





Área Metropolitana del Valle de Aburrá – Convenio interadministrativo 734 de 2019

"AUNAR ESFUERZOS TÉCNICOS Y FINANCIEROS PARA EVALUAR LOS COMPONENTES CLAVES DE AEROSOLES ATMOSFÉRICOS EN LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN EL VALLE DE ABURRÁ FASE II, A PARTIR DE LA GENERACIÓN DE CONOCIMIENTO OBTENIDO EN UN ESTUDIO DE CARACTERIZACIÓN QUÍMICA

Informe Final









CONVENIO INTERADMINISTRATIVO 734 DE 2019

UN PROYECTO DE:

ÁREA METROPOLITANA DEL VALLE DE ABURRÁ Juan David Palacio Cardona Director

Gustavo Londoño Gaviria Subdirector Ambiental

EJECUTA:

Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid Grupo de Investigación en Higiene y Gestión Ambiental - GHYGAM

Miryam Gómez Marín I.Q. Esp.
Dora Luz Yepes Palacio. I.S. M.Sc. PhD(c)
Kelly Viviana Patiño Lopez I.Q. M.Sc.
Diego Alejandro Grajales González I.B. M.Sc.
Marco Tulio Álvarez Ramírez I. P y C.
Carlos Andres Cañaveral Usuga I.I. M.Sc
Juliana Andrea Ospina Quirama Tnlga Admon.
Julián Moreno Tnlgo de Calidad
María Paula Velasquez García I.A (Grupo Calidad del Aire – Proyecto AMVA-SIATA)

SUPERVISIÓN

Gloria Estela Ramírez Casas I.Q MSc. Área Metropolitana del Valle de Aburrá









TABLA DE CONTENIDO

1.	OBJETIVOS	.21
1.1	OBJETIVO GENERAL	.21
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	.21
2.	METODOLOGÍA	.22
2.1	CONTROL CALIDAD DE LA INFORMACIÓN	.22
2.2	SITIO Y METODOLOGIA DE MONITOREO	.23
2.3	METODOLOGÍA DE ANÁLISIS QUÍMICO	.25
2.3.1	Espectrometría de masas por plasma acoplado inductivamente (ICP-MS)	. 25
2.3.2	Análisis por activación neutrónica instrumental (AAN)	. 28
2.3.3	Análisis de aniones y cationes por cromatografía iónica	. 30
2.3.4	Análisis de carbono orgánico y elemental por el método NIOSH 5040	. 32
2.3.5	Análisis de Black Carbón Método directo usando Etalómetro AE42	. 35
2.4	METODOLOGÍA PARA BALANCES IONICO Y MÁSICO	.37
	MÉTODOLOGIA PARA EL PROCESAMIENTO DE LA COMPOSICIÓN QUÍMI ROSOLES EN SUPERFICIE CON TÉCNICAS ESTADÍSTICAS PROPIAS OS DE RECEPTORES.	DE
2.5.1	Revisión de técnicas estadísticas de modelos receptores	. 41
2.5.2	Modelo CMB (Chemical Mass Balance)	. 46
2.5.3	Modelo PMF (Positive Matrix Factorization)	. 50
2.6 SATELITE GASEO	METODOLOGÍA PARA LA COLECTA Y EVALUACIÓN DE LA INFORMACION DE LA I	os
2.6.1 óptica de	Descarga de imágenes MODIS e imágenes clasificadas por AOD (profundio a aerosoles): moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS)	. 61
2.6.2	Descarga de imágenes MODIS	62
2.6.3	Visualización de imágenes satelitales (QUICK LOOK)	65
2.6.4	Visualización y descarga imágenes CALIPSO	. 69
2.6.5	Descarga de imágenes SENTINEL 5P	. 73
2.7	MANEJO MODELO HYSPLIT PARA TRAYECTORIAS DE MASAS DE AIRE	.77
2.7.1 concentr SIATA)	Identificación de eventos de aerosoles regionales de influencia a raciones de material particulado al interior del Valle de Aburrá (AMVA – Proye 81	

Página 2 de 264







3.	RESULTADOS CARACTERIZACION QUIMICA PM2.584
3.1	VALIDACIÓN DE LOS RESULTADOS84
3.2	CARACTERISTICAS ZONA DE TOMA DE MUESTRA85
3.3	CONCENTRACIÓN PM2.5 EN LA ESTACIÓN MED-BEME105
3.4 METEOR	CORRELACIÓN DATOS DE CONCENTRACIÓN Y VARIABLES ROLOGICAS117
3.5	CARACTERIZACIÓN QUIMICA PM2.5121
3.5.1 Medellín	Composición Elemental, Iónica y Carbonácea PM2.5 Estación MDE-BEME. 126
3.5.2 emisión	Análisis de las fracciones de materia carbonácea y correlación con fuentes de PM2.5149
3.5.3	Análisis de la relación OC/EC
3.5.4	Balance iónico y másico
3.5.5	Correlación entre las especies químicas e inferencia de fuentes de emisión 159
3.5.6	Comparación MED-BEME con otras ciudades del mundo
3.5.7	Mediciones directas de Black carbón, estación MED-BEME. Medellín
3.6 ZONAS	COMPARACIÓN DE LA CARACTERIZACIÓN QUÍMICA PM2.5 EN VARIAS DEL VALLE DE ABURRÁ173
3.6.1	Comparación Estación de tráfico MED-PJIC y Estación habitacional MED-BEME 173
3.6.2 habitacio	Comparación Estación suburbana industrial Girardota GIR-SOSN y Estación onal MED-BEME178
3.6.3 MED-BE	Comparación Estación de Fondo Urbano MED-LAYE y Estación habitaciona
3.6.4 BEME.2	Comparación Estación de Fondo Rural MED-SELE y Estación habitacional MED-
3.6.5 Estación	Comparación histórico caracterización 2010, 2014-2015, 2018-2019 y 2019 en la MED-PJIC
4. DISPON	RESULTADOS DEL LEVANTAMIENTO DE INFORMACIÓN SATELITAL IBLE VINCULADA A LOS AEROSOLES Y COMPUESTOS GASEOSOS198
4.1	RESULTADOS QUICK LOOK198
4.2	RESULTADOS IMÁGENES CLASIFICADAS POR AOD (MODIS)209
4.3	RESULTADOS CALIPSO211
4.4	RESULTADOS SENTINEL 5P212
4.5	RESULTADOS HYSPLIT 213

Página 3 de 264







4.6	RESULTADOS INDICADOR DE ANOMALIA DEL CICLO DIURNO PM2.5 Y PM10 216
4.7	RESULTADO INDICADOR POR RETRODISPERSIÓN (AMVA – SIATA)217
4.8	RESULTADO INDICADOR POR TRAYECTORIAS (AMVA – SIATA)219
5.	RESULTADO DE TÉCNICAS DE MODELOS RECEPTORES222
5.1	RESULTADOS MODELO CMB 8.2 caracterización PM2.5 04/03/2019-28/12/2019 222
	ULTADOS MODELO PFM 5.0 CAMPAÑA DE CARACTERIZACIÓN PM2.5 ABRIL CIEMBRE 2019224
	RECOMENDACIONES PARA EL FORTALECIMIENTO DE LAS MEDIDAS DEL ITEGRAL DE GESTIÓN DE LA CALIDAD DEL AIRE DEL VALLE DE ABURRÁ A DE LA CARACTERIZACIÓN QUÍMICA Y ESTIMACIÓN DE APORTES AL PM2,5 ¡Error! Marcador no definido.
6.1 Marcad	MAYORES CONCENTRACIONES DE PM2.5 Y MEDIDAS ASOCIADAS; Error! or no definido.
6.2 Marcad	CALDERAS Y HORNOS DE CARBÓN Y MEDIDAS ASOCIADASiError! or no definido.
6.3 Marcad	EMISIONES DE DIÉSEL Y GASOLINA Y MEDIDAS ASOCIADASiError! or no definido.
6.4 definido	MATERIAL RE SUSPENDIDO Y MEDIDAS ASOCIADAS; Error! Marcador no.
6.5 Marcad	FUENTES O EMISIONES SECUNDARIAS Y MEDIDAS ASOCIADAS ¡Error! or no definido.
6.6 definid c	BIOMASA LOCAL Y REGIONAL Y MEDIDAS ASOCIADAS; Error! Marcador no.
6.7	ZONAS URBANAS DE AIRE PROTEGIDO-ZUAP¡Error! Marcador no definido.
7.	CONCLUSIONES¡Error! Marcador no definido.
8.	BIBLIOGRAFÍA257
ANEVO	264









LISTA DE TABLAS

Tabla 2-1 Parámetros experimentales del método NIOSH 5040
Tabla 2-2. Resumen de 11 ecuaciones de reconstrucción de masa de PM2.5 y sus principales componentes químicos
Tabla 2-3 Comparativo Modelos Receptores
Tabla 2-4. Estructura de la plantilla de perfiles de fuentes para el modelo CMB8.2
Tabla 2-5. Estructura de la plantilla ambientes para el modelo CMB8.2
Tabla 2-6. Estructura de la plantilla de especies para el modelo CMB8.2
Tabla 2-7. Estructura de la plantilla de fuentes para el modelo CMB8.2 50
Tabla 2-8 Concentraciones de cada especie <i>j</i> medidas en cada muestra <i>i</i>
Tabla 2-9 Incertidumbres asociadas a las concentraciones
Tabla 2-10. AOD y contaminación atmosférica. Fuente: NASA's applied Remote Sensing Training Program
Tabla 2-11. Parámetros de productos nivel 2 CALIPSO
Tabla 3-1. Concentración PM2.5 (µg/m³). Abril – diciembre 2019
Tabla 3-2. Estadísticos asociados a la concentración de PM2.5
Tabla 3-3. Estadísticos asociados a la concentración de PM2.5 definido por niveles
Tabla 3-4. Relación muestras PM2.5. abril 03– diciembre 29 de 2019
Tabla 3-5. Concentración PM2.5 (μg/m³), Masa Elemental (μg). Abril 03–diciembre 29 de 2019. Estación MED-BEME. Medellín-Colombia
Tabla 3-6. Concentración PM2.5 (μg/m³), Masa de Iones, EC y OC (μg). Abril 03–diciembre 29 de 2019. Estación MED-BEME. Medellín-Colombia
Tabla 3-7 Concentración PM2.5 (μg/m³), Concentración Elemental (% P/P). Abril 03–diciembre 29 de 2019. Estación MED-BEME. Medellín-Colombia
Tabla 3-8. Concentración PM2.5 (μg/m³), Concentración Iones (%), EC, OC (%), Relación OC/EC abril 03–diciembre 29 de 2019. Estación MED-BEME. Medellín-Colombia
Tabla 3-9 Concentración PM2.5 (μg/m³), Concentración Elemental (μg/m³). Abril 03–diciembre 29 de 2019. Estación MED-BEME. Medellín-Colombia

Página 5 de 264







Tabla 3-10 Concentración PM2.5 (μg/m³), Concentración Iones, EC y OC (μg/m³). Abril 03–diciembre 29 de 2019. Estación MED-BEME. Medellín-Colombia
Tabla 3-11. Concentraciones promedio PM2.5 (μg/m³) de especies químicas (μg/m³), Desviación estándar (STD), intervalos (mínimo-máximo). Abril– diciembre de 2019. Estación MED-BEME. Medellín, Colombia
Tabla 3-12. Concentraciones promedio de Fracciones de Carbón en μg/m3 en PM2,5
Tabla 3-13. Perfiles de Fuentes de Emisión PM2.5 en la correlación de las ocho (8) fracciones de carbón en el análisis de materia carbonácea, Método IMPROVE (Judith C. Chow, Watson, Kuhns, et al., 2004)
Tabla 3-14. Comparativo entre los tipos de materia carbonácea en varias ciudades del mundo 155
Tabla 3-15. Correlaciones entre especies e inferencia de fuentes comunes. Referencias Bibliográficas
Tabla 3-16. Correlaciones (coeficiente Pearson) entre los componentes del PM2.5. Abril –diciembre de 2019. Estación MED-BEME. Medellín-Colombia
Tabla 4-1. Análisis visual de imágenes satelitales obtenidas a partir de MODIS. Colombia, abril de 2019 a diciembre de 2019
Tabla 5-2. Caracterización promedio PM2.5. Estación MED-BEME-Colombia







LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1. Sitio toma de muestra – Instituto Salesiano Pedro Justo Berrio Medellín, Colombia	23
Figura 2-2 Muestreador de partículas Hi-Vol PM2.5 Tisch Enviromental®	24
Figura 2-3 Muestreador de partículas Low-Vol PM2.5 PQ200 by BGI MesaLabs®	24
Figura 2-4 Metales que se analizarán en material particulado por espectrometría de masas plasma acoplado inductivamente.	
Figura 2-5 Espectrofotómetro de masas con plasma acoplado inductivamente	27
Figura 2-6 Manipulación de filtros para análisis por activación neutrónica.	29
Figura 2-7 Cromatógrafo Iónico	31
Figura 2-8 Sistema termo-óptico de medición de carbono orgánico y elemental	34
Figura 2-9. Espectros de absorción de diferentes emisiones fuente muestreadas en membrana teflón filtra y analiza con un espectrómetro ultravioleta / visible. La absorción a través del filtro teflón se normaliza a 1,000 nm, siendo dominado por el EC en cada una de las emisiones de orig	de en.
Figura 2-10. Tipos de modelos de calidad del aire	42
Figura 2-11. Dispersión para modelación de PM10 mediante el CMB	45
Figura 2-12. Grafica de dispersión para modelación de PM10 mediante el PMF	45
Figura 2-13. Grafica de dispersión para modelación de PM10 mediante el PCA	46
Figura 2-14. Flujo del proceso del modelo PMF	52
Figura 2-15. Replicación de corridas del modelo	53
Figura 2-17. Histograma PM2.5 reportado/estimado	55
Figura 2-18. Correlación de concentraciones e incertidumbres	57
Figura 2-19. Datos de Q (Robust) y Q (True)	58
Figura 2-20. Perfil de fuente identificada	59
Figura 2-21. Contribución de aportes por factor	59
Figura 2-22. Portal principal página LAADS DAAC	62
Figura 2-23. Portal de búsqueda imágenes satelitales.	63







Figura 2-24. Selección de parámetros.	63
Figura 2-25. Selección fecha.	64
Figura 2-26. Selección área de interés.	64
Figura 2-27. Resultados búsqueda.	65
Figura 2-28. Portal página worldview	66
Figura 2-29. Controlador de capas.	66
Figura 2-30. Imágenes con capas de aerosol	67
Figura 2-31. Visualización Colombia 03/04/2019	67
Figura 2-32. Área de Estudio Valle de Aburra	68
Figura 2-33. Clasificación de imagen por AOD	69
Figura 2-34. Convenciones clasificación AOD	69
Figura 2-35. Portal Worldview NASA	70
Figura 2-36. Controlador de capas.	71
Figura 2-37. Órbita Calipso 3 de abril 2019 en Colombia	72
Figura 2-38. Portal principal página COPERNICUS.	74
Figura 2-39. Definición área de interés.	75
Figura 2-40. Búsqueda avanzada	76
Figura 2-41. Búsqueda ozono primera semana de monitoreo en zona de interés	77
Figura 2-42. Portal principal página Hysplit	78
Figura 2-43. Ejecución modelo de retro trayectoria.	78
Figura 2-44. Selección tipo de trayectoria	79
Figura 2-45. Selección paquete de datos meteorológicos y área de interés	80
Figura 2-46. Selección fecha	80
Figura 2-47. Selección parámetros del modelo	81
Figura 3-1 Ubicación geográfica Estación MED-BEME	86

Página 8 de 264







Figura 3-2 Usos Generales Suelo Urbano, Estación MED-BEME	87
Figura 3-3 Vista al norte desde la Estación MED-BEME, Modelo 3D	88
Figura 3-4 Vista al norte desde la Estación MED-BEME, barrera de Arboles	88
Figura 3-5 Vista al sur desde la Estación MED-BEME, Modelo 3D	89
Figura 3-6 Vistas al oriente y occidente desde la Estación MED-BEME, Modelo 3D	89
Figura 3-7 Vistas al oriente y occidente desde la Estación MED-BEME, Modelo 3D	90
Figura 3-8 Climograma de Gaussen – Zona Belén.	91
Figura 3-9 Histórico de temperatura – Zona Belén	91
Figura 3-10 Condiciones horarias de temperatura – Zona Belén	92
Figura 3-11 Condiciones mensuales de temperatura – Zona Belén	92
Figura 3-12 Condiciones de frecuencia de registros temperatura – Zona Belén	92
Figura 3-13 Histórico de humedad relativa – Zona Belén.	93
Figura 3-14 Condiciones horarias de humedad relativa – Zona Belén	93
Figura 3-15 Condiciones mensuales de humedad relativa – Zona Belén	94
Figura 3-16 Histórico de precipitación Horario – Zona Belén.	94
Figura 3-17 Condiciones horarias de precipitación – Zona Belén.	95
Figura 3-18 Condiciones mensuales de precipitación – Zona Belén	95
Figura 3-19 Rosa de vientos general – Zona Belén.	96
Figura 3-20 Rosa de vientos diurna nocturna – Zona Belén.	96
Figura 3-21 Rosa de vientos mensual – Zona Belén	97
Figura 3-22 Histórico de velocidad del viento – Zona Belén.	97
Figura 3-23 Condiciones horarias de velocidad del viento – Zona Belén	98
Figura 3-24 Condiciones mensuales de velocidad del viento – Zona Belén	98
Figura 3-25. Mapa de ubicación cámaras y aforos vehiculares aledañas a la Estació	
Figura 3-26. Aforo vehicular cámara "El Castillo" para el mes de noviembre de 2018	100 Página 9 de 264





Figura 3-27. Aforo vehicular cámara Avenida 80 con Calle 30 para los meses de noviembre y diciembre de 2018 y enero de 2019
Figura 3-28. Aforo vehicular entrada ladrillera "El Noral", febrero 27 de 2019 102
Figura 3-29. Vehículos de carga con ingreso y salida a la Ladrillera "El Noral" durante el tiempo aforado
Figura 3-30. Aforo vehicular entrada portería Instituto Pedro Justo Berrio, febrero 27 de 2019 103
Figura 3-31. Tipo de vehículos aforados en entrada del Instituto Pedro Justo Berrio
Figura 3-32. Aforo vehicular Cra.84 x Cl. 32C, febrero 27 de 2019
Figura 3-33. Tipo de vehículos aforados en Cra.84 x Cl. 32C
Figura 3-34. Concentraciones PM2.5 ($\mu g/m^3$). Abril 03 - diciembre 29 de 2019 110
Figura 3-35. Diagrama de caja y bigotes Concentración PM2.5 (μg/m³)
Figura 3-36. Histograma de frecuencias Concentración PM2.5 ($\mu g/m^3$) y función densidad 112
Figura 3-37. Concentraciones PM2.5 (μg/m³), abril - diciembre 2019
Figura 3-38. Diagrama de caja y bigotes de concentración PM2.5 (µg/m³) por tipo de día. Abril - diciembre 2019
Figura 3-39. Densidad de probabilidad de la variable PM2.5 para cada uno de los niveles del factor Tipo de día. Abril - diciembre 2019
Figura 3-40. Diagrama de caja y bigotes por día entre abril - diciembre 2019 116
Figura 3-41. Gráfico de medias de la concentración de PM2.5 por día de la semana 117
Figura 3-42. Ciclo Diurno y Anual de la precipitación en la estación de muestreo
Figura 3-43. Comparación de la distribución de las concentraciones en días en condiciones de lluvia diurna y nocturna
Figura 3-44. Dispersión y frecuencia de las concentraciones de PM2.5 según la dirección y la velocidad del viento
Figura 3-45. Concentraciones promedio de PM2.5 a diferentes magnitudes de la velocidad del viento
Figura 3-46. Composición elemental de PM2.5. Abril—diciembre de 2019. Estación MED-BEME. Medellín, Colombia
Figura 3-47. Rosas de viento diurna y nocturna y Rosas de viento bivariado diurna y nocturna. Estación MED-BEME. Abril—diciembre de 2019. Medellín-Colombia
Página 10 de 264







Figura 3-48. Composición iónica de PM2.5. Abril—diciembre de 2019. Zona habitacional MED-BEME. Medellín, Colombia
Figura 3-49. Composición materia carbonácea de PM2.5. Abril—diciembre de 2019. Zona habitacional MED-BEME. Medellín, Colombia
Figura 3-50. Fracciones de OC en (μg/m³). Mayo –septiembre de 2019. Estación MED-BEME. Medellín, Colombia
Figura 3-51. Fracciones de EC en (μg/m³). Mayo –septiembre de 2019. Estación MED-BEME. Medellín, Colombia
Figura 3-52. Balance iónico de PM2.5. Campaña abril 03 – diciembre 29 de 2019. Estación MED-BEME. Medellín, Colombia
Figura 3-53. Concentraciones PM2.5 medidas vs. Reconstruidas a partir del cierre el balance de masa
Figura 3-54. Composición media porcentual del PM2.5. Abril –diciembre de 2019. Estación MED-BEME. Medellín-Colombia
Figura 3-55. Comportamiento diario BCe (μg/m³). Abril –diciembre de 2019. Estación MED-BEME. Medellín-Colombia
Figura 3-56. Variación temporal BCe (μg/m³). Estación MED-BEME, abril 2019 - enero 2020. Medellín, Colombia
Figura 3-57. Diagrama de niveles BCe (μg/m³) Estación MED-BEME, abril 2019 -enero 2020, Medellín, Colombia
Figura 3-58. Variación horaria BCe (µg/m³) Estación MED-BEME, abril 2019 -enero 2020, Medellín, Colombia
Figura 3-59. Comparación de la composición elemental (µg/m³) del PM2.5 en las Estaciones MED-PJIC y MED-BEME. Campañas abril 27-mayo 17 y abril 3–diciembre 29 de 2019. Medellín, Colombia
Figura 3-60. Comparación de las Especies Aniónicas (μg/m³) del PM2.5 de las Estaciones MED-PJIC y MED-BEME. Campañas abril 27-mayo 17 y abril 3–diciembre 29 de 2019. Medellín, Colombia
Figura 3-61. Comparación Materia Carbonácea (μg/m³) del PM2.5. Estaciones MED-PJIC y MED-BEME. Campañas abril 27-Mayo17 y abril 3–diciembre 29 de 2019. Medellín, Colombia 177
Figura 3-62. Comparación Composición PM2.5 (%) promedio. Estaciones MED-PJIC y MED-BEME. Campañas abril 27-Mayo17 y abril 3-diciembre 29 de 2019. Medellín, Colombia
Figura 3-63. Comparación de la composición elemental (µg/m³) del PM2.5 en las Estaciones GIR-SOSN y MED-BEME. Campañas abril 27-mayo 17 y abril 3-diciembre 29 de 2019. Medellín, Colombia

Página 11 de 264







Figura 3-64. Comparación de las Especies Aniónicas (μg/m³) PM2.5 de las Estaciones GIR-SOSN y MED-BEME. Campañas abril 27-mayo 17 y abril 3–diciembre 29 de 2019. Medellín, Colombia 181
Figura 3-65. Comparación Materia Carbonácea (µg/m³) PM2.5 de las Estaciones GIR-SOSN y MED-BEME. Campañas abril 27-Mayo17 y abril 3–diciembre 29 de 2019. Medellín, Colombia 182
Figura 3-66. Comparación Composición PM2.5 (%) promedio. Estaciones GIR-SOSN y MED-BEME. Campañas abril 27-Mayo17 y abril 3-diciembre 29 de 2019. Medellín, Colombia
Figura 3-67. Comparación de la composición elemental (μg/m³) del PM2.5 en las Estaciones MED- LAYE y MED-BEME. Campañas abril 27-mayo 17 y abril 3-diciembre 29 de 2019. Medellín, Colombia
Figura 3-68. Comparación de las Especies Aniónicas (μg/m³) del PM2.5 de las Estaciones MED-LAYE y MED-BEME. Campañas abril 27-mayo 17 y abril 3-diciembre 29 de 2019. Medellín, Colombia
Figura 3-69. Comparación Materia Carbonácea (μg/m³) del PM2.5 de las Estaciones MED-LAYE y MED-BEME. Campañas abril 27-Mayo17 y abril 3-diciembre 29 de 2019. Medellín, Colombia 187
Figura 3-70. Comparación Composición PM2.5 (%) promedio. Estaciones GIR-SOSN y MED-BEME. Campañas abril 27-Mayo17 y abril 3-diciembre 29 de 2019. Medellín, Colombia
Figura 3-71. Comparación de la composición elemental (μg/m³) del PM2.5 en las Estaciones MED-LAYE y MED-BEME. Campañas enero 12 a 22 de 2015 y abril 3–diciembre 29 de 2019. Medellín, Colombia
Figura 3-72. Comparación Especies Aniónicas (µg/m³) del PM2.5 de las Estaciones MED-SELE y MED-BEME. Campañas enero 12- enero 22 de 2015 y abril 3-diciembre 29 de 2019. Medellín, Colombia
Figura 3-73. Comparación Materia Carbonácea (μg/m³) del PM2.5 de las Estaciones MED-SELE y MED-BEME. Campañas enero 12– enero 22 de 2015 y abril 3–diciembre 29 de 2019. Medellín, Colombia
Figura 3-74. Comparación Composición PM2.5 (%) promedio. Estaciones MED-SELE y MED-BEME. Campañas abril 27-Mayo17 y abril 3-diciembre 29 de 2019. Medellín, Colombia
Figura 3-75. Comparación Especies Aniónicas (μg/m³) del PM2.5. Estación MED-PJIC. Campañas 2010, 2014-2015, 2018-2019 y 2019. Medellín, Colombia
Figura 3-76. Comparación Materia Carbonácea (μg/m³) del PM2.5. Estación MED-PJIC. Campañas 2010, 2014-2015, 2018-2019 y 2019. Medellín, Colombia
Figura 3-77. Comparación Composición PM2.5 (%) promedio. Estación MED-PJIC. Campañas 2010, 2014-2015, 2018-2019 y 2019. Medellín, Colombia
Figura 4-1. Imagen clasificada por AOD
Figura 4-2. Visualización imagen (3/04/2019) Clasificación AOD
Página 12 de 264

@areametropol www.metropol.gov.co





Figura 4-3. Mapas de Color de mediciones CALIOP para VFM nivel 2	:12
Figura 4-4. Búsqueda ozono mayo 2019 en zona de interés	:13
Figura 4-5. Resultado Mapa interactivo	14
Figura 4-6. Resultado Informe HYSPLIT	:15
Figura 4-7. Resultados del trimestre marzo-mayo-junio para la identificación de picos en l concentraciones de PM2.5 y PM10, mediante el indicador de anomalía del ciclo diurno, Fuen (AMVA – SIATA)	ite
Figura 4-8. Indicador por retrodispersión para el mes de abril del 2019 2	:17
Figura 4-9. Indicador por retrodispersión para el mes de mayo del 2019 2	:18
Figura 4-10. Indicador por retrodispersión para el mes de junio del 2019 2	:18
Figura 4-11. Trayectorias de los flujos de viento que interceptan el Valle de Aburrá en el día especifi de análisis	
Figura 4-12. Distribución de la red automática de monitoreo de PM10 en el Valle de Aburrá 2	20
Figura 4-13. Distribución de la red automática de monitoreo de PM10 en el Valle de Aburrá 2	20
Figura 5-1. Ensayo identificación aportes modelo CMB	24
Figura 5-2. Concentración PM2.5 observada vs estimada reportado/estimado	:29
Figura 5-3. Perfiles químicos de fuentes PM2.5. Estación MED-BEME. Medellín-Colombia 2	:31
Figura 5-4. Aportes de fuentes de emisión PM2.5. Estación MED-BEME. Zona Habitacional Medell	lín-

@areametropol www.metropol.gov.co





LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 2-1	27
Ecuación 2-2	31
Ecuación 2-3	32
Ecuación 2-4	38
Ecuación 2-5	38
Ecuación 2-6	40
Ecuación 2-7	40
Ecuación 2-8	51
Ecuación 2-9	56
Ecuación 2-10	56
Ecuación 2-11	56
Ecuación 2-12	56
Ecuación 2-13	57
Ecuación 2-14	57
Ecuación 2-15	83
Ecuación 3-1	157
Founción 5-1	228

@areametropol www.metropol.gov.co

Página 14 de 264







RESUMEN

Teniendo como referente el contexto regional y nacional en la temática calidad del aire y cambio climático a nivel mundial, El Área Metropolitana del Valle de Aburrá - AMVA, se ha unido desde el 2018, como aliado estratégico y cofinanciador al Proyecto Macro para la cuenca atmosférica Latinoamericana desde Argentina hasta México "EVALUACIÓN DE COMPONENTES DE AEROSOLES ATMOSFÉRICOS EN ÁREAS URBANAS, PARA MEJORAR LA GESTIÓN DE LA CONTAMINACIÓN DEL AIRE Y DE CAMBIO CLIMÁTICO -ARCAL 273, 2018-2022, liderado por Naciones Unidas ONU - Agencia Internacional de Energía Atómica IAEA, el cual se desarrolla como piloto en Colombia en el Valle de Aburra, dado el reconocimiento al fortalecimiento de las capacidades para la toma de decisiones sobre los aerosoles atmosféricos y sus fuentes de emisión con bases técnicas y científicas.

