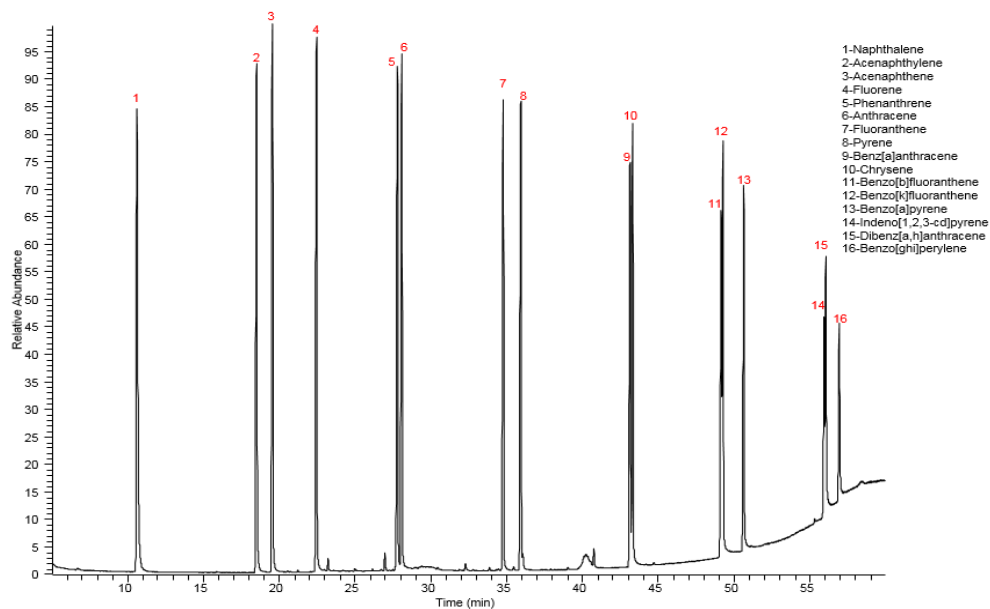


Figura 21. Mezcla certificada de HAPs

Tabla 13. Mezcla certificada de HAPs (Mix # 5)

t_R , min	HAP		%Area	Iones
15.21	Naphthalene	C10H8	8.8	128, 102, 64
24.99	Acenaphthylene	C12H8	8.1	152, 126, 76
26.24	Acenaphthene	C12H10	9.0	154, 153, 152, 76
29.67	Fluorene	C13H10	8.5	166, 165, 83, 81
35.83	Phenanthrene	C14H10	8.1	178, 176, 89, 76
36.16	Anthracene	C14H10	8.4	178, 176, 89, 76
43.83	Fluoranthene	C16H10	7.3	202, 101, 100, 200
45.15	Pyrene	C16H10	7.2	202, 101, 100, 200
53.39	Benz[a]anthracene	C18H12	5.7	228, 226, 114, 113
53.59	Chrysene	C18H12	6.4	228, 226, 113, 114
60.23	Benzo[b]fluoranthene	C20H12	4.6	252, 250, 126, 112
60.36	Benzo[k]fluoranthene	C20H12	5.4	252, 250, 126, 125
61.9	Benzo[a]pyrene	C20H12	6.3	252, 126, 250, 125
69.54	Indeno[1,2,3-cd]pyrene	C22H12	1.8	276, 138, 137, 274
69.8	Dibenz [a. h]anthracene	C22H14	2.5	278, 276, 139, 138
71.51	Benzo[ghi]perylene	C22H12	1.8	276, 138, 137, 274

En la **Tabla 14** se incluye la lista de hidrocarburos lineales que se utilizaron como estándares certificados tanto para calcular los índices de retención (I_R) para los HAPs bajo estudio como para la identificación de otros constituyentes hidrocarbonados presentes en las muestras de $PM_{2.5}$.

Tabla 14. Mezcla certificada de hidrocarburos lineales C_{10} - C_{40}

t_R , min	Tipo de HC	I_R	%Area
5.9	C_{10}	1000	6.02
11.35	C_{12}	1200	7.23
17.57	C_{14}	1400	9.04
23.54	C_{16}	1600	9.39
29.01	C_{18}	1800	10.29
34.01	C_{20}	2000	9.43
38.59	C_{22}	2200	8.15
42.8	C_{24}	2400	6.78
46.7	C_{26}	2600	6.77
50.34	C_{28}	2800	7.28
53.76	C_{30}	3000	9.04
56.97	C_{32}	3200	5.01
60.42	C_{34}	3400	5.56

Los resultados de la determinación de HAPs en las muestras de $PM_{2.5}$ se presentan a continuación. En la **Figura 22** se pone a la vista el cromatograma del extracto obtenido por Soxhlet de la muestra de la estación ciudadela 20 de julio para el día 13/03/2020, en el cual se identificaron nueve HAPs y varios hidrocarburos lineales. Asimismo, en la **Tabla 15** se reportan las concentraciones determinadas para cada HAPs (identificado en la muestra) por gramo de $PM_{2.5}$ teniendo en cuenta volumen de aire. Así como también, la concentración de HAPs total (1.522 ng/m^3).

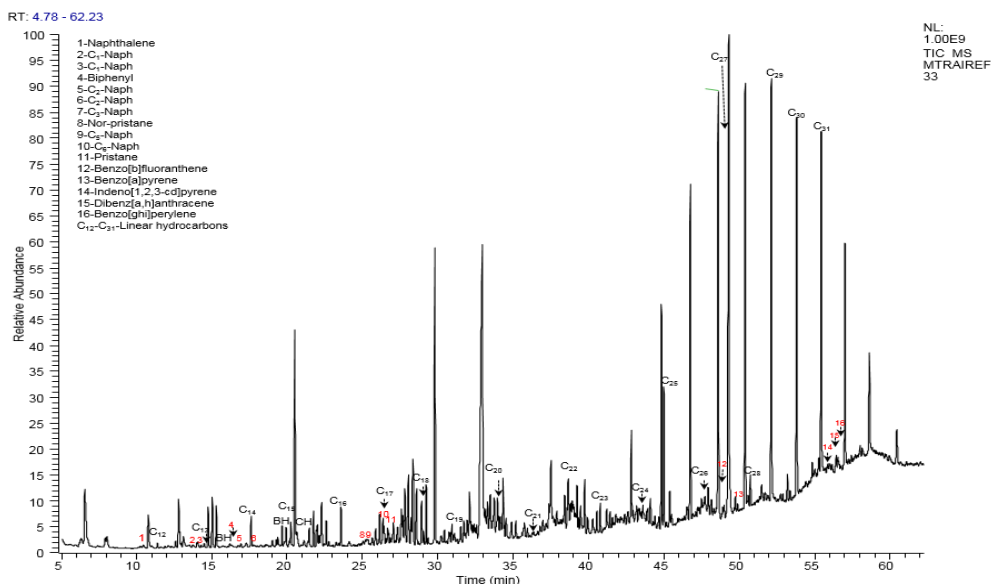


Figura 22. TIC del extracto por Soxhlet de la muestra filtro 33 de la estación Ciudadela 20 de Julio (13/03/2020)

Tabla 15. Concentración de HAPs con base en la cantidad de PM_{2.5} determinado en la muestra filtro 33 de la estación Ciudadela 20 de Julio (13/03/2020)

MTRAIREF33	µg/mL	ng	g PM _{2.5}	µg HAP/g PM _{2.5}	ng/m ³
Naphthalene	0.54	544.2	0.0272	20.01	0.341
β-Methylnaphthalene	0.23	226.5	0.0272	8.33	0.142
α-Methylnaphthalene	0.22	218.9	0.0272	8.05	0.137
1,7-Dimethylnaphthalene	0.48	475.9	0.0272	17.50	0.298
Benzo[b]fluoranthene	0.11	108.6	0.0272	3.99	0.068
Benzo[a]pyrene	0.02	17.1	0.0272	0.63	0.011
Indeno[1,2,3-cd]pyrene	0.33	328.8	0.0272	12.09	0.206
Dibenz [a,h]anthracene	0.23	231.3	0.0272	8.50	0.145
Benzo[ghi]perylene	0.28	278.1	0.0272	10.22	0.174
HAP Total	2.43	2429.3		89.31	1.522

En la **Figura 23** se expone el cromatograma del extracto obtenido por Soxhlet de la muestra de la estación Universidad del Norte para el día 13/03/2020, en el cual se identificaron cuatro HAPs y varios hidrocarburos lineales. De la misma forma, en la **Tabla 16** se incluyen las concentraciones determinadas para cada HAPs (identificado en la muestra) por gramo de PM_{2.5} según el volumen de aire y la concentración de HAPs total

(0.707 ng/m³). Al comparar este último valor con el de la estación Ciudadela 20 de Julio, el contenido de HAP/vln de aire fue aproximadamente la mitad (0.46).

