

Cuantificación del aporte de las fuentes generadoras de material particulado PM₁₀ mediante modelación de receptor en el corregimiento La Loma-Cesar.

María Camila Algarra Barrera

Lenny Yurieth Jaimes Castillo

Trabajo de Grado para Optar el título De Ingenieras Químicas

Director

Humberto Escalante Hernández

Ingeniero Químico Ph.D.

Co- Director

Jorge Leonardo Gutiérrez Ramírez

Ingeniero Ambiental Y Sanitario – Especialista En Gestión Ambiental

Universidad Industrial de Santander

Facultad De Ingenierías Físicoquímicas

Escuela De Ingeniería Química

Bucaramanga

2020

Dedicado a

A Dios, mi ser supremo, mi guía, mi luz, mi fuerza y mi camino.

A la vida quien me ha dado la capacidad de convertirme en lo que soy.

*A mi madre Gloria Inés y mi padre Orlando, quienes me dieron la vida y día a día se esfuerzan por sacarme adelante, quienes han buscado guiarme por el camino correcto y me han inculcado los valores que me caracterizan, quienes permitieron que alcanzara el sueño
de convertirme en Ingeniera Química.*

A mi abuela Cecilia, mis hermanos Esperanza, Cesar, Pilar, mis sobrinos Julián e Isabella, mis cuñados Fernando, Milena y Natalia, quienes me han acompañado en el devenir de la vida, quienes me han apoyado en momentos difíciles y han celebrado conmigo en las situaciones alegres, quienes han colaborado a mis padres con el proceso de mi formación.

A Nelson Enrique Trillos, con quien he vivido muchas aventuras desde niños, quien ha sido fiel testigo de mi crecimiento personal y profesional, quien siempre ha creído en mí y constantemente encuentra la manera de alegrar mi vida.

A cada miembro de mi familia, porque me llenan de amor cada vez que hablamos, porque de cada uno de ellos he recibido los mejores deseos, intenciones y oraciones.

A Cata, Laura, Isabella, Julieth, Luisa, Andrea, Nicolás, Pacho, Natalia P, Angie, Silvia G, Yudy, Silvia A, Valentina R, Valentina S, Natalia C, Merleins, Pachito, Juan José, Gonzo, quienes han sido mi segunda familia y me han mostrado siempre el valor de la amistad, brindándome su apoyo y cariño sincero.

María Camila Algarra Barrera

Dedicado a

A la vida por permitirme ser quien soy

A mi mejor amiga Olga Lucia Mendoza Quiñonez por su amistad, su comprensión y su apoyo en todos los momentos cruciales que me acompañó para llegar hasta este punto.

A una hermosa mujer Maria Salustria Suarez Rodriguez por su sabiduría que me animó, me acompañó, me guió en los últimos años de este proyecto.

A la Corporación para la Equidad, la Democracia y el Buen Vivir Hypatia que me dio la oportunidad de crecer como persona, de entender los problemas sociales que enfrentamos las mujeres y me impulso a continuar.

A la Fundación Abrazos Femeninos que cada semestre con su ayuda seguía persiguiendo este sueño, en especial a Leisa Puentes, una mujer comprometida que estuvo pendiente de que concluyera mi carrera.

A mi alma mater UIS y sus programas de acompañamiento, en especial el programa de Bienestar Universitario y todos sus integrantes que con su labor de acompañamiento y atención hicieron que fuera posible continuar con mis estudios.

A Alirio P. por su paciencia y cada momento que me ha regalado.

A mi madre por darme la vida y todos aquellos que de una forma u otra me apoyaron en este sueño.

Lenny Yurieth Jaimes Castillo

AGRADECIMIENTOS

Al profesor Humberto Escalante Hernández por su colaboración y enseñanza constante, quien con sus consejos y correcciones contribuyó en el desarrollo de este trabajo.

Al Ingeniero Jorge Leonardo Gutiérrez Ramírez por incluirnos en su equipo de trabajo, por su paciencia, por su comprensión, por sus consejos de vida, por asesorarnos y guiarnos en el desarrollo de esta meta tan importante en nuestras vidas.

A K2 Ingeniería S.A.S por darnos la oportunidad de desarrollar un proyecto de interés para su empresa y permitirnos aplicar al campo ambiental, los conocimientos adquiridos durante la carrera universitaria.

A la Universidad Industrial de Santander, nuestra alma máter, por acogernos en sus instalaciones y hacernos parte de su comunidad, haciendo de esta nuestro segundo hogar, también por brindándonos su excelencia académica y las bases necesarias para adquirir el tan anhelado título profesional.

A la Escuela de Ingeniería Química por transmitirnos todos los conocimientos necesarios para desenvolvemos como profesionales de una manera ética y responsable con la industria y la sociedad, por tan innumerables momentos y experiencias vividas con sus profesores, empleados y estudiantes.

María Camila y Lenny Yurieth

Tabla de Contenido

Introducción	12
1. Objetivos	17
1.1. Objetivo general.....	17
1.2. Objetivos específicos	17
2. Alcance	17
3. Descripción Metodológica	18
3.1. Apropiación de datos del muestreo preliminar	19
3.2. Análisis de los niveles de concentración del pm ₁₀ reportados y la influencia de las condiciones meteorológicas de la zona	20
3.3. Selección de los modelos de receptor.....	22
3.4. Depuración de datos	22
3.5. Implementación de los modelos de receptor.....	23
3.5.1. Modelo UNMIX.....	23
3.5.2. Modelo PMF.....	23
3.6. Identificación de las fuentes generadoras de PM ₁₀	24
3.7. Tareas y funciones desarrolladas durante la práctica empresarial.....	24
4. Resultados y análisis	25
4.1. Niveles de concentración del PM ₁₀ e influencia de las condiciones meteorológicas de la zona 25	
4.1.1. Verificación de cumplimiento de la norma colombiana para niveles permisibles de PM ₁₀ . 25	
4.1.2. Influencia de las precipitaciones en la concentración del PM ₁₀	27
4.1.3. Influencia de la velocidad y dirección de los vientos en la zona de estudio	29
4.2. Selección de modelos de receptor.....	32
4.3. Depuración de datos	33

4.4. Implementación De Los Modelos De Receptor	36
4.4.1. <i>Modelo UNMIX</i>	36
4.4.2. <i>Modelo PMF</i>	37
4.4.3. <i>Identificación de las fuentes generadoras de PM₁₀</i>	38
5. Conclusiones	44
6. Recomendaciones	45
Referencias Bibliográficas.....	46
Apéndices	51

Lista de Tablas

Tabla 1. Relación de filtros y especies químicas	19
Tabla 2. Tareas y funciones desarrolladas durante la práctica empresarial	25
Tabla 3. Variables de entada y salida de los modelos de receptor.....	32
Tabla 4. Fuentes emisoras de PM ₁₀	39

Lista de Figuras

Figura 1. Localización geográfica de La Loma, Cesar.....	13
Figura 2. Etapas metodológicas del trabajo	18
Figura 3. Estación meteorológica Loma Carbones del Cesar y Estación de Monitoreo de Calidad de Aire ZM1	21
Figura 4. Concentraciones diarias de PM ₁₀	26
Figura 5. Cualificación de la calidad de aire del corregimiento La Loma durante el periodo en estudio.....	27
Figura 6. Comportamiento de la precipitación diaria en las fechas de muestreo	28
Figura 7. Concentración de PM ₁₀ en los periodos seco y húmedo	29
Figura 8. “Rosa de Vientos” del 1 de marzo al 3 de mayo de 2018 en La Loma - Cesar.....	30
Figura 9. Ubicación de la Rosa de Viento sobre mapa de la estación meteorológica Loma Carbones del Cesar	31
Figura 10. Contribución másica del PM ₁₀	33
Figura 11. Contribución másica ajustada del PM ₁₀	33
Figura 12. Acumulado másico	34
Figura 13. Resultados generales de UNMIX	36
Figura 14. Regresión lineal de PM ₁₀ en el Modelo UNMIX	37
Figura 15. Regresión lineal del PM ₁₀ en el Modelo PMF.....	38
Figura 16. Contribución de fuentes de contaminación mediante UNMIX	41
Figura 17. Contribución de fuentes de contaminación mediante PMF.....	41
Figura 18. Aporte cuantitativo de las fuentes generadoras de PM ₁₀	42

Lista de Apéndices

Apéndice A. Distribución de las estaciones meteorológicas por estaciones de monitoreo	51
Apéndice B. Normativa colombiana sobre PM ₁₀	52
Apéndice C. Escala de precipitación según el IDEAM.	53
Apéndice D. Escala de velocidad del viento – Beaufort.....	54
Apéndice E. Matriz ajustada de concentraciones de especies	55
Apéndice F. Matriz ajustada de incertidumbres de especies	56
Apéndice G. Contribución de las especies químicas a las fuentes emisoras de PM ₁₀ con UNMIX.	57
Apéndice H. Contribución de las especies químicas a las fuentes emisoras de PM ₁₀ con PMF.	58
Apéndice I. Quema de Residuos Sólidos – Speciate	59
Apéndice J. Escape de Motor Diesel / Gasolina – Speciate	60
Apéndice K. Incendios Forestales - Speciate.....	61
Apéndice L. Polvo de Camino Despavimentado – Speciate.....	62

RESUMEN

TÍTULO: CUANTIFICACIÓN DEL APORTE DE LAS FUENTES GENERADORAS DE MATERIAL PARTICULADO PM₁₀ MEDIANTE MODELACIÓN DE RECEPTOR EN EL CORREGIMIENTO LA LOMA-CESAR*

AUTORES: MARÍA CAMILA ALGARRA BARRERA**
LENNY YURIETH JAIMES CASTILLO**

PALABRAS CLAVE: Material particulado PM₁₀, modelos de receptor, compuestos iónicos, compuestos metálicos, carbonos, hidrocarburos aromáticos policíclicos.

DESCRIPCIÓN:

K2 Ingeniería S.A.S es una empresa de consultoría especializada en el área ambiental y actualmente, es la encargada de operar la red de calidad de aire de la Corporación Autónoma Regional del Cesar – Corpopesar. La contaminación atmosférica en el Cesar constituye un tema de interés debido a las altas concentraciones de material particulado PM₁₀ registradas en corregimientos como La Loma. En el presente trabajo, se identificaron las fuentes generadoras de PM₁₀ y el aporte de ellas al mismo durante el periodo comprendido entre el 1/marzo/2018 al 3/mayo/2018. Además, se analizó la influencia de las condiciones meteorológicas de la zona respecto a las emisiones de PM₁₀ mediante herramientas computacionales como los modelos de receptor *UNMIX 6.0* y *PMF 5.0*, la base de datos *Speciate*, y el software *R*. En consecuencia, se obtuvo que las precipitaciones tienen una incidencia positiva en las concentraciones de PM₁₀, ya que, en el periodo húmedo se presentan niveles de PM₁₀ menores que los reportados en el periodo seco. Por otro lado, se concluyó que existieron cuatro fuentes emisoras de material particulado en La Loma durante el periodo de muestreo mencionado anteriormente, de las cuales la fuente más significativa son los incendios forestales, seguido del escape de motor Diesel /Gasolina, quema de residuos sólidos y polvo de camino despavimentado.

*Trabajo de grado

**Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Prof. Humberto Escalante Hernández. Codirector: Esp. Jorge Leonardo Gutiérrez Ramírez

ABSTRACT

TITLE: QUANTIFICATION OF THE CONTRIBUTION OF THE PARTICULATE MATERIAL GENERATING SOURCES PM₁₀ THROUGH MODELING OF THE RECEIVER IN THE LOMA-CESAR CORREGIMIENTO*

AUTHORS: MARÍA CAMILA ALGARRA BARRERA**
LENNY YURIETH JAIMES CASTILLO**

KEYWORDS: Particulate material PM₁₀, receptor models, ionic compounds, metal compounds, carbons, polycyclic aromatic hydrocarbons.

DESCRIPTION:

K2 Ingeniería S.A.S is a consulting company specialized in the environmental area and currently it charges of operating the air quality network of the Regional Autonomous Corporation of Cesar - Corpopesar. Air pollution in Cesar is a topic of interest due to the high concentrations of PM₁₀ particulate matter registered in townships such as La Loma. In the present work, the sources of PM₁₀ were identified and their contribution to it during the period from 01/march/2018 to 03/may/2018. In addition, the influence of the meteorological conditions of the area with respect to emissions of PM₁₀ was analyzed using computational tools such as the UNMIX 6.0 and PMF 5.0 receiver models, the Speciate database, and the R software. Consequently, it was obtained that rainfall has a positive impact on PM₁₀ concentrations, since, in the wet period, the results of PM₁₀ are lower than those reported in the dry period. On the other hand, it was concluded that there were four sources of particulate matter emitting in La Loma during the period mentioned above, of which the most significant source being forest fires, followed by Diesel/Gasoline engine exhaust, solid waste burning and dust from unpaved road

*Bachelor Thesis

**Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Prof. Humberto Escalante Hernández. Codirector: Esp. Jorge Leonardo Gutiérrez Ramírez

Introducción

Presentación de la empresa

K2 Ingeniería S.A.S es una empresa colombiana con sede principal en Bucaramanga y una sucursal en la ciudad en Bogotá. Esta empresa se especializa en el área ambiental, sector en el que desarrolla proyectos de alto impacto a nivel nacional e internacional, además es perfilada como una de las principales organizaciones proveedoras de consultoría ambiental en el país. K2 Ingeniería S.A.S es reconocida por la investigación, desarrollo, implementación y distribución de nuevas tecnologías y metodologías al mercado en el sector privado y público como es el caso de la Corporación Autónoma Regional del Cesar – Corpocesar, en la cual, K2 Ingeniería es la encargada de operar la red de calidad del aire en el corredor minero de este departamento (K2 Ingeniería, n.d.).

Planteamiento del problema

Las sustancias contaminantes del aire se clasifican en gases (CO, SO₂, NOX, O₃, COV), responsables de la lluvia ácida, partículas suspendidas totales (PST) y material particulado menor a 10, 2,5 y 1 µm (PM₁₀, PM_{2,5} y PM₁ respectivamente), el cual puede contener metales pesados y otros químicos suspendidos (Departamento Nacional de Planeación, 2018). En el año 2017 con la resolución 2254 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, en Colombia se establecieron los valores permisibles de PM₁₀, siendo el límite máximo de 50 µg.m⁻³.año⁻¹ y 75 µg.m⁻³.día⁻¹, las anteriores medidas siguen los niveles óptimos acorde a la Organización Mundial de la Salud (OMS). Sin embargo, esta normatividad comenzó a regir a partir del 1° de julio de 2018, antes de la fecha se permitían valores máximo de 100 µg.m⁻³.día⁻¹ (IDEAM; Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible; Gobierno de Colombia, 2017).

En el departamento del Cesar, la contaminación atmosférica constituye un tema de interés debido a las altas concentraciones de material particulado registradas en corregimientos

como La Loma. Uno de los contaminantes de mayor preocupación en el Cesar es el PM₁₀, debido al continuo sobrepaso a los niveles máximos permisibles y a su comprobada afectación a la salud (Ministerio de Ambiente y Desarrollo sostenible, 2017).

Para controlar y monitorear la calidad del aire en el Cesar, Corpocesar decidió implementar el Sistema Especial de Vigilancia de Calidad del Aire de la Zona Carbonífera del Cesar (SEVCA - ZCC). El SEVCA – ZCC ha sido fortalecido, modernizado y se encuentra debidamente acreditado por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) para realizar el muestreo del material particulado del aire (Corporación Autónoma del Cesar - Corpocesar, 2016).