Dada la relación directa del Proyecto ARCAL mencionado, con los objetivos del PIGECA, y específicamente con el eje temático 1, orientado al fortalecimiento del conocimiento científico y tecnológico, el Área Metropolitana del Valle de Aburrá ha realizado aportes para la Fase Inicial durante los meses de octubre a diciembre de 2018 bajo Convenio 1215 de 2018 y para la Fase II, el convenio 734, entre los meses de julio a diciembre de 2019 ambos firmados con el Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid - PCJIC a través del grupo GHYGAM.

Los objetivos definidos enfocados en (PM2.5) de mayor acceso a los alveolos pulmonares e impacto en la salud, comprenden la actualización y ampliación de los perfiles químicos de las partículas menores de 2.5 micras en campañas de medición de mayor duración y mínimo de un (1) año, analizando metales y metaloides mediante Análisis por Activación Neutrónica (AAN) y métodos ópticos para la determinación de carbono negro (etalómetro, reflectometría), cromatografía para iones y análisis de la materia carbonácea en ocho(8), fracciones, método TOT. Igualmente se incluye la colección y evaluación de información satelital disponible vinculada de los aerosoles y compuestos gaseosos para una (1) zona del Valle de Aburrá de manera conjunta con el proyecto ARCAL y vinculación de los resultados químicos obtenidos al Modelo de Receptor PMF para la evaluación el aporte local y regional de las distintas fuentes a la contaminación atmosférica en el área metropolitana y de manera comparativa, con los países vinculados a ARCAL.

La caracterización del PM2.5 se realizó durante nueve (9) meses entre el 03 de abril y el 29 de diciembre de 2019 en una zona tipo habitacional, de alta densidad poblacional, mediano tráfico vehicular e influencia industrial directa, para ser comparada con otras zonas de diferentes características, tipo tráfico, fondo urbano, sub urbano industrial y fondo rural. La campaña se programó bajo una custodia para análisis de materia carbonácea, metales, iones y HAPs, usando equipos de alto y bajo volumen en cumplimiento del Protocolo vigente para el monitoreo de la calidad del aire del Ministerio de Ambiente, garantizando la cantidad de masa requerida por las técnicas analíticas. Las muestras se analizaron en micro balanza y balanza analítica para la determinación de la masa colectada y se conservaron a -20°C hasta su caracterización química.

Página 15 de 264







La concentración de PM2.5 promedió para el periodo de muestreo fue de $19.95 \pm 6.56 \, \mu g/m^3$ sin superar la norma diaria de calidad de aire, excepto para el 2.1% del periodo. Se halló una clara diferenciación entre el PM2.5 de días laborales y no laborales, siendo mayor los días jueves. La medición de BCe, de alto impacto en la salud y el cambio climático, permitió determinar un aumento consecuente con el incremento del PM2.5. y con valores picos para cada día de la semana entre 6:00-9:00 y 17:00-21:00, atribuible al mayor flujo vehicular. Este resultado es un soporte técnico para proponer la ampliación de las franjas horarias de la medida de pico y placa para su reducción.

De acuerdo con el análisis químico, el mayor componente del PM2.5 en promedio, fue la materia orgánica (35%), seguido de los iones inorgánicos (13%) y polvo resuspendido (11%), concordante con valores reportados en las zonas urbanas a nivel mundial donde predomina la fracción orgánica en el aerosol atmosférico. En este caso de estudio, para la zona Belén Las Mercedes, se halló una mayor concentración de sulfatos, explicable tanto por emisiones enriquecidas de combustión y procesos industriales, tráfico vehicular, como también quemas de biomasa transportadas por las corrientes de vientos propias de la zona en la dirección nororiente. En cuanto a las fracciones de carbono, OC1 permitió identificar emisiones de biomasa, EC1 de combustión de Carbón, EC2 de vehículos a diésel y OC2, OC3 a gasolina. Este avance en la diferenciación de las emisiones vehiculares se evidenció en el Barrio Belén Las Mercedes, dada la mayor influencia en la zona de vehículos livianos y motos. La relación OC/EC =8.5, valor alto a escala mundial, demostró el enriquecimiento en el PM2.5 por extraemisiones secundarias derivadas de la fotoquímica atmosférica y plumas de quema de biomasa locales y regionales, potencialmente transportadas por corrientes regionales, ocasionando un alto impacto negativo en la calidad del aire en varias ciudades del país incluyendo el Valle de Aburrá.

Los aportes de las fuentes para la zona habitacional Belén las Mercedes con una reconstrucción de la masa del 98 % aplicando el Modelo Receptor PMF, dio como resultado la estimación del mayor aporte de las emisiones vehiculares (34.5%), gasolina (17.7 %), diésel (16.8%), polvo resuspendido (21.9%), estimado según su perfil, como emisiones mezcladas por el manejo y transporte de materiales, componentes del suelo, non exhaust (no escape) y partículas originadas por incendios y quema de biomasas, emisiones de calderas de carbón(12 %) y una fuente tipo industrial (9.7%), con perfil típico de industria ladrillera. En estos aportes logró cuantificarse una fuente secundaria (12%), derivada de la fotoquímica atmosférica y por la adición de extraemisiones de eventos de contaminación locales y/ o regionales y coherente con alta relación OC/EC = 8.0 de la zona.

En el componente satelital en fase inicial en el presente estudio, se ha elaborado una documentación soportada en cuatro (4) guías, para la descarga y visualización de imágenes MODIS, CALIPSO, SENTINEL, el manejo del software HYSPLIT y el análisis de imágenes por QUICK LOOK, con el objetivo de identificar aerosoles y eventos de transporte de masas de aire al Valle de Aburrá. En el año 2019, desde el comienzo de los muestreos bajo el Proyecto ARCAL (3 de abril del 2019), se identificaron dos episodios de contaminación atmosférica al interior del Valle de Aburrá provocados por eventos regionales de aerosoles,

Página 16 de 264







para ambos casos con fuente en incendios forestales. el primer episodio de contaminación fue principalmente observado el 9 de abril del 2019 (día de muestreo), con datos anómalos durante el ciclo diurno de PM2.5 en la mayoría de las estaciones que componen la REDMCA; del 7 al 10 de abril, 9 de las 22 estaciones de la red pasaron de la categoría 'moderado' del ICA a la categoría 'dañino a la salud de grupos sensibles', de acuerdo con los rangos de la Resolución 2254 del 2017 del Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible. El segundo episodio fue observado los días de muestreo 7 y 16 de agosto del 2019; para el 16 de agosto, 14 de las 22 estaciones presentaron categoría 'dañina a la salud de grupos sensibles' y 4 estaciones presentaron ICA 'dañino a la salud'. A partir del análisis de retrotrayectorias se identificó transporte de aerosoles sobre la región hacia el valle desde incendios en la región del Casanare, Arauca y Cesar, para el primer episodio de contaminación del aire; y desde la Selva Amazónica en territorio brasileño, para el mes de agosto del 2019.

Adicional a los objetivos trazados, se consideró la importancia y filosofía del Plan Integral de Gestión de Calidad del Aire del Valle de Aburrá 2017-2030, con el fin de articular las medidas y acciones que deben fortalecerse en la zona de estudio, en otras caracterizadas desde el 2010 y para las ZUAP declaradas. Algunas medidas que resultan importante intensificar son, el control a normas de emisiones de fuentes fijas y móviles y a las propias de procesos de no combustión, la continuidad en la implementación de Planes de movilidad Sostenible, las mejoras de sistemas de control de emisiones y en el desempeño ambiental y energético de la industria, acciones para mejorar la gestión de la demanda de viajes, la implementación de Buenas Prácticas Ambientales en las fuentes fijas de las ZUAP, entre otras, todo esto, articulado en un sistema de información robusto y confiable para la toma de decisiones.

El avance de este proyecto hasta la fecha para el país representa un conocimiento mayor y un fortalecimiento de las capacidades para la toma de decisiones con bases técnicas y científicas sobre los aerosoles atmosféricos y sus fuentes de emisión, no solamente a partir de la masa, es decir, de su concentración, sino determinando la composición química de las sustancias presentes en el aire respirable, las cuales serán realmente las causantes de las enfermedades y muertes, cambio del clima y daños a la vegetación, materiales y afectación del paisaje, conllevando finalmente a un deterioro del recurso aire. Es importante la estimación lograda del aporte de otras fuentes no locales, llamadas regionales y globales, las cuales fueron identificadas mediante la cuantificación del OC1 y Potasio (K) y otros indicadores y visualizadas en el monitoreo del transporte de polvo y material particulado procedentes de otras latitudes caso Brasil y Venezuela, a través de la visualización satelital de imágenes de satélites.





INTRODUCCION

El entorno urbano, donde reside la mayoría de la población mundial y donde se consume una importante proporción de la energía, es también el escenario donde los habitantes se encuentran más expuestos a la contaminación atmosférica. Existe consenso global que esta situación impone impactos negativos sobre la salud, el ecosistema y el clima, y que además empeora en la medida que las regiones urbanas crecen rápidamente. A pesar de esta circunstancia existe una falta sistemática de mediciones de la calidad del aire en muchas ciudades del mundo (OCDE, 2012)

Según el Índice de Desempeño Ambiental de 2018, la mala calidad del aire es la mayor amenaza ambiental para la salud pública, y el mayor reto para los países de medianos y bajos ingresos (Friedrich, 2016). Existe amplia evidencia sobre los efectos negativos de la contaminación atmosférica para la salud de la población, asociada a exposiciones de corta duración (horas o días) y exposiciones de larga duración (años). La más reciente producida por el proyecto Global Burden of Disease (GBD) del Institute for Health Metrics and Evaluation (IHME), estableció la contaminación del aire como el quinto factor de riesgo para la salud de la población en el mundo, y estimó que la exposición a Material Particulado menor a 2.5 micras (PM2.5, por sus siglas ingles), contribuía con aproximadamente 4,9 millones de muertes (8,7% de todas las muertes a nivel mundial) y a la pérdida de 147 millones de años de vida saludables (5,9% de todos los Años de Vida Ajustados por Discapacidad- AVAD a nivel mundial) en 2017 (Hei & IHME, 2019). Así mismo, la Organización Mundial de la Salud OMS, ha considerado la contaminación del aire como el principal factor de riesgo ambiental en las Américas, y el mayor reto para las políticas públicas de los países de medianos y bajos ingresos (Neira & Prüss-Ustün, 2016), debido a sus impactos en poblaciones susceptibles como los niños menores de 5 años, las gestantes y los adultos mayores, con altos costos económicos en la atención en salud y en el desarrollo social (Marmot & Bell, 2019).

Para el Valle de Aburrá, la problemática de la calidad del aire no es ajena al contexto internacional teniendo en cuenta que es una región conurbada de 10 municipios donde convergen diferentes actividades empresariales y de servicios, las cuales han incrementado durante los últimos años, las concentraciones PM2.5 y ozono principalmente, tal como de manera clara fue planteado en el Plan Integral de Gestión de la Calidad del aire para El Área Metropolitana del Valle De Aburrá (AMVA, PIGECA 2017-2030). En este Documento referente para la implementación de la política de calidad del aire en la región, se identificaron como los factores determinantes en la generación de emisiones, el acelerado crecimiento de la población registrado en las últimas décadas, los patrones de ocupación territorial que han propiciado una alta densificación de las laderas con asentamientos humanos regulares e irregulares de todos los estratos, el acelerado crecimiento del parque vehicular de carros y motos, la creciente pérdida de la participación modal del transporte público, la baja renovación de vehículos automotores y rezago tecnológico con respecto a otros mercados emergentes, el transporte de carga con una alta proporción de vehículos antiguos altamente contaminantes y de baja eficiencia energética, y con importantes deficiencias logísticas y de operación, la base industrial intensiva en el uso de combustibles fósiles de alto contenido de carbono, el creciente consumo de combustibles fósiles,

Página 18 de 264







patrones culturales que propician emisiones excesivas y oportunidades de mejora en el cumplimiento y fiscalización de resoluciones y normas.

Así mismo además de los factores expuestos que han afectado la calidad del aire en la región metropolitana, se suman las condiciones geográficas y climáticas que afectan la dispersión de gases y partículas, la influencia de las variables meteorológicas, la ventilación y la formación de nubes a baja altura en las épocas de transición de los periodos secos a lluviosos, dificultando la dispersión en capas superiores de la atmósfera, ocasionando finalmente, una condición de inversión térmica de la atmósfera que limita la circulación del aire y ocasiona que los contaminantes se queden a baja altura más tiempo del normal, haciendo parte del aire directamente respirado por la población.

El referente científico con el que cuenta el AMVA con el soporte de la Red de Investigadores REDAIRE desde hace más de 20 años ha permitido la toma de decisiones que han conllevado al mejoramiento de la calidad del aire durante los últimos dos años. En este contexto, el Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid a través del Grupo GHYGAM, se ha destacado por los estudios de la caracterización del material particulado, especialmente el PM2.5 e identificación de perfiles de fuentes, validados, como soporte a los estudios de los efectos de la contaminación atmosférica sobre la salud y el clima (Polichetti, Cocco, Spinali, Trimarco, & Nunziata, 2009).

Teniendo en cuenta los estudios del AMVA y los reportes del Plan Estratégico Regional (PER) para la cuenca de Suramérica y el Caribe para el período 2016-2021, que revelan que solo el 27.1% de las ciudades con más de 100,000 habitantes cuentan con alguna herramienta para el monitoreo de la calidad del aire, basado en la medición de material particulado grueso 93.4% y en menor proporción, 65.6%, material particulado fino y que pocas redes de monitoreo analizan datos de compuestos elementales, el 31.1%, y cuando lo hacen sólo miden concentraciones de plomo (Suarez Moreno & Piñeros Jimenez, 2019) Naciones Unidas a través de la Agencia Internacional de Energía Atómica financió parcialmente proyecto ARCAL 7023 2018-2022, con el objetivo de generar información de caracterización química del PM2.5 en los principales Centros Urbanos de América Latina y el Caribe", correlacionados con datos satelitales, retrotrayectorias de vientos y estimación de aportes de sus fuentes tanto locales como regionales mediante modelos receptores.

Para Colombia, el proyecto es liderado por el gobierno Nacional a través del Ministerio de Minas y Energía donde se han vinculado diferentes actores estratégicos al desarrollo operacional e investigativo que permitan el cumplimiento de los objetivos pactados, destacándose la participación del Área Metropolitana del Valle de Aburrá mediante Convenio de Cooperación Científica 1215 de 2018 para el desarrollo de la Fase I, que tuvo como aporte la evaluación del impacto de medidas de prevención y control el Plan de Gestión de la calidad del aire PIGECA como la reducción del contenido de azufre del combustible y que en conjunto con los resultados del Convenio 734 de 2019, Fase II, permitirán generar un conocimiento sobre la caracterización del PM2.5 y aportes de fuentes en una zona habitacional, de acuerdo con los lineamientos que permitirán su comparabilidad con otras ciudades de América Latina y El Caribe y una propuesta de

Página 19 de 264







medidas para la conservación de la calidad del aire sin riesgo para la población y el medio ambiente.







1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL.

Evaluar juntamente con Naciones Unidas ONU, los componentes claves de los aerosoles atmosféricos en la contaminación atmosférica (local y regional) para distintas ciudades de América Latina y su comparabilidad con el Valle de Aburrá, a partir de la generación de conocimiento obtenido en un estudio de caracterización química especializada de fracciones de material particulado PM2.5 e implementación de un modelo de receptores.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- Determinar la composición química y física de los aerosoles colectados durante un periodo de seis (6) meses aplicando técnicas analíticas nucleares, analizando metales y metaloides mediante Análisis por Activación Neutrónica (AAN) y métodos ópticos para la determinación de carbono negro (etalómetro, reflectometría).
- Colectar y evaluar la información satelital disponible (imágenes y productos) vinculada a los aerosoles y compuestos gaseosos para una (1) zona del Valle de Aburrá de manera conjunta con el proyecto ONU RLA2016004. 2018
- Vincular los resultados químicos obtenidos mediante las mediciones de superficie, la información satelital con técnicas estadísticas (conocidas como modelado de receptores) en una (1) zona del Valle de Aburrá de manera conjunta con el proyecto ONU RLA2016004. 2018 para evaluar el aporte local y regional de las distintas fuentes de aerosoles a la contaminación atmosférica.







2. METODOLOGÍA

La metodología aplicada comprende la presentación general de los métodos de toma de muestras, ensayos de análisis químico, validación y estimación de incertidumbres asociadas tanto a las características de los contaminantes como a las condiciones del laboratorio y calidad de reactivos.

Para el levantamiento de información satelital disponible vinculada a los aerosoles y compuestos gaseosos para una (1) zona habitacional del Valle de Aburrá, como base de integración con el proyecto ONU RLA2016004 2018 fase 1, se ha elaborado un marco conceptual sobre la temática sensores remotos y se ha construido información de Satélites y sensores utilizados para entender la identificación de aerosoles basada en esta técnica.

La Base de datos para el procesamiento de la composición química de aerosoles en superficie, se analiza teniendo en cuenta la estructura de los modelos receptores.

Para el control de calidad de la información se establece para la trazabilidad de los datos de acuerdo con los procedimientos de operación estándar, formatos e instructivos, codificados de acuerdo con el Listado Maestro de Documentos del Laboratorio GHYGAM. La realización de auditorías internas permitirá la identificación de acciones preventivas y correctivas evidenciadas en el reporte de las actividades e informadas oportunamente a la Dirección del proyecto.

Con énfasis especial, se desarrollan procedimientos estándar bajo la Norma NTC 17025, para velar por la calidad de los datos, identificación y control de errores potenciales en la toma, manipulación, transporte, almacenamiento, embalaje, preservación de las muestras.

2.1 CONTROL CALIDAD DE LA INFORMACIÓN

La información derivada del estudio de caracterización química especializada de fracciones de material particulado (PM2.5) y de la implementación del modelo de receptor PMF, es diseñada de acuerdo con las normas técnicas establecidas por el Sistema Integrado de Gestión del Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid, con el fin de lograr el aseguramiento y control de calidad de los datos requeridos en los diferentes estadios del proyecto.

Cada documento es estandarizado mediante la determinación de una identificación única (título, fecha, autor o número de referencia) acorde con la descripción de su contenido, el cual es estructurado, revisado y aprobado por la Dirección del proyecto, garantizando su conveniencia y adecuación con los objetivos propuestos y los resultados esperados. Otros controles como medidas de autorización de acceso por medio de cuentas de usuario y el almacenamiento de la información en el servidor institucional, aseguran la protección contra la pérdida de confidencialidad, uso inadecuado o daño de integridad de los datos.

Página 22 de 264







Así mismo, los cambios a los documentos son controlados por medio de la asignación de un consecutivo numérico o alfanumérico, el cual permite identificar el estado de la versión y realizar la trazabilidad a las modificaciones derivadas durante su construcción, logrando la preservación, recuperación y uso adecuado de los datos, de acuerdo con los requerimientos del proyecto.

2.2 SITIO Y METODOLOGIA DE MONITOREO

El sitio de monitoreo se encuentra ubicado en una zona urbana de características poblacionales en el Instituto Salesiano Pedro Justo Berrio, punto donde se encuentra ubicada la estación de calidad del aire MED-BEME (Latitud: 6.243, Longitud: -75.61201) operada por el proyecto SIATA (Sistema de Alerta Temprana del Valle de Aburrá) del AMVA. El punto de toma de muestra se encuentra en una terraza con altura de 3 metros sin acceso directo, vigilancia continua e influencia directa de una ladrillera a 620 m (Area Metropolitana del Valle de Aburrá & Politecnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid, 2019b).

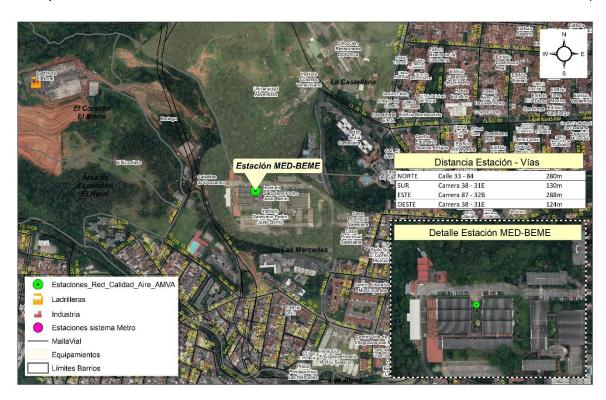


Figura 2-1. Sitio toma de muestra – Instituto Salesiano Pedro Justo Berrio Medellín, Colombia Fuente: Elaboración propia – Grupo GHYGAM 2019

Las muestras de PM2.5 fueron colectadas entre julio y diciembre de 2019 usando un equipo Hi-vol (1.02 a 1.24 m³/min - Tisch Enviromental®) con filtros de microcuarzo (8 x 10 pulgadas), un equipo Low-vol (16.67 L/min PQ200 by BGI instruments®) con filtros de teflón (47 mm diámetro). Para la medición directa de Black Carbon en PM2.5 se usó un Etalómetro AE42 (5 L/min, 370nm y 880nm - Magee Scientific). Todos los muestreos

Página 23 de 264







cuentan con calibración de flujo y condiciones ambientales antes de muestreo. El tiempo de muestreo cumple los parámetros descritos por el Protocolo para el seguimiento de la Calidad del Aire (Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo territorial, 2008) con una duración de 23 ± 1 hora entre las 12:00 m y 12:00 m. Un total de 61 muestras fueron recolectados para análisis de composición química.



Figura 2-2 Muestreador de partículas Hi-Vol PM2.5 Tisch Enviromental® Fuente: Manual de Diseño de sistemas de Vigilancia de la Calidad del Aire (MAVDT, 2010)



Figura 2-3 Muestreador de partículas Low-Vol PM2.5 PQ200 by BGI MesaLabs® Fuente: Manual de usuario PQ200 by BGI MesaLabs.

Antes de muestreo, los filtros de cuarzo fueron calcinados a 550 ± 50 °C en una mufla por 3 horas para remover la adsorción de compuestos orgánicos y posteriormente estabilizados en un cuarto limpio a condiciones ambientales de control (temperatura $20-23 \pm 2$ °C y humedad $30-40 \pm 5$ %HR) por un tiempo mínimo de 24 horas. Cada filtro de cuarzo fue pesado tres veces con una diferencia promedio no mayor a 2,8 mg usando una balanza analítica con una resolución de 0.1 mg (Radwag AS-220-X2) y cada filtro de teflón tres veces con una diferencia promedio no mayor a 15 μ g utilizando una microbalanza con

Página 24 de 264







resolución 0.001 mg (Sartorius CPA26P). Después de muestreo, todos los filtros fueron estabilizados en un cuarto limpio por 48 horas y pesados bajos las condiciones anteriormente mencionados. Finalmente, los filtros fueron almacenados a -15 °C protegidos de la luz para futuros análisis.

2.3 METODOLOGÍA DE ANÁLISIS QUÍMICO

Con el objetivo de evaluar los componentes claves de aerosoles atmosféricos en la contaminación atmosférica en el Valle de Aburrá, a partir de la caracterización química de material particulado (PM2.5) y apoyados en el proyecto de investigación "Uso de Técnicas Analíticas Nucleares para el Estudio de la Emisión y la Recepción de Material Particulado Atmosférico por parte de los grandes Centros Urbanos de América Latina y el Caribe", se utilizarán diferentes técnicas analíticas.

Por espectrometría de masas con fuente de plasma (ICP-MS), se cuantificarán elementos como Al, As, Ca, Cd, Sb, Si, V y Zn, entre otros, por cromatografía iónica se analizarán cationes y aniones y para la determinación de la materia carbonácea expresada como Carbono orgánico y carbono elemental, se aplicarán las condiciones experimentales establecidas en el protocolo NIOSH 5040 (NIOSH, 1999) y usando un equipo OCEC Lab Intrument Model 5L, Marca Sunset.

La determinación de la concentración total de elementos traza y minoritarios (Ag, Sb, Cd, Co, Zn, As, Hg, Pb, Cr y Fe), se hará usando técnicas analíticas nucleares, mediante Análisis por Activación Neutrónica (AAN) y la concentración de hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPS) en material particulado colectado con muestreadores de alto volumen, se determina por Cromatografía de Gases acoplada a Espectrometría de Masas usando el Compendium Method TO-13A (USEPA, 1999).

Finalmente, la masa de partículas colectadas se determinará por gravimetría mediante la diferencia entre las masas del filtro con material depositado y el filtro blanco. Se emplearán para ello micro balanzas con legibilidad 10⁻⁶ g.