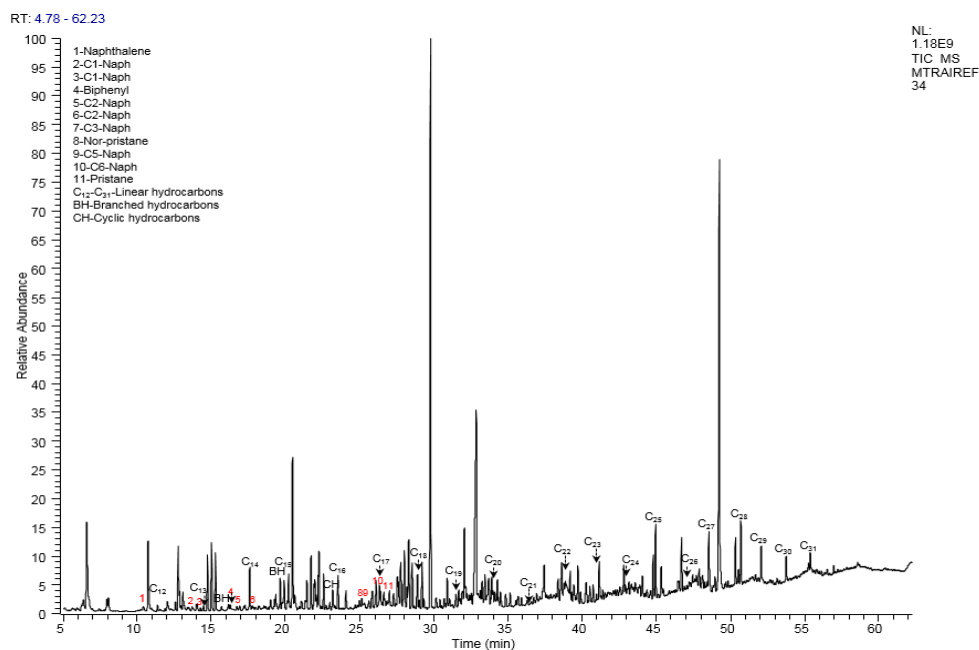


Figura 23. TIC del extracto por Soxhlet de la muestra filtro 34 de la estación Universidad del Norte (13/03/2020)

Tabla 16. Concentración de HAPs con base en la cantidad de PM_{2.5} determinado en la muestra filtro 34 de la estación Universidad del Norte (13/03/2020)

MTRAIREF34	µg/mL	ng	g PM _{2.5}	µg HAP/g PM _{2.5}	ng/m ³
Naphthalene	0.58	579.4	0.0041	141.31	0.377
β-Methylnaphthalene	0.14	139.1	0.0041	33.94	0.090
α-Methylnaphthalene	0.05	48.2	0.0041	11.77	0.031
1,7-Dimethylnaphthalene	0.32	321.0	0.0041	78.29	0.209
HAP Total	1.09	1087.74		265.30	0.707

En la **Figura 24** se enseña el cromatograma del extracto obtenido por Soxhlet de la muestra de la estación Ciudadela 20 de Julio para el día 14/03/2020, en el cual se identificaron cuatro HAPs y varios hidrocarburos lineales. También, la **Tabla 17** contiene las concentraciones determinadas para cada HAPs (identificado en la muestra) por gramo de PM_{2.5} con base en el volumen de aire y la concentración de HAPs total (0.33 ng/m³). Al

comparar este último valor con el del día anterior en la misma estación (Ciudadela 20 de Julio), se observó una disminución significativa (ca. 78 %) en el contenido de HAP/vln de aire.

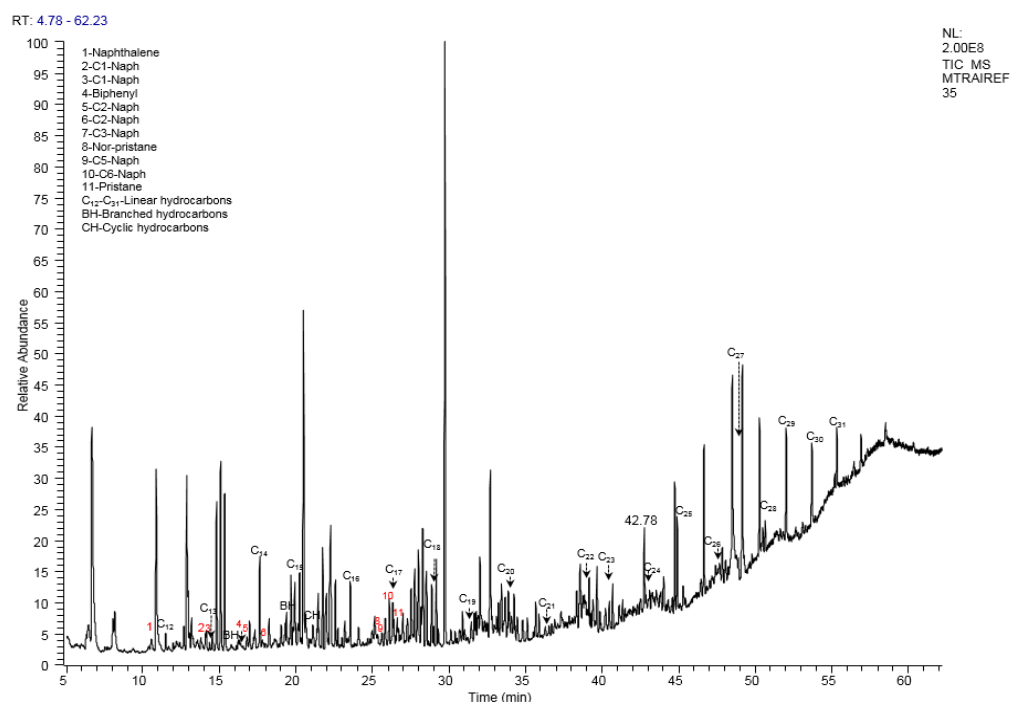


Figura 24. TIC del extracto por Soxhlet de la muestra filtro 35 de la estación Ciudadela 20 de Julio (14/03/2020)

Tabla 17. Concentración de HAPs con base en la cantidad de $PM_{2.5}$ determinado en la muestra filtro 35 de la estación Ciudadela 20 de Julio (14/03/2020)

MTRAIREF35	$\mu\text{g/mL}$	ng	g $PM_{2.5}$	$\mu\text{g HAP/g } PM_{2.5}$	ng/m^3
Naphthalene	0.33	331.1	0.0158	20.95	0.21
β -Methylnaphthalene	0.06	60.3	0.0158	3.82	0.038
α -Methylnaphthalene	0.02	16.6	0.0158	1.05	0.010
1,7-Dimethylnaphthalene	0.12	120.5	0.0158	7.63	0.076
HAP Total	0.53	528.60		33.46	0.33

La **Figura 25** exhibe el cromatograma del extracto obtenido por Soxhlet de la muestra de la estación Universidad del Norte para el día 14/03/2020, en el cual se identificaron cuatro

HAPs y varios hidrocarburos lineales. En la **Tabla 18** detallan las concentraciones determinadas para cada HAPs (identificado en la muestra) por gramo de PM_{2.5} de acuerdo con el volumen de aire y la concentración de HAPs total (0.52 ng/m³).