La Figura 1, muestra la ubicación geográfica del corregimiento La Loma, Cesar, lugar donde se encuentra localizada la estación de monitoreo de calidad de aire ZM1 Loma Centro, usada para medir las concentraciones de PM₁₀ y PM_{2,5} de la zona (Corpocesar, 2019).



Figura 1. Localización geográfica de La Loma, Cesar. Imagen tomada de Google Earth (Google Earth, n.d.-a).

En la Figura 1 se observa que el corregimiento se encuentra próximo a actividades mineras correspondientes a la explotación de carbón, principal actividad económica del departamento.

La estación ZM1 se complementa con equipos adicionales como lo son los equipos de alto volumen (Hi-Vol) quienes operan cada tercer día y equipos de bajo volumen (Low-Vol) que toma las muestras diariamente. Los equipos Hi-Vol y Low-Vol se diferencian en la cantidad total de volumen de aire muestreado corregido a las condiciones de referencia (298 K, 760 mm Hg), y se determina a partir de la velocidad de flujo medida y el tiempo de muestreo (Vásquez Villanueva, 2017). En el caso de los equipos Hi-Vol, se manejan volúmenes de 1608,4 m³ con filtros de cuarzo para la cuantificación de las especies de carbonos e hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs). Los equipos Low-Vol, manejan volúmenes de 24 m³, usando filtros de borosilicato para la medición de las especies iónicas y filtros de teflón para medir los metales.

En este orden de ideas, los datos recolectados son sometidos a un robusto análisis fisicoquímico como Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente ICP-OES, ICP-MS y cromatografía iónica. Posteriormente, los resultados son tratados mediante herramientas computacionales denominadas modelos de receptor, los cuales a partir de los datos de concentración identifican el número de fuentes de contaminación y el aporte de las mismas a la calidad del aire (US EPA, n.d.-b).

Según el parágrafo 3, del artículo 5 de la resolución 2254 en Colombia, Ministerio de Ambiente y Desarrollo sostenible, 2017 “Las autoridades ambientales que usen modelos de contaminantes deberán basarse en los modelos recomendados por la Agencia de Protección Ambiental en los Estados Unidos (US-EPA) mientras que el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible adopta la Guía Nacional de Modelización de Calidad del Aire” (p.4).

Modelos de receptor

Los modelos de receptor utilizan las características químicas y físicas de gases y partículas medidas en el receptor (estación de calidad de aire) para identificar la presencia y

cuantificar las contribuciones de las fuentes a las concentraciones del receptor del aire (US EPA, 2016). Los modelos de receptor suponen condiciones tales como (Bruinen et al., 2006):

- Las especies químicas no reaccionan entre sí (se suman linealmente).
- El número de fuentes o categorías de fuentes es menor o igual que el número de especies.

La US-EPA ha desarrollado diversos modelos de receptor de libre descarga, tales como los de *balance químico de masa (CMB)*, *UNMIX* y el método de *factorización de matriz positiva (PMF)* (US EPA, 2016). Sin embargo, la elección de cual modelo debe utilizarse no es sencilla, existen variedad de modelos y condiciones bajo las cuales se pueden ejecutar. Además, se recomienda la implementación conjunta de al menos dos modelos en una misma configuración de datos para realizar una comparación posterior y así poder validar mutuamente los resultados (Belis et al., 2014).

Modelo Factorización de Matriz Positiva (PMF) EPA 5.0

Este modelo no considera, en las variables de salida, los elementos con cargas negativas de los componentes utilizados. El modelo *PMF* basa su principio de análisis de factores, en el método de mínimos cuadrados asociado a tiempos cortos de respuesta (Behrentz et al., 2009).

Modelo UNMIX EPA 6.0

Funciona encontrando un modelo inicial con especies seleccionadas. Cada modelo encontrado se convierte en un modelo base, y se repite el proceso de agregar las especies restantes de una en una (Ortiz et al., 2011). Los algoritmos utilizados en el modelo *UNMIX* han sido revisados por científicos líderes en gestión de la calidad del aire por medio de combinaciones lineales (Norris et al., 2007).

Modelo Balance Químico de Masas (CMB)

Su método consiste en solucionar ecuaciones lineales que expresan la concentración química de cada receptor como una suma lineal de productos de abundancia de perfil de fuente

y contribuciones de fuente (Watson et al., 2004). El modelo *CMB* necesita un pequeño número de muestras (Behrentz et al., 2009) y además, asume que la incertidumbre de cada fuente es independiente con una distribución normal y que los perfiles de las fuentes son independientes una de otra (Kleeman, 2003).

De acuerdo con lo anterior, y con el fin de implementar estrategias de mitigación, Corpocesar requiere identificar las fuentes generadoras de PM₁₀. Además, conocer de manera cuantitativa la contribución de cada una de estas a la calidad del aire en el corregimiento La Loma, especialmente en la estación ZM1 Loma Centro. Corpocesar solicitó a la empresa K2 Ingeniería S.A.S realizar los estudios sobre la calidad del aire de la zona en el periodo comprendido entre el 01/mar/2018 – 03/may/2018, quien optó por un convenio con la Universidad Industrial de Santander, para que las estudiantes, autoras de este trabajo, desarrollaran el estudio solicitado por Corpocesar y a su vez fuera válido como su trabajo de grado.

1. Objetivos

1.1. Objetivo general

Cuantificar el aporte de las fuentes emisoras de material particulado PM₁₀ a la calidad del aire en la estación ZM1 Loma Centro del corregimiento La Loma en el departamento del César mediante el uso de modelos de receptor.

1.2. Objetivos específicos

Analizar los niveles de material particulado menor a 10 µm emitidos en La Loma – Cesar y la influencia de las condiciones meteorológicas en el mismo.

Identificar las fuentes emisoras de material particulado menor a 10 µm en La Loma – Cesar mediante los modelos de receptor.

Determinar el aporte de fuentes generadoras de material particulado menor a 10 µm.

2. Alcance

Los resultados de este trabajo entregaran a K2 Ingeniería S.A.S la información cuantificada sobre el aporte de las diferentes fuentes generadoras de PM₁₀ en la estación de monitoreo ZM1 del corregimiento La Loma – Cesar, durante un periodo de estudio de aproximadamente 2 meses (01/mar/2018 – 03/may/2018). Estos resultados podrán ser utilizados por Corpocesar y otras Autoridades Ambientales para desarrollar estrategias de mitigación, direccionadas a las fuentes contaminantes con mayor aporte en la zona. Se resalta que las bases de datos de entrada para la modelación de receptor fueron proporcionadas por la acción conjunta de Corpocesar, K2 ingeniería (operador de la red de calidad de aire) y Colombian Natural Resources (CNR).

3. Descripción Metodológica

En la Figura 2, se presenta la secuencia de fases para el desarrollo del trabajo, las cuales involucraron diferentes actividades para responder a los objetivos planteados.

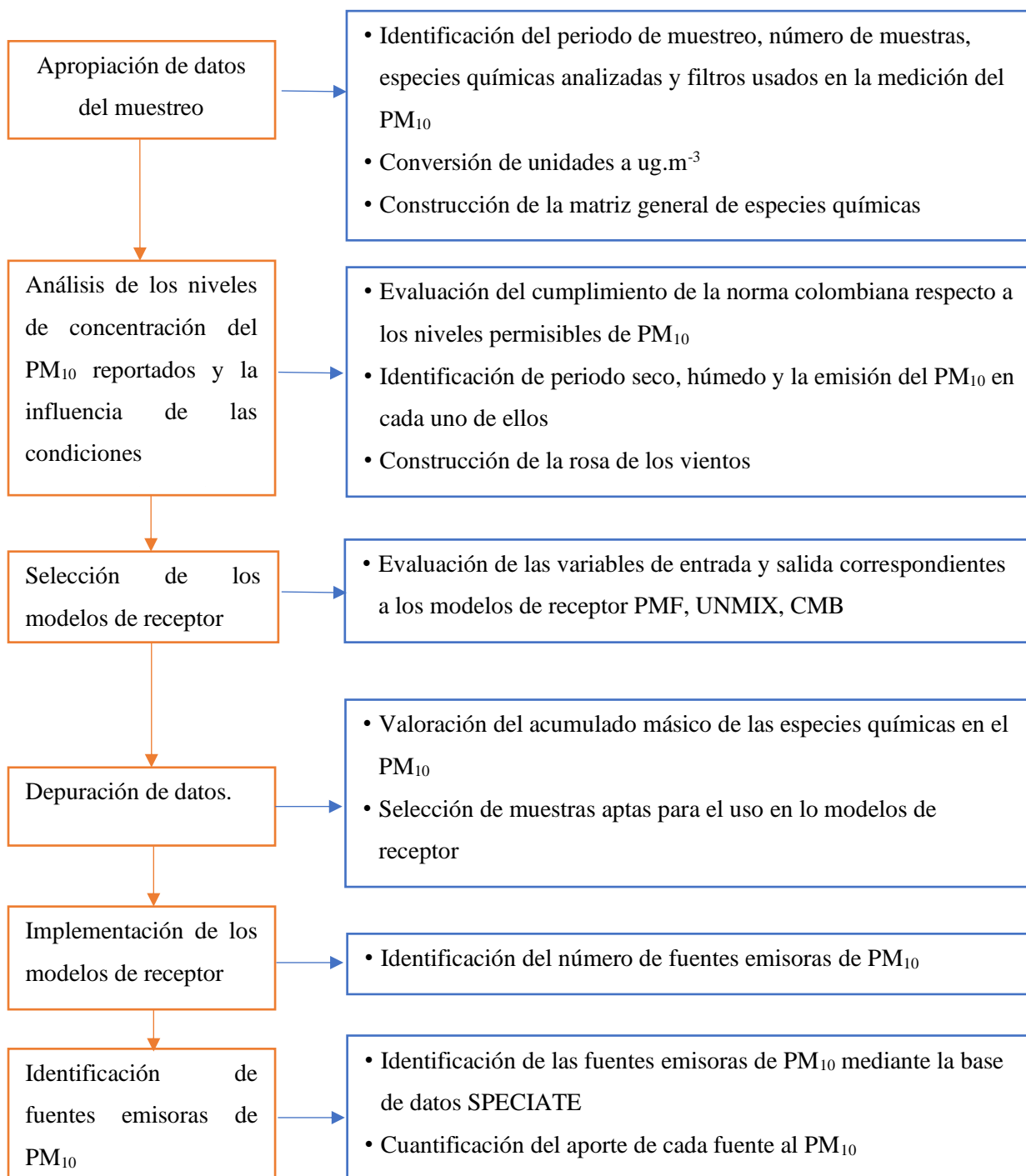


Figura 2. Etapas metodológicas del trabajo

3.1. Apropiación de datos del muestreo preliminar

El proceso de muestreo lo realizó Corpocesar y posteriormente los filtros recolectados fueron entregados a Colombia Natural Resources (CNR) quienes se encargaron de enviarlas al laboratorio de Higiene de la División de Salud Ambiental del Estado de Wisconsin (WSLH), donde se llevó a cabo la caracterización fisicoquímica del material particulado. Posteriormente, los resultados se entregaron a K2 Ingeniería S.A.S, quienes fueron designados por Corpocesar para realizar el análisis de identificación y cuantificación de las fuentes contaminantes del aire en la zona de su jurisdicción.

La toma de muestras fue realizada diariamente, durante el periodo 01- marzo – 2018 a 03 – mayo – 2018. No todas las muestras se comenzaron a tomar el mismo día, el proceso se realizó con diferentes clases de filtros, con el fin de analizar químicamente las especies constituyentes del PM₁₀. Sin embargo, estos filtros se encuentran asociados a equipos de alto y bajo volumen según corresponda, por lo tanto, no todas las especies están reportadas diariamente. Las especies químicas se clasificaron en cuatro grupos diferentes: compuestos iónicos, compuestos metálicos, hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs) y carbonos.

En la Tabla 1 se presenta un resumen sobre la toma de muestras, realizada por Corpocesar.

Tabla 1.
Relación de filtros y especies químicas

Tipo de filtro	Tipo de equipo	Periodicidad	Especie	Inicio de muestreo [dd-mm-aa]	Fin de muestreo [dd-mm-aa]	Número de muestras	Número de especies analizadas
Borosilicato	Bajo volumen	Diaria	Compuestos iónicos	10/03/2018	1/05/2018	53	9
Teflón	Bajo volumen	Diaria	Compuestos metálicos	10/03/2018	1/05/2018	53	59

Tipo de filtro	Tipo de equipo	Periodicidad	Especie	Inicio de muestreo [dd-mm-aa]	Fin de muestreo [dd-mm-aa]	Número de muestras	Número de especies analizadas
Cuarzo	Alto volumen	Cada tercer día	Hidro-carbuos aromáticos policíclicos	1/03/2018	3/05/2018	22	17
Cuarzo	Alto volumen	Cada tercer día	Carbonos	1/03/2018	3/05/2018	22	2

Los reportes de las concentraciones de las especies químicas analizadas por el laboratorio fueron compiladas en una matriz general así: primera columna la fecha de toma de muestra y las siguientes columnas corresponden a las especies químicas analizadas; en las filas se representó las concentraciones de cada especie.

3.2. Análisis de los niveles de concentración del pm₁₀ reportados y la influencia de las condiciones meteorológicas de la zona

Para llevar a cabo el análisis meteorológico fue necesario estudiar la plataforma utilizada por el IDEAM para cargar los datos, su nombre es Hydras 3. Es una herramienta tipo Web que permite la revisión y descarga de información hidrometeorológica y ambiental de país, la cual es generada por los distintos SEVCA. Hydras 3 facilita el acceso y consulta de la información a los ciudadanos y las instituciones encargadas de la investigación en el tema ambiental.

Las estaciones meteorológicas certificadas por el IDEAM reportan las variables meteorológicas: temperatura, humedad, velocidad del viento, dirección del viento, presión atmosférica, radiación solar y precipitaciones. Las estaciones se asocian según la ubicación geográfica del SEVCA correspondiente. Para el caso del presente estudio correspondió a la Zona Carbonífera del Cesar (ZEVCA - ZCC). En el Apéndice A, se especifica que la estación

meteorológica asociada a la estación de monitoreo ZM1, es la de estación Loma Carbones del Cesar. En la Figura 3 se observa la ubicación geográfica de las estaciones. Las estaciones se encuentran a una distancia de 8,65 km según Google Earth (Google Earth, n.d.-b).



Figura 3. Estación meteorológica Loma Carbones del Cesar y Estación de Monitoreo de Calidad de Aire ZM1. Imagen tomada de Google Earth (Google Earth, n.d.-b).

Una vez se dispuso de la información de la estación meteorológica se procedió a:

- Filtrar las fechas del reporte de la estación meteorológica, según las fechas de muestreo del PM₁₀.
- La información entregada reportó los valores de precipitación por horas, por lo que se decidió sumar los mismos para obtener un total por día.
- Se clasificó el tipo de precipitación presentada y se determinó el periodo seco y húmedo.
- Se identificaron los niveles de concentración del PM₁₀ en el periodo seco y húmedo.