2.3.1 Espectrometría de masas por plasma acoplado inductivamente (ICP-MS)

La concentración de los metales (Al, Sb, As, Ba, Be, Ca, Cd, Cr, Co, Cu, Pb, Fe, Mg, Mn, Hg, Mo, Ni, Se, Ag, K, Na, Tl, Th, U, V y Zn) en el material particulado colectado con muestreadores de alto volumen (ver Figura 2-4), se determina por Análisis de Espectrometría de Masas por Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-MS) usando protocolos y métodos de referencia (APHA, AWWA, & WEF, 2012b, 2012a; Environmental Protection Agency (EPA), 1999). Para los elementos (Ag, Sb, Cd, Co, Zn, As, Hg, Pb, Cr y Fe) en bajas concentraciones, trazas, se realizarán replicas por el método de Activación Neutrónica AAN.

Página **25** de **264**







METALES EN MATERIAL PARTICULADO

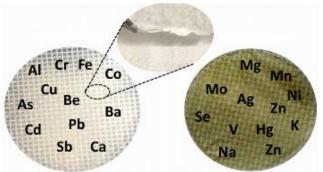


Figura 2-4 Metales que se analizarán en material particulado por espectrometría de masas por Plasma acoplado inductivamente.

Fuente: Elaboración propia – Grupo GHYGAM 2019

El método (ICP-MS) se basa en el acoplamiento de un método para generar iones (plasma acoplado inductivamente) y un método para separarlos y detectarlos (espectrómetro de masas).

El material de la muestra en disolución es introducido por nebulización neumática dentro de un plasma producido por radiofrecuencia donde los procesos de transferencia de energía provocan desolvatación, atomización e ionización. Los iones son extraídos del plasma a través de una interfaz de presión producida por una bomba de vacío y separado en base a su relación masa/carga por un cuádruplo de espectrómetro de masas, teniendo una resolución de capacidad mínima de 1 uma (unidad de masa atómica) en el 5% de la altura de pico. Los iones transmitidos a través del cuádruplo son detectados por un detector de multiplicador de electrones, o por un detector Faraday, y la información resultante es procesada por un sistema de manejo de datos.

Las interferencias asociadas a la técnica deben ser detectadas y corregidas. Tales correcciones deben incluir compensación por interferencias de elementos isobáricos e interferencias de iones poliatómicos derivados del gas del plasma, reactivos o matriz de la muestra y la sensibilidad abundante, la cual define el grado en el cual la base del pico de una masa contribuye a las adyacentes. El error instrumental, así como las respuestas falsas positivas o negativas del instrumento, causadas por la matriz de la muestra deben corregirse a través del uso de estándares internos.

El equipo utilizado es un espectrofotómetro de masas con plasma acoplado inductivamente, capaz de detectar masas en un rango de (5-250) uma (ver Figura 2-5).









Figura 2-5 Espectrofotómetro de masas con plasma acoplado inductivamente Fuente: EDECA-UNA, Costa Rica.

El instrumento puede ser ajustado con un sistema de detección de rango dinámico convencional o extendido.

Posteriormente, se aplica alguno de los medios de extracción ácida: digestión en plantilla o mediante microondas, para lo cual se utiliza un protocolo de (USEPA, 1999). En este caso las muestras fueron digeridas mediante digestor de microondas MARS 6.

La concentración de la muestra se obtiene directamente del equipo, y luego a partir de este valor se calcula la concentración final del metal usando la Ecuación 2-1:

$$C_n(\mu g / m^3) = \frac{N \times C_{metal}(\mu g / L)V_{aforo}}{V_{aire}}$$

Ecuación 2-1

Dónde:

c: Concentración del metal en μg/m³.

N : Número de tiras de 2.5 cm que pueden ser obtenidas de la zona de deposición de partículas en filtro, el valor calculado es 9.2.

 C_{metal} : Concentración del metal en µg/L.

 V_{atoro} : Volumen en el cual fue aforada la muestra, en L.

V....: Volumen del aire.

Como mecanismos de control de calidad, se llevarán a cabo las siguientes actividades:

Página 27 de 264





- Desempeño del equipo: se realiza el proceso de Auto tune antes de iniciar la calibración, para garantizar el desempeño óptimo de ICAP ICP-MS se debe correr el performance report el cual debe cumplir con las especificaciones de fábrica.
- Curva de calibración: la curva debe contener al menos 6 patrones en el rango lineal del método. Analitos de muestras que estén por encima del 95% de la curva de calibración generada sobre el límite del rango lineal dinámico deben ser diluidas y reanalizadas. El coeficiente de correlación debe ser mayor o igual a 0.995.
- Calibración de material volumétrico: todo el material volumétrico se calibra de acuerdo con un procedimiento establecido para ello.
- Réplicas de mediciones en las muestras: se lee al menos una réplica de las muestras a analizar por batch, la variación entre ellos no debe superar el 20%.
- Análisis de blancos: se analizan blancos de campo, digestión, laboratorios, verificación y calibración.
- Estándares: se utilizan estándares internos, de control de calidad y de control de desempeño del equipo.
- Muestras enriquecidas: se forman muestras enriquecidas de filtros, de acuerdo con el tipo de filtros que se utilizan.
- Cálculo de incertidumbre: se calcula de acuerdo con un procedimiento establecido.

2.3.2 Análisis por activación neutrónica instrumental (AAN)

En el presente estudio, los análisis por activación neutrónica instrumental AAN, se aplicarán para la determinación de la concentración total de elementos traza y minoritarios (Ag, Sb, Cd, Co, Zn, As, Hg, Pb, Cr y Fe) presentes en muestras de material particulado atmosférico PM2.5 (método relativo). El análisis se basa en las transformaciones nucleares que ocurren en la materia cuando los neutrones interactúan con ella, así la interacción de los núcleos de los átomos con los neutrones va a generar productos radiactivos y emisores gamma. Este proceso se basa en una reacción umbral en la que el núcleo necesita una energía máxima (energía umbral) para la generación de neutrones de diferente clase.

La técnica del análisis por activación neutrónica se basa en la medición de la radiación liberada por el decaimiento de los núcleos radiactivos formados al irradiar los materiales con neutrones. La fuente más adecuada de neutrones para una aplicación de este tipo suele ser un reactor de investigación y puede llevarse a cabo de varias maneras, en función del elemento y de los niveles de radiación correspondientes que se midan, así como de la naturaleza y la magnitud de la interferencia provocada por otros elementos presentes en la muestra. Los métodos empleados son en su mayoría no destructivos y se basan en la detección de la radiación gamma emitida por el material irradiado durante su irradiación o con posterioridad. Prácticamente cualquier reactor que funcione a una potencia térmica de 10 a 30 kilovatios es capaz de proporcionar suficiente flujo neutrónico para irradiar muestras destinadas a aplicaciones selectivas de esta técnica de análisis.

Página 28 de 264







La ventaja de esta técnica radica en que es multielemental y que puede ser utilizada para medir 40 elementos en forma simultánea. En general no requiere preparación significativa de la muestra, ni la adición de materiales para el pretratamiento, por lo tanto, no se introducen reactivos que interfieren en la medición. Este análisis se llevará a cabo en el laboratorio de Técnicas Analíticas Nucleares (TAN), ubicado en el Centro Atómico Ezeiza en Buenos Aires-Argentina.

Para el análisis por Activación Neutrónica Instrumental (AAN), el material particulado se recolectará sobre filtros de policarbonato, teflón (PTFE) o acetato de celulosa de 47 mm de diámetro o menos y cada filtro debe ser envasado en recipientes adecuados (cajas de Petri o similares) que garanticen la integridad del depósito de material particulado sobre el filtro.

Las muestras como tal no requieren ninguna preparación previa a la irradiación, los filtros se doblan siguiendo un procedimiento estandarizado, que asegure la integridad del depósito de particulado y utilizando pinzas plásticas o forradas con cinta de Teflón. Los filtros se envasan en ampollas de cuarzo de 4 mm de diámetro interno o se envuelven en papel de aluminio, asignando en cada caso un código que permita la identificación de la muestra de acuerdo con la geometría de irradiación elegida. Las ampollas o pequeños envoltorios de papel de aluminio se envasan en canes de irradiación y para la segunda opción de envasado, los envoltorios se apilan y empaquetan juntos envolviéndolos en papel de aluminio, dejando constancia del orden de las muestras en este envoltorio final y en la bitácora de análisis. Además de las muestras a analizar, se incluyen patrones de cuantificación y muestras control envasados en ampollas de cuarzo de 2 mm de diámetro interno.

Para establecer blancos de filtro y/o de campo, deben analizarse un número de filtros de alrededor del 10% de los utilizados para muestreo. De existir blancos para algunos de los elementos analizados, los valores se sustraerán de los obtenidos en la caracterización de los filtros (Ver Figura 2-6).

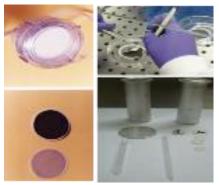


Figura 2-6 Manipulación de filtros para análisis por activación neutrónica. Fuente: Elaboración propia – Grupo GHYGAM 2019

Como mecanismos de control de calidad, se llevarán a cabo las siguientes actividades:

Página 29 de 264







Gráficas de control de balanzas

La balanza se verificará semanalmente con pesos de 100 mg y 1 g para asegurar su funcionamiento entre períodos de uso. Esta verificación se realizará pesando tres veces la pesa de 100 mg y tres veces la pesa de 1 g. Los valores de las pesadas sólo pueden diferir entre sí en la última cifra decimal.

Los datos de verificación semanal alimentan un gráfico de control para cada peso, incorporando el promedio de las tres pesadas. Se utilizará como valor central el promedio de los 20 primeros valores obtenidos (20 semanas).

El criterio de aceptación será +/- 0.00010 g respecto del valor medio y los límites de alerta corresponderán a +/- 2/3 de ese valor. Las verificaciones periódicas se registrarán en una bitácora de control.

Gráficos de control de líneas de medición

Se realizará un control diario de 5 líneas de medición para espectrometría gamma y se utilizará una fuente de ¹⁵²Eu (t_{1/2} 13.5 años), también se hará control para 3 picos gamma del ¹⁵²Eu 121.8 keV; 778.9 keV; 1408.0 keV. El control del valor de energía del pico se hará con el criterio para recalibrar de corrimiento > 0.5 keV en dos picos. Se hará tambien control del FWHM (full width at half maximum) y del FWTM (full width at tenth maximum).

Gráficos de ensayos por elemento

Para elaborar estos gráficos, se incluye una o más muestras de control y se hace un análisis en las mismas condiciones de las muestras y patrones.

Gráficos de control, valor Z.

Este tipo de gráfico se aplica cuando el elemento a evaluar está certificado en el material de referencia, es decir, se cuenta con su incertidumbre estándar o la misma se puede estimar, también se aplica cuando se utiliza un material para el que se cuenta con un valor de concentración conocido, que se calcula como promedio de las 10 o 15 primeras determinaciones con su correspondiente desviación estándar.

Con los materiales seleccionados como muestra control, se prepara un gráfico de control de Z score, donde se grafica el valor de Z en función de las muestras analizadas y cada nuevo dato obtenido se va agregando en el gráfico de control.

2.3.3 Análisis de aniones y cationes por cromatografía iónica

La concentración de los iones solubles en agua (NO₂-, SO₄²⁻, PO₄³⁻, NH₄+, Na+, Mg²⁺, Ca²⁺, F-, Cl-, NO₃-, C₂O₄²⁻, Br- y K+) en material particulado colectado con muestreadores de alto volumen, se determina por Cromatografía Iónica usando un método de referencia (APHA, AWWA, & WEF, 2012c). La concentración mínima detectable dependerá de cada ion y está en función del volumen de aire colectado y del tiempo de muestreo.

Página 30 de 264







Se inyecta una muestra de la extracción del material particulado en agua, en una corriente de eluente de carbonato-bicarbonato para aniones y ácido metasulfónico para cationes y se hace pasar a través de una serie de intercambiadores iónicos en donde los iones de interés se separan según sus afinidades relativas. Se identifican sobre la base del tiempo de retención, comparado con disoluciones patrón de cada ion. La determinación cuantitativa se realiza midiendo el área del pico respectivo a cada ion. Se utilizará un cromatógrafo DIONEX ICS 3000 (ver Figura 2-7) el cual incluye sistema de inyección simultánea de aniones y cationes, una columna separadora de aniones y cationes, una columna protectora, idéntica a la separadora, excepto que es más corta para proteger a la separadora de obstrucciones por partículas o materia orgánica y un supresor de fibra de membrana intercambiadora de cationes y aniones capaz de transformar continuamente el diluyente y los aniones y cationes separados en sus formas ácidas.



Figura 2-7 Cromatógrafo Iónico Fuente: EDECA-UNA, Costa Rica

Las interferencias asociadas a la técnica deben ser detectadas y corregidas. Tales correcciones deben incluir las sustancias cuyo tiempo de retención coincida con el de un ion a determinar y las concentraciones relativamente altas de ácidos orgánicos de bajo peso molecular interfieren con la determinación de ion cloruro.

El cálculo de la Concentración de Iones en Partículas de cada uno de los iones se obtiene directamente de la curva de calibración con la Ecuación 2-2:

y = mx + b

Ecuación 2-2

Posteriormente se multiplica la concentración obtenida mediante interpolación por el volumen del balón aforado al que se trasvasó la muestra. A partir de la masa del ion se aplica la siguiente ecuación para determinar la concentración del ion Ecuación 2-3:

fy (m) @areametropol

www.metropol.gov.co







$$C_n(\mu g / m^3) = \frac{N \times M_{ion} \times 1000}{V_{aire}}$$

Ecuación 2-3

Dónde:

 C_{\perp} : Concentración del ion en μ g/m³.

N : Número de tiras de 2.5 cm que pueden ser obtenidas de la zona de deposición de partículas en filtro.

 M_{ion} : Masa del ion obtenida anteriormente.

v...: Volumen del aire muestreado acondiciones estándar tomado de los registros.

La incertidumbre en la concentración de iones presentes en el material particulado recolectado del aire ambiente se estima como el límite de repetibilidad obtenido de la validación del método multiplicado por 1.96 con un nivel de confianza del 95%.

Como mecanismos de control de calidad, se llevarán a cabo las siguientes actividades:

- Calibración de material volumétrico: tanto las pipetas aforadas como balones aforados se calibrarán siguiendo un plan anual para ello.
- Análisis de un patrón: se preparará un patrón, que se analizará en cada corrida cromatográfica y el valor obtenido no puede sobrepasar los límites de acción establecidos en el gráfico de control.
- > Cálculo de incertidumbre de acuerdo con un procedimiento establecido para ello.
- Análisis de duplicado y muestra enriquecida, cada 30 muestras.
- Se comparará contra el límite de repetibilidad y se calculará el porcentaje de recuperación.
- Por día de análisis se hará comprobación de curva de calibración con patrón intermedio fresco.

2.3.4 Análisis de carbono orgánico y elemental por el método NIOSH 5040

El Carbono Orgánico (OC) y el Carbono Elemental (EC), el cual en algunos casos es llamado Black Carbon (BC), son medidos en muestras ambientales, tomadas en filtros de fibra de cuarzo por diferentes métodos de análisis que aplican extracción con solventes seguida por combustión, rampas continuas de temperatura, dos temperaturas en atmósferas oxidantes y/o no oxidantes, Reflectancia Termo/óptica (TOR) y Tramitancia Termo/óptica. Los métodos térmicos, calientan una porción de la muestra de manera continua o paso a paso bajo diferentes atmósferas, con la detección de carbono volatilizado o carbono oxidado que sale de la muestra. Con una estandarización consistente, estos

Página 32 de 264







métodos, proveen medidas equivalentes de Carbono Total (TC, la suma de OC y EC) y definen la división entre OC y EC basado en combinaciones de temperaturas de combustión, tiempo de residencia a cada temperatura, la composición de la atmósfera que rodea la muestra, y la luz reflejada o transmitida a través del filtro.

El EC atmosférico, el cual es algo similar a formas minerales como el grafito o el diamante, es la fracción de carbono de baja volatilidad de color oscuro que no evoluciona apreciablemente sin oxidantes a temperaturas inferiores a 700°C. Sin embargo, la pirolización y carbonización del OC en y dentro del filtro a medida que la muestra se calienta, puede adicionarse al EC original que se recogió en la atmósfera, inflando artificialmente su concentración. La luz roja de un láser monitorea el oscurecimiento del depósito de partículas en el filtro, debido a la carbonización del OC. Cuando se suministra oxígeno (O2) a la atmósfera del análisis a una temperatura suficientemente alta (> 350°C), este carbón negro se quema junto con el EC original en el filtro y éste se torna más claro. Este oscurecimiento e iluminación se mide mediante la luz reflejada desde la superficie del filtro y transmitida a través de todo el filtro. Cuando la luz reflejada o trasmitida alcanza su intensidad original, se considera que el OC (POC) pirolizado y carbonizado, se ha eliminado y todo el carbón restante, está asociado con el EC que originalmente se encontraba en el filtro. Por consiguiente, se puede realizar una partición del carbono evolucionado, asignándolo antes de este punto de división a OC y después de este punto a EC (Judith C. Chow, Watson, Kuhns, et al., 2004).

El carbono orgánico y carbono elemental se determinó por el método es el método NIOSH 5040, aplicando las condiciones experimentales establecidas en el protocolo (NIOSH, 1999), el cual es uno de los métodos térmicos mencionados. En la Tabla 2-1 se presentan los parámetros experimentales.

Tabla 2-1 Parámetros experimentales del método NIOSH 5040.

Actividad del programa	Gas de arrastre	Tiempo de Rampa (s)	Temperatura de la Rampa (°C)
Purga del horno	Helio	10	Ambiente
Primera Rampa	Helio	60	315
Segunda Rampa	Helio	60	475
Tercera Rampa	Helio	60	615
Cuarta Rampa	Helio	90	870
Enfriamiento para EC	Helio	30	0
Temperatura de estabilización	Helio	45	550
Primera Rampa	Helio/Oxígeno	45	625
Segunda Rampa	Helio/Oxígeno	45	700
Tercera Rampa	Helio/Oxígeno	45	775
Cuarta Rampa	Helio/Oxígeno	45	850
Quinta Rampa	Helio/Oxígeno	120	910
Estándar Interno de calibración	Helio/Oxígeno	120	0

Página 33 de 264







El principio de medida consiste en la diferenciación del EC del OC y el análisis de ambas fracciones en partículas atmosféricas captadas en filtros de fibra de cuarzo y la detección del metano producido por ambas fracciones (Ver Figura 2-8).

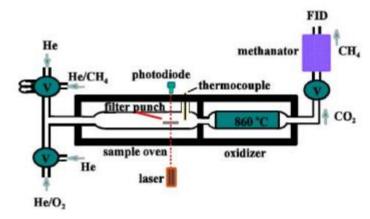


Figura 2-8 Sistema termo-óptico de medición de carbono orgánico y elemental. Fuente: EDECA-UNA, Costa Rica

El análisis se realiza mediante un filtro de fibra de cuarzo troquelado que es colocado en una cámara de cuarzo. Una vez situado en la cámara, se purga con helio, aumentando gradualmente y por pasos la temperatura de la cámara hasta alcanzar los 870 °C. Los compuestos orgánicos desprendidos y/o los productos pirolizados se pasan a través de un catalizador ubicado en el horno, el cual lo convierte a CO₂ reabsorbiendo térmicamente los componentes orgánicos y los productos de la pirolisis dentro de una cámara de oxidación de dióxido de manganeso (MnO₂). El CO₂ es barrido de la cámara de oxidación por una corriente de helio, mezclada con hidrógeno. Esta mezcla fluye a través de un catalizador de níquel calentado, donde se convierte cuantitativamente a metano, el cual se mide posteriormente utilizando un Detector de Ionización de Llama (FID). Una vez completada la rampa inicial de subida de temperatura, se enfría a 550 °C y el flujo de gas de arrastre se cambia por mezcla de helio/oxígeno. Entonces, se inicia una segunda rampa para oxidación del carbón elemental, el cual es detectado igual que el OC.

Estos métodos térmicos de evolución por temperatura permiten determinar por separado, las fracciones de OC y EC, de manera similar al protocolo IMPROVE (Interagency Monitoring of Protected Visual Environments), el cual es un método termo óptico por reflectancia (TOR). El método entrega datos de cuatro (4) fracciones de OC (OC1, OC2, OC3, y OC4 en una atmósfera de Helio a 140°C, 280°C, 480°C y 580°C, respectivamente), una fracción de carbón pirolizado (OP, determinado cuando la luz de laser reflejada alcanza su intensidad original, luego de adicionar oxígeno a la atmósfera de combustión), y tres (3) fracciones de EC (EC1, EC2 y EC3 en una atmósfera de 2% de oxígeno y 98% de Helio a 580°C, 740°C y 840°C, respectivamente. El protocolo IMPROVE define el OC como la suma de las cuatro fracciones de OC más el OP y el EC como la suma de las tres fracciones de EC, menos el OP. (Chow et al, 2018). El conocimiento de la proporción de cada una de





estas fracciones en el OC y el EC, permiten inferir posibles fuentes del PM2.5, recolectado en los filtros.

2.3.5 Análisis de Black Carbón Método directo usando Etalómetro AE42

El Etalómetro es un instrumento que utiliza el análisis óptico para determinar la concentración en masa de las partículas de negro de humo recogido de una corriente de aire que pasa a través de un filtro. Estas partículas se emiten directamente al aire durante toda la combustión, está asociado con el carbón y/o el humo de diésel, afectando negativamente a la salud pública, contribuyendo al cambio climático global y reduciendo la visibilidad. carbono orgánico OC.

Para la medición directa de Black Carbon en PM2.5 se usó un Etalómetro AE42 Magee Scientific de flujo 5 L/min, y longitudes de onda de medición 370nm para OCe fracción aromáticos y BCe a 880nmEl Etalómetro AE42 posee un rango de trabajo basado en dos (2) Longitudes de onda:

- Medición a 880 nm se interpreta como concentración de Black carbon (BCe). La lectura del equipo se observa como BC. Esta cantidad medida representa la materia carbonácea tipo antracita que absorbe energía calórica. Operacionalmente se define como la cantidad de carbono que absorbe fuertemente la luz con las propiedades ópticas aproximadas de hollín que darían la misma señal en un instrumento óptico.
- Medición adicional a 370 nm designado como 'UVPM', interpretado como un indicador de compuestos orgánicos aromáticos tales como se encuentran en el humo del tabaco, humo de madera y biomasa de leña, entre otros. La lectura del equipo se reporta como UV. Los reportes de resultados se interpretarán como carbono orgánico OC.

Este equipo capta y analiza las partículas presentes en el PM2.5 de manera continúa haciendo pasar una corriente de aire a través de una cinta de cuarzo. Cuando las partículas son depositadas, la cinta se ilumina con luz permitiendo que los detectores sensibles (fotómetros) midan la intensidad de luz transmitida a través de una porción no expuesta de la cinta que actúa como referencia versus el lugar de recolección. A medida que el material de absorción (BCe) se acumula en el lugar de recolección, la intensidad de luz es transmitida a través de la cinta disminuye gradualmente. La disminución de la intensidad de la luz de una medición a la siguiente se interpreta como un aumento en la cantidad de material recolectado. Finalmente, el aumento en la cantidad de material se divide por el flujo de aire conocido para calcular la concentración a través del coeficiente de atenuación que se convierte en el coeficiente de absorción y el equivalente en masa. Al ser un equipo de tamaño reducido y portable al contar con batería interna, su uso puede extenderse a plataformas móviles como automóviles, trenes y aviones. Etalómetros más recientes permiten la medición del BCe a mayor cantidad de longitudes de onda.

Página 35 de 264







Los Análisis de contenido de carbono por reflectancia Termo/óptica se hacen con el calentamiento gradual del filtro de fibra de cuarzo en una atmósfera inerte de Helio (He) y luego en una atmósfera oxidante (98% He, 2% O₂), para determinar OC, EC y las fracciones térmicas de carbono, que son indicativas de las fuentes. La reflectancia y transmitancia de la luz láser, se monitorea para determinar y corregir la carbonización del OC. Desde el 2016, estas mediciones ópticas se han realizado a siete (7) longitudes de onda, que van desde 405 nm hasta 980 nm (405, 450, 532, 635, 780, 808 y 980 nm), permitiendo la estimación del Carbono Marrón – Brown Carbon (BrC), comúnmente encontrado en la fase latente de combustión de biomasa (Judith C Chow, Wang, Green, & Watson, 2019).

En los Etalómetros de siete (7) longitudes de onda que abarcan el rango desde el infrarrojo cercano (950 nm) hasta el ultravioleta cercano (370 nm), la secuenciación de la iluminación y el análisis se realiza en una base de tiempo de 1 Hz. Esto produce el espectro completo de absorción óptica de aerosol con una línea de datos por segundo. Dado el amplio espectro de determinación de sustancias complejas que absorben luz calórica, este medidor directo es ampliamente usado en redes automáticas para el estudio de trazadores de fuentes de emisión de PM entre ellas emisiones de diésel, Biomasa, partículas finas de carbón y otros procesos industriales. La quema de biomasa produce OC denominado carbono café o Brown Carbon BrC que absorbe la luz con mayor fuerza en longitudes de onda más cortas que las emisiones de partículas del escape del motor diésel. Mientras que el Carbono Negro BC (o EC) absorbe luz a través del espectro solar (300-1000 nm), algunos compuestos orgánicos que evolucionan en el OC también pueden absorber la luz, especialmente a longitudes de onda cortas (<600nm). Estos compuestos han sido denominados "Carbono Marrón" (BrC) y están asociados con la fase de combustión lenta de la biomasa y algunos productos finales de formación de aerosoles secundarios (Chemistry & Andreae, 2006; Clarke et al., 2007; X. Zhang et al., 2011).

En la Figura 2-9, se presenta en alguna medida que en todas las muestras de combustión, turba humeante y agujas de pino ardiendo y partículas de diésel se pueden identificar fracciones de carbono como trazadores de estas emisiones. La división de 450 nm parece ser sensible al contenido de "Carbono Marrón" o Brown Carbon (BrC), como se evidencia por un mayor ECR que el determinado a 635 nm (excepto para muestras de exosto de diésel, donde el contenido de Brown Carbon (BrC) es bajo (Chen et al., 2015)

De manera similar el Análisis Espectral Térmico (TSA), el cual también es un método termo/óptico, provee información adicional que evalúa las contribuciones del Carbón Negro (BC) y el Carbón Marrón (BrC) y sus propiedades ópticas del espectro solar en el infrarrojo cercano hasta el ultravioleta cercano (Chen et al., 2015).





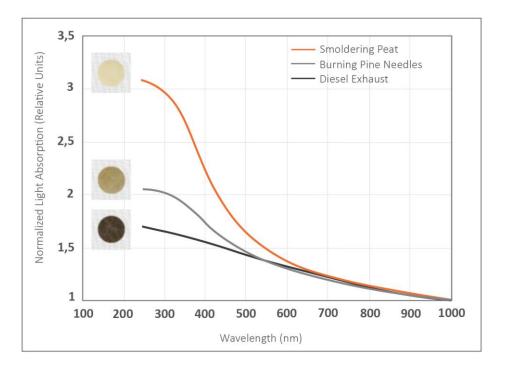


Figura 2-9. Espectros de absorción de diferentes emisiones fuente muestreadas en membrana de teflón filtra y analiza con un espectrómetro ultravioleta / visible. La absorción a través del filtro de teflón se normaliza a 1,000 nm, siendo dominado por el EC en cada una de las emisiones de origen.