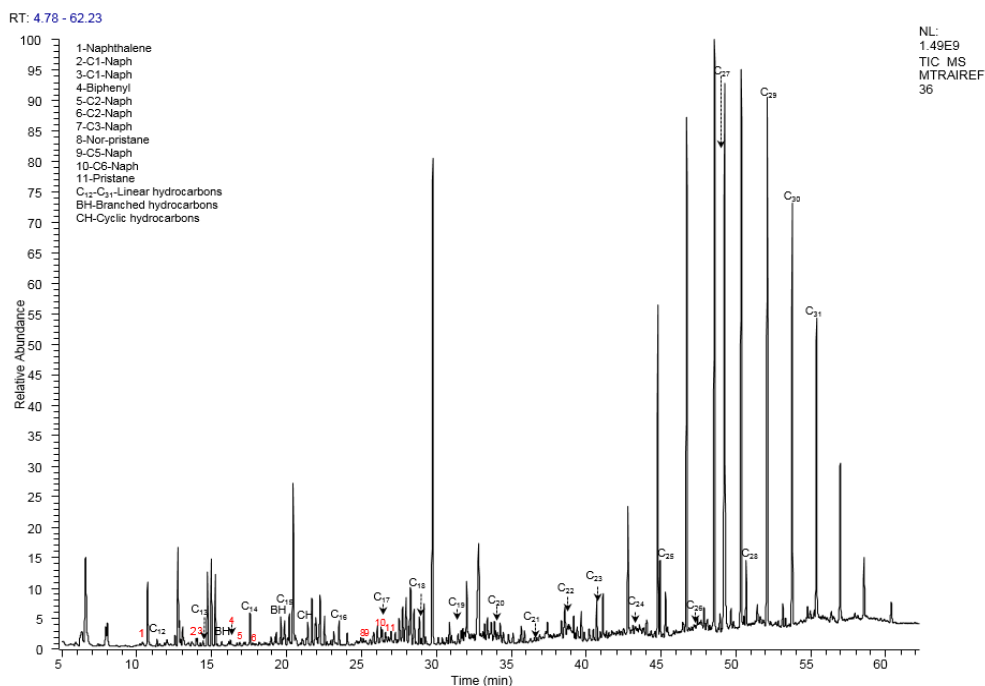


Figura 25. TIC del extracto por Soxhlet de la muestra filtro 36 de la estación Universidad del Norte (14/03/2020)

Tabla 18. Concentración de HAPs con base en la cantidad de PM_{2.5} determinado en la muestra filtro 36 de la estación Universidad del Norte (14/03/2020)

MTRAIREF36	µg/mL	ng	g PM _{2.5}	µg HAP/g PM _{2.5}	ng/m ³
Naphthalene	0.66	660.0	0.0125	52.80	0.40
β-Methylnaphthalene	0.06	60.3	0.0125	4.83	0.04
α-Methylnaphthalene	0.02	16.6	0.0125	1.33	0.01
1,7-Dimethylnaphthalene	0.12	120.5	0.0125	9.64	0.07
HAP Total	0.86	857.50		68.60	0.52

De la misma forma, el cromatograma del extracto obtenido por Soxhlet de la muestra de la estación Ciudadela 20 de Julio para el día 15/03/2020, en el cual se identificaron cuatro HAPs y varios hidrocarburos lineales, se presenta en la **Figura 26**. Adicionalmente, las

concentraciones determinadas para cada HAPs (identificado en la muestra) por gramo de PM_{2.5} basadas en el volumen de aire y la concentración de HAPs total (0.37 ng/m³) se especifican en la **Tabla 19**.

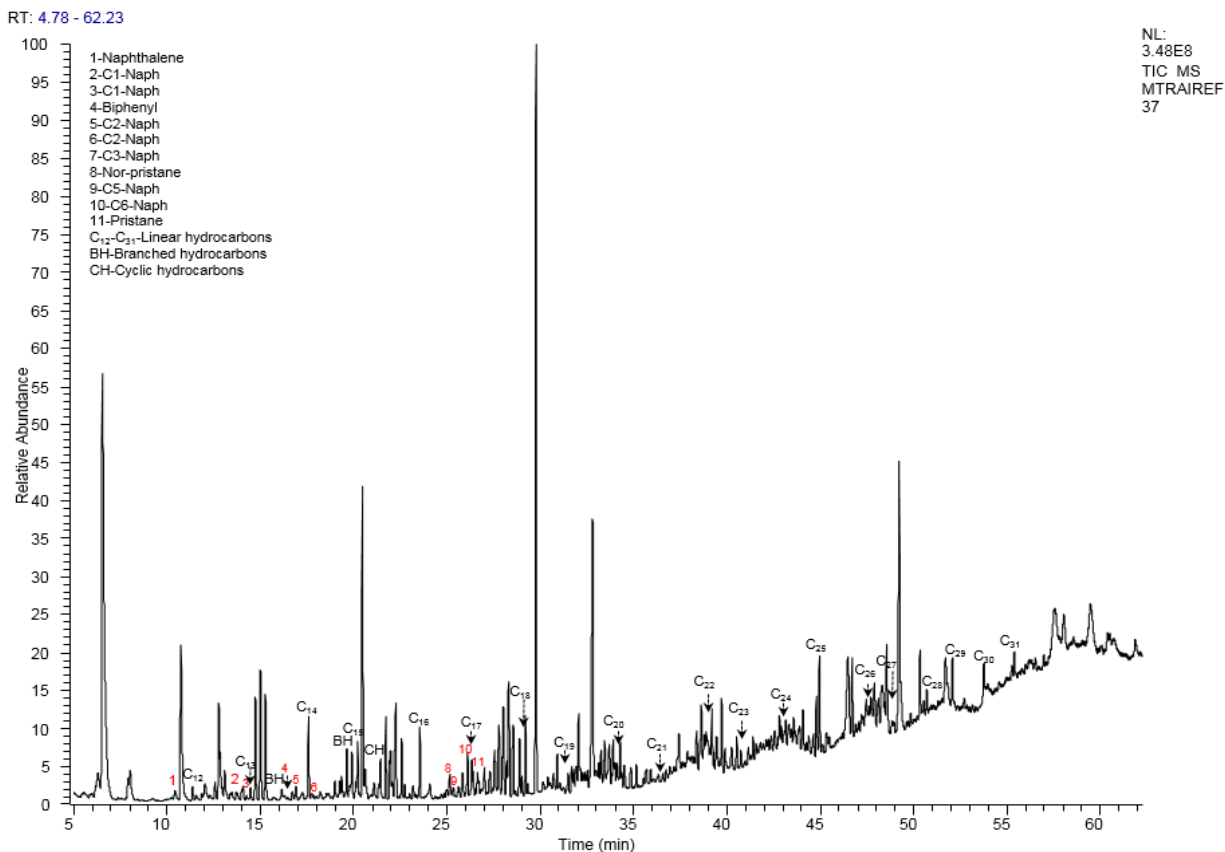


Figura 26. TIC del extracto por Soxhlet de la muestra filtro 37 de la estación Ciudadela 20 de Julio (15/03/2020)

Tabla 19. Concentración de HAPs con base en la cantidad de PM_{2.5} determinado en la muestra filtro 37 de la estación Ciudadela 20 de Julio (15/03/2020)

MTRAIREF37	µg/mL	ng	g PM _{2.5}	µg HAP/g PM _{2.5}	ng/m ³
Naphthalene	0.40	400.2	0.0107	37.40	0.25
β-Methylnaphthalene	0.06	60.3	0.0107	5.64	0.04
α-Methylnaphthalene	0.02	16.6	0.0107	1.56	0.01
1,7-Dimethylnaphthalene	0.12	120.5	0.0107	11.27	0.08
HAP Total	0.60	597.74		55.86	0.37

El último análisis GC-MS de la muestra incluida en este trabajo fue la del filtro 38. Por lo tanto, el cromatograma del extracto obtenido por Soxhlet de la muestra de la estación

Universidad del Norte para el día 15/03/2020, en el cual se identificaron cuatro HAPs y varios hidrocarburos lineales, se muestra en la **Figura 27**. Además, las concentraciones determinadas para cada HAPs (identificado en la muestra) por gramo de PM_{2.5} basadas en el volumen de aire y la concentración de HAPs total (0.26 ng/m³) se puntualizan en la **Tabla 20**.

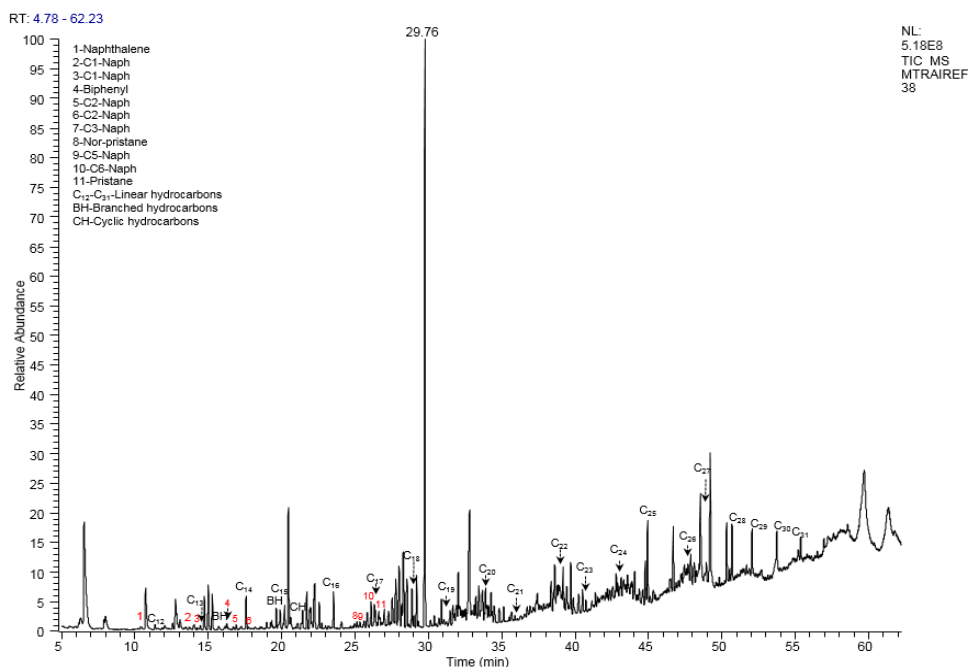


Figura 27. TIC del extracto por Soxhlet de la muestra filtro 38 de la estación Universidad del Norte (15/03/2020)