Los datos de velocidad y dirección del viento son reportados según la media horaria, entonces se realizó una matriz en la cual se relacionan estos datos con las fechas de interés del presente trabajo. Posteriormente, se elaboró el diagrama “Rosa de Viento”, el cual permite determinar los patrones de viento. Lo anterior, se desarrolló haciendo uso de la librería *OPENAIR* mediante la interfaz del software *R*. El software *R* es un lenguaje y entorno para computación estadística y de gráficos, está disponible como software libre bajo los términos

de la Free Software Foundation 's Licencia Pública General de GNU en forma de código fuente. El software *R* fue desarrollado en los Laboratorios Bell, proporciona una amplia variedad de técnicas estadísticas (modelos lineales y no lineales, pruebas estadísticas clásicas, análisis de series temporales, clasificación, agrupamiento) y gráficas, y es altamente extensible. (R - Project, n.d.). El software *R* proporciona una interfaz que permite hacer uso de un paquete adicional denominado *OPENAIR* cuya función es realizar análisis estadísticos de datos sobre la calidad del aire (Follos Pliego, 2012).

3.3. Selección de los modelos de receptor

- Se evaluaron los modelos de receptor *UNMIX*, *PMF*, *CMB* desarrollados por la US-EPA; dado que según la normatividad de Colombia son los únicos aprobados por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo sostenible para estudiar la calidad de aire del país.
- Se identificaron las variables de entrada y salida requeridas por cada software y cuáles de ellas estaban disponibles para el desarrollo del proyecto.
- Se escogieron dos modelos de receptor con el fin de verificar su congruencia y complementar los resultados de las fuentes de contaminación obtenidas.

3.4. Depuración de datos

- Se analizó la contribución másica de los grupos especiados al PM₁₀ y posteriormente el aporte de cada especie al mismo para identificar las especies relevantes en la composición del material particulado.
- Se depuraron de la matriz general aquellas especies que su contribución másica era de 0%.
- Se seleccionaron las muestras aptas para la ejecución de los programas. Los softwares no permiten valores vacíos, negativos o cero. Lo anterior hace referencia a que se escogieron los días en los que se tomaron las muestras de todas las especies de manera simultánea.

3.5. Implementación de los modelos de receptor

3.5.1. Modelo UNMIX

- Se ejecutó el modelo de receptor *UNMIX* con la matriz de concentraciones depurada.
- Se obtuvo el número de fuentes, teniendo en cuenta que se cumpliera una relación Señal/Ruido (S/N; por sus siglas en inglés) con valor superior a 1,5 y un ajuste de R² mayor a 0,8. Este resultado sirvió como base para la ejecución del modelo *PMF*. Además, se halló el porcentaje de contribución de cada fuente y la composición de las especies que conforman a cada una.

3.5.2. Modelo PMF

- Se ejecutó el modelo de receptor *PMF* con las matrices de concentraciones e incertidumbres depuradas en la etapa anterior.
- Las especies se categorizaron como fuerte, débil y mala según el valor de relación entre el promedio de las concentraciones y promedio de las incertidumbres (Señal/Ruido o S/N). Según la guía para un valor menor a 0,5 establece que la especie se categorizaba como “mala”, y para valores entre 0,5 - 1 se denomina “débil” y para valores mayores a 1 corresponde a “fuerte” (US-EPA, 2014).
- *PMF* requiere un número base de fuentes, éste se asumió igual al número de fuentes halladas mediante el modelo *UNMIX*, pues así lo sugieren las revisiones bibliográficas realizadas de estudios previos al presente trabajo (Dordevié Dragana, Petrovié Sedar, Relié Dubravka, 2000).
- Se obtuvo el aporte porcentual de la fuente al material particulado y así mismo, las especies involucradas en cada fuente, junto con su composición.

3.6. Identificación de las fuentes generadoras de PM₁₀

La identificación de las fuentes emisoras de material particulado menor a 10 μm , se llevó a cabo mediante el software *Speciate 5.0*. Este software es una base de datos de la US-EPA de perfiles de especiación de muchos tipos de fuentes de contaminación del aire. Los perfiles proporcionan la composición de especies o la composición del gas orgánico (como los compuestos orgánicos volátiles, o VOC), las partículas (PM) y otros contaminantes emitidos por estas fuentes. Los perfiles de especiación son utilizados por la EPA, otras agencias gubernamentales y no gubernamentales, incluidas las agencias internacionales, la comunidad regulada y la academia (Hsu et al., 2019).

- Las especies agrupadas según la fuente emisora se ingresan a *Speciate 5.0*, haciendo que el programa relacione las mismas con su base de datos y las posibles fuentes.
- El usuario debe identificar las fuentes que, además de contener los compuestos correspondientes, también mantengan una relación similar con la composición hallada de estos.
- El usuario con conocimiento previo de actividades frecuentes en la zona de interés debe evaluar el ajuste de las fuentes identificadas con las mismas.

3.7. Tareas y funciones desarrolladas durante la práctica empresarial

La práctica empresarial desarrollada en K2 Ingeniería S.A.S tuvo una duración de 6 meses. A continuación, en la Tabla 2 se presentan las diferentes tareas desarrolladas durante este periodo.

Tabla 2.*Tareas y funciones desarrolladas durante la práctica empresarial*

Tarea	Descripción
Revisión bibliográfica de normatividad colombiana en materia de calidad de aire	Conocer y profundizar sobre la normatividad colombiana que rige actualmente en Colombia según la legislación impuesta por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Especialmente la resolución 2254.
Validación de datos de estaciones meteorológicas	Descargar datos meteorológicos y verificar la existencia de posibles errores de medición del equipo.
Análisis estadístico de información de calidad de aire	Descargar la información de calidad de aire de la plataforma Hydras 3 e implementar análisis estadísticos de los respectivos datos
Revisión bibliográfica de informes de calidad de aire en el departamento del Cesar	Revisión de anteriores informes correspondientes a la calidad de aire del departamento del Cesar, suministrados por el ente corporativo de carácter público, Corporación Autónoma Regional del Cesar - CORPOCESAR.
Realización de un informe sobre las fuentes de contaminación de aire en el corregimiento La Loma – Cesar	Desarrollo del proyecto "Cuantificación Del Aporte De Las Fuentes Generadoras De Material Particulado PM ₁₀ Mediante Modelación De Receptor En El Corregimiento La Loma-Cesar".

4. Resultados y análisis

4.1. Niveles de concentración del PM₁₀ e influencia de las condiciones meteorológicas de la zona

4.1.1. Verificación de cumplimiento de la norma colombiana para niveles permisibles de PM₁₀.

El Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, cualifica la calidad del aire (resolución 2254 de 2017) de acuerdo al Índice de Calidad del Aire (ICA) y estableció para Colombia un límite máximo permisible de PM₁₀ de 100 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{día}^{-1}$. En el Apéndice B se presenta un resumen de la normatividad colombiana vigente en el periodo de muestreo (Tabla B1) y la cualificación otorgada según el ICA (Tabla B2).

En la Figura 4 se presentan las concentraciones diarias de PM₁₀ [μg/m³] reportadas por el laboratorio para el periodo de muestreo.

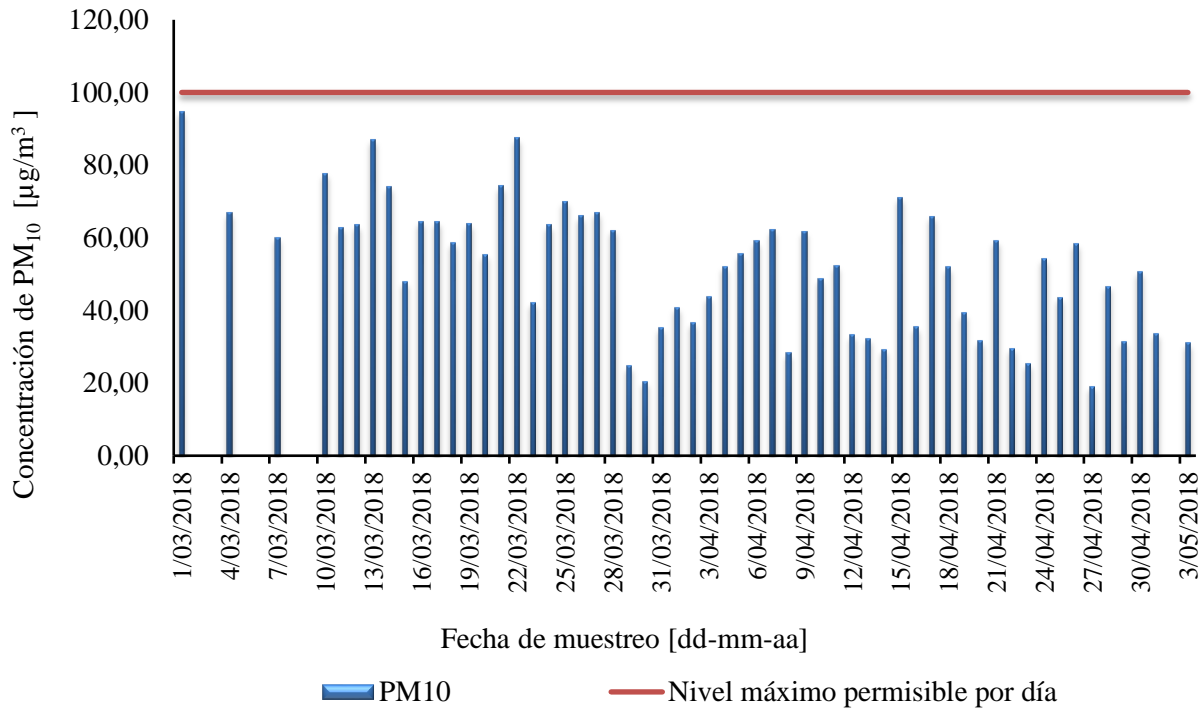


Figura 4. Concentraciones diarias de PM₁₀

En la Figura 4, se observa que ninguno de los días muestreados presentó excedencia en los límites máximos de PM₁₀ permitidos por la norma colombiana vigente antes del 1 de julio de 2018.

Por otra parte, se calcularon los ICA para cada día, siguiendo la ecuación (1) que se presenta a continuación (Ministerio de Ambiente y Desarrollo sostenible, 2017):

$$ICA_p = \frac{I_{Alto} - I_{Bajo}}{PC_{Alto} - PC_{Bajo}} \times (C_p - PC_{Bajo}) + I_{Bajo} \quad (1)$$

En donde:

ICA_p = Índice de Calidad de Aire para el contaminante p.

C_p = Concentración medida para el contaminante p.

PC_{Alto} = Punto de corte mayor o igual a C_p.

PC_{Bajo} = Punto de corte menor o igual a C_p .

I_{Alto} = Valor del ICA correspondiente al PC_{Alto} .

I_{Bajo} = Valor del ICA correspondiente al PC_{Bajo} .

En la Figura 5, se observa la distribución de los valores del ICA correspondientes a los días del periodo de muestreo y su clasificación por colores.

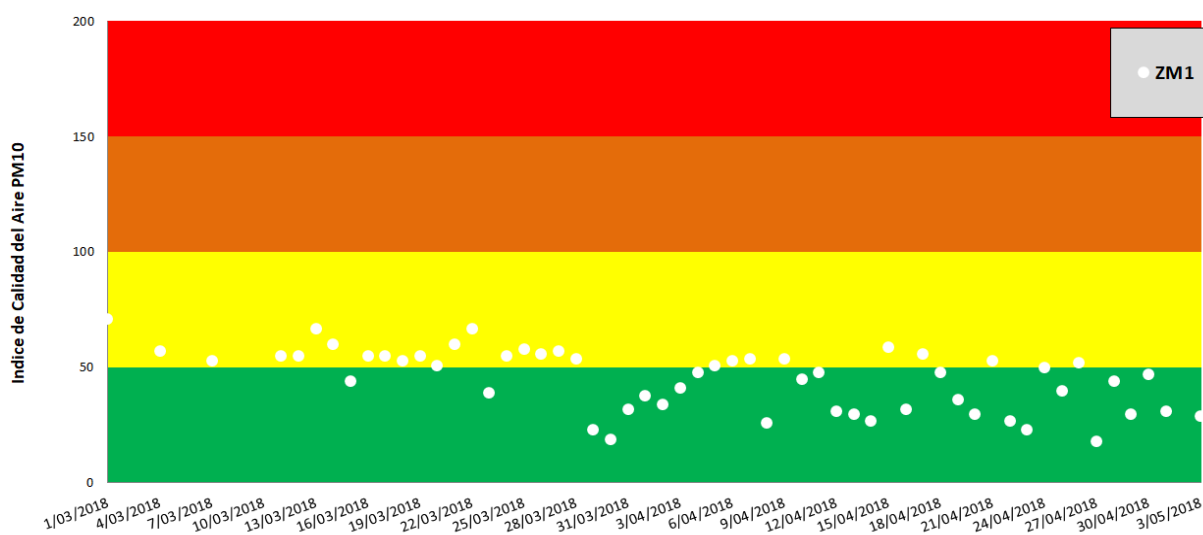


Figura 5. Cualificación de la calidad de aire del corregimiento La Loma durante el periodo en estudio

En la Tabla B2 del Apéndice B, se exponen el significado de cada color respecto a la calidad del aire según el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Según la Figura 5, veintinueve de las cincuenta y tres muestras (55% de días muestreados) se encuentran dentro de la calificación “Buena” de calidad del aire y los días restantes se califican como “Aceptable”.

4.1.2. Influencia de las precipitaciones en la concentración del PM₁₀.

Para la identificación de los periodos seco y húmedo se utilizó la escala de precipitaciones propuesta por el IDEAM (

Apéndice C). Se analizaron las precipitaciones correspondientes al periodo de muestreo del estudio (1 de marzo - 3 mayo del 2018). Esta información se plasma en la Figura 6. De

acuerdo con la relación entre los valores de las precipitaciones y la escala mencionada, se otorgó la categoría apropiada a cada periodo.

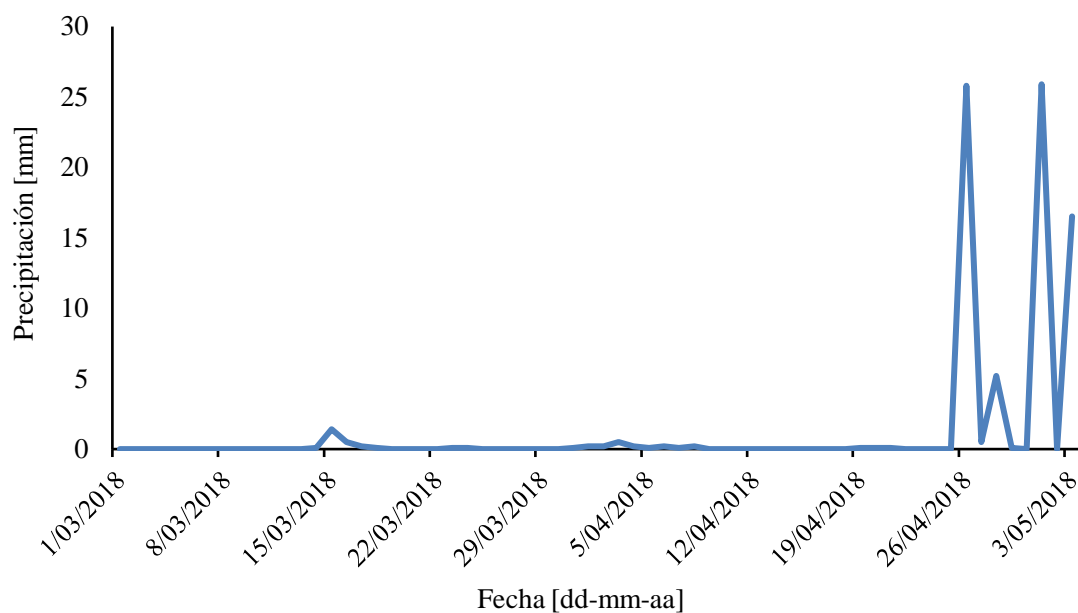


Figura 6. Comportamiento de la precipitación diaria en las fechas de muestreo

En la Figura 6 se representa el nivel de precipitación [mm] versus el periodo de muestreo. Se evidencia que el periodo seco se encuentra comprendido del 1 al 28 de marzo. Sin embargo, el día 15 de marzo se presentaron lluvias escasas. Por el contrario, el periodo húmedo correspondió del 31 de marzo al 3 de mayo. En el periodo húmedo se presentan precipitaciones escasas. Sin embargo, hubo precipitaciones fuertes los días 26 de abril y 1 de mayo; precipitaciones moderadas el 16 de abril precipitaciones moderadas y el 28 de abril precipitaciones ligeras.