Tomado de (Chow et.al,2019).

2.4 METODOLOGÍA PARA BALANCES IONICO Y MÁSICO

El análisis químico de metales, iones, carbono orgánico y carbono elemental realizada en el laboratorio solamente da cuenta de una parte de la composición del material particulado presente en el aire, sin embargo, pueden existir otros compuestos asociados a emisiones primarias o secundarias, que no fueron determinadas en las diferentes técnicas analíticas, de acuerdo con sus alcances, interferencias y limitantes propias de los principios de medición.

La aproximación de la composición química de los compuestos presentes en el material particulado se realizó a partir del balance iónico, estimación de la masa de la partícula promedio y el balance de masa para reconstrucción de los componentes de la misma.

El balance iónico de la partícula se hizo calculando la concentración de los equivalentesgramo de los aniones presentes que fueron medidos, y comparándolos con la concentración de los equivalentes-gramo de los cationes. En aquellos casos donde no puedan determinar los cationes, se aplica según (Vargas & Rojas, 2010), el supuesto que todos los metales se encuentran como cationes disponibles para neutralizar la carga de los aniones medidos.

Página 37 de 264







El cálculo de la concentración del número de equivalentes-gramo de una especie química se realiza según la Ecuación 2-4:

$$CN_{eq.gr_i} = \frac{Concentración_i}{Peso\ equivalente_i}$$
 $\begin{bmatrix} eq.\ gr/_{m^3} \end{bmatrix}$

Fcuación 2-4

El proceso de reconstrucción de la masa gravimétrica experimental está basado en información sobre los componentes químicos de PM y el uso de ecuaciones validadas científicamente que describen los perfiles químicos de la contribución de las fuentes más comunes. Hay 11 ecuaciones de reconstrucción en masa publicadas (Judith C. Chow, Lowenthal, Chen, Wang, & Watson, 2015) ver Tabla 2-2. Resumen de 11 ecuaciones de reconstrucción de masa de PM2.5 y sus principales componentes químicos que pueden aplicarse, las cuales están en función de componentes químicos individuales según tipos de especies o fuentes relevantes, tales como: componentes carbonosos, masa mineral (material geológico), sal marina, especies inorgánicas secundarias y metales en trazas. De esta manera se puede verificar la fiabilidad de los datos experimentales y aún más, puede usarse como método de validación y comparación con los resultados que se obtienen con el análisis de distribución de las fuentes.

Para la reconstrucción de la masa RM, de acuerdo con la ecuación seleccionada, se realiza la suma de componentes químicos individuales según tipos de especies o fuentes relevantes, Ecuación 2-5:

$$RM = iones\ inorgánicos + OM + EC + minerales\ geológicos + sal + trazas + otros$$

Ecuación 2-5

El carbono orgánico (OC) debe convertirse en masa orgánica (OM).

La masa mineral también debe calcularse a través de concentraciones elementales relevantes.

La sal marina se puede calcular en base a la concentración estándar de agua de mar.

En la Tabla 2-2, se describen las 11 ecuaciones científicas para la RM y obtención de la caracterización del PM en función de componentes químicos individuales comunes en perfiles químicos de la contribución de fuentes (Judith C. Chow et al., 2015; DeBell et al., 2006; Genga, Ielpo, Siciliano, & Siciliano, 2017c; Lewis, Norris, Conner, & Henry, 2003; Maenhaut, Raes, Chi, Cafmeyer, & Wang, 2008).

El balance masico puede obtenerse a partir de la comparación de la masa gravimétrica del PM con la suma de masas de componentes químicos individuales en función de los tipos de especies o fuentes relevantes:

Página 38 de 264









- Masa orgánica (OM)
- > Inorgánicos Secundarios
- Carbono elemental
- > Minerales geológicos
- > sa
- Elementos traza
- Otros

Tabla 2-2. Resumen de 11 ecuaciones de reconstrucción de masa de PM2.5 y sus principales componentes químicos

Equa⊠onNo. (reference)/studyarea	Inorganic ions	Organic mass/organic carbon (OM/OC) ra⊠o		Geologicalminerals ^a	Salt ^b	Trace element§	Others
Equa⊠on 1 (Macias et al. 1981)/Page, AZ	(NH ₄) ₂ SO ₄ +NH ₄ NO ₃	1.5 ^d	Yes	1.89Al+2.14Si+1.4Ca+1.2K+ 1.43Fe (assuming Al ₂ O ₃ , SiO ₂ , CaO, K ₂ O, and Fe ₂ O ₃)	None	1.25Cu+1.24Zn+1.08Pb (assuming CuO, ZnO, and PbO)	None
Equa⊠on 2 (Solomon et al. 1989)/Los Angeles, CA	SO ₄ + NO ₃ + NH ₄ +	1.4	Yes	1.89Al+2.14Si+1.4Ca+1.43Fe (no oxides were specified)	None	Sum of all species measured by XRF (excluding S, Al, Si, Ca, and Fe) plus Na ⁺ and Mg ⁺⁺ measured by AAS	None
Equa⊠on 3 (Chow et al. 1994b)/Los Angeles, CA	SO_4 + NO $_3$ + NH $_4$ +	1.4	Yes	As in Eq. 2 (assuming Al $_2$ O ₃ , SiO $_2$, CaO, and Fe $_2$ O ₃)	None	Sum of 40 elements (Na to U) by XRF excluding S, Al, Si, Ca, and Fe	None
Equa⊠on 4 (Malm et al. 1994)/IMPROVE network	4.125S as (NH ₄) ₂ SO ₄ NO ₃ [−] was excluded due to the concern that NO ₃ [−] can vola⊠lize from the Teflon- membrane filters but not from the Nylon filter	1.4	Yes	2.2Al+2.49Si+1.63Ca+1.94Ti+ 2.42Fe (assuming Al ₂ O ₃ , SiO ₂ , CaO, Fe ₂ O ₃ , and FeO (in equal amounts), TiO ₂ , and K ₂ O (assuming that soil K is 0.6Fe), with all oxide mul⊠pliers by 1.16 to accoun⊠or other missing compounds)	N one	None	None
Equa⊠on 5 (Chow et al. 1996)/ San Joaquin Valley, CA	$SO_4^{=} + NO_3^{-} + NH_4^{+}$	1.4	Yes	As in Eq. 2	Na ⁺ +Cl ⁻	As in Eq. 2: also excluding Na +, K +, and Cl -	None
Equa®on 6 (Andrews et al. 2000)/Great Smoky Mountains Na®onal Park, TN	SO_4 + NO $_3$ + NH $_4$ + Was es2mated by HEADS SO_4 + /NH $_4$ + ra \boxtimes 0)	1.4	Yes	As in Eq. $$ 2 plus 1.67Ti (assuming Al $_2{\rm O}_3,$ SiO $_2,$ CaO, K $_2{\rm O},$ TiO $_2,$ and Fe $_2{\rm O}_3)$	None	Sum of remaining species (excluding S, Al, Si, Fe, Ti, Ca, and K; see Table S- 1 of Andrews et al. 2000)	None
Equaion 7 (Malm et al. 2000); original IMPROVE Eq.)/ IMPROVE network	4.125S (as (NH ₄) ₂ SO ₄)+ 1.29NO ₃ ⁻ (as NH ₄ NO ₃)	1.4	Yes	As in Eq. 4	None	None	None
Equalon 8 (Maenhaut et al. 2002)/Melpitz, Germany	$SO_4^= + NO_3^- + NH_4^+$	1.4	Yes	As in Eq. 4	Cl+1.4486Na	Sum of all non-sea salt and non-crustal elements, excluding S and K.	Non-crustal K (K – 0.6Fe)
Equa⊠on 9 (DeBell et al. 2006)/IMPROVE network	4.125S (as (NH ₄) ₂ SO ₄)+ 1.29NO ₃ ⁻ (as NH ₄ NO ₃)	1.8	Yes	As in Eq. 4	None	None	None
Equa⊠on 10 (Hand et al. 2011; revised IMPROVE Eq.)/IMPROVE network	1.375 SO ₄ ⁼ (as (NH ₄) ₂ SO ₄) ^e + 1.29NO ₃ ⁻ (as NH ₄ NO ₃)	1.8	Yes	As in Eq. 4	1.8Cl ⁻	None	None
Equallon 11 (Simon et al. 2011)/IMPROVE network	(NH ₄) ₂ SO ₄ +NH ₄ NO ₃	1.8	Yes	3.48Si+1.63Ca+2.42Fe+1.94Ti	1.8Cl-	None	Non-crustal K=1.2× (K -0.6Fe)

Página 39 de 264







Una vez realizada la RM, se calculará la composición promedio balanceada del PM2.5 en función de componentes químicos individuales según tipos de especies o fuentes relevantes, componentes carbonosos, masa mineral (material geológico), sal marina, especies inorgánicas secundarias y metales en trazas, y bajo esta estructura química, estimar los aportes de las fuentes a las concentraciones PM2.5.

La realización del balance másico tiene por objetivo tener una aproximación a la composición química real de los compuestos presentes en el material particulado. Para ello, se aplicaron los 11 métodos diferentes considerados en (Chow, Lowenthal, Chen, Wang, & Watson, 2015) para la reconstrucción másica y de acuerdo a los resultados obtenidos. Se seleccionará el método que reproduzca la masa medida con mayor acercamiento a las características de las fuentes de emisión propias de la región. Esta masa reconstruida se compara con la masa gravimétrica determinada en el laboratorio, considerando como potenciales datos atípicos explicables por el modelo experimental, aquellos por fuera del intervalo 80% - 120% del balance másico. Estos datos de denominaran con el sufijo balanceado.

La reconstrucción de la masa se lleva a cabo para cada muestra de la campaña, aplicando la ecuación del modelo seleccionado permitiendo tener claridad del rango de reconstrucción de la masa en el estudio. Para la obtención de la composición promedio del PM2.5 balanceado, siguiendo el procedimiento descrito por (Vargas & Rojas, 2010), usando la mediana de los datos de la masa recolectada, aplicando los coeficientes descritos para el material orgánico y carbonáceo, el material mineral del suelo, los materiales iónicos y las trazas de los demás elementos, según la Ecuación 2-6. La cantidad de la masa no identificada se estima según la Ecuación 2-7.

Para la estimación de la composición promedio del PM2.5 balanceado, se multiplica este valor por la mediana de los valores porcentuales de cada especie analizada.

$$PM_{2,5\;rec} = SO_4 + 1,40C + EC + 2,2Al + 2,49Si + 1,63Ca + 2,49Fe + 1,94Ti \\ + \sum (dem\'{a}s\;iones\;y\;elementos\;analizados)$$

Ecuación 2-6

No Identificado = Masa gravímetrica —
$$\sum$$
 Masas reconstruidas

Ecuación 2-7

Página 40 de 264









2.5 MÉTODOLOGIA PARA EL PROCESAMIENTO DE LA COMPOSICIÓN QUÍMICA DE AEROSOLES EN SUPERFICIE CON TÉCNICAS ESTADÍSTICAS PROPIAS DE MODELOS DE RECEPTORES.

Los modelos de receptores son una solución matemática para cuantificar la contribución de unas fuentes a unas muestras, a partir de la composición de dichas fuentes.

La composición, también conocida como "especiación", se determina empleando métodos analíticos apropiados para los medios ambientes y las especies clave, o combinaciones de especies que se requieran para separar aportes. Para el análisis de un conjunto de datos especiados, se emplea una matriz X de i por j dimensiones, en la cual i, es el número de muestras y j, la cantidad de especies químicas a considerar; los datos empleados en los modelos deben estar acompañados de las incertidumbres u. Usualmente se ingresan en otra matriz del igual orden (i, j). El objetivo de los modelos receptores es resolver el balance másico químico (CMB — Chemical Mass Balance) e identificar correlaciones entre la concentración de especies medidas y un conjunto de perfiles de fuentes previamente identificados.

2.5.1 Revisión de técnicas estadísticas de modelos receptores

Los modelos de calidad del aire emplean técnicas matemáticas y numéricas para simular los procesos físicos y químicos que intervienen en la emisión de los contaminantes del aire, su dispersión y reacción en la atmósfera, y su inmisión.

- Modelos de dispersión: Típicamente empleados para estimar los niveles permitidos de concentración de contaminantes en determinados lugares alrededor de las fuentes de emisión.
- Modelos foto-químicos: Comúnmente empleados en procesos regulativos o políticas de medición para simular el impacto de todas las fuentes de emisión en la generación de nuevos contaminantes, y estimar las concentraciones en una amplia escala espacial.
- Modelos receptores: Estos modelos se basan en técnicas observacionales sobre las características físicas y químicas de gases y partículas presentes en una fuente y un receptor, al estar ambos caracterizados se puede establecer la presencia y la magnitud de la contribución que hace una fuente a las concentraciones presentes en un receptor.

La Figura 2-10, que se muestra a continuación, ilustra los tipos de modelos de calidad del aire.

fy © fitto

@areametropol

www.metropol.gov.co

Página 41 de 264





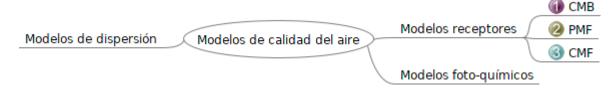


Figura 2-10. Tipos de modelos de calidad del aire Fuente: Elaboración propia – Grupo GHYGAM 2020

Los modelos receptores se soportan en procesos matemáticos o estadísticos para identificar y cuantificar las fuentes contaminantes del aire en la locación del receptor. A diferencia de los modelos de dispersión y foto-químicos, los modelos receptores no usan emisiones contaminantes, datos meteorológicos y mecanismos de transformación química para estimar la contribución de las fuentes a las concentraciones presentes en el receptor. Los modelos receptores usan las características físicas y químicas de gases y partículas medidas en la fuente y en el receptor para identificar la presencia de especies y cuantificar las contribuciones de las mismas realizadas por las fuentes a las diferentes concentraciones identificadas en el receptor. Estos modelos se complementan con otros modelos de calidad del aire y permiten identificar las fuentes que contribuyen a los problemas de calidad del aire.

La EPA ha desarrollado el modelo CMB (Chemical Mass Balance) y modelos no combinados como el modelo PMF (Positive Matrix Factorization). CMB considera la mayoría de las concentraciones de aportes identificados en el receptor, los cuales están referidos químicamente a los diferentes tipos de fuentes, a partir de una base de datos con perfiles de fuentes caracterizadas. Los modelos no mezclados y el modelo PMF internamente generan perfiles de fuentes a partir de los datos del ambiente, de tal forma que el usuario las pueda relacionar con fuentes conocidas.

Para lograr el objetivo que persiguen los modelos más difundidos: PCA (Principal Components Analysis), CMB(Chemical Mass Balance), PMF (Positive Matrix Factorization) (Paatero & Tapper, 1994), UNMIX (Multi-linear Engine), Lenschow Approach, Backtrajectory Analysis, Constrained Physical Receptor Model and Isotopic Mass Balance usando C-14 (Viana et al., 2008), existen varias técnicas y métodos de análisis. Cada una de ellas varía en el grado de conocimiento que se debe tener de las fuentes y sus perfiles, además del número de fuentes requeridas para efectuar una modelación. Según (Viana et al., 2008), el modelo más ampliamente usado es el CMB; para este modelo, se requiere un conocimiento detallado de las fuentes y los perfiles de las emisiones. En segundo lugar, los modelos PCA y PMF son los que más se emplean. En términos cuantitativos, estos dos últimos requieren un conocimiento menor de las fuentes y los perfiles de las emisiones, en comparación con el CMB. No obstante, en cualquier caso, se requiere un conocimiento cualitativo inicial de las fuentes del área de estudio. De los tres modelos antes mencionados, el modelo PCA es el que menos datos exige, la única información requerida son los datos de especiación. Un aspecto por resaltar del modelo PMF es que permite introducir los errores estimados (peso) de los datos, lo cual permite considerar indirectamente los límites de detección en las consideraciones del modelo. El modelo PMF, además los datos de especiación requiere las incertidumbres para cada punto de toma de datos. Mientras que, Página 42 de 264







el modelo CMB, además de requerir datos de concentración e incertidumbre, requiere los perfiles de las fuentes de emisiones a correlacionar, acompañadas de sus correspondientes incertidumbres.

En materia computacional el modelo PCA no precisa un software específico dado que emplea factores de análisis y técnicas de regresión multilineal que se pueden realizar con cualquier paquete de software estadístico. Por el contrario, el modelo PMF y el CMB requieren un software específico. Para el primero, la EPA (Environmental Protection Agency) en su sitio web, ofrece una herramienta de libre descarga en el sitio web (US-EPA, n.d.). En el caso del CMB, también existe un software de uso libre que provee la EPA. Además, existen soluciones con licencias propietarias a las que se puede recurrir como la del grupo el software MCF 2.0 desarrollado por el grupo de investigación GHYGAM del Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid.

Los resultados y tiempos de respuesta de lo anterior dependen de la identificación de las fuentes y de su contribución:

- Identificación de las fuentes de PM: PCA y PMF son relativamente más rápidos, dado que la selección de los perfiles de las fuentes que requiere CMB consume un tiempo adicional.
- La identificación de la contribución de las fuentes con PCA y CMB es un proceso más extenso que con PMF.

Por otra parte, la preparación de los datos para alimentar el modelo PMF, consume más tiempo, dado que se deben parametrizar las matrices con las incertidumbres. La Tabla 2-3, muestra la comparación de los tres modelos considerados a partir de los datos presentados por (Viana et al., 2008).







Tabla 2-3 Comparativo Modelos Receptores

Modelo	Requerimientos	Aspectos relevantes
PCA (Análisis de Componente Principal)	• Datos de especiación	 No requiere un software específico Identificación de fuentes: Rápida Contribución de fuentes: Consume mayor tiempo
PMF (Factorización de Matriz Positiva)	 Datos de especiación Datos de incertidumbres 	 Software de propiedad de la EPA para libre uso Identificación de fuentes: Rápida Contribución de fuentes: Rápida La preparación de los datos consume mayor tiempo
CMB (Balance Químico de Masas)	 Datos de especiación Datos de incertidumbres Perfiles de emisión 	Software de propiedad de la EPA para libre uso u otras soluciones de terceros Selección de los perfiles de las fuentes: consume mayor tiempo Contribución de fuentes: consume mayor tiempo

Con respecto al desempeño de los modelos, los tres arrojan resultados muy similares en lo concerniente a la capacidad para reproducir los niveles diarios de concentración de PM.

En el caso del estudio de inter-comparación realizado por (Viana et al., 2008) la dispersión entre los datos medidos y modelados en el menor de los casos correspondiente al CMB, es de $R^2 = 0.93$, como se muestra en la Figura 2-11.





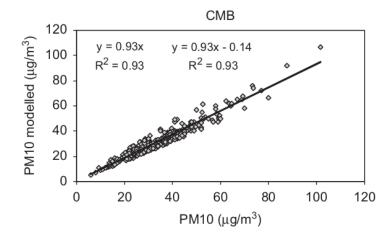


Figura 2-11. Dispersión para modelación de PM10 mediante el CMB Fuente: (Viana et al., 2008)

En el caso de PMF, el mayor es r2 = 0.83, como se observa en la Figura 2-12.

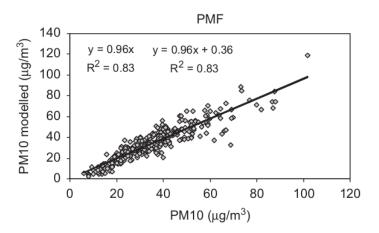


Figura 2-12. Grafica de dispersión para modelación de PM10 mediante el PMF Fuente (Viana et al., 2008)

Por el contrario, la correlación de la curva descendente es de 1 en el caso de PMF (y = 0.96x+0.36) como intercepto menor, mientras que en el caso del PCA, corresponde a 0.86 con un intercepto de 2.15 en (y = 0.86x+2.15). Los resultados obtenidos para el PCA son muy similares (y = 0.93x-0.14) a los anteriores, como se observa en la Figura 2-13.





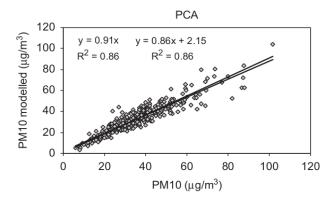


Figura 2-13. Grafica de dispersión para modelación de PM10 mediante el PCA Fuente (Viana et al., 2008)

En conclusión, los resultados que se pueden alcanzar con cualquiera de estos modelos son satisfactorios. Sin embargo, el modelo PMF ofrece un mayor grado de confiabilidad, no precisa de perfiles de fuentes conocidas y permite realizar un análisis más enriquecido al momento de interpretar los datos. En el siguiente apartado se presentará en detalle el modelo PMF que ha sido el modelo seleccionado para el proyecto.

A continuación, se detallan los modelos CMB8.2 y PFM 5.0 dada la comparabilidad entre los aportes de las fuentes que soportaran los resultados esperados del presente proyecto, aun así, se haya seleccionado el modelo PFM para el reporte final de los mismos.

2.5.2 Modelo CMB (Chemical Mass Balance)

Para correr este modelo existe un software de uso libre desarrollado por la EPA, la última versión disponible es la 8.2. Para cuantificar las contribuciones de las fuentes, el modelo requiere como datos de entrada perfiles de especiación con un potencial de contribución en las fuentes y datos del ambiente, esta información se obtiene a partir del análisis de las muestras recolectadas en la ubicación del receptor. Las contribuciones se cuantifican a partir de la composición química de los diferentes tipos de fuentes más que de los emisores individuales. Diversas fuentes con características químicas y físicas similares no se pueden ser diferenciadas por el CMB.

2.5.2.1 Identificación de los perfiles especies

Para esta labor se cuenta con la base de datos de perfiles de fuentes Speciate de la EPA y una base de datos del grupo de Investigación GHYGAM que contiene registros con información de especiación asociados a fuentes contaminantes caracterizadas en publicaciones científicas e investigaciones previas del grupo. El repositorio de datos y la documentación relacionada está disponible en la siguiente dirección: https://www.epa.gov/air-emissions-modeling/speciate-4. Al momento de redactar el presente documento la última versión disponible es la 5.0. Además de estar disponible para

Página 46 de 264







ser descargada y accedida empleando Microsoft Access, cuenta con una versión el línea que puede ser consultada a través de un navegador de Internet en la siguiente dirección: https://www.epa.gov/air-emissions-modeling/speciate-0.

2.5.2.2 Asunciones del modelo CMB

- ➤ El número de fuentes seleccionadas debe ser positivo y menor o igual que el número de especies químicas seleccionadas.
- R2 está determinado por la regresión lineal de lo medido versus lo calculado por el modelo. El rango de los valores de R2 están entre 0 y 1. Cuando R2 es menor que 0.8, las contribuciones estimadas de la fuente no explican muy bien las observaciones con los perfiles de fuente suministrados.
- El valor de Chi cuadrado debe estar entre 0 y 4.
- ➤ El porcentaje de masa arrojado por el modelo es la proporción porcentual de la suma de las concentraciones estimadas en una fuente calculadas por el modelo, tomando las concentraciones de masa medidas. El valor óptimo de esta proporción es el 100%, valores obtenidos entre 80 y 120% son aceptables.
- ➤ El valor de los grados de libertad (DEGREES FREEDOM) que arroja la solución del modelo deben ser mayor 5. DF > 5

2.5.2.3 Archivos de entrada

Para alimentar el software CMB se requieren tres archivos, los cuales pueden ser enlazados mediante un archivo de control, lo cual simplifica la alimentación del software al momento de repetir una corrida del modelo. La extensión de los archivos de control es *.in8, el contenido al interior de los mismos consta de dos líneas en las que se ubica el nombre de los dos datos que alimentan el modelo con la información de los datos del ambiente y los perfiles de las fuentes. Los formatos aceptados para los datos de la **muestra del ambiente** (AD) y los perfiles de las fuentes (PR) son *.csv, *.dbf y *.wks.

Los archivos con extensión *.sel permiten pre-cargar la información de un subconjunto de muestras en las que el aporte de las fuentes serán evaluados.

El archivo que contiene los perfiles de las fuentes debe contener la estructura que se presenta en la siguiente tabla:

Página 47 de 264









Tabla 2-4. Estructura de la plantilla de perfiles de fuentes para el modelo CMB8.2.

PNO	SID	SIZE	Elemento 1	Elemento 2	Elemento 3	Elemento n
Identificador perfil	Identificador fuente	COARSE/FINE	Concentración elemento 1	Concentración elemento 2	Concentración elemento 3	Concentración elemento n

El nivel de precisión en el ajuste de la escala de los datos presentes en la matriz cargada se establece en la columna size mediante los valores COARSE/FINE. COARSE se emplea para fijar una escala más amplia y FINE para fijar una más pequeña.

La información con los datos del ambiente debe contener la estructura que se presenta a continuación:

Tabla 2-5. Estructura de la plantilla ambientes para el modelo CMB8.2.

ID	DATE	DUR	STHOUR	SIZE	TMAC	TMAU	Elemento 1	Elemento 1 U	Elemento n	Elemento n U
ID receptor	Fecha	Duración en horas entre 0 y 24	Hora inicial	COARSE/ FINE	Concentra- ción total de masa	Incertidum- bre de la concentra- ción total	Concentra- ción elemento 1	Incertidumbre de la concentración elemento 1	Concentra- ción elemento n	Incertidumbre de la concentración elemento n

2.5.2.4 Diccionario de datos para la plantilla de ambientes

- Campo 1(ID): Identificador del sitio donde se toma la muestra (hasta 12 caracteres)
- Campo 2 (DATE): Fecha a la que corresponde el dato de la fila (hasta 8 caracteres)
- Campo 3(DUR): Duración del tiempo muestral (hasta 2 caracteres)
- Campo 4(STHOUR): Hora de inicio de la toma de la (hasta 2 caracteres)
- Campo 5(SIZE): Tamaño de la fracción de la partícula (Hasta to 6 caracteres)
- Campo 6 (TMAC): Concentración total de masa (Cualquier cantidad de caracteres en formato numérico: entero, como flotante o formato exponencial)
- Campo 7 (TMAU): Incertidumbre de la concentración total de masa. (El mismo formato que el campo 6)
- ➤ Campo 8+2n: Concentraciones de las especies químicas. (El mismo formato que el campo 6). Donde n= 0,1,2,...
- ➤ Campo 9+2n: Incertidumbre de las concentraciones de especies. (El mismo formato que el campo 6). Donde n= 0,1,2,...

Página 48 de 264







Nota: Es muy importante tener de presente que el encabezado de las primeras 5 columnas de la plantilla deben coincidir en orden y en nomenclatura de acuerdo con el manual del software: ID,DATE,DUR,STHOUR,SIZE.