Tabla 20. Concentración de HAPs con base en la cantidad de PM_{2.5} determinado en la muestra filtro 38 de la estación Universidad del Norte (15/03/2020)

MTRAIREF38	µg/mL	ng	g PM _{2.5}	µg HAP/g PM _{2.5}	ng/m ³
Naphthalene	0.21	211.5	0.0084	25.18	0.13
β-Methylnaphthalene	0.06	60.3	0.0084	7.18	0.038
α-Methylnaphthalene	0.02	16.6	0.0084	1.98	0.011
1,7-Dimethylnaphthalene	0.12	120.5	0.0084	14.35	0.076
HAP Total	0.41	409.03		48.69	0.26

Es importante mencionar que cuatro HAPs se identificaron en todas las muestras analizadas por GC-MS, variando sólo sus concentraciones entre días y estaciones. Estos HAPs fueron: naftaleno, β -metilnaftaleno, α -metilnaftaleno y 1,7-dimetilnaftaleno. De estos, recientemente el naftaleno está llamando la atención porque a pesar de que es una molécula frecuente y proveniente de diferentes fuentes era considerado no cancerígeno, aparentemente porque sus concentraciones en aire estaban por debajo de niveles máximos permisibles de diversos comités del mundo como la Conferencia Americana de Higienistas Industriales Gubernamentales (ACGIH) y el MAK de la Deutsche Forschungsgemeinschaft. No obstante, a partir del 2000 el Programa de Toxicología de los Estados Unidos encontró evidencias sobre el potencial carcinogénico de este HAP en ratas y fue, entonces reclasificado como un posible cancerígeno para los seres humanos (Preuss, Angerer, & Drexler, 2003). Adicionalmente, otros autores como Honda et al. (1990) evidenciaron toxicidad pulmonar en ratones por naftaleno y sus alquilnaftalenos (e.g., 2-metilnaftaleno, isopropilnaftaleno) después de 24 h de administrado, en concentraciones de 200-400 mg/kg. Asimismo, el trabajo de Grifo et al. 1981 demostró que ratones administrados con diferentes concentraciones de 2-metilnaftaleno, luego de 24 h, presentaron necrosis bronquiolar no ciliada (a 200 mg/kg) y daños severos al tracto respiratorio superior (> 800 mg/kg).

Al comparar los resultados de las seis muestras con los reportes de la literatura científica consultados, basados en el contenido de $PM_{2.5}$ (2.0-24.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) y HAPs (0.26-1.52 ng/m^3), se encontró que fueron inferiores a los reportados por González Cárdenas et al. (2020), Hall et al. (2012), Sahu et al. (2020) y Sammaritano (2018) (ver **Tabla 1**). Al mismo tiempo, los

datos se compararon con el reporte de calidad del aire de Barranquilla del primer trimestre (enero-marzo) 2020.

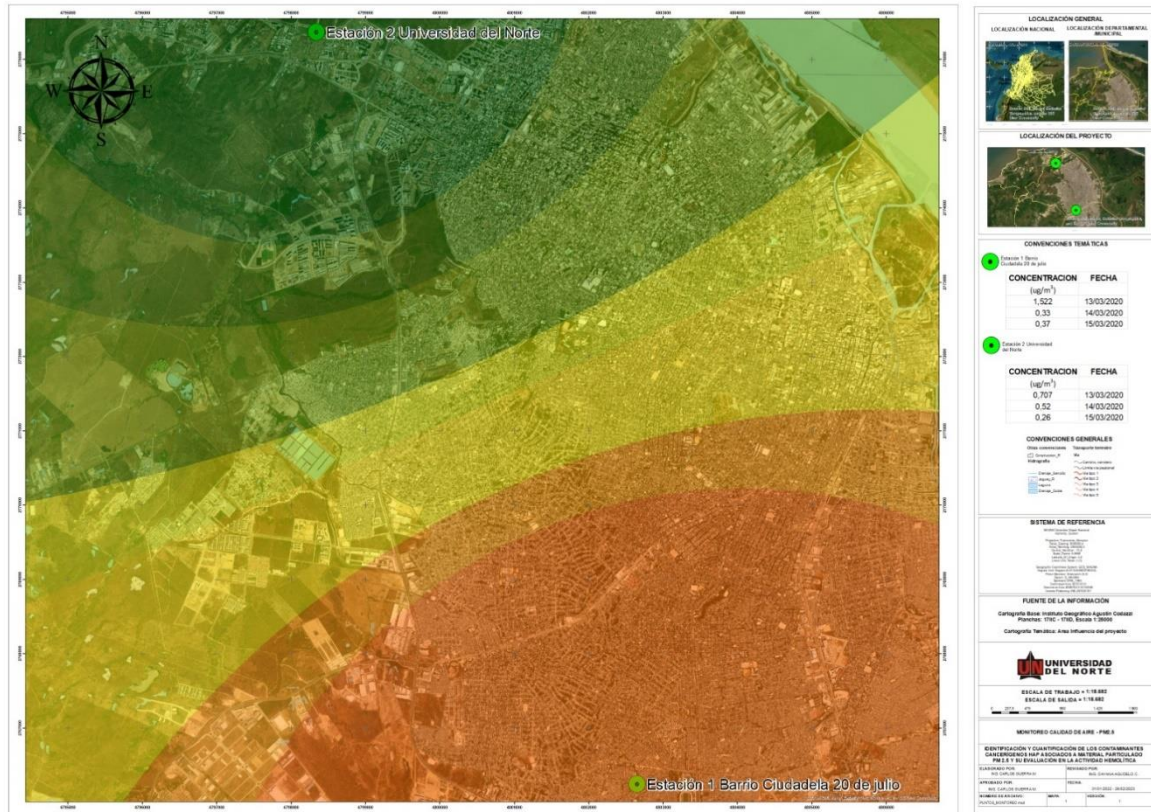


Figura 28. Mapa de distribución/concentración de los HAP con base en las estaciones Ciudadela 20 de Julio y Universidad del norte

Según el reporte, el valor promedio diario fue de $15.54 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para la estación Policía (cercana a la Ciudadela 20 de Julio) y $13.76 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para la estación móvil (cercana a la Universidad del Norte). En ese sentido, el valor promedio ($15.09 \mu\text{g}/\text{m}^3$) para la estación Ciudadela 20 de Julio fue muy cercana a la de la estación Policía, pero la de estación Universidad del Norte ($7.38 \mu\text{g}/\text{m}^3$) fue inferior (ca. 0.54) a la de la estación móvil.

Finalmente, la evaluación de los posibles daños biológicos por parte de extractos con HAPs sobre eritrocitos humanos se reportan en la **Tabla 21**. En ella se reportan los porcentajes de inhibición calculados para cuatro extractos a partir de las muestras filtros 33-36 junto con los controles positivo (SDS) y negativo. Así, se encontró que ninguna de las muestras

evaluadas presentaron hemólisis a la máxima concentración evaluada (1000 ppm); i.e., ninguna se acercó al máximo valor (100%) presentado por el SDS.

Tabla 1. Inhibición determinada de los extractos obtenidos de los PM_{2.5} sobre eritrocitos humanos

Porcentaje de inhibición, %						
Muestras	M33	M34	M35	M36	C⁻	C⁺
1000 ppm	6.1 ± 0.8	2.9 ± 0.2	3.7 ± 0.4	3.0 ± 0.4	0 ± 0	100.00 ± 0.03

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

* Mediante el análisis de superficie de respuesta se pudieron establecer las mejores condiciones (t: 60 min, T: 60 °C y rel. sól:ste: 1:10) para la extracción de HAPs con ultrasonido a partir del material PM_{2.5}, con una recuperación porcentual del 95%.