En la Figura 7 se presenta la comparación de la concentración de PM₁₀ en cada periodo.

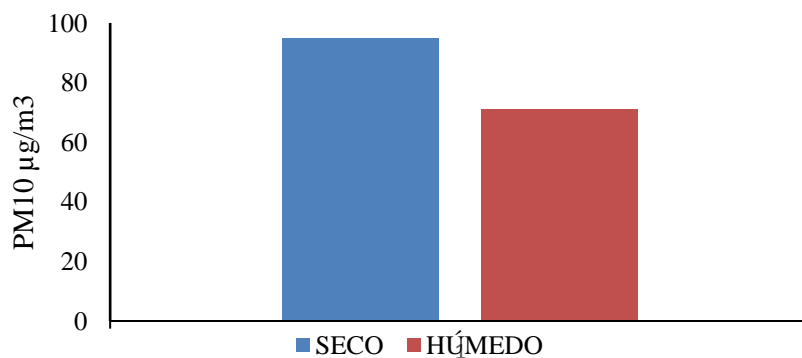


Figura 7. Concentración de PM₁₀ en los periodos seco y húmedo

El color naranja representa la concentración máxima obtenida en el periodo seco, la cual corresponde a $95 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ y el color azul representa la máxima concentración en periodo húmedo cuyo valor fue de $71 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, lo que equivale a una diferencia del 26%.

La concentración del PM₁₀ tiene un comportamiento inverso a las precipitaciones. Cuando aumentan las precipitaciones se disminuye la concentración de PM₁₀. Estudios realizados anteriormente, relacionan la disminución del material particulado en presencia de lluvias con un lavado atmosférico que arrastra, transforma y elimina los contaminantes de la atmósfera; especialmente las partículas gruesas como lo es el PM₁₀ (Srithawirat et al., 2016).

4.1.3. Influencia de la velocidad y dirección de los vientos en la zona de estudio

En continuidad con el análisis meteorológico, se decidió estudiar la influencia de la velocidad y dirección de los vientos por medio de la construcción de la denominada rosa de vientos. Para esto, se tomaron los mismos datos que para las precipitaciones proporcionados por Hydras 3 y posteriormente procesados con el paquete *Openair* en *R*, específicamente la función *windRose*.

La Figura 8 permite observar el diagrama de rosa de vientos a partir de la información recolectada del corregimiento La Loma en el Cesar - Colombia.

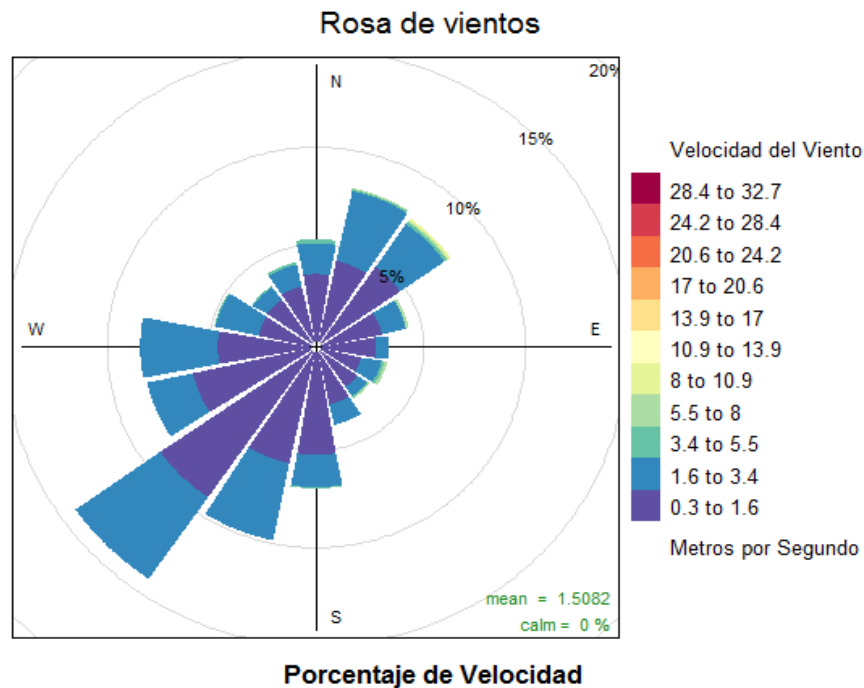


Figura 8. “Rosa de Vientos” del 1 de marzo al 3 de mayo de 2018 en La Loma - Cesar

La Figura 8 presenta la velocidad [m/s] mediante un código de colores para diferentes intervalos y la dirección de los vientos en un plano de puntos cardinales. Los porcentajes representan la cantidad de tiempo que los vientos se manifestaron en determinada dirección y velocidad. La clasificación de los vientos se obtuvo mediante la escala Beaufort de velocidad del viento presentada en el Apéndice D. Se analizó la velocidad media horaria del viento en el período comprendido entre el 1 de marzo y el 3 de mayo de 2018, dicho periodo carece de datos desde el 5 de marzo al 25 de abril del 2018. El equipo que mide la velocidad tiene una sensibilidad de $0,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

En la Figura 8 se deduce que hubo presencia del 62% de ventolina (color morado), dado que los vientos se encuentran en un rango de $0,3$ a $1,6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ y 37% de brisa suave (color azul) el cual corresponde al rango de $1,6$ a $3,4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, Este tipo de vientos se presentaron en diferentes direcciones, predominando los provenientes del Suroeste hacia la estación meteorológica en un 9% de ventolina y 7% de brisa suave. Los vientos con mayor velocidad se dirigen desde el Noreste y Nor-Noreste hacia la estación del IDEAM, alcanzando un rango de velocidades

máximo entre 8 a 10,9 m · s⁻¹, (color verde claro), corresponden a brisa fresca, durante cortos periodos de tiempo, con una participación de 1%. La brisa moderada comprendida en el rango de 5,5 a 8 m.s⁻¹ (color turquesa) se presentó en el 1% del tiempo con dirección Norte, Nor-Noroeste y Este- Sureste.

La ubicación de la “Rosa de Vientos” sobre el mapa de localización de la estación meteorológica y la estación ZM1 permite una mejor interpretación de la influencia de los vientos en la zona de estudio (Figura 9).



Figura 9. Ubicación de la Rosa de Viento sobre mapa de la estación meteorológica Loma Carbones del Cesar

La Figura 9, permite observar que los vientos predominantes como ventolina y brisa suave se dirigen desde la estación ZM1 hacia la estación meteorológica, la cual se encuentra anexa a la mina de carbón. Además, las brisas frescas que se presentan desde la mina hacia el corregimiento La Loma son escasas (1%). Lo anterior, sugiere que, durante el periodo de tiempo en estudio, la presencia de PM₁₀ en el corregimiento se debe a sus actividades propias y no por arrastre proveniente de la mina, sin embargo, esto se analiza más adelante.

Por otro lado, las altas velocidades del viento se relacionan con la presencia de precipitaciones (Montoya et al., 2013). Entre mayor sean las precipitaciones, mayor será la

velocidad del viento. Además, la velocidad del viento tiene efectos sobre la cantidad de PM₁₀ emitido (Cichowicz et al., 2020). A velocidades de viento bajas la concentración de PM₁₀ tiende a aumentar. Estas premisas corroboran los resultados encontrados en este estudio, en relación con el material particulado y la precipitación. Por consiguiente, en la temporada húmeda los niveles de material particulado fueron menores a los presentados en la temporada seca.

4.2. Selección de modelos de receptor

La selección de los modelos de receptor se llevó a cabo realizando un balance entre la información requerida por el software para poder ejecutarlo (variables de entrada) y la información suministrada por el modelo al usuario (variables de salida). A continuación, el resumen de esta información se puede apreciar en la Tabla 3.

Tabla 3.
Variables de entada y salida de los modelos de receptor

Modelo	UNMIX	PMF	CMB
Variables de entrada	Concentraciones de las especies analizadas	* Concentraciones de las especies químicas * Incertidumbres de especies químicas * Número base de fuentes	* Los perfiles especiales de fuentes potencialmente contribuyentes
Variables de salida	Calcula el número de tipos de fuentes, perfiles y contribuciones de las fuentes	Calcula perfiles de fuente y contribuciones de origen	Calcula valores de contribuciones de cada fuente
Referencia	(US EPA, n.d.-a)	(US-EPA, 2014)	(Watson et al., 2004)

Dado que se desconocen los perfiles de las fuentes de contaminación, se descartó el modelo CMB. Por consiguiente, se seleccionaron los modelos UNMIX y PMF; dado que los datos que se deben suministrar para el desarrollo de modelos corresponden a la concentración e incertidumbre de las especies analizadas en el PM₁₀, y las variables de salida de estos modelos dan respuesta a los objetivos planteados.

4.3. Depuración de datos

La caracterización fisicoquímica de las especies analizadas compone un 74% del PM₁₀ medido gravimétricamente, y el 26% restante se atribuye a la presencia de constituyentes no analizados y/o agua ligada las partículas (ver Figura 10). Sin embargo, para que el balance de masa que sea consistente con los resultados de los modelos (ya que estos solo trabajan con las especies analizadas), se decidió retirar la excedencia de PM₁₀ total, por lo que los demás grupos se redistribuyeron de la manera como se muestra en la Figura 11:

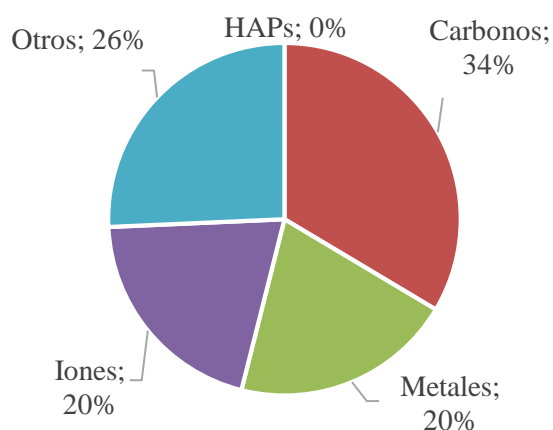


Figura 10. Contribución másica del PM₁₀

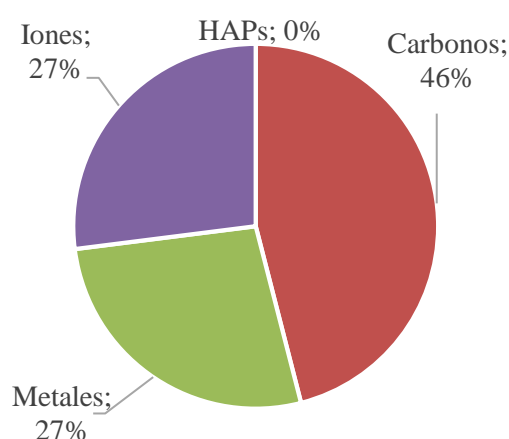


Figura 11. Contribución másica ajustada del PM₁₀

En la Figura 11 se puede observar que el PM₁₀ se compone mayoritariamente de carbonos, quienes aportan un 46% a la masa total. La contribución de los iones y metales tiene una participación del 27% y en cuanto a los HAPs, definitivamente no tienen un aporte significativo en las mediciones del PM₁₀.

En consecuencia, se analizó el aporte másico de las especies presentes en el PM₁₀. Como resultado se obtuvo que de los cincuenta y nueve compuestos metálicos, solamente siete sobresalieron: Sodio (Na₂₃), Magnesio (Mg₂₅), Aluminio (Al₂₇), Azufre (S₃₂), Sodio (K₃₉),

Calcio (Ca₄₂), Hierro (Fe₅₆); respecto a los compuestos iónicos se destacó el Ion Calcio (Ca²⁺), Ion Magnesio (Mg²⁺), Cloruro (Cl⁻), Nitrato (NO₃⁻), Sulfato (SO₄²⁻), Ion Sodio (Na⁺), Ion Potasio (K⁺), por el contrario, el Fosfato (PO₄³⁻) y el Amonio (NH₄⁺) presentaron un valor del 0%. En cuanto a los carbonos, tanto el Carbono Orgánico (OC) como el Carbono Elemental (EC) resultaron ser relevantes. En la Figura 12 se presentan los aportes porcentuales de cada especie:

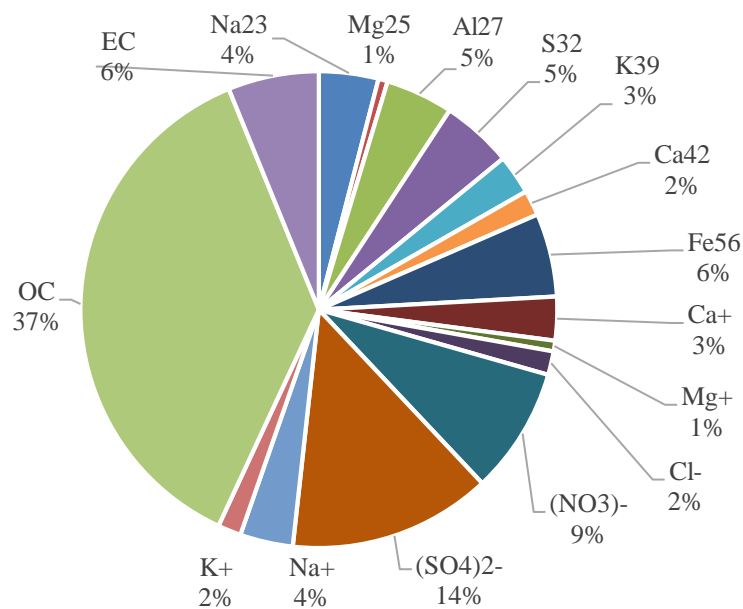


Figura 12. Acumulado másico

En la Figura 12 se observa que la especie mayoritariamente contribuyente a la masa del PM₁₀ es el OC con un 37% de participación, seguido del SO₄²⁻ con el 14% y el NO₃ con el 9%. Es de esperarse que estos valores tengan un significado relacionado a las fuentes de contaminación y se explicará más adelante.