Al momento de correr el modelo se deben configurar arreglos de especiaciones como resultantes de establecer la presencia o no de un compuesto en un arreglo. El software permite configurar hasta 10 arreglos, los cuales se pueden acompañar de una columna con la descripción del arreglo tal como se presenta a continuación:

Tabla 2-6. Estructura de la plantilla de especies para el modelo CMB8.2.

SPECIE	SPECIE NAME	1	2	3	10	COMMENT
Identificador de la especiación 1	nombre de la especiación 1	•				Descripción 1
Identificador de la especiación 2	nombre de la especiación 2			•		Descripción 2
Identificador de la especiación 3	nombre de la especiación 3	•		•		Descripción 3
Identificador de la especiación n	nombre de la especiación n	•				Descripción n

La información de los arreglos de especiaciones puede ser precargada y almacenada al momento de actualizar la configuración de esta matriz, para ello debe incluirse un archivo con la extensión *.sel y debe ser vinculado al archivo de control, denotando la existencia de una configuración de arreglos fijada por defecto.

Adicionalmente para proceder a correr el modelo CMB se deben establecer perfiles de fuentes, para lo cual el usuario puede seleccionar perfiles que representan las emisiones que probablemente influyen en las concentraciones del receptor. Pueden establecerse diferentes perfiles para referirse al mismo tipo de fuente, pero generalmente solo uno ellos es el que mejor se ajusta a la fuente asociada, tal como se muestra en la Tabla 2-7.





Tabla 2-7. Estructura de la plantilla de fuentes para el modelo CMB8.2.

PNO	SID	1	2	3	10	COMMENT	Elemento 1	Elemento n
Identificador perfil 1	Identificador fuente 1	•				Descripción 1	Concentración elemento 1	Concentración elemento n
Identificador perfil 2	Identificador fuente 2			•		Descripción 2	Concentración elemento 1	Concentración elemento n
Identificador perfil 3	Identificador fuente 3	•		•		Descripción 3	Concentración elemento 1	Concentración elemento n
Identificador perfil n	Identificador fuente n	•				Descripción n	Concentración elemento 1	Concentración elemento n

De igual forma esta información también puede ser pre-cargada en un archivo con la extensión *.sel. En caso de no estar cargada previamente dicha información, al momento de seleccionar los perfiles de fuentes, estos pueden ser guardados para futuros ejercicios.

2.5.3 Modelo PMF (Positive Matrix Factorization)

De acuerdo con (Brown, Eberly, Paatero, & Norris, 2015), el objetivo del modelo receptor multivariado PMF es identificar el número de factores p, el perfil de las especies f de cada factor, y la cantidad de masa g aportada por cada factor a cada muestra individual que resuelve el balance químico másico entre concentraciones de especies medidas y perfiles factor. El modelo PMF no requiere como parámetros de entrada datos de fuentes categorizadas, a diferencia del modelo CMB. El modelo PMF suministra un perfil a una cantidad de factores posibles introducida por el usuario. La información de salida debe ser interpretada a partir de los estudios del ambiente y la identificación de los contaminantes presentes en las fuentes resultantes.

El modelo PMF asume que existen p tipos de fuentes o regiones de fuentes a las que se les denomina factores, las cuáles influyen sobre un receptor. Las concentraciones observadas para las distintas fuentes se producen por una combinación lineal de los impactos de los p factores. Mediante dos matrices F y G (F = matriz de concentraciones y G = matriz de incertidumbres) de doble entrada (i, j), con igual número de (m X n) dimensiones (m = filas, n = columnas). En la columna (i,1) de ambas matrices se introduce la información de cada muestra observada, mientras que los valores reportados para concentraciones e incertidumbres para cada elemento j, se introducen a partir de la columna 2 hasta la columna m en su correspondiente matriz. Para correr el modelo se asocia una señal de ruido (m S/N = Signal Noise) a cada elemento reportado mediante la siguiente clasificación: strong, weak y bad. Estas últimas, adicionan una señal de ruido (m S/N) a las

Página 50 de 264









incertidumbres cuando se trata de weak y bad, mientras que strong conserva el valor original. Por defecto el software PMF asigna la clasificación strong a todas las incertidumbres.

El objetivo del Modelo PMF es resolver la ecuación que representa la expresión matemática presentada en la Ecuación 2-8:

$$Xij = \sum_{k=1}^{p} g_{ik} f_{kj} + e_{ij}$$

Ecuación 2-8

Dónde:

Xij, es la concentración en el receptor para las j especies del día i

 $\sum_{k=1}^{p} g_{ik}$, es la contribución de los *k* factores el día *i*

 X^{ij} Corresponde a la fracción de los k factores que corresponde a la especie j y,

eij, es el residuo de la especie j el día i.

El modelo PMF, requiere 2 tipos de datos diferentes para determinar las contribuciones aportadas por determinadas fuentes a la muestra medida: el primer conjunto de datos corresponde a las concentraciones de cada especie *j* medidas en cada muestra *i*, tal como se muestra en la Tabla 2-8.

Tabla 2-8 Concentraciones de cada especie *j* medidas en cada muestra *i*

Fecha	Especie 1	Especie 2	 Especie j
Muestra 1	Concentración 1 Especie 1	Concentración 1 Especie 2	 Concentración 1 Especie j
Muestra 2	Concentración 2 Especie 1	Concentración 2 Especie 2	 Concentración 2 Especie j
Muestra i	Concentración i Especie 1	Concentración i Especie 2	 Concentración i Especie j

Página 51 de 264





El segundo conjunto de datos corresponde a las incertidumbres asociadas a cada una de las concentraciones establecidas en la Tabla 2-8 como se muestra en la Tabla 2-9. Estas incertidumbres, pueden conocerse directamente o determinarse a partir de los límites de detección de cada especie y un porcentaje de incertidumbre asociada.

Tabla 2-9 Incertidumbres asociadas a las concentraciones

Fecha	Incertidumbres Especie 1	Incertidumbres Especie 2	 Incertidumbres Especie j
Muestra 1	Incertidumbre 1 Especie 1	Incertidumbre 1 Especie 2	 Incertidumbre 1 Especie j
Muestra 2	Incertidumbre 2 Especie 1	Incertidumbre 2 Especie 2	 Incertidumbre 2 Especie j
Muestra i			
Muestra n	Incertidumbre n Especie 1	Incertidumbre 1 Especie n	 Incertidumbre n Especie j

La secuencia de las operaciones necesarias para correr el modelo PMF se presentan en la Figura 2-14, se ilustra el diagrama de actividades del proceso empleado por el modelo PMF.

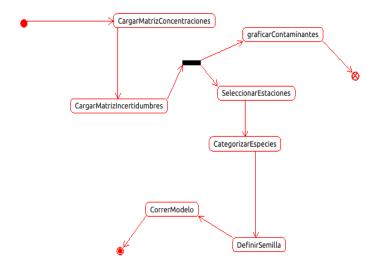


Figura 2-14. Flujo del proceso del modelo PMF Fuente: Elaboración propia – Grupo GHYGAM 2019

Página 52 de 264









2.5.3.1 Réplicas para una corrida del modelo

La repetición de la corrida en una modelación permite hacer revisiones y validaciones de los criterios y resultados empleados y obtenidos en momento dado. En el caso del modelo PMF, esto es posible. Mediante el archivo de configuración (archivo con extensión .cfg), el modelo puede enlazar los archivos previamente empleados con los datos de concentración e incertidumbre. Adicionalmente, contiene el valor de la última semilla empleada. Para obtener una réplica con factores exactamente iguales, se debe conservar exactamente la misma semilla. Por consiguiente, para repetir el experimento que genera una nueva semilla de manera aleatoria, tal como lo hace el modelo por defecto (US-EPA, 2014). En la Figura 2-15 se observa la pantalla que permite deshabilitar la generación aleatoria de una nueva semilla.

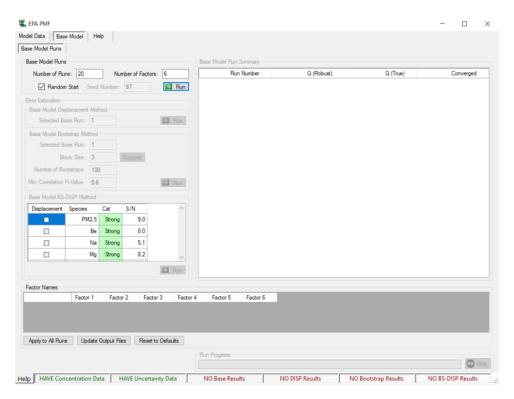


Figura 2-15. Replicación de corridas del modelo Fuente: Elaboración propia – Grupo GHYGAM 2020

2.5.3.2 Condiciones del modelo PMF

Las siguientes son condiciones del Modelo:

> Todos los valores, tanto de concentración como de incertidumbre deben ser positivos.

Página 53 de 264







- ➤ Los datos deben estar ordenados de manera creciente de acuerdo a la fecha del muestreo, esto es, de la más antigua a la más reciente.
- ➤ El formato de fecha en la columna donde se encuentra la fecha en la que se toman los datos debe estar estandarizada, es decir todas las columnas deben estar en el mismo formato YYYY-MM-DD o YYYY/MM/DD.
- Se debe definir como punto de comienzo valores al azar mayores o iguales a 5.
- ➤ Se deben especificar el número de fuentes a asociar con las concentraciones de las especies medidas. En estudios ambientales se emplean valores entre 3 y 17.
- ➤ En la matriz de concentraciones y de incertidumbres, las columnas que contienen la información de los contaminantes (especies), deben estar en el mismo orden.
- Adicional a la incertidumbre ingresada como parámetro inicial, se puede añadir hasta un 25% extra de incertidumbre con el objetivo de contrarrestar las incertidumbres asociadas a los datos tomados, siempre y cuando la incertidumbre inicial se considere demasiado pequeña (Pindado, R., & García, 2013).
- Se deben categorizar las especies con un parámetro marcado como: strong, bad ó weak, con el fin de asignar mayor o menor peso de acuerdo a su importancia (Pindado et al., 2013).

Adicionalmente, se debe tener en cuenta que:

- ➤ El modelo PMF puede generar resultados insatisfactorios cuando no se introducen las concentraciones de algunas especies.
- A mayor número de factores especificados para las corridas del modelo, el tiempo de respuesta será mayor.

2.5.3.3 Datos empleados para correr el modelo PMF

El modelo PMF se ha corrido con un set de datos especiados de PM2.5, provenientes del análisis de laboratorio de la estación de calidad del aire MED-BEME, ubicada en la ciudad de Medellín, Colombia. La información colectada, corresponde a la campaña realizada entre el 6 de abril al 6 de septiembre de 2019. Se empleó un conjunto de 50 muestras de ambiente, con 30 especies caracterizadas y se han seleccionado 6 factores. Las especies reportadas con sus respectivos datos de concentración y límites de detección son: Be, Na, Mg, Al, K, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Se, Mo, Ag, Cd, Sb, Ba, Hg, Pb, F⁻, Cl⁻, NO₃⁻, SO4⁻, OC, EC. En la Figura 2-18 se observa el comportamiento de la concentración observada durante la campaña y los datos estimados por el modelo.

f y ® th a areametropol www.metropol.gov.co







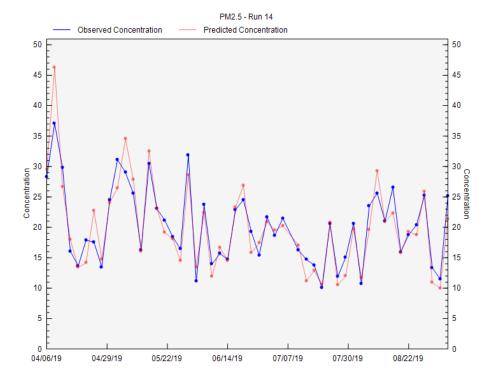


Figura 2-17. Histograma PM2.5 reportado/estimado Fuente: Elaboración propia – Grupo GHYGAM 2019

A partir de los trazadores que se pueden identificar en los perfiles de fuentes es factible asociar un factor a una fuente conocida en el ambiente de la zona de estudio. Por ejemplo (Mantas et al., 2014) señalan que las contribuciones provenientes de fuentes de combustión de fuel oil están claramente caracterizadas por: EC, V, Ni, Cr y Fe. Para la zona de estudio se lograron identificar claramente cinco de los seis factores que produjo el modelo. Una fuente vehicular, quema de biomasa, material resuspendido, industria y una fuente secundaria.

2.5.3.4 Interpretación de los datos de concentraciones/incertidumbres

Los datos estadísticos correspondientes a la relación concentración/incertidumbre, en primer lugar, son presentados en gráficas de dispersión para cada una de las especies modeladas. Las estadísticas calculadas para cada especie son las siguientes:

- Min: Valor con la concentración mínima
- ➤ Percentil 25: Dato de concentración que denota que el 25% de las concentraciones están por debajo de este.
- Media = Percentil 50: Dato de concentración que denota que la mitad de las concentraciones están por debajo de este.
- Percentil 75: Dato de concentración que denota que el 75% de las concentraciones están por debajo de este.

Página 55 de 264







- Max: Valor con la concentración máxima
- > S/N (Signal-to-Noise-ratio): Indica si la variabilidad reportada en las mediciones es real o forma parte del ruido de los datos.

Los percentiles se calculan usando una aproximación al promedio ponderado usando las ecuaciones que van de la Ecuación 2-9 a la Ecuación 2-12 (US-EPA, 2014):

$$L(n,p) = \frac{(n+1)p}{100}$$

Ecuación 2-9

$$L(n,p) = I + F$$

Ecuación 2-10

$$\sum_{K=1}^{P} g_{ik}$$

Ecuación 2-11

$$P = W_1 X_I + W_2 X_{(I+1)} + W_3 X_{(I+2)}$$

Ecuación 2-12

Dónde:

n, representa el número de valores no errados de la variable seleccionada

p, es el percentil de interés

 \emph{I} , es la parte entera de \emph{fkj} ,

F, representa la parte fraccionaria de L(n, p)

 W_1 , e^{ij} y W_3 ,son pesos

P, es el percentil enésimo y,

 $L(n,p) = \frac{(n+1)p}{100}$, $X_2...X_3$, representan los valores ordenados de la parte de las variables de interés.

El valor de S/N se obtiene a partir de la suma de los valores de concentraciones divido entre la suma de los valores de las incertidumbres.

Página 56 de 264







En la Figura 2-18 se muestra la correlación concentración/incertidumbre para los datos de la campaña del 06-04-2019 al 06-09-2019 de la Estación MED-BEME del AMVA tal como se explica en el manual del software PMF versión 5.0 de la EPA (US-EPA, 2014).

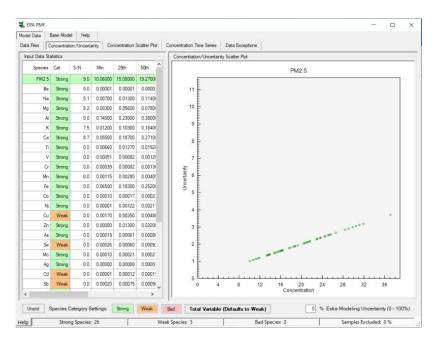


Figura 2-18. Correlación de concentraciones e incertidumbres Fuente: Elaboración propia – Grupo GHYGAM 2019

Para determinar S/N se realizan dos cálculos, donde las concentraciones correspondientes a una incertidumbre se asumen sin señal, además de las concentraciones que están por encima del valor de la incertidumbre. La diferencia entre concentración $L(n, p) = I+F y la incertidumbre <math>S_i$ es lo que asume como la señal (Ver Ecuación 6).

$$W_1 = 1 - F$$
; $W_2 = F$; $W_3 = 0$ si $P = W_1X_I + W_2X_{I+1} + W_3X_{I+2}$

Ecuación 2-13

$$L(n, p)$$
 si $X_{ij} \leq S_{ij}$

Por consiguiente, S/N se

$$\left(\frac{S}{N}\right)_{i} = \frac{1}{n\sum_{i=1}^{n} d_{ii}}$$

Ecuación 2-14

Página 57 de 264







El resultado del cálculo de S/N para las especies con concentraciones que siempre están por debajo de su incertidumbre, arrojan un S/N con valor de 0. Mientras que las especies que tienen el doble de la incertidumbre tienen un valor de S/N igual a 1. De otro lado, cuando la señal S/N es mayor a 1, puede corresponder a especies con una "buena señal", aunque también depende del método empleado para determinar las incertidumbres. Valores negativos de concentración no contribuyen a S/N. Especies con numerosos eventos de altas concentraciones no necesariamente deben asociarse a una incertidumbre alta.

La manera como se determina la convergencia de los datos es a partir de la estimación de Q. El valor del Q(Robust) obtenido fue de 846,5. Se seleccionaron 6 factores, 51 muestras y 30 especies clasificadas como strong, exceptuando Cu, Ag, Cl $^-$, Se, Cd y Sb; clasificadas como weak. Se tiene que el valor del Q esperado fue de 1044, proveniente de: (51 * 30) - ((6 * 51) + (6 * 30)) = 1044.

En la Figura 2-19 se muestra la información de los valores de Q obtenidos.

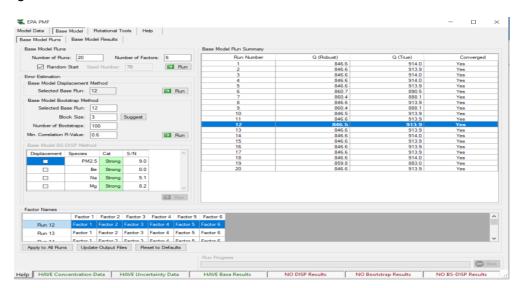


Figura 2-19. Datos de Q (Robust) y Q (True) Fuente: Elaboración propia – Grupo GHYGAM 2020

Para este ejemplo no se han asignado clasificaciones de weak para ningún elemento. Al considerar todas las especies con una clasificación strong y señalar Cu, Ag, Cl⁻, Se, Cd y Sb con weak, no hubo una variación en el valor del *Q obtenido*.

Para correr el modelo PMF es recomendable excluir los datos de concentración que se encuentran por debajo de los límites de detección. Para obtener mejores resultados, se recomienda incluir especies con S/N (señal/ruido) mayores que 1. Para los datos de la campaña anteriormente mencionada, se corrió el modelo con una semilla aleatoria, el tiempo de ejecución no superó los dos minutos empleando el software PMF 5.0 de la EPA

Página 58 de 264









en un computador con Windows 10, 4GB de RAM y un procesador QuadCore de 64-bit a 3.1 MHZ.

El modelo PMF contribuye a explicar la muestra del ambiente a partir de las fuentes seleccionadas, teniendo identificados los contaminantes que están presentes en las mismas tal como se observa en la Figura 2-20 la composición de un perfil de fuente, en este caso la asociación a una quema de biomasa.

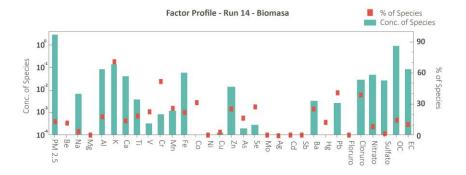


Figura 2-20. Perfil de fuente identificada Fuente: Elaboración propia – Grupo GHYGAM 2020

En la Figura 2-21 se observan las contribuciones que realizan los factores que se obtienen al correr el modelo.

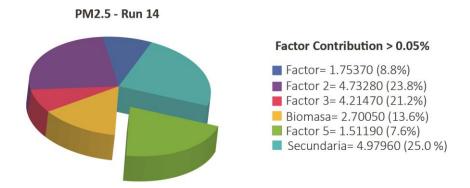


Figura 2-21. Contribución de aportes por factor Fuente: Elaboración propia – Grupo GHYGAM 2020

La interpretación y el ajuste de los datos arrojados por el modelo permiten correlacionar de manera muy aproximada la correspondencia que existe entre la modelación y la observación de los datos provenientes del ambiente y así determinar y caracterizar las principales fuentes aportantes a las concentraciones de PM2.5.

Página 59 de 264









2.6 METODOLOGÍA PARA LA COLECTA Y EVALUACIÓN DE LA INFORMACIÓN SATELITAL DISPONIBLE VINCULADA A AEROSOLES Y COMPUESTOS GASEOSOS

El monitoreo de la calidad del aire se ha convertido en un tema trascendental para las autoridades ambientales en los diferentes países en el mundo, ya que su estudio ha evidenciado una relación directa con la salud humana y el cambio climático (Gaviria Garcés, Muñoz M., & González, 2012), por lo tanto, en cuanto más información se tenga a cerca de las causas y efectos de este fenómeno se podrán tomar mejores decisiones para aumentar la calidad de vida de las personas.

Existen varias fuentes de emisión, las fuentes fijas como las industrias, canteras y minería localizadas en un punto determinado, las móviles como los vehículos o aviones; también existen resuspensiones de polvo del entorno transportado por el viento o aportes de fuentes no locales como las cenizas de erupciones volcánicas o los incendios forestales. La capacidad de la atmósfera de dispersar las concentraciones de los contaminantes viene determinada por las condiciones meteorológicas, siendo los parámetros meteorológicos que más directamente se relacionan con la contaminación atmosférica y su dispersión la velocidad del viento, la dirección del viento y la variación de la temperatura con la altura, entre otros (Placeres, Olite, & Toste, 2006).

En la última década, alrededor del mundo se han creado gran variedad de sensores remotos para la vigilancia del planeta en aspectos como la tierra, el agua y el aire, generando así imágenes de las que se puede obtener variedad de información que sirve para analizar el estado actual de diferentes elementos presentes en la atmósfera como los aerosoles.

Algunos satélites para datos de calidad del aire:

- MODIS (Terra y Aqua): Mide el AOD, carga de aerosoles en columna la cual se usa para obtener concentración de masa de material particulado. Una imagen satelital está compuesta por bandas y cada banda por pixeles, dependiendo de la resolución espacial de la imagen y el tamaño del pixel. De esta manera los aerosoles en la imagen se miden verticalmente (en columna vertical), de acuerdo a cuantos obstáculos en la atmósfera interfieren en la señal enviada por el satélite dentro de cada pixel.
- OMI (Aura): Mide absorción de aerosoles y gases traza.
- > VIIRS (NPP): Mide la profundidad óptica del aerosol, y el tipo de aerosol.
- Las aplicaciones de la teledetección son múltiples y variadas, teniendo en cuenta que existen numerosas plataformas y sensores, ciencias como la geografía, biología, geología, agronomía y oceanografía demandan el tratamiento de imágenes satelitales ya que la observación terrestre proporciona información sobre el estado de la cubierta del planeta (Sobrino et al., 2001). Una de las aplicaciones más representativas es la detección remota por satélite de la calidad del aire de material particulado, que permite la estimación de aerosoles en la atmosfera usando la profundidad óptica del aerosol derivada del satélite a longitud de onda visible (Rojas,

Página **60** de **264**







Duque, & Hernández, 2017), ya que la información se obtiene casi en tiempo real y a diario, por medio de las imágenes satelitales es posible apoyar la identificación de eventos de intrusión de aerosoles y gracias a estas técnicas se puede tener una imagen global de información sobre las plumas de aerosoles a través de la inspección visual y también permiten detectar el desplazamiento de masas de aire cargadas de aerosoles a través de los siguientes portales on-line.

- Imágenes satelitales en tiempo real NRT (Near Real Time)
- https://earthdata.nasa.gov/earth-observation-data/near-real-time
- La nasa entrega datos e imágenes casi en tiempo real de instrumentos como AIRS, AMSR2, LIS ISS, MIRS, MODIS, MOPITT, OMI, OMPS y VIIRS, la mayoría de estos productos de datos están disponibles en 3 horas desde la observación satelital. https://earthdata.nasa.gov/earth-observation-data/imagery
- Earthdata de la NASA brinda la opción de ver imágenes y crear visualizaciones de datos de acuerdo con el interés del visualizador, usando imágenes obtenidas casi en tiempo real, lo que permite respuestas casi inmediatas a ciertos eventos, las imágenes son interactivas y cuentan con diferentes capas para visualizar elementos como puntos calientes, lo mejor de esta herramienta es que no es necesario descargar las imágenes, de esta forma se puede monitorear y analizar variedad de fenómenos.
- ➤ En el portal de Worldview se pueden visualizar imágenes de los sensores MODIS (Terra/Aqua), VIIRS (SNPP), MISR (Terra), y productos de fuego. https://worldview.earthdata.nasa.gov/

2.6.1 Descarga de imágenes MODIS e imágenes clasificadas por AOD (profundidad óptica de aerosoles): moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS)

MODIS es un instrumento clave a bordo del Terra (originalmente conocido como EOS AM-1) y Aqua (originalmente conocido como EOS PM-1) satélites. La órbita de Terra alrededor de la Tierra está programada para que pase de norte a sur a través del ecuador por la mañana, mientras que Aqua pasa de sur a norte por el ecuador por la tarde. Terra MODIS y Aqua MODIS están visualizando toda la superficie de la Tierra cada 1 o 2 días, tiene 36 bandas de longitud de onda que cubren el rango de 405 (azul) a 14,385 (infrarrojo). Las imágenes que se obtienen de este sensor están clasificadas por profundidad óptica de aerosol AOD que es una medida de la atenuación de la luz solar causada por los aerosoles, es un número relacionado con la cantidad de aerosoles en la columna vertical de la

Página 61 de 264









atmosfera sobre el sitio de medición. El AOD y los niveles de contaminación atmosférica se pueden relacionar en Tabla 2-10:

Tabla 2-10. AOD y contaminación atmosférica. Fuente: NASA's applied Remote Sensing Training Program

AOD	CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA
0.02	Áreas aisladas muy limpias
0.2	Área urbana bastante limpia
0.4	Área urbana bastante contaminada
0.6	Área bastante contaminada
1.5	Evento de quema de biomasa alta o polvo

Fuente:https://arset.gsfc.nasa.gov/sites/default/files/airquality/webinars/intro_2014/span_Week4presentation.pdf

2.6.2 Descarga de imágenes MODIS

A continuación, se presenta una breve descripción del Instructivo de descarga de imágenes MODIS e imágenes clasificadas por AOD (Anexo 2-1)

Se realiza la búsqueda de las imágenes de las que se quiera obtener información de la página de LAADS DAAC NASA: https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/. El portal principal de la página se puede visualizar en la Figura 2-22.

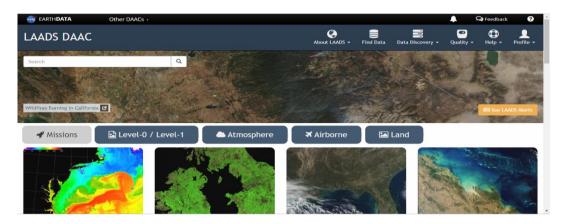


Figura 2-22. Portal principal página LAADS DAAC Fuente: Elaboración propia – Grupo GHYGAM 2019

➤ Elegir la opción Find Data que abre el portal de búsqueda de imágenes satelitales como se observa en la Figura 2-23.