* La determinación de PM_{2.5} en los puntos estacionales seleccionados (Ciudadela 20 de Julio y Universidad del Norte) no sobre pasaron el máximo permisible con base en la resolución 2254 de 2017. Los rangos fueron 9.3-24.9 µg/m³ (Ciudadela 20 de Julio) y 2.0-16.1 µg/m³ (Universidad del Norte).

* En los extractos analizados por GC-MS de las muestras PM_{2.5} fueron recurrentes 4 HAPs: naftaleno, β-metilnaftaleno, α-metilnaftaleno y 1,7-dimetilnaftaleno. Mientras que, en otra muestra (estación Ciudadela 20 de Julio, 13/03/2020) se encontraron cinco HAPs adicionales: benzo[*b*]fluoranteno, benzo[*a*]pireno, indeno[1,2,3-*cd*]pireno, dibenz[*a,h*]antraceno y benzo[*ghi*]perileno. Es importante no subestimar la presencia de naftaleno y sus derivados alquílicos en el material PM_{2.5}, porque aparecen en concentraciones significativas, y se conoce el potencial tóxico de los mismos sobre el ser humano.

* Finalmente, a las concentraciones en las cuales se encontraron los HAPs en las muestras PM_{2.5} no causaron hemólisis *in vitro* en los eritrocitos humanos.

A partir de este trabajo se recomienda:

* Realizar nuevos monitoreos en la ciudad para identificar/confirmar la presencia de otros HAPs/PM_{2.5} asociados al tráfico vehicular, la operatividad regular de las industrias en

condiciones post-pandemia y periodos de sequía/lluvia, garantizando así considerar la variación espacial y temporal de los resultados.

* Ampliar la cobertura actual de la estaciones del SVCA a mínimo cinco con el fin de tener una mejor distribución espacial en diversas áreas, incluyendo las portuarias (en la partes oriental y sur de la ciudad); así como en las zonas residenciales de alto flujo vehicular de la parte central y sur, donde convergen las principales vías como las avenidas murillo, circunvalar, cordialidad y calle 30.

* Extender los monitoreos de HAPs/PM_{2.5} a otros centros urbanos/municipios de la Región Caribe Colombiana debido a que existe poca información relacionada con esta temática.

* Aplicar herramientas de modelación como AERMOD, CALPUFF, Emission View, Austal View, que permitan evaluar/determinar las fuentes, modelar la dispersión de gases/partículas suspendidas y su afectación en la salud de las comunidades vecinas.

9. REFERENCIAS

- Agudelo-Castañeda, D. M., & Teixeira, E. C. (2014). Seasonal changes, identification and source apportionment of PAH in PM_{1.0}. *Atmospheric Environment*, 96, 186–200. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.07.030>
- Amador-Muñoz, O., Villalobos-Pietrini, R., Agapito-Nadales, M. C., Munive-Colín, Z., Hernández-Mena, L., Sánchez-Sandoval, M., Gómez-Arroyo, S., Bravo-Cabrera, J. L., & Guzmán-Rincón, J. (2010). Solvent extracted organic matter and polycyclic aromatic hydrocarbons distributed in size-segregated airborne particles in a zone of México City: seasonal behavior and human exposure. *Atmospheric Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.07.012>
- Angelopoulou, R., & Kyriazoglou, M. (2002). Techniques for the detection of fragmented DNA. *Archives of Hellenic Medicine*.
- Atkinson, R. W., Fuller, G. W., Anderson, H. R., Harrison, R. M., & Armstrong, B. (2010). Urban ambient particle metrics and health: A time-series analysis. *Epidemiology*. <https://doi.org/10.1097/EDE.0b013e3181debc88>
- Balakrishnan, K., Ghosh, S., Ganguli, B., Sambandam, S., Bruce, N., Barnes, D. F., & Smith, K. R. (2013). State and national household concentrations of PM_{2.5} from solid cookfuel use: Results from measurements and modeling in India for estimation of the global burden of disease. *Environmental Health: A Global Access Science Source*, 12(1). <https://doi.org/10.1186/1476-069X-12-77>
- Bermejo Rolong, G. T., & Romo Padilla, A. M. (2021). Evaluación del aporte de PM₁₀ y PM_{2.5} en la calidad del aire de barranquilla modelando diferentes escenarios de quema en el vía parque isla de salamanca. Barranquilla.

- Biochimica et biophysica acta. (1969). In *BBA - Protein Structure* (Vol. 194, Issue 2).
[https://doi.org/10.1016/0005-2795\(69\)90136-6](https://doi.org/10.1016/0005-2795(69)90136-6)
- Bonilla Mejía, L. (2010). El sector industrial de Barranquilla en el siglo XXI: ¿Cambian finalmente las tendencias? . Cartagena de Indias: Banco de la República – Sucursal Cartagena.
- Chen, C., Xia, Z., Wu, M., Zhang, Q., Wang, T., Wang, L., & Yang, H. (2017). Concentrations, Source Identification, and Lung Cancer Risk Associated with Springtime PM_{2.5}-Bound Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Nanjing, China. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*.
<https://doi.org/10.1007/s00244-017-0435-4>
- Cook, P. R., Brazell, I. A., & Jost, E. (1976). Characterization of nuclear structures containing superhelical DNA. *Journal of Cell Science*.
- Cvetković, A., Jovašević-Stojanović, M., Marković, D., & Ristovski, Z. (2015). Concentration and source identification of polycyclic aromatic hydrocarbons in the metropolitan area of Belgrade, Serbia. *Atmospheric Environment*.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.04.034>
- de Castro, L., & Priego Capote, F. (2007). *Analytical Applications of Ultrasound*. Elsevier Science.
- Environmental Protection Agency. (2007). *epa.gov*. Obtenido de <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-12/documents/3550c.pdf>
- Environmental Protection Agency. (11 de Agosto de 1993). Obtenido de <https://www3.epa.gov>: <https://www3.epa.gov/airtoxics/gp/genprovf.pdf>
- Environmental Protection Agency. (www.epa.gov de diciembre de 1996). *SW-846 Test Method 3540C: Soxhlet Extraction*. Obtenido de <https://www.epa.gov/hw-sw846/sw-846-test-method-3540c-soxhlet-extraction>
- Del Águila López., C. I. (2018). Hidrocarburos aromáticos polinucleares (HAPs) en material particulado de la ciudad de Lima. In *Universidad Nacional Mayor de San*

Marcos.

- Duarte González, A. L. (2020). Evaluación espaciotemporal de contaminantes atmosféricos en la ciudad de barranquilla. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 1.
- Echeverri Londoño, C., & Maya Vasco, G. (2008). Relación entre las partículas finas (PM_{2.5}) y respirables (PM₁₀) en la ciudad de Medellín. *Revista de Ingenierías: Universidad de Medellín*.
- EPA. (1993). *Environmental Protection Agency 40 CFR Parts 60, 61, and 63*.
<https://www3.epa.gov/airtoxics/car/carpre91.pdf>
- EPA. (2022). *Conceptos básicos sobre el material particulado*.
<https://espanol.epa.gov/espanol/conceptos-basicos-sobre-el-material-particulado-pm-por-sus-siglas-en-ingles#PM>
- Establecimiento Público Ambiental Barranquilla Verde. (2020). Reporte primer trimestre de calidad de aire. Barranquilla.
- Esworthy, R. (2014). Air quality: EPA'S 2013 changes to the particulate matter (PM) standard. In *Air Quality Observation in the U.S.: Systems, Needs, and Standards*.
- Fassy, J., Tsalkitzi, K., Goncalves-Maia, M., & Braud, V. M. (2017). A real-time cytotoxicity assay as an alternative to the standard chromium-51 release assay for measurement of human NK and T cell cytotoxic activity. *Current Protocols in Immunology*. <https://doi.org/10.1002/cpim.28>
- Fernández-Amado, M., Prieto-Blanco, M. C., López-Mahía, P., Muniategui-Lorenzo, S., & Prada-Rodríguez, D. (2016). Strengths and weaknesses of in-tube solid-phase microextraction: A scoping review. In *Analytica Chimica Acta* (Vol. 906).
<https://doi.org/10.1016/j.aca.2015.12.007>