Seguidamente como tarea prioritaria se construyeron las matrices de datos requeridas por los modelos de receptor. Se depuró la matriz general de las concentraciones, de manera que las especies irrelevantes se eliminaron de la misma. Por otro lado, se eliminaron las muestras que no tenían mediciones de todos los compuestos, ya que así lo sugieren estudios realizados anteriormente (Morales y Rojas, 2018), es decir, se seleccionaron las muestras tomadas cada

tercer día. Sin embargo, como el proceso de muestreo se empezó en días diferentes y se quiso tener la máxima cantidad de muestras posibles, los datos faltantes de concentración e incertidumbre se reemplazaron por 1/2 del límite de detección y 1/6 del límite de detección respectivamente como lo indican los manuales de usuario de los programas (US-EPA, 2014). El cálculo del límite de detección se llevó a cabo usando la ecuación (2) (Herrera y Rodríguez, 2010).

$$L_D = \hat{c}_B + 3(std_B) \quad (2)$$

Siendo:

L_D : Límite de detección [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$]

\hat{c}_B : Concentración de señal promedio del blanco [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$]

std_B : Desviación estándar de la concentración [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$]

Partiendo de los supuestos anteriores, se construyeron las matrices ajustadas de concentración e incertidumbre que se exponen en los Apéndices D y E respectivamente. La matriz ajustada de concentraciones está compuesta por la fecha en la que se tomaron las 22 muestras resultantes de la depuración, la concentración de 16 especies químicas y del PM₁₀. La matriz ajustada de incertidumbres reemplaza las concentraciones por el valor de incertidumbre correspondiente a cada especie.

Cabe resaltar que el procedimiento no se realizó de manera inversa, es decir no se reemplazaron las muestras faltantes de los carbonos, dado que, es el grupo mayoritariamente contribuyente al PM₁₀ y la cantidad de muestras faltantes de este corresponden a más de la

mitad (42) del número de muestras totales (64), por lo que se podría aumentar el error en los resultados finales.

4.4. Implementación De Los Modelos De Receptor

4.4.1. Modelo UNMIX

La descripción de cálculos del modelo *UNMIX* de la matriz ajustada de concentraciones se presenta en el Apéndice E. Los resultados generales obtenidos mediante este programa se muestran en la Figura 13.

# Species	# Obs	# Sources	Min. Rsq	Min. Sig/Noise
17	23	4	0.91	2.39

Figura 13. Resultados generales de UNMIX

En la Figura 13 se manifiestan que el número de especies analizadas fueron 17, se hallaron 4 fuentes emisoras de PM₁₀ con un ajuste de R² mínimo de 0,91, lo que se adapta al valor que sigue la guía, el cual debería ser mayor o igual a 0,8. Además, la S/N calculada es de 2,39, otra variable de ajuste que cumple con las recomendaciones de *UNMIX*, pues este debe ser superior a 1,5, entonces los resultados obtenidos se consideran confiables. En la Figura 14 se presenta la regresión lineal del PM₁₀ en base a los valores medidos y los valores predichos por el programa.

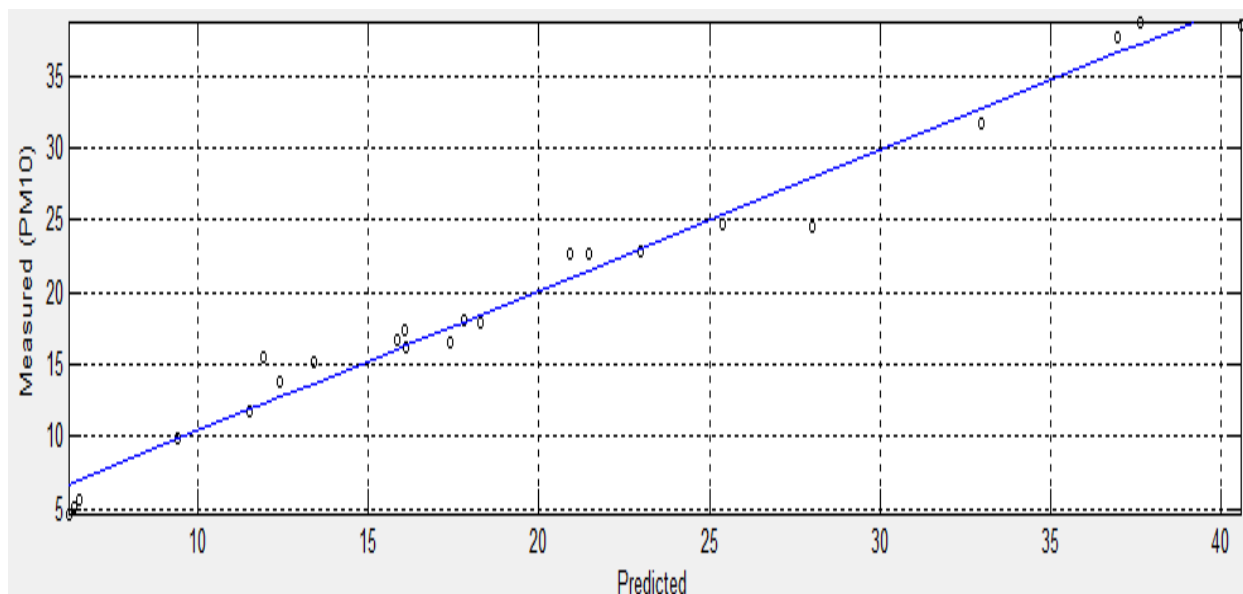


Figura 14. Regresión lineal de PM₁₀ en el Modelo UNMIX

La regresión de la Figura 14 presenta un ajuste del 98%, lo que indica que *UNMIX* está acoplado eficientemente sus cálculos a los datos de entrada, cabe resaltar que las demás especies presentaron un R^2 mayor a 0,8.

4.4.2. Modelo *PMF*

El modelo *PMF* requiere insertar tanto la matriz ajustada de concentraciones como la de incertidumbres (Apéndices D y E). Posteriormente, se hace necesario categorizar las especies según el valor de S/N que las representa. Todas las especies excepto uno, presentaron valores mayores a 1, por lo que se categorizaron como especies fuertes (strong); el PM₁₀ y el Na⁺ fueron los categorizados como débiles (weak), dado que el primero se escogió como especie totalizadora, el programa por defecto le da esta clasificación y el segundo porque el valor de S/N corresponde a 0,7.

En vista de la confiabilidad de los resultados obtenidos por *UNMIX* se asumió el número de factores como 4, para que *PMF* se ejecutara. Todas las especies presentaron una variable de ajuste R^2 mayor a 0,8, exceptuando al Na⁺ (0,29) como era de esperarse por sus valores de S/N, esto quiere decir que es el único compuesto que no se ajusta completamente al

modelo establecido por el programa como consecuencia de altos valores de incertidumbre respecto a los demás compuestos.

La Figura 15 representa la regresión lineal entre los valores predichos por UNMIX y los valores medidos físicamente.

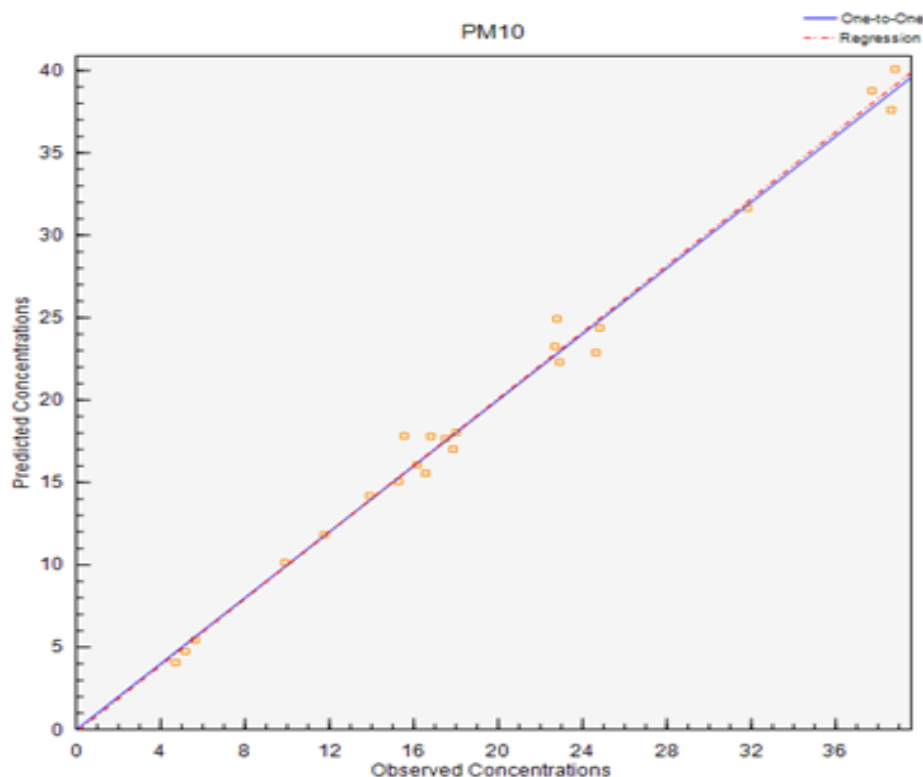


Figura 15. Regresión lineal del PM₁₀ en el Modelo PMF

De la Figura 15 se deduce que el PM₁₀ mostró un ajuste de la regresión lineal de 0,99, lo que representa la veracidad de los resultados mediante el modelo PMF y un ajuste a los parámetros de la guía de *UNMIX* (Norris et al., 2007).

4.4.3. Identificación de las fuentes generadoras de PM₁₀

Mediante el uso de los modelos de receptor, se determinó cuantitativamente el aporte que realiza cada especie química a las fuentes emisoras, esta información se denomina perfil químico de la fuente y se pueden encontrar detalladamente en los Apéndices F y G. Obtenidos

los perfiles químicos, se procedió a usar la base de datos *Speciate*, con la cual se identificaron las fuentes generadoras de PM₁₀.

En la Tabla 4 se expone un resumen de las fuentes emisoras identificadas y sus perfiles químicos.

Tabla 4.
Fuentes emisoras de PM₁₀

Fuente	Especies según UNMIX	Fuente identificada por <i>Speciate</i>	Especies según PMF	Fuente identificada por <i>Speciate</i>
1	EC, OC, NO ₃ ⁻ , Na ⁺ , K ⁺ , K ₃₉ , Al ₂₇ , S ₃₂	Escape Motor Diese/Gasolina	OC, Fe ₅₆ , Al ₂₇ S ₃₂ , Na ₂₃ , K ₃₉ , Mg ₂₅ , Ca ₄₂ , Mg ²⁺ , K ⁺ SO ₄ ²⁻ , NO ₃ ⁻ , EC	Polvo de Camino Despavimentado
2	SO ₄ ²⁻ , Mg ²⁺ , Mg ₂₅ , Na ₂₃ , Cl ⁻ , S ₃₂ , K ⁺ , Ca ²⁺	Quema de Residuos Sólidos	OC, EC, SO ₄ ²⁻ , NO ₃ ⁻ , Ca ²⁺ , Cl ⁻ , Na ⁺ , Na ₂₃ , S ₃₂ , Fe ₅₆ , K ⁺ , Al ₂₇ , K ₃₉ , Mg ²⁺	Incendios Forestales
3	OC, SO ₄ ²⁻ , NO ₃ ⁻ , EC, Ca ₄₂ , Ca ²⁺ , S ₃₂ , K ₃₉ , K ⁺ , Mg ²⁺ , Fe ₅₆	Incendios Forestales	SO ₄ ²⁻ , Cl ⁻ , S ₃₂ , K ₃₉ , NO ₃ ⁻ , Fe ₅₆ , Ca ²⁺ , Al ₂₇ , K ⁺	Quema de Residuos Sólidos
4	Fe ₅₆ , Al ₂₇ , S ₃₂ , Ca ₄₂ , K ₃₉ , Na ₂₃ , Mg ₂₅ , OC, SO ₄ ²⁻ , Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , NO ₃ ⁻ y Cl ⁻	Polvo de Camino Despavimentado	OC, EC, SO ₄ ²⁻ , NO ₃ ⁻ , Ca ²⁺ , Na ₂₃ , Na ⁺ S ₃₂ , Fe ₅₆ , K ⁺ , K ₃₉	Escape Motor Diese/Gasolina

En la Tabla 4 se observa que, aunque los programas no coinciden con el número de fuente que otorgan, si coexiste una relación entre las especies representativas de algunas de ellas. Dado lo anterior y con los resultados obtenidos mediante *Speciate*, se concluyó que, los dos modelos utilizados reportaron similitud en la caracterización de las fuentes emisoras de PM₁₀, información que fue corroborada por medio de revisiones bibliográficas. A continuación, se describe brevemente cada perfil:

Escape Motor Diesel / Gasolina: Este perfil se caracteriza por el aporte significativo de EC y OC (Bove et al., 2016) junto con otros iones y metales (Na⁺ y S₃₂) (Rojas y Castro,

2015) que coinciden con los resultados de los modelos de receptor y posteriormente evaluados con *Speciate* cuyo perfil se observa en el Apéndice J, dado que presentan contribuciones en promedio de los dos modelos tales como OC (70%) y EC (14%) y en menor proporción NO₃⁻ (5%), SO₄²⁻ (7%), Na⁺ (6%) y S₃₂ (2%).

Quema de Residuos: Según *Speciate* esta fuente se caracteriza por la alta concentración compuestos iónicos como Cl⁻ y SO₄²⁻ y compuestos metálicos como K₃₉ y S₃₂, el

Apéndice I se encuentra la contribución de especies según la base de datos de US-EPA, las contribuciones calculadas por los programan se aproximan al 16%, 14%, 3% y 10% respectivamente. Esta información fue verificada por medio de una revisión bibliográfica en (Andrea Juliana Hernández Villamizar, Néstor Yesid Rojas, 2012) quien sugiere la presencia de Cl⁻, SO₄²⁻.

Incendios Forestales: Su mayor contribuyente es el OC con una participación en promedio del 40%; según la literatura, la presencia conjunta de estas cantidades de OC, K⁺ y K₃₉, hacen referencia a los incendios forestales (Rojas y Castro, 2015), además según estudios realizados anteriormente por Corpocesar, los siguieren como una de las principales fuentes de contaminación de la zona (Corpocesar, 2018). No obstante, también se reportó la presencia de EC (6%), NO₃⁻ (14%), SO₄²⁻ (16%) propias de la combustión y en menor porcentaje el S₃₂ (2%), Na₂₃ (2%), Na⁺ (3%), Ca²⁺ (4%), Ca₄₂ (1%), Fe₅₆ (2%), asociándose de esta manera al perfil obtenido mediante *Speciate*, que se expone en el Apéndice K.

Polvo de Camino Despavimentado: El perfil sugerido por *Speciate* se evidencia en el Apéndice L, sugiere la participación mayoritariamente de compuestos metálicos como Ca₄₂, Al₂₇, Fe₅₆, K₃₉, Mg₂₅, S₃₂ cuyos reportes según los modelos de receptor corresponden al 4%, 14%, 15%, 8%, 2% respectivamente, también indica la presencia en alta proporción del OC (18%) y una baja contribución del EC (3%); en cuantos a los iones que aportan material

particulado a la fuente se encontraron el SO_4^{2-} (10%), NO_3^- (4%) y K^+ (1%). Esta hipótesis se respalda con información bibliográfica (Espitia y Porras, 2017) quien sugiere que estos compuestos en las respectivas concentraciones hacen referencia a material geológico y polvo suspendido. Lo anterior concuerda con las vías despavimentadas de la zona y adicionalmente, el informe de Corpocesar expresa que en las fechas en las que se tomaron las muestras, se presentó un aumento de obras civiles en la vía principal del corregimiento (Corpocesar, 2018).

Las figuras 16 y 17 presentan los resultados del aporte cuantitativo de cada fuente emisora de PM₁₀ identificada mediante los modelos de receptor *UNMIX* y *PMF* respectivamente.