Página 62 de 264









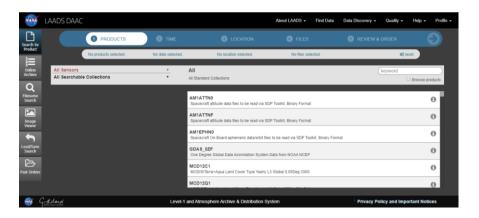


Figura 2-23. Portal de búsqueda imágenes satelitales. Fuente: Elaboración propia – Grupo GHYGAM 2019

Seleccionar: el sensor del que se quiere obtener la información, en este caso el sensor (MODIS-Aqua) ya que es el responsable de la toma de información de los aerosoles y AOD, parámetro (Aerosol) e imágenes de 10 km y de 3 km, como se muestra en la Figura 2-24.

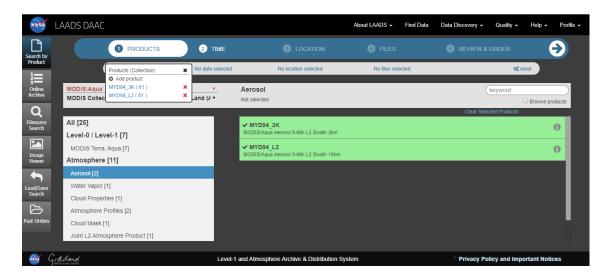


Figura 2-24. Selección de parámetros. Fuente: Elaboración propia – Grupo GHYGAM 2019

➤ Seleccionar la fecha o el rango de fechas en las que se obtuvieron las imágenes que se pretende descargar como se muestra en la Figura 2-25, en este caso se elegirá el primer día del cronograma del proyecto ARCAL (3 de abril del 2019).

Página **63** de **264**







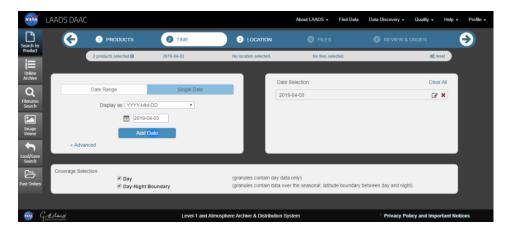


Figura 2-25. Selección fecha. Fuente: Elaboración propia – Grupo GHYGAM 2019

Continuar con la selección del área de interés en la que se va a trabajar como se muestra en la Figura 2-26, teniendo en cuenta que el proyecto para Colombia se desarrollara en el Valle de Aburra, sitio de medición Belén, Sector suroccidental - Carrera 86 # 34-97 Coordenadas (Latitud: 6.243, Longitud: -75.61201), se selecciona el área mencionada, se puede hacer por medio de un recuadro, escribiendo las coordenadas, escribiendo el nombre del lugar o seleccionando un punto específico en el mapa.

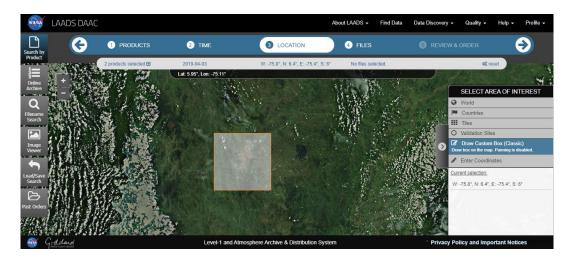


Figura 2-26. Selección área de interés. Fuente: Elaboración propia – Grupo GHYGAM 2019

Verificar el resultado de la búsqueda como se observa en la Figura 2-27 en este caso se encontró 2 imágenes una con resolución de 3 kilómetros y otra con resolución de 10 kilómetros, las dos imágenes se pueden descargar y de la imagen

Página 64 de 264









de 10 kilómetros se puede obtener una clasificación de aerosoles de acuerdo al AOD.

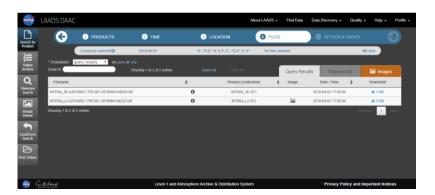


Figura 2-27. Resultados búsqueda. Fuente: Elaboración propia – Grupo GHYGAM 2019

2.6.3 Visualización de imágenes satelitales (QUICK LOOK)

En el Anexo 2-2, se encuentra el Instructivo quick look, completo. A continuación, se presenta una breve descripción:

Al ingresar al portal de la página: https://worldview.earthdata.nasa.gov se muestra las últimas imágenes que ha adquirido el sensor y deja el espacio en negro de las que falta adquirir para el momento actual como se muestra en la Figura 2-28, en la parte baja se puede modificar la fecha de acuerdo a el día en que se tomó la imagen que se está buscando y también brinda la posibilidad de ver imágenes día tras día con el objetivo de comparar.





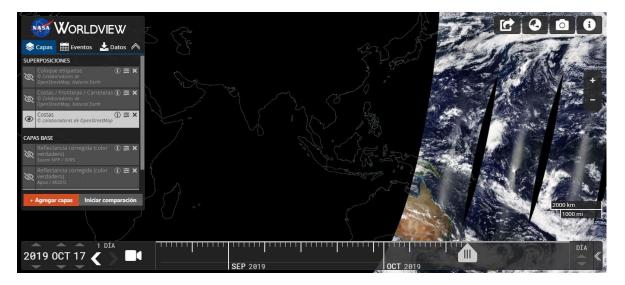


Figura 2-28. Portal página worldview Fuente: Elaboración propia – Grupo GHYGAM 2019

- ➤ En la columna izquierda se encuentran las diferentes capas que se pueden encender y apagar para visualizarlas sobre la imagen esto de acuerdo con el interés del visualizador, para el proyecto se elegirán las capas que permitan visualizar focos de contaminación, puntos calientes y valores de AOD.
- ➤ En el controlador de capas se encuentran las opciones de encender y apagar las diferentes capas, los eventos naturales más significativos, con su respectiva ubicación y la descarga de imágenes como se muestra en la Figura 2-29.



Figura 2-29. Controlador de capas. Fuente: Elaboración propia – Grupo GHYGAM 2019

Página 66 de 264







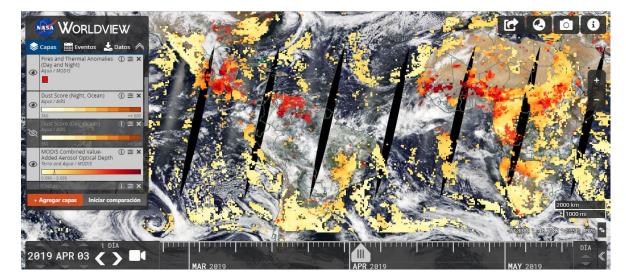


Figura 2-30. Imágenes con capas de aerosol. Fuente: Elaboración propia – Grupo GHYGAM 2019

Encender la capa de reflectancia corregida color verdadero, con el objetivo de corregir visualmente las zonas donde no hay imagen (traslapo) y solo se ve una mancha negra.

En la Figura 2-31 se puede visualizar Colombia para el primer día de toma de datos del proyecto 3 de abril del 2019, se evidencian bastantes puntos calientes en la frontera entre Colombia y Venezuela y varios en Venezuela.



Figura 2-31. Visualización Colombia 03/04/2019 Fuente: Elaboración propia – Grupo GHYGAM 2019

Página 67 de 264







Teniendo en cuenta que el proyecto para Colombia se desarrollara en el Valle de Aburra, sitio de medición Belén, Barrio Las Mercedes, Instituto Salesiano Pedro Justo Berrio, sector suroccidental - Carrera 86 # 34-97 Coordenadas (Latitud: 6.243, Longitud: -75.61201) se verifica que ninguna capa afecta el área de estudio Figura 2-32, con datos significativos de aerosoles.

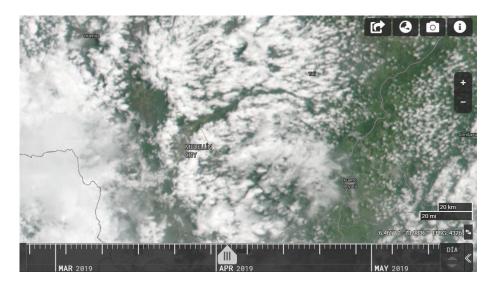


Figura 2-32. Área de Estudio Valle de Aburra Fuente: Elaboración propia – Grupo GHYGAM 2019

El AOD tomado de MODIS también se puede visualizar en una imagen como en la Figura 2-33 y Figura 2-34 que indica el nivel en el que las partículas en el aire (aerosoles) evitan que la luz viaje a través de la atmósfera. Los aerosoles absorben y dispersan la luz solar entrante, lo que reduce la visibilidad y aumenta la profundidad óptica. Una profundidad óptica de menos de 0.1 indica un cielo despejado con máxima visibilidad, y un valor de 1 indica la presencia de aerosoles tan densos que las personas tendrían dificultades para ver el sol.







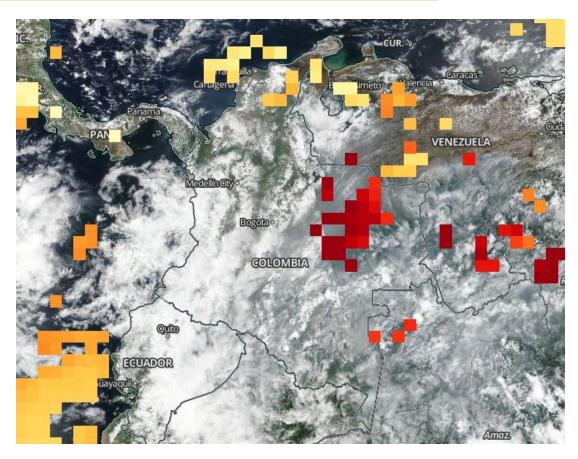


Figura 2-33. Clasificación de imagen por AOD. Fuente: Elaboración propia – Grupo GHYGAM 2019

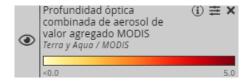


Figura 2-34. Convenciones clasificación AOD. Fuente: Elaboración propia – Grupo GHYGAM 2019

2.6.4 Visualización y descarga imágenes CALIPSO

En el Anexo 2-3se presenta el instructivo para descarga y visualización imágenes CALIPSO, y una breve descripción se detalla a continuación:

Para este procedimiento se descargarían datos nivel 2, los productos pueden ser en capas, perfiles y VFM "Vertical Feature Mask", es el producto de datos de máscaras de características verticales de calipso que describe la distribución vertical y horizontal de las Página 69 de 264







capas de nubes y aerosoles observados por el Lidar CALIPSO, de acuerdo a los parámetros, como se muestra en la Tabla 2-2.

La obtención de datos del satélite CALIPSO no se realiza en tiempo real como otros satélites, la página oficial de la NASA ha publicado desde el año 2006 diferentes versiones para la descarga de información por lo que es necesario inicialmente ubicar la zona de interés y la fecha en la que se necesita cargar la información con el fin de verificar si existen datos.

Esta verificación se puede hacer por medio de la página principal del portal de la NASA: https://worldview.earthdata.nasa.gov en la cual se encuentra la información de todos los satélites pertenecientes a la NASA y para este caso específicamente se puede ver por donde paso el satélite CALIPSO.

Al abrir la página se observan las últimas imágenes que han adquirido los diferentes sensores y el espacio en negro es de las que falta adquirir para el momento justo en el que se abre la página, como se muestra en la Figura 2-35, en la parte baja se puede modificar la fecha de acuerdo a el día en que se tomó la imagen que se está buscando y también brinda la posibilidad de ver imágenes día tras día con el objetivo de comparar.

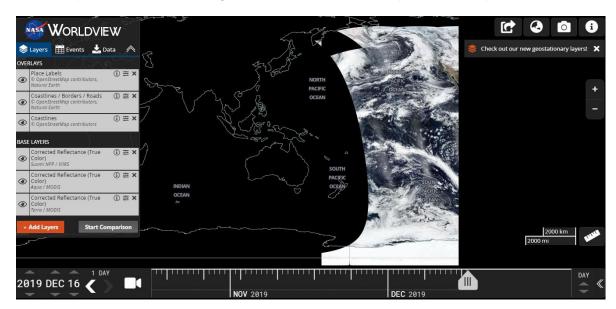


Figura 2-35. Portal Worldview NASA Fuente: NASA

En la columna izquierda se encuentran las diferentes capas que se pueden encender y apagar para visualizarlas sobre la imagen, esto de acuerdo con el interés del visualizador, en este caso se tendrá en cuenta las capas con las orbitas que trazan los satélites y sensores cada día.

Página **70** de **264**









En el controlador de capas se encuentran las opciones de encender y apagar las diferentes capas, los eventos naturales más significativos, con su respectiva ubicación y la descarga de imágenes como se muestra en la Figura 2-36.



Figura 2-36. Controlador de capas. Fuente: Elaboración propia – Grupo GHYGAM 2019

Cuando se selecciona la opción de adicionar capas se abre una ventana (Ver Figura 2-37), donde se presentan varias opciones, en peligros y desastres se debe seleccionar la primera opción "TODO"







Figura 2-37. Órbita Calipso 3 de abril 2019 en Colombia Fuente: Elaboración propia – Grupo GHYGAM 2019

Se procede a buscar el nivel y la versión del grupo de datos que se desea descargar, los datos se clasifican en niveles de procesamiento 1 y 2, el nivel 1 consiste en perfiles lidar geolocalizados y calibrados, nivel 2 se pueden dividir en tres grupos: productos de capas (nubes y aerosoles), productos de perfiles (retrodispersión y extinción) y máscaras de características verticales (localización y tipo de nubes y aerosoles) (Lopes, 2011).

Para este procedimiento se descargarían datos nivel 2, los productos pueden ser en capas, perfiles y VFM de acuerdo a los parámetros, como se muestra en la Tabla 2-11.







Tabla 2-11. Parámetros de productos nivel 2 CALIPSO

PRODUCTOS NIVEL 2	PARÁMETROS
Capa de nubes	Actitud de la base y tope, profundidad óptica y fase agua/hielo
Capa de aerosoles	Actitud de la base y tope, profundidad óptica y tipo de aerosoles
Perfil de nubes	Coeficiente de extinción y retrodispersión a 532 nm
Perfil de aerosoles	Perfiles de extinción y retrodispersión a 532 y 1064 nm
Mascara de Característica Vertical (VFM)	Máscara de nubes y fase agua/hielo, máscara y tipo de aerosoles

Fuente: Tomado de (Nisperuza Toledo, 2015)

2.6.5 Descarga de imágenes SENTINEL 5P

La búsqueda de imágenes de hace por medio de la página de COPERNICUS. En él, se encuentra el Instructivo para descarga y visualización SENTINEL 5P. Algunos detalles se observan a continuación:

https://s5phub.copernicus.eu/dhus/#/home

El portal principal de la página se puede visualizar en la Figura 2-38.





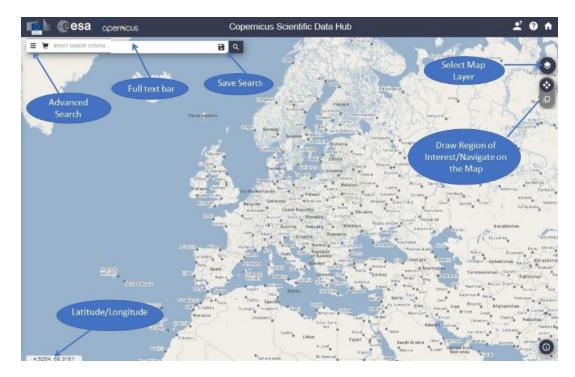


Figura 2-38. Portal principal página COPERNICUS. Fuente: COPERNICUS, 2019

Se debe seleccionar el área de interés, que se hace por medio de un cuadro o un polígono, con clic derecho, como se muestra en la Figura 2-39, como en la parte de inferior izquierda se ven las coordenadas también se puede seleccionar por coordenadas el área.





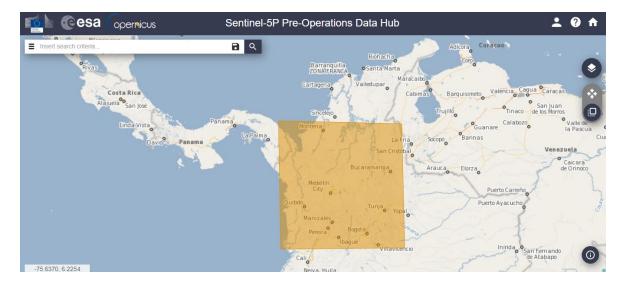


Figura 2-39. Definición área de interés. Fuente: Elaboración propia – Grupo GHYGAM 2019

Para realizar la búsqueda avanzada se despliega el icono "Búsqueda avanzada" ubicado en la parte superior izquierda del portal como se muestra en la Figura 2-40, en ésta se seleccionan criterios como la fecha de ingestión que es la hora en que el producto se indexa en las bases de datos del Servicio DHuS. La hora es en UTC, la fecha de detección que representa la hora en que se tomó el producto, el orden en que quiere que se muestre el resultado de la búsqueda, el tipo de producto que se quiere obtener y se debe seleccionar la misión.





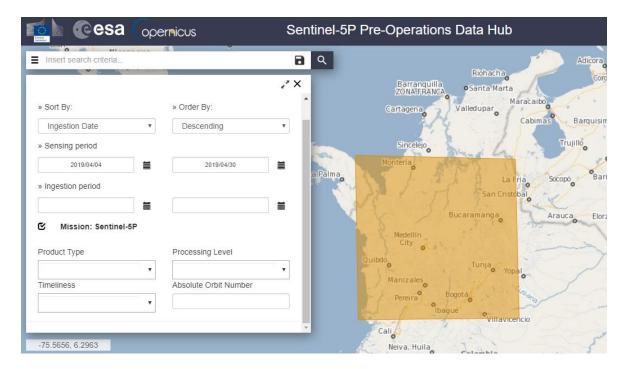


Figura 2-40. Búsqueda avanzada Fuente: Elaboración propia – Grupo GHYGAM 2019

Teniendo en cuenta que para el primer día de toma de datos del proyecto 3 de abril del 2019 en la zona de interés el Valle de Aburra, sitio de medición Belén, Sector suroccidental - Carrera 86 # 34-97 Coordenadas (Latitud: 6.243, Longitud: -75.61201) se realiza una búsqueda de ozono en esa primera semana de monitoreo, como se muestra en Figura 2-41. En el Anexo 2-4 se encuentra el Instructivo para descarga y visualización SENTINEL 5P.







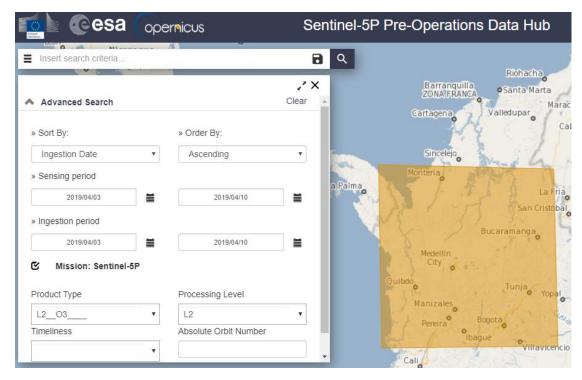


Figura 2-41. Búsqueda ozono primera semana de monitoreo en zona de interés. Fuente: Elaboración propia – Grupo GHYGAM 2019

2.7 MANEJO MODELO HYSPLIT PARA TRAYECTORIAS DE MASAS DE AIRE

Para descargar: https://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php, en este enlace se encuentran las opciones de descarga la PC para Windows, Apple, Linux o para usarlo sin descargar con internet. En el Anexo 2-5, se encuentra el Instructivo para el manejo de HYSPLIT.

Para manejar la versión ONLINE, el portal principal de la página se puede visualizar en la Figura 2-42.

www.metropol.gov.co







Figura 2-42. Portal principal página Hysplit Fuente: Elaboración propia – Grupo GHYGAM 2019

Se debe ejecutar el modelo de trayectoria HYSPLIT, primera opción, y se abre la ventana que se presenta en la Figura 2-43.



Figura 2-43. Ejecución modelo de retro trayectoria. Fuente: Elaboración propia – Grupo GHYGAM 2019

Se debe seleccionar "Calcular trayectorias de archivo", posterior a esto el programa solicita se ingrese el tipo de trayectoria que se quiere realizar ya que se tienen diferentes opciones como:

Página 78 de 264







La opción de matriz de trayectoria ejecutará una cuadrícula de trayectorias delimitadas por las 2 primeras ubicaciones de origen (la trayectoria 1 es el punto de cuadrícula inferior izquierdo y la trayectoria 2 es el punto de cuadrícula superior derecha), la opción de conjunto de trayectoria iniciará múltiples trayectorias desde la primera ubicación de inicio seleccionada y la opción de frecuencia de trayectoria comenzará una trayectoria desde una sola ubicación y altura cada 6 horas y luego sumará la frecuencia que la trayectoria pasó sobre una celda de cuadrícula y luego se normalizará por el número total de trayectorias o puntos finales.

Para este caso se selecciona 1 trayectoria de tipo normal como se muestra en la Figura 2-44.

Type of Trajectory(ies)

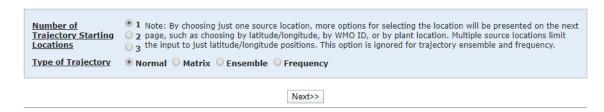


Figura 2-44. Selección tipo de trayectoria Fuente: Elaboración propia – Grupo GHYGAM 2019

Posterior a esto se presentan todos los diferentes modelos que se tienen como opción para realizar la trayectoria, el usuario lo puede seleccionar de acuerdo con sus necesidades.

Se debe seleccionar el área interés en este caso el Valle de Aburrá como se muestra en la Figura 2-45, esta selección se puede hacer por medio de un polígono, ingreso de coordenadas o escribir el nombre del sitio del que se requiere la información y se seleccionó los datos meteorológicos de GFS por que cubre el área de interés.







Trajectory Calculation

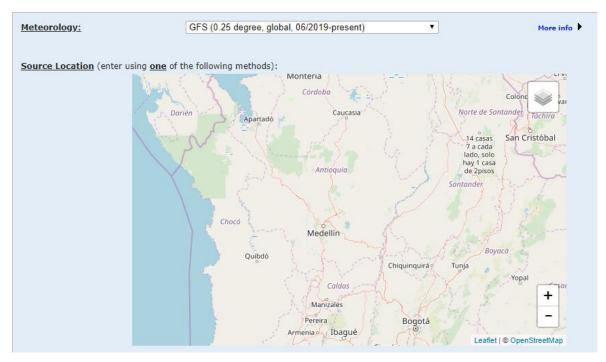


Figura 2-45. Selección paquete de datos meteorológicos y área de interés. Fuente: Elaboración propia – Grupo GHYGAM 2019

Como siguiente paso se debe seleccionar el ciclo de pronóstico meteorológico de acuerdo al archivo que se eligió y la fecha de la que se quiere la información como se muestra en la Figura 2-46.

Meteorology File



Figura 2-46. Selección fecha Fuente: Elaboración propia – Grupo GHYGAM 2019

Página 80 de 264









Como siguiente paso se debe seleccionar si se quiere una trayectoria (para donde se desplazaron los aerosoles que genero el área de interés) o retrotrayectoria (de donde llegaron loso aerosoles que están en el área de interés), en este caso se hará una retrotrayectoria, los demás datos se dejan por defecto, excepto la hora que se debe elegir de acuerdo a lo que se esté buscando, en este caso será el medio día, todo esto como se muestra en la Figura 2-47.

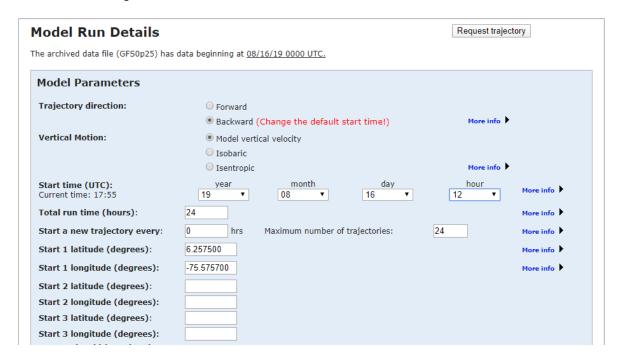


Figura 2-47. Selección parámetros del modelo Fuente: Elaboración propia – Grupo GHYGAM 2019

En el Anexo 2-6, se encuentra el Procedimiento para descarga y caracterización de datos satelitales que sirve como guía para analizar las diferentes posibilidades y la cantidad de información que hay disponible al respecto.

2.7.1 Identificación de eventos de aerosoles regionales de influencia a las concentraciones de material particulado al interior del Valle de Aburrá (AMVA – Proyecto SIATA)

Los eventos de aerosoles regionales son resultado del actuar conjunto entre fuentes de contaminación externas a una región de control, la meteorología sinóptica, quien permite el transporte de los aerosoles a gran escala, la meteorología local y particularidades adicionales de cada territorio. De este modo, la dinámica de los eventos de aerosoles

Página 81 de 264







regionales, pueden ser analizados a diferentes escalas; una mejor interpretación de cada evento, dependerá de la cantidad de procesos que sean analizados conjuntamente.

2.7.1.1 Indicador de anomalía del ciclo diurno PM2.5 y PM10

Para la identificación de eventos de aerosoles, se realiza un análisis completo de la red en seguimiento del material particulado PM2.5 y PM10; bajo la idea de eventos de mesoescala, que debe ser identificada por las estaciones de forma más grupal que individual. De este modo, se construye un indicador con los datos históricos de las estaciones de PM2.5 y PM10, en donde se calculan anomalías, a partir de la identificación por estación y para cada hora del día, de la concentración que es superada solo un 15 % de los días; es decir, el ciclo diurno de percentiles 85 en cada estación.

Luego se toman los datos de concentraciones horarias para cada estación, y se evalúa si las mediciones superaron el respectivo percentil 85 durante ocho o más horas del día. En caso de que el porcentaje de estaciones que cumplen esta condición supere el 30%, se define que durante el día en cuestión se presentó un pico de contaminación y que por lo menos 7 estaciones lo constatan.

2.7.1.2 Indicador por Retrodispersión

El Valle de Aburrá cuenta con una red de ceilómetro que actualmente incluye 3 sensores. Los equipos reportan estiman la retrodispersión de las partículas en la columna atmosférica hasta una altura de 4.5 Km, con una resolución temporal de 16 seg.

El indicador de retrodispersión permite la identificación de posibles eventos anómalos de contaminación en la columna atmosférica, a partir del resultado promedio de las estimaciones de los ceilómetros en la red, de la diferencia del perfil promedio de backscatter (retrodispersión) de cada día y el perfil promedio de los 5 días anteriores y 5 días posteriores. A los perfiles estimados por el ceilómetro se le realiza una validación antes de ser promediados, buscando eliminar las influencias de la retrodispersión generada por las nubes y precipitación.