- Gallegos-Hernandez, G. F. (2018). Ensayos colorimétricos para la detección de citotoxicidad. *Vidsupra*.
- Gao, Y., & Ji, H. (2018). Microscopic morphology and seasonal variation of health effect arising from heavy metals in PM_{2.5} and PM₁₀: one-year measurement in a densely populated area of urban Beijing. *Atmospheric Research*, 212, 213–226. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2018.04.027>
- Gillespie, P., Tajuba, J., Lippmann, M., Chen, L. C., & Veronesi, B. (2013). Particulate matter neurotoxicity in culture is size-dependent. *NeuroToxicology*. <https://doi.org/10.1016/j.neuro.2011.10.006>
- González Cárdenas, J. A., González Santiago, O., Montañó Soto, M. T., & Garza Ocañas, Lourdes Garza Ulloa, H. (2020). Hidrocarburos aromáticos. *Bienestar y Salud Social*. https://www.researchgate.net/profile/Pedro-Cantu-Martinez/publication/343700395_Bienestar_y_Salud_Social/links/5f3b088e92851cd302013121/Bienestar-y-Salud-Social.pdf#page=80
- Grifo, K. A., Johnson, C. B., Breger, R. K., & Ronald, F. B. (1981). Pulmonary toxicity, hepatic, and extrahepatic metabolism of 2-methylnaphthalene in mice. *Toxicology and Applied Pharmacology*.
- Hall, D., Wu, C. Y., Hsu, Y. M., Stormer, J., Engling, G., Capeto, K., Wang, J., Brown, S., Li, H. W., & Yu, K. M. (2012). PAHs, carbonyls, VOCs and PM_{2.5} emission factors for pre-harvest burning of Florida sugarcane. *Atmospheric Environment*, 55, 164–172. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.03.034>
- Honda, T., Kiyozumi, M., & Kojima, S. (1990). Alkylnaphthalene. XI. Pulmonary toxicity of naphthalene, 2-methylnaphthalene, and isopropylnaphthalenes in mice. *Chemical*

and Pharmaceutical Bulletin.

- Hu, W., Downward, G. S., Reiss, B., Xu, J., Bassig, B. A., Hosgood, H. D., Zhang, L., Seow, W. J., Wu, G., Chapman, R. S., Tian, L., Wei, F., Vermeulen, R., & Lan, Q. (2014). Personal and indoor PM_{2.5} exposure from burning solid fuels in vented and unvented stoves in a rural region of China with a high incidence of lung cancer. *Environmental Science and Technology*, 48(15). <https://doi.org/10.1021/es502201s>
- Hystad, P., Larkin, A., Rangarajan, S., AlHabib, K. F., Avezum, Á., Calik, K. B. T., Chifamba, J., Dans, A., Diaz, R., du Plessis, J. L., Gupta, R., Iqbal, R., Khatib, R., Kelishadi, R., Lanan, F., Liu, Z., Lopez-Jaramillo, P., Nair, S., Poirier, P., ... Brauer, M. (2020). Associations of outdoor fine particulate air pollution and cardiovascular disease in 157 436 individuals from 21 high-income, middle-income, and low-income countries (PURE): a prospective cohort study. *The Lancet Planetary Health*, 4(6). [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(20\)30103-0](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(20)30103-0)
- IARC. (2013). Air pollution and cancer, IARC scientific publications NO. 161. In *Air pollution and cancer, IARC scientific publications NO. 161* (Issue 104).
- Jaime Perez, J. C., & Gomez Almaguer, D. (2012). Hematologia, la sangre y sus enfermedades. Monterrey Mexico: Mc Graw-Hill.
- Jamhari, A. A., Sahani, M., Latif, M. T., Chan, K. M., Tan, H. S., Khan, M. F., & Mohd Tahir, N. (2014). Concentration and source identification of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in PM₁₀ of urban, industrial and semi-urban areas in Malaysia. *Atmospheric Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.12.019>
- Juda-Rezler, K., Reizer, M., & Oudinet, J. P. (2011). Determination and analysis of PM₁₀ source apportionment during episodes of air pollution in Central Eastern European

- urban areas: The case of wintertime 2006. *Atmospheric Environment*.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.08.020>
- Kim, J., & Hwang, I. (2016). The Characterization of PM, PM 10 , and PM 2.5 from Stationary Sources . *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 32(6).
<https://doi.org/10.5572/kosae.2016.32.6.603>
- Liu, Y., Yu, Y., Liu, M., Lu, M., Ge, R., Li, S., Liu, X., Dong, W., & Qadeer, A. (2018). Characterization and source identification of PM2.5-bound polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in different seasons from Shanghai, China. *Science of the Total Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.049>
- McCracken, J. P., Schwartz, J., Diaz, A., Bruce, N., & Smith, K. R. (2013). Longitudinal Relationship between Personal CO and Personal PM2.5 among Women Cooking with Woodfired Cookstoves in Guatemala. *PLoS ONE*, 8(2).
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0055670>
- Menya, D. (2014). Household air pollution and its resultant health effects in rural Kenyan women. *American Journal of Tropical Medicine and Hygiene*, 91(5).
- Ministerio de Ambiente, V. y D. T. (2010). *MANUAL DE OPERACION DE SISTEMAS DE VIGILANCIA DE LA CALIDAD DEL AIRE*.
- MINISTERIO DE AMBIENTE VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. (2007). *PROTOCOLO PARA EL MONITOREO Y SEGUIMIENTO DE LA CALIDAD DEL AIRE (K-2 INGENI)*.
https://www.cortolima.gov.co/sites/default/files/images/stories/calidadAire/protocolo_monitoreo_calidad_aire.pdf
- Monroy, C. M., Cortés, A. C., Sicard, D. M., & De Restrepo, H. G. (2005). Citotoxicidad y

genotoxicidad en células humanas expuestas in vitro a glifosato. *Biomédica*.

<https://doi.org/10.7705/biomedica.v25i3.1358>

- Mukhopadhyay, R., Sambandam, S., Pillarisetti, A., Jack, D., Mukhopadhyay, K., Balakrishnan, K., Vaswani, M., Bates, M. N., Kinney, P. L., Arora, N., & Smith, K. R. (2012). Cooking practices, air quality, and the acceptability of advanced cookstoves in Haryana, India: an exploratory study to inform large-scale interventions. *Global Health Action*, 5. <https://doi.org/10.3402/gha.v5i0.19016>
- Murray, C., Aravkin, A., Zheng, P., Abbafati, C., Abbas, K., Abbasi-Kangevari, M., Abd-Allah, F., Abdelalim, A., Abdollahi, M., Abdollahpour, I., Abegaz, K., Abolhassani, H., Aboyans, V., Abreu, L., Abrigo, M., Abualhasan, A., Abu-Raddad, L., Abushouk, A., Adabi, M., & Lim, S. (2020). Global burden of 87 risk factors in 204 countries and territories, 1990–2019: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2019. *The Lancet*, 396(10258).
- N, P., S, S., S, S., G, R., K, B., & K, S. (2019). Personal exposures to polycyclic aromatic hydrocarbons and biological monitoring among rural women cooking with different fuels in India. *Environmental Epidemiology*, 3. <https://doi.org/10.1097/01.ee9.0000609488.16985.75>
- Ñanco Ñanco, F. E. (2018). *IDENTIFICACIÓN DE HIDROCARBUROS AROMATICOS POLICICLICOS EN EL MATERIAL PARTICULADO DE LA ZONA HUALPEN-TALCAHUANO*. <https://hdl.handle.net/11673/46240>
- Núñez Blanco, P. Y. (2019). Estimación de fuentes de material particulado atmosférico (PM10 y PM2.5) en la ciudad de Barranquilla, Colombia. *Universidad de La Costa*.
- Nutrición, A. española de seguridad alimentaria y. (2017). *Hidrocarburos aromáticos*

policíclicos.

<https://www.aesan.gob.es/AECOSAN/web/laboratorios/subdetalle/hidrocarburos.htm>

Parra, A. Q., Vargas, M. J. Q., Vargas, L. A. Q., & Manzano, S. T. (2017). TOXICIDAD DEL AIRE DE LA CIUDAD DE VILLA DEL ROSARIO EN MUESTRAS DE MATERIAL PARTICULADO-FRACCIÓN RESPIRABLE PM 2.5. *REVISTA COLOMBIANA DE TECNOLOGIAS DE AVANZADA (RCTA)*, 2(26).

<https://doi.org/10.24054/16927257.v26.n26.2015.2382>

Pérez-Cardenas, J. E. (2017). La Calidad Del Aire En Colombia: Un Problema De Salud Pública: Un Problema De Todos. *Biosalud*. <https://doi.org/10.17151/biosa.2017.16.2.1>

Prakash Maran, J., Manikandan, S., Thirugnanasambandham, K., Vigna Nivetha, C., & Dinesh, R. (2013). Box-Behnken design based statistical modeling for ultrasound-assisted extraction of corn silk polysaccharide. *Carbohydrate Polymers*.