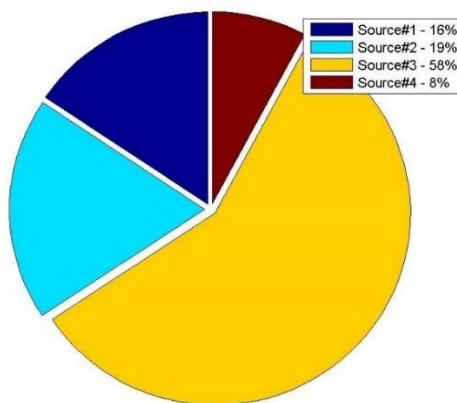


Figura 16. Contribución de fuentes de contaminación mediante UNMIX

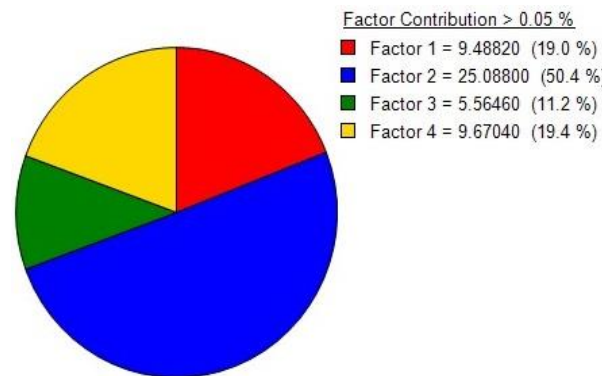


Figura 17. Contribución de fuentes de contaminación mediante PMF

En las figuras 15 y 16 se observa que el número de fuentes emisoras de PM₁₀ es 4, se debe mencionar que *UNMIX* se refiere a las fuentes como “Source” y *PMF* como “Factor”. Sin embargo, para realizar la comparación entre los modelos se decidió unificar los resultados en el diagrama de barras presentado en la Figura 18.

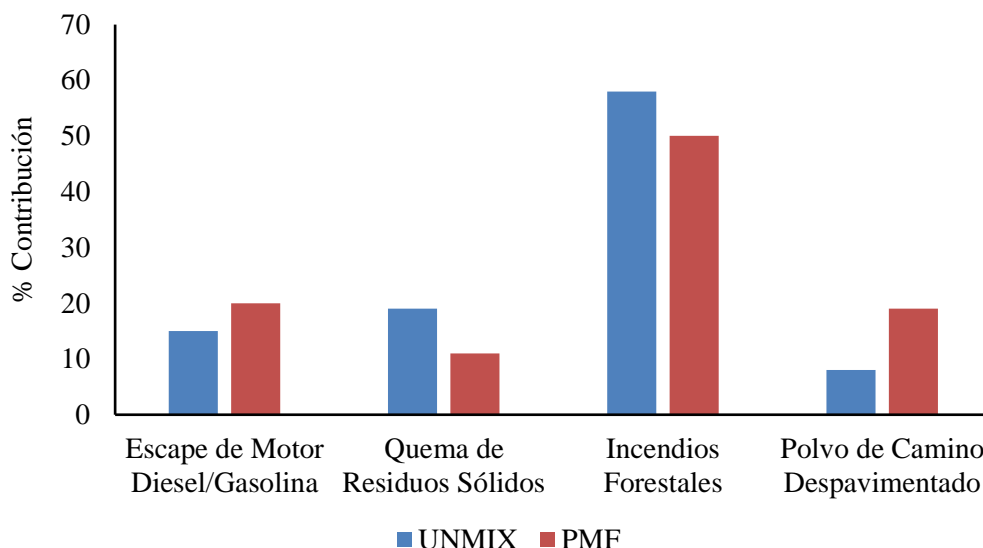


Figura 18. Aporte cuantitativo de las fuentes generadoras de PM₁₀

La Figura 18 expone leves discrepancias en los resultados, se reportó una diferencia mínima de 5% que corresponde al perfil de Escape de Motor Diesel/Gasolina y una diferencia máxima del 11% en el perfil de Polvo de Camino Despavimentado, en tanto la Quema de Residuos e Incendios Forestales presentaron una divergencia del 8%. Lo anterior puede ser acogido dada la información solicitada por cada modelo y los modelos matemáticos que usan en la resolución del problema. No obstante, se asume que existe congruencia entre los resultados obtenidos mediante los modelos de receptor y se comprueba la veracidad de estos.

Complementando lo anterior, se observa que el material particulado PM₁₀ es emitido principalmente por Incendios forestales quien promediando los resultados de los modelos reporta una contribución del 54%, esto se puede atribuir a las altas temperaturas que constantemente son reportadas por el IDEAM en su base de datos de Hydras 3 y que oscilan entre los 26°C y 37°C. Por su parte, el Escape de motor Diesel / Gasolina (18% en promedio), quien ha demostrado en diversos estudios la influencia significativa en la contaminación del aire (Herrera et al., 2012), es el segundo en la lista de contribuyentes al PM₁₀, lo que toma sentido dado que, en La Loma se desarrolla la explotación de carbón, principal actividad

económica del departamento y por ende se espera que sea un lugar altamente transitado por vehículos.

En cuanto a la Quema de residuos (promediando 15%) se debe resaltar que es una actividad netamente humana que está repercutiendo en la salud de los mismos habitantes que la practican e incluso los que no lo hacen, dicha actividad se ha llevado a cabo a lo largo de la historia y se sigue realizando ya sea por costumbre o por falta de gestión de residuos por parte de las entidades sanitarias encargadas, cuando el sistema de recolección de basuras falla, las personas queman los desechos para evitar la proliferación de moscos, malos olores y enfermedades (Instituto Colombiano de Bienestar Familiar, 2017). En el último lugar se consideró el Polvo de Camino Despavimentado quien presenta un promedio de 14%, no muy distante del valor anterior, su participación se atribuye a las obras civiles y sobre todo a las vías despavimentadas en el corregimiento La Loma, por el transporte de vehículos pesados como volquetas y tractomulas hace que se desprenda el polvo suspendido en la superficie de la carretera (Corpocesar, 2018).

El informe de Corpocesar (Corpocesar, 2018) indica que, las actividades que generan material particulado en el departamento son principalmente minero-industrial, transporte, construcciones, vías destapadas, quema de residuos a cielo abierto, combustibles fosiles y producción de palma de aceite. Las fuentes de contaminación identificadas en el corregimiento La Loma, hacen parte del conjunto de actividades mencionado anteriormente, por lo que los resultados presentan una congruencia con los informes establecidos sobre la zona.

5. Conclusiones

Los resultados obtenidos en el presente trabajo corresponden al periodo de estudio comprendido desde el 01/mar/2018 hasta 03/05/2018, es decir aproximadamente 2 meses. Se concluye que para tomar decisiones a gran escala sobre las estrategias de mitigación de la contaminación del aire del corregimiento La Loma – Cesar se deben tener en cuenta estudios complementarios sobre la calidad del aire de la zona en diferentes años y periodos de tiempo durante los mismos.

Los resultados obtenidos en el presente trabajo se basaron en el análisis del 74% de la masa del PM₁₀ reportada, dado que, los resultados entregados por el laboratorio contenían un 26% de material particulado no analizado.

En el periodo seco se identificaron las concentraciones más altas de PM₁₀. Los días lluviosos fueron de poca intensidad y, sin embargo, las concentraciones de PM₁₀ fueron bajas respecto a las presentadas en el periodo seco. Por consiguiente, se concluye que las lluvias reducen los niveles de material particulado en el aire.

El estudio de los vientos (intensidad y dirección) mostró que las ventolinas y brisas suaves dirigidas desde la estación ZM1 hacia la estación *Loma Carbones* del Cesar y las brisas frescas y moderadas en dirección hacia el corregimiento *La Loma* fueron escasos y no arrastran material particulado desde la mina en el periodo en estudio.

Los modelos de receptor *UNMIX 6.0* y *PMF 5.0* identificaron que, en el periodo de muestras, las fuentes emisoras de PM₁₀ son propias de las actividades que realiza el corregimiento *La Loma* y corresponden a fuentes móviles como el escape de motor

Diesel/Gasolina y fuentes fijas como la Quema de Residuos Sólidos, Incendios Forestales y Polvo de Camino Despavimentado.

Se identificó que los incendios forestales son responsables de más de la mitad del PM₁₀, en tanto las demás fuentes expresan un aporte similar entre sí, que sumadas entre ellas no superan a los Incendios Forestales.

6. Recomendaciones

Para futuros proyectos de identificación y cuantificación de fuentes generadoras de PM₁₀, se debe realizar monitoreos diarios y simultáneos en los filtros de teflón, borosilicato y cuarzo, con el objetivo de tener un mayor número de muestras y por ende un mejor desarrollo de los modelos de receptor, pues así lo sugieren sus manuales de usuario.

Para tomar decisiones respecto a la implementación de estrategias de mitigación de contaminación de aire, se recomienda realizar la caracterización fisicoquímica del PM₁₀ de todos los días del año, con el fin de evaluar la presencia única de las fuentes emisoras identificadas en el presente trabajo o dado el caso, identificar otra(s) fuentes que no se manifestaron durante el periodo en estudio.

Se aconseja analizar la totalidad del PM₁₀ muestreado con el fin de hacer uso de información más completa en la implementación de los modelos de receptor. Además, se sugiere el análisis fisicoquímico de la especie silicio (Si), dado que es un trazador importante relacionado con el material particulado proveniente del suelo.

Referencias Bibliográficas

- Behrentz, E., Sánchez, A., y Rivera, J. (2009). *Elementos técnicos del plan decenal de descontaminación de Bogotá*. (pp. 1–46).
- Belis, C. A., Larsen, B. R., Amato, F., Haddad, E., Favez, O., Harrison, R. M., Hopke, P. K., Nava, S., Paatero, P., Prévôt, A., Quass, U., y Vecchi, R. (2014). *European guide on with receptor models air pollution source apportionment Report EUR 26080 EN*.
<https://doi.org/10.2788/9307>
- Bove, M. C., Brotto, P., Calzolari, G., Cassola, F., Cavalli, F., Fermo, P., Hjorth, J., Massabò, D., Nava, S., Piazzalunga, A., Schembari, C., y Prati, P. (2016). PM₁₀ source apportionment applying PMF and chemical tracer analysis to ship-borne measurements in the Western Mediterranean. *Atmospheric Environment*, 125(November), 140–151.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.11.009>
- Bruinen, Y., Koistinen, K., Yli-Tuomi, T., Kephelopoulus, S., y Jantunen, M. (2006). *SOURCE Apportionment techniques and marker substances available for identification of personal exposure, in door and outdoor sources of chemicals*.
- Cichowicz, R., Wielgosiński, G., y Fetter, W. (2020). Effect of wind speed on the level of particulate matter PM₁₀ concentration in atmospheric air during winter season in vicinity of large combustion plant. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 45–46.
<https://doi.org/10.1007/s10874-020-09401-w>
- Corpocesar. (2018). *Informe anual de operación del sistema especial de vigilancia de calidad de aire en la zona carbonífera del Departamento del Cesar*. 19.
- Corpocesar. (2019). *Informe mensual SEVCA_ZCC-Enero 2019*.
- Corporación Autónoma del Cesar. (2016). *Diseño, implementación y operación de las redes de*

monitoreo de los recursos naturales en el área de jurisdicción de Corpocesar. In *Resumen ejecutivo de proyectos* (Vol. 1). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

Departamento Nacional de Planeación. (2018). *Presentación Calidad del aire: Una prioridad de política pública en Colombia*. [https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Prensa/Presentación Calidad del Aire 15_02_2018.pdf](https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Prensa/Presentación%20Calidad%20del%20Aire%2015_02_2018.pdf)

Dordevié Dragana, Petrovié Sedar, Relié Dubravka, M.-Z. A. (2000). *Applying receptor models Unmix and PMF on real data set of elements in PM for sources evaluation*.

Follos Pliego, F. (2012). *Lenguaje R aplicado al análisis de datos de Calidad del Aire* (p. 121).

Google Earth. (n.d.-a). *Corregimiento La Loma*. Retrieved April 16, 2020, from <https://earth.google.com/web/@9.6352315,-73.56612011,55.64602168a,14472.31406183d,35y,-0h,0t,0r/data=MicKJQojCiExMVIVb05pZHBXUllxWnJPdzBJMGU1VHIwOXd2dDhqVkY6AwoBMA?authuser=0>

Google Earth. (n.d.-b). *Estación Meteorológica Loma Carbones del Cesar - Estación ZM1 La Loma Centro*. Retrieved April 16, 2020, from <https://earth.google.com/web/@9.63104396,-73.57653297,56.37995112a,14471.58127885d,35y,-0h,0t,0r/data=MicKJQojCiExX01TYzNHZEFVcTk3T2dKN3BiOEtoVnpPc2JJdGZIZ2M6AwoBMA?authuser=0>

Hernández, A., Rojas, N., p. d. (2012). *Análisis de la variación espacial de los componentes del material particulado respirable en la zona carbonífera del departamento del Cesar*. 66, 37–39.

- Herrera, J., y Rodríguez, S. (2010). Validación de un método de análisis para la determinación de metales pesados en partículas PM₁₀ colectadas en aire ambiente. *Tecnología En Marcha*, 23(3), 33–46.
- Herrera, J., Rodríguez, S., y Rojas, J. F. (2012). Determinación de las emisiones de contaminantes del aire generadas por fuentes móviles en carreteras de Costa Rica. *Revista Tecnología En Marcha*, 25(1), 54. <https://doi.org/10.18845/tm.v25i1.176>
- Hsu, Y., Divita, F., y Dorn, J. (2019). *SPECIATE: Guidelines for Data Developers* (Vol. 01, Issue 02). <https://doi.org/10.36548/jsws.2019.2>
- IDEAM; Minambiente; Gobierno de Colombia. (2017). *Informe del estado de la calidad del aire en colombia 2017*.
- Instituto Colombiano de Bienestar Familiar. (2017). *Programa manejo de residuos regional Cesar*.
- K2 Ingeniería. (n.d.). Retrieved March 22, 2020, from <https://www.k2ingenieria.com/>
- Kleeman, M. (2003). *Review of source apportionment techniques for airborne particulate matter* (Issue February).
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo sostenible. (2017). *Resolución 2254. Ministerio De Ambiente Y Desarrollo Sostenible*. http://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/resoluciones/96-res_2254_de_2017.pdf
- Montoya Rendon, M. L., Zapata Saldarriaga, P. M., y Correa Ochoa, M. A. (2013). Contaminación ambiental por PM₁₀ dentro y fuera del domicilio y capacidad respiratoria en Puerto Nare, Colombia. *Revista de Salud Publica*, 15(1), 109. <https://doi.org/10.15446/rsp.15.1.109>

- Morales, M., y Rojas, N. (2018). *Contribución de fuentes particulares a Material Particulado en el corregimiento la Loma , Zona Minera del Cesar.*
- Norris, G., Vedantham, R., Rachelle Duvall, y Henry, R. C. (2007). EPA Unmix 6 . 0 Fundamentals y User Guide. In *Us Epa* (p. 97). <http://www.epa.gov/heasd/research/unmix.html>
- Ortiz, H. C., Castro, R., Chacón, J., Rodríguez, L., y Herrera, A. (2011). *Caracterización fisicoquímica de material particulado y aplicación de modelos receptor-fuente en el área metropolitana de bucaramanga.*
- R - Project. (n.d.). *R: The R Project for Statistical Computing*. Retrieved March 28, 2020, from <https://www.r-project.org/>
- Rojas, N., y Henry, C. (2015). *Caracterización físico-química del material particulado y aplicación de modelos receptor en una población cercana a un proyecto minero en el departamento del cesar physico-chemical characterization of particulate matter and application of receptor models.* UIS.
- Srithawirat, T., Latif, M. T., y Sulaiman, F. R. (2016). Indoor PM₁₀ and its heavy metal composition at a roadside residential environment, Phitsanulok, Thailand. *Atmosfera*, 29(4), 317–318. <https://doi.org/10.20937/ATM.2016.29.04.03>
- Espitia Cano, S. O., y Porras Montaña, S. P. (2017). *Identificación preliminar del aporte de fuentes del material particulado susceptible de resuspensión en vías de Bogotá.* 100.
- US-EPA. (2014). *EPA Positive Matrix Factorization (PM F) 5 . 0 Fundamentals and.* 136. https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-02/documents/pmf_5.0_user_guide.pdf
- US EPA. (n.d.-a). *Unmix 6.0 Model for environmental data analyses.*
- US EPA. (2016). *Receptor Modeling | TTN - Support Center for Regulatory Atmospheric*

Modeling. 27 Septiembre.