2.7.1.3 Indicador por trayectorias

El análisis Lagrangiano de dinámica atmosférica es de gran utilidad para comprender el transporte de parcelas de aire que contienen contaminantes, así como sus procesos de dispersión. Dichos contaminantes, pueden ser transportados cientos de kilómetros partiendo desde la fuente de emisión, este transporte depende de la variabilidad de los campos de viento de la zona en estudio y de las tasas de deposición de los aerosoles.

En el análisis de trayectorias para determinar la influencia de un evento externo sobre la región, se realiza el cálculo conjunto de las trayectorias del viento con el AOD (Aerosol Optical depht), como proxy de la concentración de aerosoles en la atmósfera, influenciado en gran medida por zonas de incendio sobre el territorio.

Página 82 de 264







El indicado de trayectorias se calcula a partir del umbral de AOD con valor 1 (valor alcanzado en el valle en condiciones de estabilidad en el mes de marzo), y se calcula como el porcentaje de trayectorias que al menos posee una excedencia al umbral, representando la probabilidad de que un evento externo haya interceptado el valle por las condiciones dinámicas en mesoescala.

2.7.1.4 Estudio del movimiento de masas de aire

Los modelos Lagrangianos de dispersión de partículas han sido usados de manera extensiva para simular el transporte atmosférico en diferentes escalas y con múltiples aplicaciones, desde dispersión de contaminantes a pequeña escala, hasta obtención de regiones de influencia para las masas de aire que llegan a una región o estación en específico.

Actualmente existen varios modelos Lagrangianos usados en todo el mundo, con diferentes limitaciones y ventajas, entre ellos HYSPLIT (HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory), el algoritmo base de todos estos modelos es el mismo: a partir de cierta base de datos meteorológicos (desde modelos de meso-escala, hasta reanálisis y modelos globales) se extraen los datos de velocidad del viento como variable principal, y de otras variables secundarias que se quieran analizar dependiendo del caso (humedad relativa, temperatura, humedad específica).

La retrotrayectorias se pueden definir como la trayectoria que siguió una partícula, cuerpo o parcela en un tiempo determinado, antes de alcanzar una coordenada y fecha en específico. Las retrotrayectorias o Back-Trajectories (BT) se estiman a partir de interpolaciones lineales en saltos de tiempo definidos, usando información del presente para calcular la ubicación en el pasado. La Ecuación 2-15, expresa matemáticamente cómo se calculan los puntos correspondientes a una BT.

$$Xi - 1(t) = (t - \Delta t) - V \sim (t, Xi(t)) * \Delta t$$

Ecuación 2-15

Donde X es la coordenada tridimensional (latitud, longitud y nivel de presión), t es el tiempo, Δt el paso de tiempo que es función de la resolución temporal del set de datos disponible y $V\sim$ es el campo de velocidad zonal, meridional y omega del viento. Los subíndices i en X, representan la temporalidad de la coordenada.

Desde el proyecto SIATA se han realizado análisis de retrotrayectorias con una buena variedad de aplicaciones de gran importancia (influencia en los procesos hidrológicos, eventos extremos, calidad de agua lluvia y calidad del aire), siempre con el fin de entender los procesos físicos que involucran advección de propiedades a cierta región. Para estos análisis no se ha hecho uso de HYSPLIT, sino de un algoritmo propio de cálculo que permite no estar restringidos por ciertas limitaciones, dando libertad para ser modificado y trabajar con cualquier base de datos, y en cualquier intervalo de tiempo.

Página 83 de 264









3. RESULTADOS CARACTERIZACIÓN QUÍMICA PM2.5

Los resultados obtenidos en marco del convenio 734 de 2019 entre el 03 de abril y el 29 de diciembre de 2019 se presentan a continuación:

3.1 VALIDACIÓN DE LOS RESULTADOS

Los resultados que se presentan en este capitulado fueron validados mediante la aplicación del Sistema de gestión de calidad del Laboratorio GHYGAM como a continuación se describe:

Los datos obtenidos para el análisis de la concentración del PM2.5 para la campaña de caracterización, fueron tratados de acuerdo con las directrices establecidas en el instructivo ID-MEA183 Aseguramiento de la calidad con los datos, con el propósito de asegurar la validez, trazabilidad y confiabilidad de los resultados obtenidos.

El personal del Laboratorio está debidamente capacitado y autorizado para el montaje y la recuperación de las muestras y evaluar: A continuación, se detallan los aspectos más relevantes en la validación del cumplimiento de la Acreditación del Laboratorio GHYGAM:

- Factor evaluado: Defectos en la estructura física del filtro. Se consideran los defectos que puedan presentar los filtros desde fábrica o por la misma actividad de toma de muestra, que puedan alterar la retención de material particulado sobre su superficie, pérdida de masa del filtro o ganancia de masa distinta a la muestra de material particulado.
 - Resultado: Para el caso del estudio realizado en la toma de muestras PM2.5 y su caracterización, no se presentaron defectos de la estructura física en ninguno de los filtros usados.
- Parámetros de recuperación no conformes: Se refiere a eventos en los cuales el monitoreo PM2.5 se altera.
 - Resultado: Para el caso del presente convenio, sólo se presentó un evento en el que uno de los equipos de muestreo presentó malfuncionamiento, sin embargo, se actuó de acuerdo a los procedimientos internos de control de calidad y se pudo seguir operando sin problemas con un segundo equipo de similares características garantizando que los datos y los resultados ofrecidos siguen siendo confiables y veraces para los propósitos estipulados.

La toma de muestras, el tiempo de acondicionamiento y los controles ambientales fueron correctamente configurados de acuerdo a las disposiciones del sistema de gestión de calidad y se llevaron a cabo sin presentar eventos no conformes.

El Laboratorio también participó en un programa de intercomparación para el análisis gravimétrico con el proyecto SIATA del AMVA, Caracterización PM2.5 Zonas de influencia Página 84 de 264







de las estaciones de calidad del aire MED-PJIC, MED-LAYE, y Girardota GIR-SOSN, cuyos resultados fueron positivos, corroborando que las actividades de muestreo y análisis gravimétrico del laboratorio cumplen con las disposiciones requeridas por nuestro medio para garantizar la calidad y validez de los resultados emitidos para este convenio.

Se implementó, como mecanismo de control de la calidad de la medición, la Lista de Chequeo de Evaluación de la Conformidad para cada una de las muestras, validando el cumplimiento de los criterios establecidos en los instructivos internos para la determinación de material particulado y caracterización, el pesaje de los filtros, la cadena de custodia de la muestra, la manipulación y mantenimiento de equipos y las especificaciones técnicas del proyecto.

Finalmente, los datos obtenidos de la toma de muestras y análisis gravimétrico mediciones, fueron procesados por personal autorizado y competente para determinar la concentración de material PM2.5. Los resultados fueron calculados y registrados en los formatos FD-MEA218 Calculo de la concentración de material particulado y FD-MEA217 Pesaje e integridad de datos.

Los resultados fueron revisados por la dirección del proyecto para determinar el cumplimiento de los parámetros de las mediciones con los criterios establecidos en el método de referencia y tomar las acciones correctivas, preventivas y de mejora correspondientes.

Todas estas actividades están aseguradas con la Acreditación del Sistema de Gestión de Calidad del Grupo GHYGAM, bajo la norma internacional ISO/IEC 17025:2005 Requisitos Generales para la Competencia de los Laboratorio de Ensayo y Calibración, demostrando su competencia técnica y capacidad de generar resultados técnicamente válidos y confiables.

Todos los soportes del Sistema de Gestión de Calidad, del Laboratorio GHYGAM, están disponibles en el Servidor ORION del Politécnico Colombiano JIC, para cualquier revisión y verificación de la información primaria.

3.2 CARACTERISTICAS ZONA DE TOMA DE MUESTRA

La Estación MED-BEME ubicada en la comuna 16 Belén, Barrio las Mercedes se encuentra catalogada dentro de la Red de Calidad de Aire del Valle de Aburrá como urbana de fondo por su baja influencia de fuentes vehiculares. De acuerdo con los criterios definidos para el proyecto es catalogada como estación Escala Vecindario, definida para las concentraciones dentro de un área extendida de ciudad que tiene un uso de suelo relativamente uniforme con dimensiones de 0,5 a 4,0 km. En la Figura 3-1 se presenta la ubicación geográfica de la Estación MED-BEME.

Los equipos de toma de muestra se encuentran ubicados a 3.1 m de altura sobre el nivel de referencia, en plataforma de concreto de 11.2 m por 3.6 m con capacidad de carga

Página 85 de 264







suficiente para el sostenimiento de los equipos y protección de intervención de personal no autorizado.

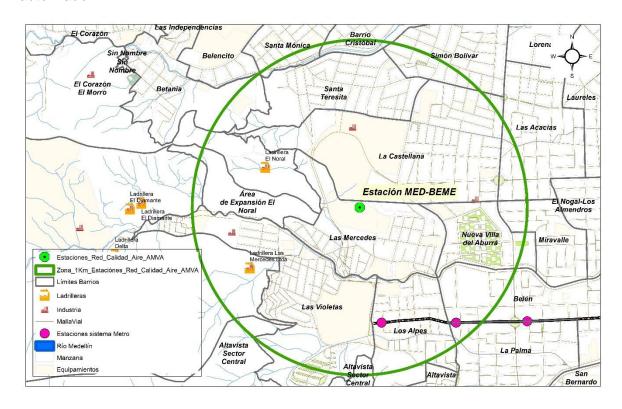


Figura 3-1 Ubicación geográfica Estación MED-BEME Fuente: Elaboración propia. Grupo GHYGAM, 2018

Dada la ubicación de la Estación MED-BEME y según Plan de Ordenamiento Territorial (POT 2014-2027) para la ciudad de Medellín se encuentra en suelo clasificado con referencia habitacional, asentamientos de pequeños comercios destinados al consumo habitual y comercio donde sobresalen mercados al por menor compuesto principalmente por alimentos, bebidas y tabaco, desestimulando el asentamiento de grandes industrias que en ocasiones son perjudiciales para los entornos urbanos por sus niveles de contaminación. Así mismo, es común encontrar pequeñas y medianas empresas dedicadas a la confección y productos metálicos para uso estructural como se presenta en Figura 3-2.





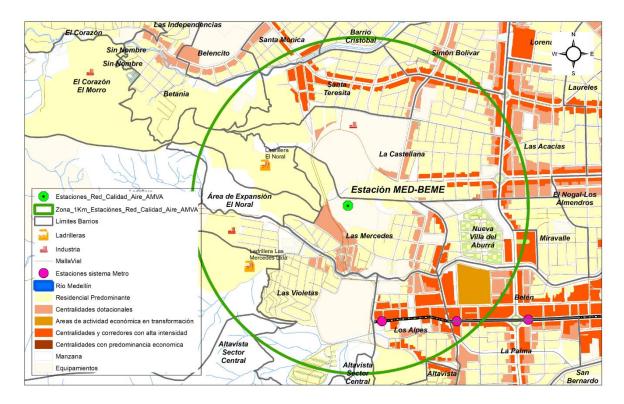


Figura 3-2 Usos Generales Suelo Urbano, Estación MED-BEME Fuente: Elaboración propia. Grupo GHYGAM, 2018

Al norte, el punto de monitoreo limita a 22 m con desarrollo forestal propio del inventario de especies arbóreas de la institución educativa y a menos de 10 m vía interna como se presenta en las Figura 3-3 y Figura 3-4. Cabe anotar que la barrera de árboles tiene un ancho aproximado de 3 metros y posterior a ella se encuentra zona Urbana del sector.







Figura 3-3 Vista al norte desde la Estación MED-BEME, Modelo 3D Fuente: Elaboración propia. Grupo GHYGAM, 2018



Figura 3-4 Vista al norte desde la Estación MED-BEME, barrera de Arboles Fuente: Elaboración propia. Grupo GHYGAM, 2018

Hacia el sur, el punto de monitoreo MED-BEME presenta a una distancia de 13 y 20 metros la presencia de una plantación arbórea y una palmera tal como se presenta en la Figura 3-5.

www.metropol.gov.co





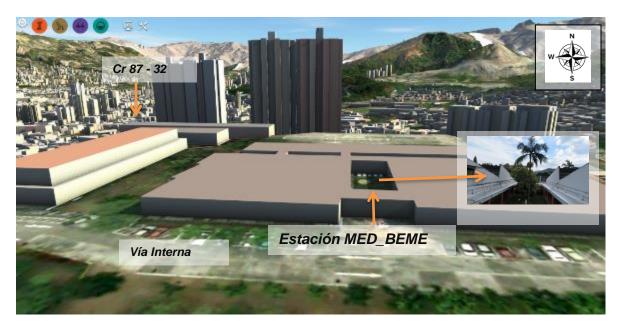


Figura 3-5 Vista al sur desde la Estación MED-BEME, Modelo 3D Fuente: Elaboración propia. Grupo GHYGAM, 2018

Hacia el oeste, la estación de monitoreo MED-BEME cuenta con barreras sónicas, en su punto máximo de 2.5 m y en su punto mínimo de 1.5 m de altura, medidos desde la plataforma donde reposan los equipos tal como se presenta en la Figura 3-6.



Figura 3-6 Vistas al oriente y occidente desde la Estación MED-BEME, Modelo 3D. Fuente: Elaboración propia. Grupo GHYGAM, 2018

Página 89 de 264







Finalmente, hacia el este, la estación de monitoreo MED-BEME cuenta con barreras sónicas, en su punto máximo de 2.5m y en su punto mínimo de 1.5m de altura medidos desde la plataforma donde reposan los equipos tal como se presenta en la Figura 3-7.



Figura 3-7 Vistas al oriente y occidente desde la Estación MED-BEME, Modelo 3D. Fuente: Elaboración propia. Grupo GHYGAM, 2018

La Estación MED-BEME por su ubicación posee baja incidencia de fuentes vehiculares, tal como se observa hacia el norte la Calle 33-84 a 280 metros, al Sur la Carrera 88 31E a 130metros, al este la carrera 87-32B a 288metros y al occidente la carrera 88 -31E a 124 metros.

En cuanto a las variaciones climatológicas en la zona, de acuerdo con la Figura 3-8, el climograma de Gaussen muestra que los meses de abril, mayo, septiembre, octubre y noviembre se caracterizan por ser periodos húmedos, siendo periodos donde se esperaría un control natural de las partículas presentes en el ambiente por precipitación húmeda. Pero, por otro lado, una reducción de la temperatura en condiciones de alta estabilidad atmosférica puede favorecer a una menor altura de capa de mezcla, que, en conjunto con condiciones de emisión recurrente de contaminantes atmosféricos, puede favorecer al incremento de las concentraciones en tiempos de exposición cortos (menores a 24 horas).





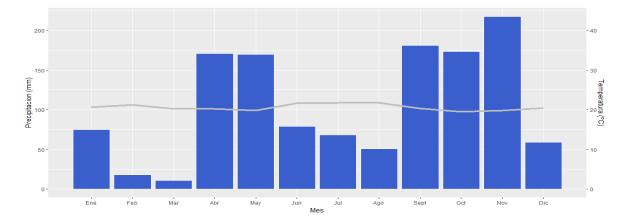


Figura 3-8 Climograma de Gaussen – Zona Belén. Fuente: Elaboración propia Grupo GHYGAM a partir de Información Proyecto SIATA, 2018

Los datos presentados en la Figura 3-9 muestran una temperatura promedio de 21,3°C, con un rango típico entre 18.5 y 24.0 °C. A nivel horario (Ver la Figura 3-10), se encuentra el mínimo medio de 17.6 °C a la 6:00 a.m., y un máximo medio de 26.3 °C a la 1:00 p.m.

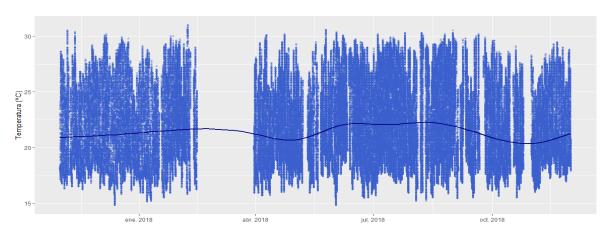


Figura 3-9 Histórico de temperatura – Zona Belén. Fuente: Elaboración propia Grupo GHYGAM a partir de Información Proyecto SIATA, 2018.

A nivel mensual (Figura 3-11), se encuentra que el mínimo medio se encuentra en el mes de octubre con una temperatura de 19.5 °C, mientras que julio presenta el máximo medio con una temperatura de 21.8 °C.

@areametropol





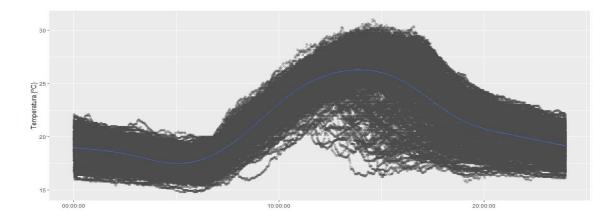


Figura 3-10 Condiciones horarias de temperatura – Zona Belén. Fuente: Elaboración propia Grupo GHYGAM a partir de Información Proyecto SIATA 2018.

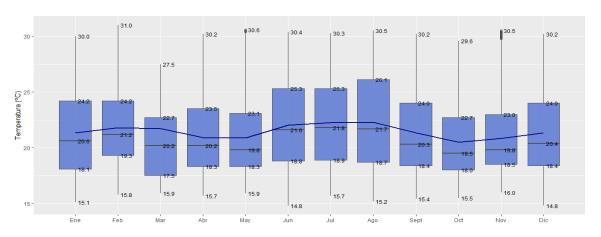


Figura 3-11 Condiciones mensuales de temperatura — Zona Belén. Fuente: Elaboración propia Grupo GHYGAM a partir de Información Proyecto SIATA 2018.

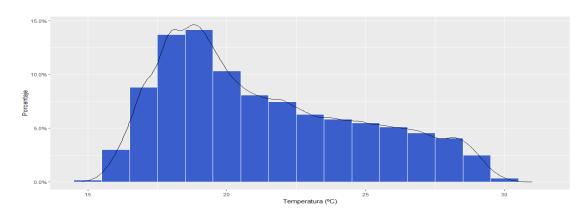


Figura 3-12 Condiciones de frecuencia de registros temperatura – Zona Belén. Fuente: Elaboración propia Grupo GHYGAM a partir de Información Proyecto SIATA 2018.

Página 92 de 264







Los datos presentados en la Figura 3-13 muestran una humedad relativa promedio de 79%, con un rango típico entre 65.2 y 96.0 %. A nivel horario (Ver la Figura 3-14), se encuentra el mínimo medio de 55.1 % a la 1:00 pm, y un máximo medio de 96 % a la 5:00 am.

A nivel mensual (Ver la Figura 3-15), se encuentra que el mínimo medio se encuentra en el mes de agosto con una humedad relativa de 72.9 %, mientras que octubre presenta el máximo medio con una humedad relativa de 93.8 %. Este comportamiento es congruente con la valoración de la temperatura.

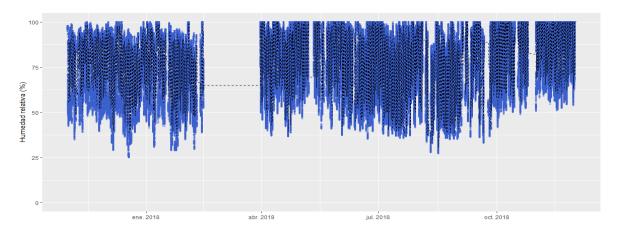


Figura 3-13 Histórico de humedad relativa – Zona Belén. Fuente: Elaboración propia Grupo GHYGAM a partir de Información proyecto SIATA 2018.

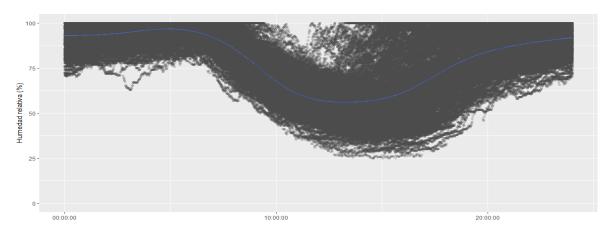


Figura 3-14 Condiciones horarias de humedad relativa – Zona Belén. Fuente: Elaboración propia Grupo GHYGAM a partir de Información proyecto SIATA 2018.

Página **93** de **264**





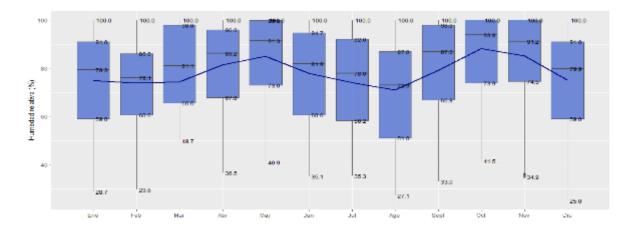


Figura 3-15 Condiciones mensuales de humedad relativa – Zona Belén. Fuente: Elaboración propia Grupo GHYGAM a partir de Información proyecto SIATA, 2018.

Así mismo, los datos presentados en la Figura 3-16 muestran una precipitación promedio anual de 0.02 mm, con un rango típico entre 0.01 y 0.04 mm. A nivel horario (Ver la Figura 3-17), se espera una mayor ocurrencia de precipitaciones en horas de la tarde.

A nivel mensual (Ver la Figura 3-18), se encuentra que la precipitación acumulada más baja se encuentra en el mes de marzo con un nivel de 11 mm, mientras que noviembre presentan el máximo acumulado con un nivel de 217.3 mm de precipitaciones.

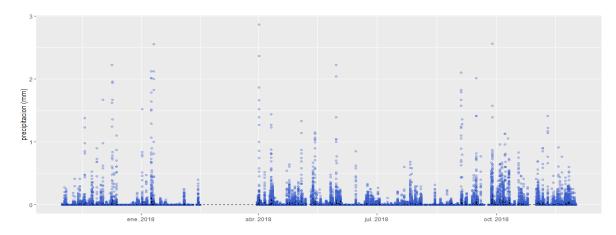


Figura 3-16 Histórico de precipitación Horario – Zona Belén. Fuente: Elaboración propia Grupo GHYGAM a partir de Información SIATA, 2018.

Página **94** de **264**





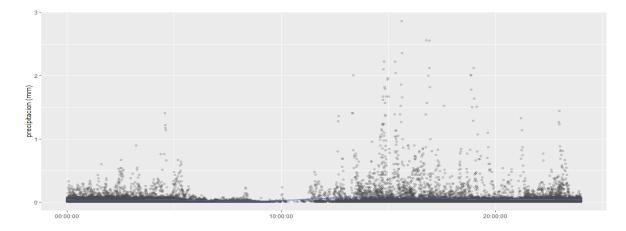


Figura 3-17 Condiciones horarias de precipitación – Zona Belén. Fuente: Elaboración propia Grupo GHYGAM a partir de Información Proyecto SIATA 2018.

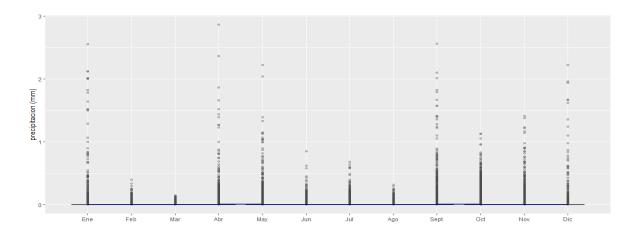


Figura 3-18 Condiciones mensuales de precipitación – Zona Belén. Fuente: Elaboración propia Grupo GHYGAM a partir de Información proyecto SIATA, 2018.

De acuerdo con la rosa de vientos anual (Ver la Figura 3-19), la velocidad promedio esperada en la zona de estudio es de 1.11 m/s, con movimiento predominantes desde el sector noroeste de la locación, y con un porcentaje de calmas de 0.1% de los registros.







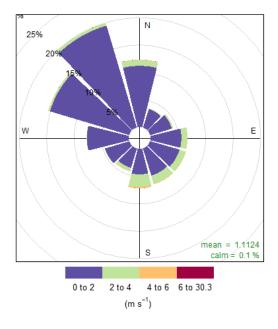


Figura 3-19 Rosa de vientos general – Zona Belén. Fuente: Elaboración propia Grupo GHYGAM a partir de Información Proyecto SIATA, 2018.

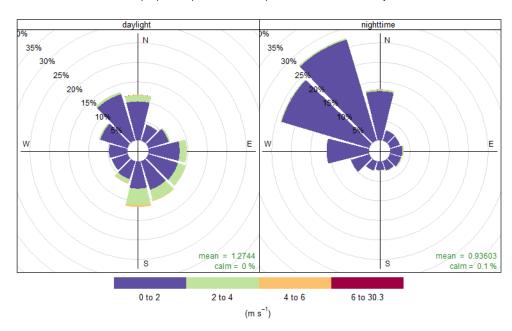


Figura 3-20 Rosa de vientos diurna nocturna – Zona Belén. Fuente: Elaboración propia Grupo GHYGAM a partir de Información Proyecto SIATA, 2018.

A nivel diario (Ver la Figura 3-20), el comportamiento del viento muestra una mayor velocidad (1.3 m/s) en horario diurno, siendo la dirección predominante los sectores noroeste y sureste de la locación. Mientras tanto, en horario nocturno, la velocidad promedio

Página 96 de 264









desciende hasta los 0.9 m/s, siendo la dirección predominante desde el cuadrante noroeste de la locación.

A nivel mensual (Figura 3-21), se encuentra que la dirección predominante del viento varia levemente, siendo el movimiento predominante el sector noroeste, aunque en los meses de junio, julio y agosto se pueden esperar vectores con velocidades entre los 2 y 4 m/s desde la dirección sur de la locación.

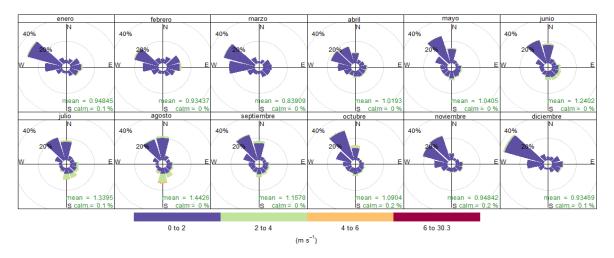


Figura 3-21 Rosa de vientos mensual – Zona Belén. Fuente: Elaboración propia Grupo GHYGAM a partir de Información Proyecto SIATA, 2018.

De acuerdo con los registros históricos, el mes que presenta eventos puntuales (más no recurrentes) de mayor velocidad es octubre. A nivel horario, se espera un incremento de la velocidad del viento en horas de la tarde, siendo este comportamiento congruente con una característica de movimiento mecánico por influencia de la radiación solar.

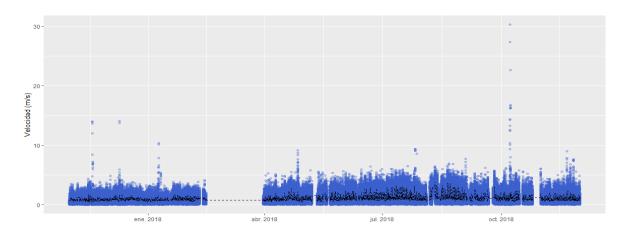


Figura 3-22 Histórico de velocidad del viento – Zona Belén. Fuente: Elaboración propia Grupo GHYGAM a partir de Información Proyecto SIATA, 2018.