<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2012.09.020>

Preuss, R., Angerer, j., & Drexler, H. (2003). Naphthalene—an environmental and occupational toxicant. *International Archives of Occupational and Environmental Health*.

Quijano Parra, A., & Meléndez Gélvez, I. (2014). Identificación de hidrocarburos aromáticos policíclicos (haps) en el aire de Cúcuta-Colombia: Efecto gen tóxico. *Revista EIA*. <https://doi.org/10.24050/reia.v11i21.621>

Rogalsky DK, Mendola P, Metts TA, M. W. I. (2014). Household air pollution in the United States. *Environmental Health Perspectives*, 122(8).

Rojas, N., & Galvis, B. (2005). Relación entre PM 2.5 y PM 10 en la ciudad de Bogotá. *Quality*.

- Sahu, S. K., Chen, L., Liu, S., Ding, D., & Xing, J. (2020). The impact of aerosol direct radiative effects on PM_{2.5}-related health risk in Northern Hemisphere during 2013–2017. *Chemosphere*, 254, 126832. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126832>
- Sammaritano, M. L. A. (2018). *Biomonitoreo atmosférico en la provincia de San Juan: caracterización y composición de material particulado atmosférico (HAPS y metales pesados)*. <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/93320>
- Solomon, P. A., Geller, M. D., Shah, P., & Sioutas, C. (2001). Development and evaluation of a continuous coarse (PM₁₀-PM_{2.5}) particle monitor. *Journal of the Air and Waste Management Association*. <https://doi.org/10.1080/10473289.2001.10464360>
- Srimuruganandam, B., & Shiva Nagendra, S. M. (2012). Source characterization of PM₁₀ and PM_{2.5} mass using a chemical mass balance model at urban roadside. *Science of the Total Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.05.082>
- Suárez, V. D., & Pérez, C. P. (2006). Contaminación por material particulado en Quito y caracterización química de las muestras. *ActaNova*.
- World Health Organization. (2018). *Nueve de cada diez personas de todo el mundo respiran aire contaminado*. <https://www.who.int/es/news-room/detail/02-05-2018-9-out-of-10-people-worldwide-breathe-polluted-air-but-more-countries-are-taking-action>
- World Health Organization. (2022). *Air pollution data portal*. <https://www.who.int/data/gho/data/themes/air-pollution/ambient-air-pollution>
- Yang, S., Ündar, A., & Zahn, J. D. (2005). Blood plasma separation in microfluidic channels using flow rate control. *ASAIJ Journal*, 51(5). <https://doi.org/10.1097/01.mat.0000178962.69695.b0>
- Yue, H., Yun, Y., Gao, R., Li, G., & Sang, N. (2015). Winter Polycyclic Aromatic

Hydrocarbon-Bound Particulate Matter from Peri-urban North China Promotes Lung Cancer Cell Metastasis. *Environmental Science and Technology*.

<https://doi.org/10.1021/es506280c>

Zuluaga Quintero, M., Valencia Ruiz, A. M., & Ortiz Trujillo, I. C. (2009). Efecto genotóxico y mutagénico de contaminantes atmosféricos. *Med. U.P.B.*

10. ANEXOS

Muestreo

Se estableció una guía interna para iniciar la etapa de muestreo el cual se describe por la siguiente síntesis. Teniendo un intervalo de cuánto de tiempo se tardó en ir a los puntos de monitoreo, verificación del estado de los equipos, agregar y retirar muestras, operación del equipo, cadena de custodia de las muestras al laboratorio, verificación de los equipos en el laboratorio, análisis de las muestras en el laboratorio, registro de los datos. Para la identificación de cada muestra se agrega una identificación siendo para estación 1 el primer día E1D1 para la misma estación el segundo día E1D2, igualmente para la estación dos. Teniendo un total de 15 días para cada estación de monitoreo.

Tabla A1. Códigos de identificación muestras

Estación	Estación
1(Ciudadela)	2(Universidad)
E1D1	E2D1
E1D2	E2D2
E1D3	E2D3
E1D4	E2D4
E1D5	E2D5
E1D6	E2D6
E1D7	E2D7
E1D8	E2D8
E1D9	E2D9
E1D10	E2D10
E1D11	E2D11
E1D12	E2D12

E1D13	E2D13
E1D14	E2D14
E1D15	E2D15

Con la información se procede a diligenciar un formato similar al observado en la Tabla A2 para la cadena de custodia el cual consiste en diligenciar un formato diseñado para el registro de las observaciones.

Tabla 2. Formato de información para cadena de custodia de las muestras

ID	Nombre punto	Fecha	Hora
E1D1	Estación ciudadela	26-02-2020	1130 am

Procesamiento datos concentración PM_{2.5}

Para el procesamiento de datos se realiza una tabla de Excel donde se registra

- ✓ la fecha del monitoreo por días además del valor de la temperatura en grados (K) que se le agrega 273.15 a la temperatura en Celsius y presión (mbar).
- ✓ además, se agrega en wi el valor de la masa del filtro y en wf la masa final de la masa del filtro.
- ✓ Luego en tiempo de muestreo se registra el tiempo transcurrido que debe oscilar entre 23 y 25 h, en el flujo se registra el valor que muestra el equipo en carta flujo
- ✓ El flujo total es el promedio de los flujos
- ✓ El flujo estándar es el resultado de la multiplicación del flujo total por la presión entre la temperatura
- ✓ Volumen total es igual al flujo total por el tiempo de muestreo por un factor de conversión con valor de 60
- ✓ Por último, el valor de la concentración es igual a peso final menos el inicial por un factor de conversión de 1000000 entre el volumen total

Tabla 3. Eficiencia antraceno 250 ppm

Absorbancia	Eficiencia		Ensayo	Solvente	Resultado	
1.201	87.6769359		ensayo 1		2.65683911	desv estándar
1.053				Hexano	85.7982669	promedio
1.194	83.919598		ensayo 2		7.05879404	varianza
1.002						
1.223	72.2812756		ensayo 1		1.25507872	desv estándar
0.884				Acetonitrilo	73.1687502	promedio
1.245	74.0562249		ensayo 2		1.57522259	varianza
0.922						
1.287	74.1258741		ensayo 1		1.65143453	desv estándar
0.954				Etanol	72.9581336	promedio
1.145	71.790393		ensayo 2		2.72723601	varianza
0.822						
1.187	74.4734625		ensayo 1		3.93516631	desv estándar
0.884				diclorometano	71.6908797	promedio
1.145	68.9082969		ensayo 2		15.4855339	varianza
0.789						

```

> shapiro.test(historial$estacion.1)

Shapiro-wilk normality test

data: historial$estacion.1
W = 0.97646, p-value = 0.8806

> ajb.norm.test(historial$estacion.1)

Adjusted Jarque-Bera test for normality

data: historial$estacion.1
AJB = 0.22694, p-value = 0.9

> frosini.norm.test(historial$estacion.1)

Frosini test for normality

data: historial$estacion.1
B = 0.14473, p-value = 0.743

> geary.norm.test(historial$estacion.1)

Geary test for normality

data: historial$estacion.1
d = 0.80156, p-value = 0.5745

> hegazy1.norm.test(historial$estacion.1)

Hegazy-Green test for normality

data: historial$estacion.1
T = 0.15573, p-value = 0.675

> spiegelhalter.norm.test(historial$estacion.1)

Spiegelhalter test for normality

data: historial$estacion.1
T = 1.2518, p-value = 0.701

> wb.norm.test(historial$estacion.1)

Weisberg-Bingham test for normality

data: historial$estacion.1
WB = 0.9758, p-value = 0.795

> kurtosis.norm.test(historial$estacion.1)

Kurtosis test for normality

data: historial$estacion.1
T = 2.6723, p-value = 0.73

> skewness.norm.test(historial$estacion.1)

Skewness test for normality

data: historial$estacion.1
T = 0.22375, p-value = 0.6195

> jb.norm.test(historial$estacion.1)

Jarque-Bera test for normality

data: historial$estacion.1
JB = 0.25635, p-value = 0.879

> hegazy2.norm.test(historial$estacion.1)

Hegazy-Green test for normality

data: historial$estacion.1
T = 0.040828, p-value = 0.7125