US EPA, O. O. of A. Q. P. and S. (n.d.-b). *Air Quality Models*. Retrieved March 23, 2020, from <https://www3.epa.gov/ttn/scram/aqmindex.htm>

Vásquez Villanueva, S. (2017). *Manual de mantenimiento de los equipos pm10 hi- vol utilizados en la medición de material particulado* (Vol. 1, Issue 1). <https://doi.org/10.17162/rmi.v1i1.772>

Watson, J. G., Robinson, N. F., Lewis, C., y Coulter, T. (2004). *Chemical Mass Balance Receptor Model Version 8 (CMB8) User's manual* (Vol. 8, Issue 1808). <https://www3.epa.gov/ttn/scram/models/receptor/EPA-CMB82Manual.pdf>

Apéndices

Apéndice A. Distribución de las estaciones meteorológicas por estaciones de monitoreo

Código	Estación	Estación meteorológica asociada	Código	Estación	Estación meteorológica asociada
ZM01	La Loma	Loma	ZM13	El Hatillo	La Francia CDC IDEAM
ZM02	Jagua Centro	Jagua	ZM15	Chiriguaná	Chiriguaná
ZM03	La Loma 2	Loma	ZM19	Becerril	Casacará
ZM04	Palmitas	Borrego	ZM20	Costa Hermosa	Loma
ZM05	La Aurora	Chiriguaná	ZM21	La Victoria	PLJ
ZM06	Boquerón	Borrego	ZM22	Casacará	Casacará
ZM07	Plan Bonito	Calenturitas			
ZM09	Jagua Vía	Jagua			
ZM12	Rincón Hondo	Chiriguaná			

Adaptado de: (Corpocesar, 2018b)

Apéndice B. Normativa colombiana sobre PM₁₀.**Tabla B1.***Niveles máximos permisibles de PM₁₀ en Colombia.*

Contaminante	Nivel Máximo	Tiempo de Exposición
	Permisible [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	
PM ₁₀	50	Anual
	100	24 horas

Adaptado de: (Ministerio de Ambiente y Desarrollo sostenible, 2017)**Tabla B2.***Puntos de corte del ICA*

ICA	Índice de Calidad del Aire		Puntos del corte del ICA
	Color	Categoría	PM ₁₀ [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$] en 24 horas
0-50	Verde	Buena	0-54
51-100	Amarillo	Aceptable	55-154
101-150	Naranja	Dañina a la salud de Grupos Sensibles	155-254
151-200	Rojo	Dañina a la salud	255-354
201-300	Púrpura	Muy dañina a la salud	355-424
301-500	Marrón	Peligrosa	425-604

Adaptado de: (Ministerio de Ambiente y Desarrollo sostenible, 2017)

Apéndice C. Escala de precipitación según el IDEAM.

Denominación	Precipitación diaria [mm]	Precipitación Mensual [mm]
Escasa	0-5	0-20
Ligera	6-10	21-40
Moderada	11-20	41-80
Fuerte	21-50	81-200
Muy Fuerte	51-70	201-280
Intensa	>70	>281

Adaptado de: (Corpocesar, 2018)

Apéndice D. Escala de velocidad del viento – Beaufort

Denominación	Velocidad del viento [m/s]
Calma	0,0-0,2
Ventolina	0,3-1,5
Brisa suave	1,6-3,3
Brisa leve	3,4-5,4
Brisa moderada	5,5 - 7,9
Brisa fresca	8,0 - 10,8
Brisa fuerte	10,9 - 13,8
Viento fuerte	13,9 - 16,9
Viento duro	17,0 - 20,5
Muy duro	20,6 - 24,1
Temporal	24,2 - 28,3
Borrasca	28,4 - 32,6
Huracán	≥ 32,7

Adaptado de: (Corpocesar, 2018)

Apéndice E. Matriz ajustada de concentraciones de especies

FECHA	PM ₁₀	Ca ⁺	Mg ⁺	Cl ⁻	(NO ₃) ⁻	(SO ₄) ²⁻	Na ⁺	K ⁺
03-01-2018	15,279	0,642	0,167	0,402	2,026	3,029	0,891	0,350
03-04-2018	11,750	0,642	0,167	0,402	2,026	3,029	0,891	0,350
03-07-2018	31,814	0,945	0,334	0,735	4,218	4,560	2,335	0,664
03-10-2018	38,811	1,007	0,498	1,681	4,353	6,377	3,406	0,569
03-13-2018	37,719	0,847	0,197	0,218	2,737	3,999	1,168	0,814
03-16-2018	24,630	0,594	0,186	0,194	2,512	3,762	0,988	0,759
03-19-2018	38,633	0,814	0,270	0,264	3,631	4,627	1,817	0,879
03-22-2018	24,811	0,830	0,233	0,914	2,163	3,687	1,134	0,271
03-25-2018	22,688	0,330	0,069	0,049	1,033	1,518	0,335	0,172
03-28-2018	16,806	0,620	0,121	0,135	1,712	2,692	0,378	0,248
03-31-2018	16,563	0,610	0,110	0,057	1,209	3,434	0,343	0,517
04-03-2018	18,011	0,449	0,093	0,194	1,125	1,689	0,110	0,176
04-06-2018	16,166	0,735	0,148	0,351	2,562	2,863	0,624	0,290
04-09-2018	17,493	0,375	0,074	0,274	0,965	1,623	0,226	0,205
04-12-2018	22,908	0,933	0,175	0,486	2,245	3,813	0,531	0,308
04-15-2018	22,779	0,747	0,161	0,223	2,358	3,478	0,898	0,327
04-18-2018	17,858	0,578	0,105	0,261	1,336	2,968	0,232	0,378
04-21-2018	13,906	0,287	0,055	0,119	1,049	1,728	0,891	0,199
04-24-2018	15,550	0,463	0,072	0,110	1,063	1,547	0,049	0,025
04-27-2018	9,892	0,441	0,046	0,358	0,656	0,583	0,891	0,350
04-30-2018	5,627	0,636	0,164	0,395	1,985	3,000	0,891	0,337
05-01-2018	5,168	0,629	0,154	0,342	1,900	2,920	0,671	0,328
05-03-2018	4,708	0,622	0,147	0,317	1,853	2,855	0,620	0,323

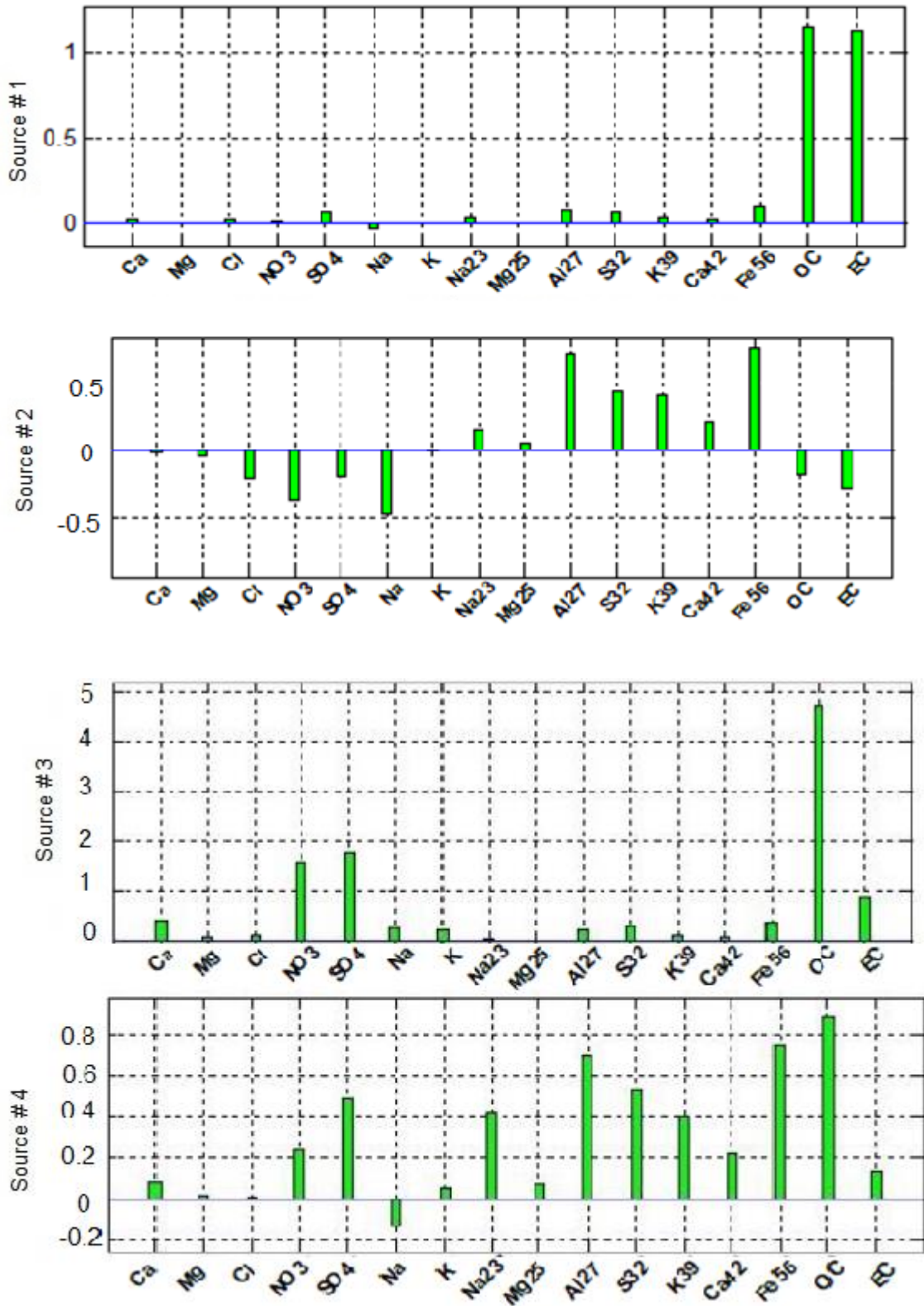
Na ₂₃	Mg ₂₅	Al ₂₇	S ₃₂	K ₃₉	Ca ₄₂	Fe ₅₆	OC	EC
0,928	0,138	0,974	1,037	0,578	0,363	1,216	10,857	1,977
0,928	0,138	0,974	1,037	0,578	0,363	1,216	7,567	1,619
0,719	0,131	0,837	0,519	0,368	0,257	0,819	12,310	1,820
3,641	0,396	1,521	2,372	1,011	0,676	1,858	11,630	1,426
1,100	0,206	1,432	1,458	1,027	0,525	1,477	17,133	3,097
1,041	0,148	0,748	1,394	0,817	0,333	1,019	7,566	2,333
1,847	0,322	2,793	1,946	1,474	0,764	2,826	12,194	1,671
1,692	0,282	2,220	1,317	1,177	0,775	1,923	5,355	0,513
1,105	0,263	2,119	1,599	1,277	0,684	1,983	8,775	1,092
0,259	0,061	0,509	0,779	0,247	0,186	0,547	7,196	1,022
0,408	0,065	0,534	1,031	0,432	0,291	0,805	5,617	0,952
1,130	0,180	1,754	1,495	0,946	0,543	2,185	4,759	0,923
0,123	0,023	0,181	0,236	0,113	0,088	0,295	6,475	0,980
0,298	0,062	0,785	0,591	0,294	0,209	0,973	8,229	7,910
1,288	0,136	1,286	1,570	0,840	0,627	2,374	5,300	0,713
0,399	0,058	0,686	0,746	0,292	0,229	0,958	9,673	1,423
0,678	0,113	1,162	1,196	0,731	0,435	1,826	4,778	0,875
0,120	0,034	0,197	0,659	0,209	0,075	0,214	7,222	1,543
0,341	0,033	0,236	0,580	0,152	0,155	0,504	8,918	1,242
0,038	0,021	0,233	0,239	0,134	0,132	0,494	4,871	0,668
0,928	0,138	0,974	1,037	0,578	0,363	1,216	3,181	0,000
0,928	0,138	0,974	1,037	0,578	0,363	1,216	8,223	1,389
0,928	0,138	0,974	1,037	0,578	0,363	1,216	8,223	1,389