```

Ilustración A1. Test Normalidad Estación 1

```

> shapiro.test(historical$estacion.2)
      Shapiro-Wilk normality test
data:  historical$estacion.2
W = 0.94474, p-value = 0.2941
> ajb.norm.test(historical$estacion.2)
      Adjusted Jarque-Bera test for normality
data:  historical$estacion.2
AJB = 1.0489, p-value = 0.4965
> frosini.norm.test(historical$estacion.2)
      Frosini test for normality
data:  historical$estacion.2
B = 0.18552, p-value = 0.425
> geary.norm.test(historical$estacion.2)
      Geary test for normality
data:  historical$estacion.2
d = 0.84476, p-value = 0.2225
> hegazy1.norm.test(historical$estacion.2)
      Hegazy-Green test for normality
data:  historical$estacion.2
T = 0.18425, p-value = 0.3585
> kurtosis.norm.test(historical$estacion.2)
      Kurtosis test for normality
data:  historical$estacion.2
T = 2.0415, p-value = 0.2325
> skewness.norm.test(historical$estacion.2)
      Skewness test for normality
data:  historical$estacion.2
T = 0.24454, p-value = 0.604
> jb.norm.test(historical$estacion.2)
      Jarque-Bera test for normality
data:  historical$estacion.2
JB = 0.96492, p-value = 0.43
> hegazy2.norm.test(historical$estacion.2)
      Hegazy-Green test for normality
data:  historical$estacion.2
T = 0.05231, p-value = 0.487
> spiegelhalter.norm.test(historical$estacion.2)
      Spiegelhalter test for normality
data:  historical$estacion.2
T = 1.2626, p-value = 0.635
> wb.norm.test(historical$estacion.2)
      Weisberg-Bingham test for normality
data:  historical$estacion.2
WB = 0.95499, p-value = 0.3785

```

Ilustración A2. Test Normalidad Estación 1

Tabla A4. Datos de campo muestreo PM_{2.5}

Estación 1 Barrio ciudadela 20 de julio														
Fecha	Temp	Pbar	Wi	Wf	Hi	Hf	Tiempo muestreo	Flujo inicial	Flujo Final	Flujo promedio	Flujo total	Flujo Estándar	Volumen total	Concentración
	(K)	(mmHg)	(g)	(g)	(Horas)	(Horas)	(Horas)	(CFM)	(CFM)	(I)	(m ³ /min)	(m ³ /min)	(m ³)	(µg/m ³)
26/02/2020	299.25	755.76	4.354	4.3819	143.23	167.15	23.92	40	40	40.0	1.12	1.11	1593.89	17.50
27/02/2020	299.45	756.21	4.3433	4.3654	167.15	191.06	23.91	40	40	40.0	1.12	1.11	1593.14	13.87
28/02/2020	300.85	755.17	4.3554	4.3841	191.06	215.10	24.04	40	40	40.0	1.12	1.11	1595.46	17.99
29/02/2020	302.52	753.99	4.3859	4.4131	215.10	238.90	23.80	40	40	40.0	1.13	1.10	1572.20	17.30
1/03/2020	302.72	753.50	4.3636	4.3871	238.90	262.81	23.91	40	40	40.0	1.13	1.10	1578.10	14.89
2/03/2020	302.68	754.94	4.3864	4.4189	262.81	286.73	23.92	40	40	40.0	1.13	1.10	1580.88	20.56
3/03/2020	301.06	754.95	4.3931	4.4153	286.73	310.65	23.92	40	40	40.0	1.12	1.11	1586.48	13.99
4/03/2020	299.11	755.64	4.3955	4.418	310.65	334.56	23.91	40	40	40.0	1.12	1.11	1593.55	14.12
5/03/2020	297.96	755.58	4.4265	4.4433	334.56	358.48	23.92	40	40	40.0	1.12	1.11	1598.18	10.51
6/03/2020	299.64	755.10	4.4364	4.4512	358.48	382.42	23.94	40	40	40.0	1.12	1.11	1592.93	9.29
7/03/2020	301.97	754.71	4.3667	4.3933	382.42	406.20	23.78	40	40	40.0	1.13	1.10	1573.72	16.90
8/03/2020	301.99	754.92	4.3909	4.4263	406.20	430.23	24.03	40	40	40.0	1.13	1.10	1590.50	22.26
9/03/2020	301.00	754.83	4.3825	4.4222	430.23	454.28	24.05	40	40	40.0	1.12	1.11	1595.12	24.89
10/03/2020	298.77	754.67	4.4047	4.4303	454.28	478.06	23.78	40	40	40.0	1.12	1.11	1584.71	16.15
11/03/2020	299.66	754.81	4.4285	4.4444	478.06	501.98	23.92	40	40	40.0	1.12	1.11	1591.16	9.99
12/03/2020	299.61	755.52	4.3827	4.401	501.98	525.90	23.92	40	40	40.0	1.12	1.11	1592.30	11.49
13/03/2020	300.41	755.93	4.3956	4.4228	525.90	549.91	24.01	40	40	40.0	1.12	1.11	1596.07	17.04
14/03/2020	301.63	755.54	4.3817	4.3975	549.91	573.73	23.82	40	40	40.0	1.12	1.10	1578.68	10.01
15/03/2020	301.95	754.91	4.3915	4.4022	573.73	597.72	23.99	40	40	40.0	1.13	1.10	1587.98	6.74
16/03/2020	301.63	755.54	4.4145	4.44	597.72	621.4	23.68	40	40	40.0	1.12	1.10	1569.40	16.25

Estación 2 universidad del norte														
Fecha	Temp	Pbar	Wi	Wf	Hi	Hf	Tiempo muestreo	Flujo inicial	Flujo Final	Flujo promedio	Flujo total	Flujo Estándar	Volumen total	Concentración
	(K)	(mmHg)	(g)	(g)	(Horas)	(Horas)	(Horas)	(CFM)	(CFM)	(I)	(m ³ /min)	(m ³ /min)	(m ³)	(µg/m ³)
26/02/2020	299.80	755.65	4.35	4.3554	200.44	224.15	23.71	40	40	40.0	1.12	1.11	1577.84	3.42
27/02/2020	299.90	756.03	4.3751	4.3786	224.15	248.10	23.95	40	40	40.0	1.12	1.11	1594.00	2.20
28/02/2020	299.81	756.04	4.3941	4.4192	248.10	271.50	23.40	40	40	40.0	1.12	1.11	1557.71	16.11
29/02/2020	299.59	756.28	4.3794	4.3907	271.50	296.12	24.62	40	40	40.0	1.12	1.11	1640.03	6.89
01/03/2020	299.98	755.23	4.3832	4.394	296.12	320.40	24.28	40	40	40.0	1.12	1.11	1614.54	6.69
02/03/2020	299.89	754.30	4.3912	4.4074	320.40	344.50	24.10	40	40	40.0	1.12	1.11	1601.58	10.12
03/03/2020	299.95	753.81	4.3964	4.4151	344.50	368.13	23.63	40	40	40.0	1.12	1.11	1569.49	11.91
04/03/2020	299.87	753.91	4.4217	4.4405	368.13	392.16	24.03	40	40	40.0	1.12	1.11	1596.48	11.78
05/03/2020	299.95	754.23	4.4391	4.4568	392.16	415.88	23.72	40	40	40.0	1.12	1.11	1576.04	11.23
06/03/2020	299.94	754.38	4.3736	4.3848	415.88	439.20	23.32	40	40	40.0	1.12	1.11	1549.68	7.23
07/03/2020	299.54	754.87	4.3611	4.3705	439.20	463.13	23.93	40	40	40.0	1.12	1.11	1592.30	5.90
08/03/2020	299.61	755.13	4.3748	4.3904	463.13	487.17	24.04	40	40	40.0	1.12	1.11	1599.76	9.75
09/03/2020	300.12	754.89	4.3956	4.3989	487.17	511.12	23.95	40	40	40.0	1.12	1.11	1591.65	2.07
10/03/2020	299.72	754.86	4.4203	4.4262	511.12	534.20	23.08	40	40	40.0	1.12	1.11	1535.13	3.84
11/03/2020	299.42	754.14	4.4168	4.4199	534.20	557.35	23.15	40	40	40.0	1.12	1.11	1539.85	2.01
12/03/2020	299.57	753.42	4.4017	4.4181	557.35	582.14	24.79	40	40	40.0	1.12	1.11	1647.36	9.96
13/03/2020	299.78	755.09	4.4116	4.4157	582.14	605.26	23.12	40	40	40.0	1.12	1.11	1537.89	2.67
14/03/2020	299.60	755.95	4.4088	4.4213	605.26	629.84	24.58	40	40	40.0	1.12	1.11	1636.87	7.64
15/03/2020	299.85	755.82	4.4386	4.447	629.84	653.62	23.78	40	40	40.0	1.12	1.11	1582.57	5.31
16/03/2020	299.67	755.51	4.4231	4.441	653.62	678.5	24.88	40	40	40.0	1.12	1.11	1655.97	10.81