Apéndice F. Matriz ajustada de incertidumbres de especies

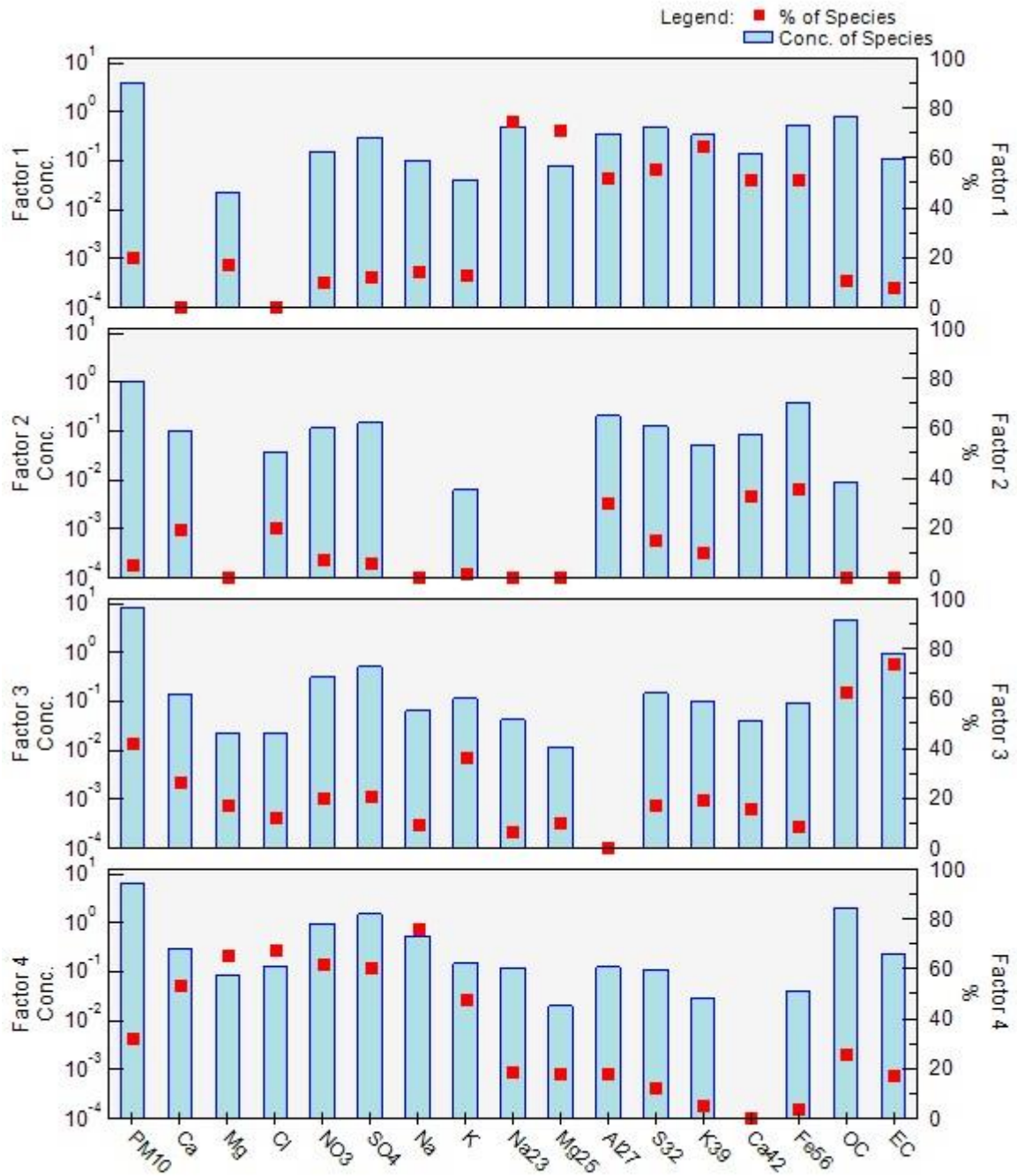
FECHA	PM ₁₀	Ca ⁺	Mg ⁺	Cl ⁻	(NO ₃) ⁻	(SO ₄) ²⁻	Na ⁺	K ⁺
03-01-2018	0,7640	0,2195	0,0527	0,0945	0,1123	0,3621	0,5837	0,4859
03-04-2018	0,5875	0,2195	0,0527	0,0945	0,1123	0,3621	0,6045	0,4859
03-07-2018	1,5907	0,0479	0,0168	0,0813	0,4281	0,4793	0,5630	0,1316
03-10-2018	1,9406	0,0510	0,0250	0,1738	0,4416	0,6576	0,6460	0,1246
03-13-2018	1,8860	0,0431	0,0101	0,0355	0,2804	0,4249	0,4835	0,1432
03-16-2018	1,2315	0,0306	0,0095	0,0338	0,2581	0,4020	0,4726	0,1389
03-19-2018	1,9317	0,0414	0,0137	0,0390	0,3695	0,4858	0,5260	0,1484
03-22-2018	1,2406	0,0422	0,0119	0,0985	0,2234	0,3948	0,4814	0,1054
03-25-2018	1,1344	0,0178	0,0041	0,0260	0,1120	0,1956	0,4370	0,1002
03-28-2018	0,8403	0,0318	0,0064	0,0301	0,1787	0,3004	0,4392	0,1042
03-31-2018	0,8282	0,0316	0,0059	0,0263	0,1291	0,3705	0,4374	0,1210
04-03-2018	0,9005	0,0235	0,0051	0,0338	0,1210	0,2100	0,4264	0,1004
04-06-2018	0,8083	0,0375	0,0077	0,0461	0,2630	0,3164	0,4519	0,1065
04-09-2018	0,8746	0,0199	0,0043	0,0398	0,1054	0,2044	0,4317	0,1018
04-12-2018	1,1454	0,0473	0,0090	0,0580	0,2315	0,4070	0,4470	0,1075
04-15-2018	1,1389	0,0436	0,0089	0,0359	0,2428	0,3748	0,4673	0,1087
04-18-2018	0,8929	0,0360	0,0063	0,0387	0,1416	0,3263	0,4320	0,1118
04-21-2018	0,6953	0,0246	0,0042	0,0291	0,1136	0,2134	0,4199	0,1016
04-24-2018	0,7775	0,0312	0,0049	0,0286	0,1149	0,1980	0,4237	0,0938
04-27-2018	0,4946	0,0304	0,0039	0,0467	0,0759	0,1288	0,4023	0,0927
04-30-2018	0,2814	0,2195	0,0527	0,0945	0,1123	0,3621	0,4130	0,4859
05-01-2018	0,2584	0,2195	0,0527	0,0945	0,1123	0,3621	0,4076	0,4859
05-03-2018	0,2354	0,2195	0,0527	0,0945	0,1123	0,3621	0,4103	0,4859

Na ₂₃	Mg ₂₅	Al ₂₇	S ₃₂	K ₃₉	Ca ₄₂	Fe ₅₆	OC	EC
0,0105	0,0065	0,0280	0,0554	0,0934	0,0421	0,0214	0,5943	0,1117
0,0105	0,0065	0,0280	0,0554	0,0934	0,0421	0,0214	0,4210	0,0938
0,1238	0,0274	0,1457	0,0877	0,1215	0,0777	0,1422	0,6665	0,1037
0,2090	0,0262	0,0877	0,1281	0,1050	0,0583	0,1056	0,6345	0,0846
0,0618	0,0126	0,0808	0,0802	0,0964	0,0399	0,0830	0,9100	0,1681
0,0597	0,0133	0,0431	0,0762	0,0723	0,0349	0,0577	0,1297	0,5733
0,1052	0,0192	0,1566	0,1049	0,1175	0,0617	0,1596	0,0964	0,7702
0,0964	0,0162	0,1245	0,0712	0,0819	0,0765	0,1085	0,0389	0,3726
0,0641	0,0176	0,1205	0,0884	0,1152	0,0558	0,1126	0,0676	0,5714
0,0149	0,0045	0,0300	0,0475	0,0747	0,0149	0,0312	0,0641	0,4887
0,0234	0,0046	0,0301	0,0572	0,0537	0,0243	0,0454	0,0605	0,4061
0,0650	0,0110	0,0987	0,0813	0,0730	0,0391	0,1251	0,0590	0,3612
0,0072	0,0032	0,0105	0,0173	0,0199	0,0107	0,0167	0,0621	0,4511
0,0174	0,0050	0,0447	0,0339	0,0254	0,0141	0,0546	0,1221	0,5975
0,0723	0,0107	0,0731	0,0846	0,0889	0,0468	0,1353	0,0485	0,3778
0,0034	0,0391	0,0034	0,0343	0,0195	0,0000	0,0000	0,0864	0,6336
0,0077	0,0675	0,0073	0,0815	0,0360	0,0000	0,0000	0,0664	0,4787
0,0029	0,0112	0,0035	0,0437	0,0091	0,0000	0,0000	0,0899	0,5146
0,0023	0,0141	0,0020	0,0223	0,0204	0,0000	0,0000	0,0748	0,5841
0,0021	0,0131	0,0023	0,0241	0,0120	0,0000	0,0000	0,0459	0,3520
0,0105	0,0065	0,0280	0,0554	0,0934	0,0421	0,0214	0,0129	0,2346
0,0105	0,0065	0,0280	0,0554	0,0934	0,0421	0,0214	0,0128	0,2119
0,0105	0,0065	0,0280	0,0554	0,0934	0,0421	0,0214	0,0127	0,1891

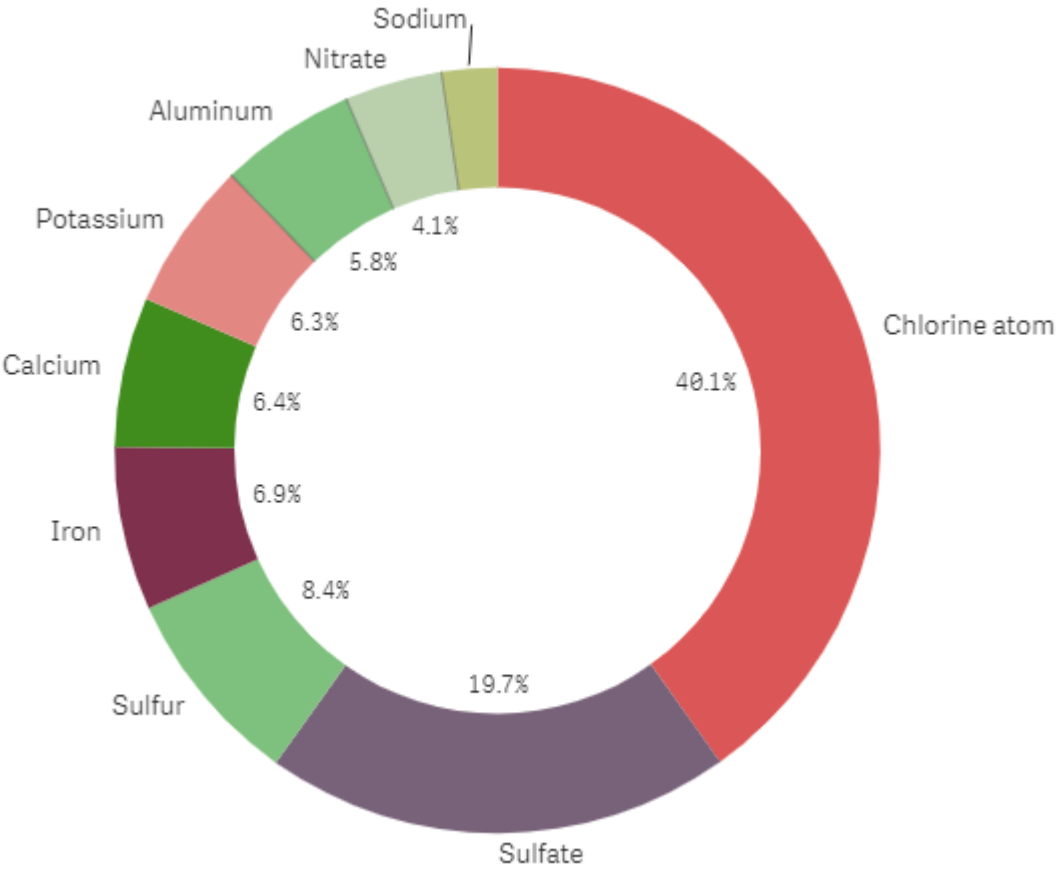
Apéndice G. Contribución de las especies químicas a las fuentes emisoras de PM₁₀ con UNMIX.



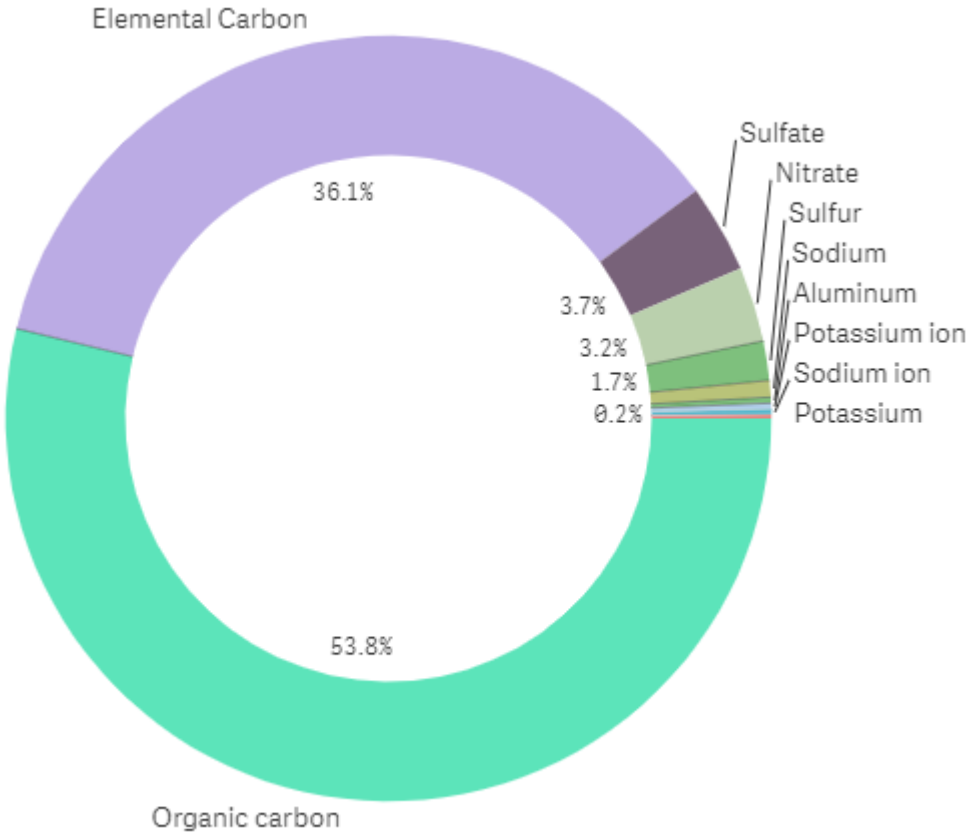
Apéndice H. Contribución de las especies químicas a las fuentes emisoras de PM₁₀ con PMF.



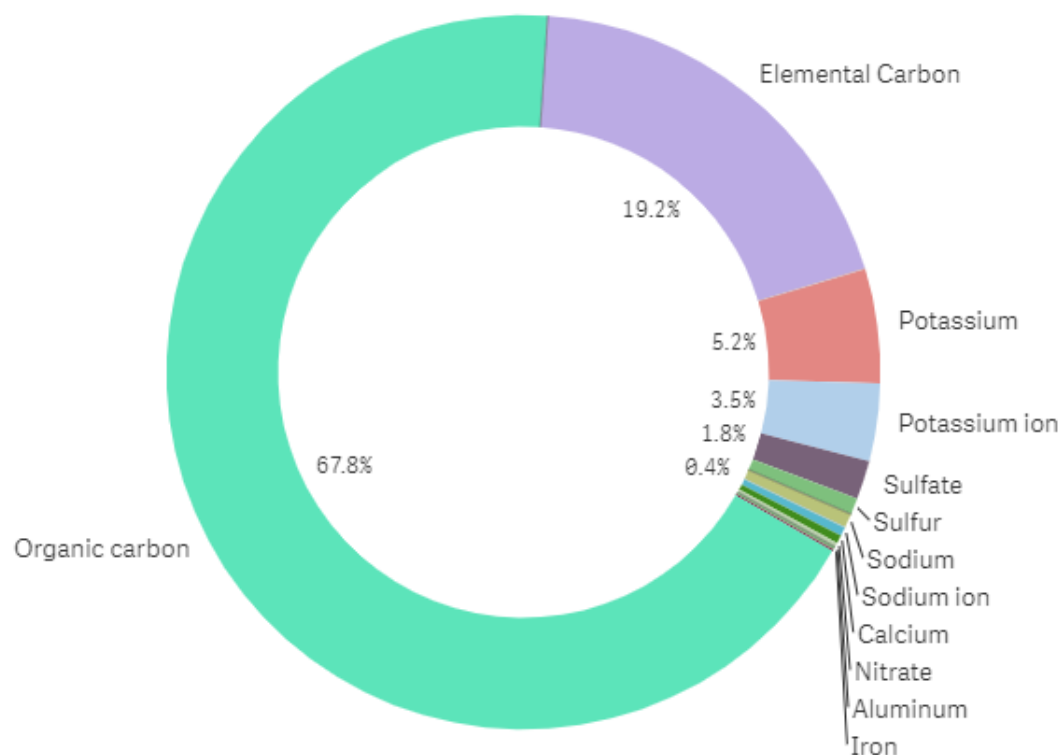
Apéndice I. *Quema de Residuos Sólidos – Speciate*



Apéndice J. Escape de Motor Diesel / Gasolina – Speciate



Apéndice K. Incendios Forestales - Speciate



Apéndice L. *Polvo de Camino Despavimentado – Speciate*