Página 97 de 264







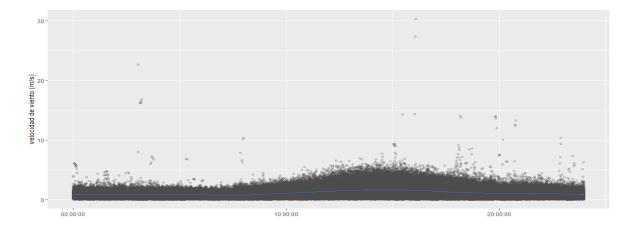


Figura 3-23 Condiciones horarias de velocidad del viento – Zona Belén. Fuente: Elaboración propia Grupo GHYGAM a partir de Información Proyecto SIATA, 2018.

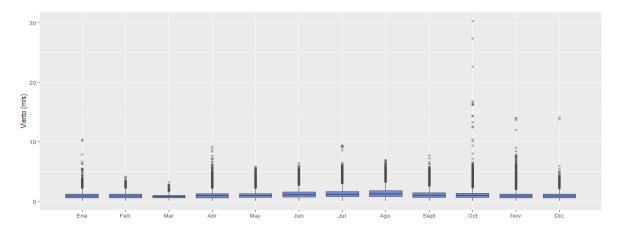


Figura 3-24 Condiciones mensuales de velocidad del viento – Zona Belén. Fuente: Elaboración propia Grupo GHYGAM a partir de Información Proyecto SIATA, 2018.

En cuanto al tránsito vehicular alrededor del punto de monitoreo de calidad de aire de la Estación MED-BEME se evaluó mediante el aforo vehicular en vías aledañas al Instituto Pedro Justo Berrio y el análisis de información suministrada por la Secretaria de Movilidad de Medellín, correspondiente al conteo automatizado de vehículos reportados por cámaras de vigilancia de circuito cerrado (CCTV) y foto detección (ARS). El área de análisis se encuentra delimitada dentro del radio de influencia de la estación anteriormente mencionada, teniendo en cuenta zonas exentas y en las que aplica la medida de pico y placa.

El análisis de datos se distribuyó en 3 franjas horarias: Pico y Placa Mañana (7:00 – 8:59 horas), Pico y Placa Tarde (17:00 – 18:59 horas), agrupadas en los intervalos según los intervalos horarios de almacenamiento del sistema de cámaras y horas Valle correspondiente a los horarios en los cuales no aplica pico y placa. Para el caso de los

Página 98 de 264







puntos de medición de aforo manual se tuvieron en cuenta la franja horaria para Pico y Placa mañana (7:00 – 8:59 horas) y una hora de la franja valle (9:00 – 9:59 horas)

El conteo de vehículos se agrupó en 3 categorías, de acuerdo con la configuración del sistema de cámaras de la Secretaria de Movilidad de Medellín:

- Categoría 1: vehículos de longitud máxima de 6 m,
- Categoría 2: vehículos de longitud entre 6 y 12 metros,
- Categoría 3: vehículos con longitud mayor a 12m.

En la Figura 3-25 se presenta la ubicación de cámaras y puntos de medición de aforo manual en vías cercanas a la Estación MED-BEME.



Figura 3-25. Mapa de ubicación cámaras y aforos vehiculares aledañas a la Estación MED-BEME Fuente: https://www.medellin.gov.co/MAPGISV5_WEB/mapa.jsp?aplicacion=0.

La cámara "El Castillo" se encuentra ubicada en la Calle 33 entre las Carrera 83C y 84 a una distancia en línea recta de la Estación MED-BEME de 380m y mide el flujo vehicular de la Calle 33 en direcciones Oriente-Occidente y Occidente-Oriente. Por su ubicación, realiza el conteo de vehículos en vía exenta de pico placa, lo que la convierte en una ruta alterna a la avenida 80 para comunicar los sectores de Belén con la América.

A partir de los datos suministrados por la Secretaria de Movilidad de Medellín, a la fecha solo se dispone de información para el mes de noviembre de 2018. En la Figura 3-26 se presenta el promedio de correspondiente a cada una de las franjas horarias observándose el mayor flujo de vehículos de longitud menor a 6 m generalmente livianos, tanto en pico y

Página 99 de 264







placa como en hora valle. Como puede observarse en la Figura 3-26 y Figura 3-27, el mayor flujo vehicular medido por cámaras corresponde a la categoría 1, la cual incluye vehículos livianos, motocicletas, vehículos de transporte de carga ligera y van de transporte escolar, seguido en menor proporción por la categoría 2, correspondiente a volquetas, busetas, buses y camiones de menos de 6 ejes.

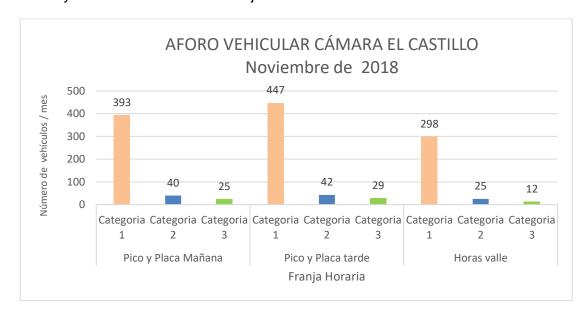


Figura 3-26. Aforo vehicular cámara "El Castillo" para el mes de noviembre de 2018 Fuente: Elaboración propia. Grupo GHYGAM, 2019

La cámara ubicada en la Avenida 80 con calle 30A se encuentra a una distancia en línea recta de 1.15 Km de la Estación MED-BEME y realiza el conteo de vehículos en la carrera 80 direcciones Norte-Sur y Sur-Norte y la Calle 30A en dirección Oriente-Occidente. En la Figura 3-27 se presenta el promedio comportamiento horario para los meses de noviembre y diciembre de 2018 y enero de 2019.





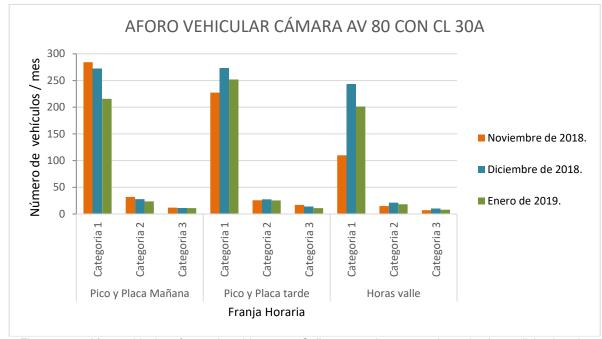


Figura 3-27. Aforo vehicular cámara Avenida 80 con Calle 30 para los meses de noviembre y diciembre de 2018 y enero de 2019.

Fuente: Elaboración propia. Grupo GHYGAM, 2019

Con el fin de evaluar el impacto puntual de las fuentes móviles sobre la Estación MED-BEME se realizaron aforos manuales en 3 puntos, como se puede apreciar en la Figura 3-25.

El "Punto de aforo 1" se encuentra ubicado a una distancia en línea recta de la Estación MED-BEME de 243 m frente a la entrada vehicular de la ladrillera "El Noral" (Cra 89C N° 31E-99) con el fin de evaluar el impacto de los vehículos de carga provenientes de esta factoría. La Figura 3-28 presenta el promedio horario de vehículos medidos el 27 de febrero de 2019.





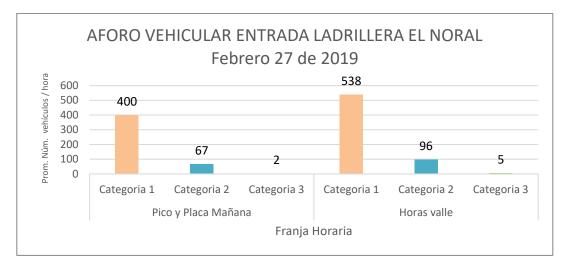


Figura 3-28. Aforo vehicular entrada ladrillera "El Noral", febrero 27 de 2019 Fuente: Elaboración propia. Grupo GHYGAM, 2019

Para éste caso, se observa que el transito perteneciente a la categoría 2 presenta una magnitud superior en comparación con las mediciones a partir de cámaras; sin embargo, según los reportes de campo de las mediciones realizadas, del flujo total para dicha categoría en el intervalo de tiempo aforado, 3 camiones de 2 ejes y un camión articulado tipo tractomula ingresaron y salieron de la compañía mencionada como se muestran en la Figura 3-29, cabe anotar que esta planta presenta emisiones de fuentes fijas en el radio de influencia de la estación de monitoreo (Figura 3-1). También se aclara que en la categoría 2 se encuentran los buses alimentadores al Sistema Integrado de Transporte del Valle de Aburrá – SITVA, quienes operan con gas natural vehicular - GNV.



Figura 3-29. Vehículos de carga con ingreso y salida a la Ladrillera "El Noral" durante el tiempo aforado Fuente: Elaboración propia. Grupo GHYGAM, 2019

Página 102 de 264







El "Punto de aforo 2" ubicado a una distancia lineal de la Estación MED-BEME de 240 m en la entrada principal del Instituto Pedro Justo Berrio, donde se evaluó la influencia de fuentes móviles en mayor proporción por los vehículos que ingresan a la institución educativa y la unidad residencial "Azalea del Parque" (Cra 87A N° 32 – 81). En la Figura 3-30 se presenta el promedio diario de vehículos para el mismo periodo de tiempo anteriormente mencionado.

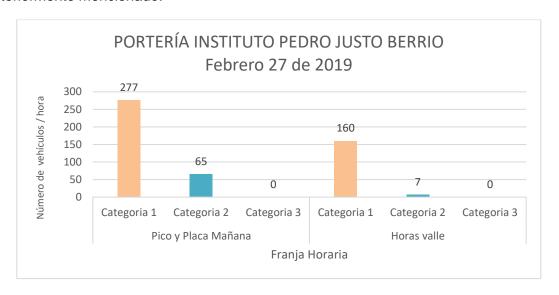


Figura 3-30. Aforo vehicular entrada portería Instituto Pedro Justo Berrio, febrero 27 de 2019 Fuente: Elaboración propia. Grupo GHYGAM, 2019

En la Figura 3-30 se observa que las fuentes móviles predominantes corresponden a categoría 1, principalmente de vehículos particulares y motocicletas, esto debido a la cercanía de unidades residenciales y zona escolar. En cuanto a la categoría 2 y según lo observado durante el periodo de tiempo aforado, se presentó una mayor tendencia de vehículos para transporte de pasajeros, en su mayoría escolares y de servicios especiales como se aprecia en la Figura 3-31.



Figura 3-31. Tipo de vehículos aforados en entrada del Instituto Pedro Justo Berrio Fuente: Elaboración propia. Grupo GHYGAM, 2019

Página 103 de 264







Finalmente, el "Punto de aforo 3" expuesto en la Figura 3-32 se ubicó en la intersección de la Cra. 84 con calle 32C distante 455 metros de la estación de calidad de aire MED-BEME. El punto de aforo fue seleccionado debido a que el parque automotor liviano proveniente de la zona circundante, lo usa como salida directa a la rotonda de la carrera 84 con calle 33 en cercanías a la cámara de medición "El Castillo".

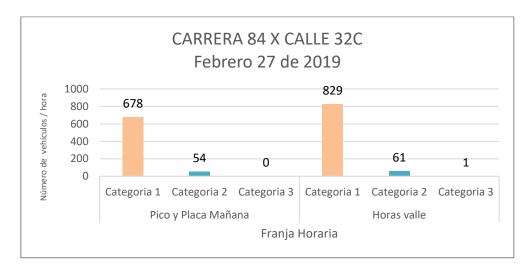


Figura 3-32. Aforo vehicular Cra.84 x Cl. 32C, febrero 27 de 2019 Fuente: Elaboración propia. Grupo GHYGAM, 2019

El análisis de datos para el "Punto de aforo 3" muestra una mayor circulación de vehículos, especialmente para la categoría 1 (Figura 3-33); sin embargo, cabe anotar que la proporción de vehículos medidos en la categoría 2 es menor que los reportados en los "Puntos de aforo 1 y 2".



Figura 3-33. Tipo de vehículos aforados en Cra.84 x Cl. 32C Fuente: Elaboración propia. Grupo GHYGAM, 2019

En general, se puede afirmar que dentro del radio de influencia del estacón de calidad de aire MED-BEME la influencia de fuentes móviles está compuesta en un alto porcentaje por Página 104 de 264







vehículos de categoría 1 y el flujo de vehículos de carga pesada con interacción directa con la ladrillera "El Noral" representa un bajo porcentaje, en comparación con el total de los vehículos aforados para la categoría 2. De la misma manera, en las cercanías del Instituto Pedro Justo Berrio, lugar donde se asienta la estación de monitoreo en cuestión, adicionalmente el punto más cercano presenta mayor afluencia de vehículos de transporte de pasajeros en el marco de la categoría 2. Así mismo, se evidenció que para los 3 puntos de medición para la categoría 3, el conteo de vehículos no supera el 5% del total aforado, permitiendo inferir que las vías aledañas al punto no son especialmente usadas para el transporte por vehículos de carga pesada y que, aunque las zonas aforadas están exentas de la medida de pico y placa, estas no presentan comportamientos diferentes para las 3 franjas horarias reportadas.

3.3 CONCENTRACIÓN PM2.5 EN LA ESTACIÓN MED-BEME

La validación de los datos de campo se presenta en el Anexo 3-1. FD-MEA200, trazabilidad del dato y el procedimiento de determinación de material particulado designado por el Laboratorio GHYGAM.

Los resultados de concentración de PM2.5 ($\mu g/m^3$) en la estación de monitoreo MED-BEME entre abril 03 y diciembre 29 de 2019 se presentan en la Tabla 3-1. La concentración del PM2.5 promedio en la Estación MED-BEME presenta un valor de 19.95 $\mu g/m^3$. Los valores reportados presentan una mediana de 20.05 $\mu g/m^3$, una concentración mínima de 8.15 $\mu g/m^3$ y una máxima de 37.86 $\mu g/m^3$.





Tabla 3-1. Concentración PM2.5 (μg/m³). Abril – diciembre 2019. Estación MED-BEME. Medellín, Colombia.

NÚMERO DE MUESTRA	FECHA MONITOREO	CONCENTRACIÓN ref (µg/m3)	Concentración PM2.5 ± Incertidumbre (µg/m3) ref
1	2019-04-03	27,23	$27,23 \pm 0,3$
2	2019-04-06	28,33	28,33 ± 0,3
3	2019-04-09	37,09	37,09 ± 0,3
4	2019-04-12	29,84	29,84 ± 0,3
5	2019-04-15	16,08	16,08 ± 0,3
6	2019-04-18	13,65	13,65 ± 0,3
7	2019-04-21	17,90	17,90 ± 0,3
8	2019-04-24	17,57	17,57 ± 0,3
9	2019-04-27	13,46	13,46 ± 0,3
10	2019-04-30	24,45	24,45 ± 0,3
11	2019-05-03	31,11	31,11 ± 0,3
12	2019-05-06	29,02	29,02 ± 0,3
13	2019-05-09	25,58	25,58 ± 0,3
14	2019-05-12	16,30	16,30 ± 0,3
15	2019-05-15	30,47	$30,47 \pm 0,3$
16	2019-05-18	23,04	23,04 ± 0,3
17	2019-05-21	21,18	21,18 ± 0,3
18	2019-05-24	18,45	18,45 ± 0,3
19	2019-05-27	16,42	$16,42 \pm 0,3$
20	2019-05-30	31,89	31,89 ± 0,3
21	2019-06-02	11,16	11,16 ± 0,3
22	2019-06-05	23,71	23,71 ± 0,3
23	2019-06-08	13,93	$13,93 \pm 0,3$
24	2019-06-11	15,67	15,67 ± 0,3
25	2019-06-14	14,76	14,76 ± 0,3
26	2019-06-17	22,90	$22,90 \pm 0,3$
27	2019-06-20	24,54	24,54 ± 0,3
28	2019-06-23	19,27	19,27 ± 0,3

Página 106 de 264







NÚMERO DE MUESTRA	FECHA MONITOREO	CONCENTRACIÓN ref (µg/m3)	Concentración PM2.5 ± Incertidumbre (µg/m3) ref
29	2019-06-26	15,42	15,42 ± 0,3
30	2019-06-29	21,63	21,63 ± 0,3
31	2019-07-02	18,69	18,69 ± 0,3
32	2019-07-05	21,49	21,49 ± 0,3
33	2019-07-08	19,24	19,24 ± 0,3
34	2019-07-11	16,23	16,23 ± 0,3
35	2019-07-14	14,74	14,74 ± 0,3
36	2019-07-17	13,77	13,77 ± 0,3
37	2019-07-20	10,06	10,06 ± 0,3
38	2019-07-23	20,60	20,60 ± 0,3
39	2019-07-26	11,89	11,89 ± 0,3
40	2019-07-29	15,08	15,08 ± 0,3
41	2019-08-01	20,63	20,63 ± 0,3
42	2019-08-04	10,68	10,68 ± 0,3
43	2019-08-07	23,57	23,57 ± 0,3
44	2019-08-10	25,61	25,61 ± 0,3
45	2019-08-13	21,00	21,00 ± 0,3
46	2019-08-16	25,92	25,92 ± 0,3
46	2019-08-16	26,57	26,57 ± 0,3
47	2019-08-19	15,98	15,98 ± 0,3
47	2019-08-19	15,92	15,92 ± 0,3
48	2019-08-22	18,76	18,76 ± 0,3
48	2019-08-22	17,80	$17,80 \pm 0,3$
49	2019-08-25	20,38	20,38 ± 0,3
49	2019-08-25	18,37	18,37 ± 0,3
50	2019-08-28	25,20	25,20 ± 0,3
50	2019-08-28	30,00	30,00 ± 0,3
51	2019-08-31	13,36	13,36 ± 0,3
52	2019-09-03	11,53	11,53 ± 0,3
53	2019-09-06	25,17	25,17 ± 0,3
54	2019-09-09	17,97	17,97 ± 0,3
55	2019-09-12	10,97	10,97 ± 0,3
56	2019-09-15	11,36	11,36 ± 0,3
57	2019-09-18	24,33	24,33 ± 0,3

Página 107 de 264







NÚMERO DE MUESTRA	FECHA MONITOREO	CONCENTRACIÓN ref (µg/m3)	Concentración PM2.5 ± Incertidumbre (µg/m3) ref
58	2019-09-21	20,06	20,06 ± 0,3
59	2019-09-24	29,00	29,00 ± 0,3
60	2019-09-27	13,33	$13,33 \pm 0,3$
61	2019-09-30	16,97	16,97 ± 0,3
62	2019-10-03	21,49	21,49 ± 0,3
63	2019-10-06	10,63	10,63 ± 0,3
64	2019-10-09	20,05	20,05 ± 0,3
65	2019-10-12	22,92	22,92 ± 0,3
66	2019-10-15	15,44	15,44 ± 0,3
67	2019-10-18	20,25	20,25 ± 0,3
68	2019-10-21	28,63	28,63 ± 0,3
69	2019-10-24	28,72	28,72 ± 0,3
70	2019-10-27	12,26	12,26 ± 0,3
71	2019-10-30	12,47	12,47 ± 0,3
72	2019-11-02	10,96	10,96 ± 0,3
73	2019-11-05	21,08	21,08 ± 0,3
74	2019-11-08	25,76	25,76 ± 0,3
75	2019-11-11	9,40	9,40 ± 0,3
76	2019-11-14	37,86	37,86 ± 0,3
77	2019-11-17	8,15	8,15 ± 0,3
78	2019-11-20	17,39	$17,39 \pm 0,3$
79	2019-11-23	21,74	21,74 ± 0,3
80	2019-11-26	21,14	21,14 ± 0,3
81	2019-11-29	35,29	35,29 ± 0,3
82	2019-12-02	24,80	$24,80 \pm 0,3$
83	2019-12-05	16,93	16,93 ± 0,3
84	2019-12-08	11,20	11,20 ± 0,3
85	2019-12-11	23,18	23,18 ± 0,3
86	2019-12-14	16,12	16,12 ± 0,5
87	2019-12-17	23,58	23,58 ± 0,5
88	2019-12-20	21,49	21,49 ± 0,5
89	2019-12-23	20,49	20,49 ± 0,5
90	2019-12-26	16,02	16,02 ± 0,5
91	2019-12-29	22,32	22,32 ± 0,5

Fuente: Elaboración propia Grupo GHYGAM, 2020.

Página 108 de 264







Durante el periodo de medición abril y diciembre de 2019, la norma de calidad de aire diaria vigente para Colombia (37 µg/m³) se superó el martes 09 de abril y el jueves 14 de noviembre. Para ambas fechas se revisaron las bitácoras de observación del monitoreo y no se registraron alteraciones en la vía por congestión vehicular extrema, ni hubo reportes de eventos de orden público, ni ambientales locales de quemas, ni tampoco accidentes industriales. Como alternativa para analizar las causas de estos datos atípicos, se analizó la posible ocurrencia de corrientes externas aportantes de PM2.5 a partir de información descargada del sensor (MODIS-Aqua) de la NASA sobre la escala o columna de aerosoles AOD, obteniendo imágenes en una resolución de 10 km y de 3 km, como se presenta en la Sección 4.3 y se concluye a continuación:

Para el 09 de abril del 2019 se visualizan algunos puntos calientes a lo largo del país con valores de AOD altos hacia el norte y centro), e igualmente se evidencian en Venezuela puntos calientes con valores de AOD altos. No es posible ver plumas de humo por la cobertura de nubes, otro evento detectado este día es el traslado de aerosoles desde África, siendo probable que alguno de estos eventos observados en las imágenes, tenga alguna intervención en la calidad del aire para este día. El 14 de noviembre de este mismo año, se visualizan varios puntos calientes en el centro de Colombia con valores medios de AOD, en Venezuela también, pero con valores nulos de AOD y en mayor cantidad en Brasil, con algunas plumas de humo y valores medios de AOD. Se observa en las imágenes transporte de aerosoles desde África. En los próximos avances del proyecto ONU ARCAL, se realizará un análisis más profundo de esta afectación a partir de la implementación del protocolo regional para identificación y valoración de aportes por corrientes externas.

Así mismo, días como el 16 y el 22 de agosto la información satelital levantada y declarada por SIATA, permitieron demostrar un incremento en el PM2.5 en varias estaciones de la red de monitoreo ocasionada por la entrada de plumas contaminantes al Valle de Aburrá a causa de incendios forestales al norte y centro de Brasil Ver (Figura 4-6); sin embargo, no se identificó un aumento apreciable en la zona de estudio Belén, en las Mercedes.

En el mes de diciembre, día 11, se evaluó una concentración de 23.2 μg/m³ con vientos predominantes del norte y oriente provenientes de toda el área poblada de La América, Laureles y Belén. Una observación específica del día de monitoreo fue la existencia de quemas controladas en el municipio de Copacabana en dirección Norte, visualizadas por los ingenieros de monitoreo.

@areametropol





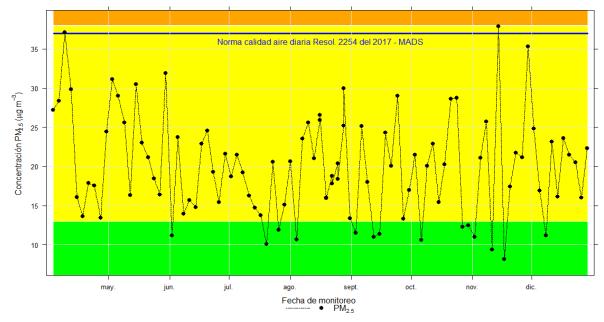


Figura 3-34. Concentraciones PM2.5 (μg/m³). Abril 03 - diciembre 29 de 2019 Estación MED-BEME. Medellín, Colombia. Fuente: Elaboración propia Grupo GHYGAM, 2019.

Para la mayor comprensión del comportamiento del PM2.5 observando los datos en conjunto, se realizó un análisis exploratorio de los datos como se observa en el diagrama de caja y bigotes presentado en la Figura 3-35. Los datos representan una mediana de 20.05 $\mu g/m^3$ similar al promedio de la concentración evaluada en el periodo de medición. Además, se encuentra un rango intercuartílico de 8.77 $\mu g/m^3$, es decir, el 50% del conjunto de datos que rodea la media se diferencia en 8.77 $\mu g/m^3$ con un mínimo para ese intervalo de 15.25 $\mu g/m^3$ (Q1) y un máximo de 24.03 $\mu g/m^3$ (Q3). Así mismo, se evidencia un dato atípico correspondiente al 14 de noviembre con un valor de 37.86 $\mu g/m^3$ ya antes mencionado. Así mismo, la asimetría no es evidente, es decir, la variabilidad de los datos por encima de la media es similar a la variabilidad por debajo de la misma con excepción del dato atípico.





Diagrama de caja y bigotes de la Concentración de PM2.5 (μg/m3)

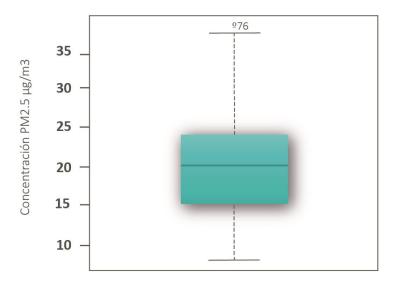


Figura 3-35. Diagrama de caja y bigotes Concentración PM2.5 (μg/m³).
Abril - diciembre 2019
Estación MED-BEME. Medellín, Colombia.
Fuente: Elaboración propia Grupo GHYGAM, 2020.

A partir del histograma de concentraciones (Figura 3-36), se encuentra desde el punto de vista de la forma, un mayor porcentaje de mediciones en el intervalo de clase entre 20 y 25 $\mu g/m^3$ con más del 30% de todas las mediciones en este intervalo. Se observa un sesgo del histograma a la derecha, evidenciándose una cola que se extiende hasta el intervalo de clase cuyo límite superior es 40 $\mu g/m^3$. Además, los datos presentan una mayor concentración de frecuencia relativa a la izquierda de la media con más de un 50% de las observaciones totales que se encuentran en tres intervalos de clase que van desde 5 hasta 20 $\mu g/m^3$.

Es notable que la función de densidad sobrepuesta al histograma de frecuencias no encuentra su máximo en el intervalo de clase entre 20 y 25 μg/m³, esto en razón a que la media de la concentración no está en este intervalo, dado su valor de 19.95 μg/m³.

Los estadísticos asociados a la variable objeto de estudio se presentan en la Tabla 3-2, donde se evidencia que la asimetría, skewness, es del orden de 0.48 demostrando con ello la carga de observaciones y con ello, de frecuencia relativa a la izquierda de la media (una distribución simétrica tiene como valor de asimetría cero).

Respecto de la curtosis, que es de magnitud -0.13, negativa, pero con valores cercanos a cero, desde el punto de vista estrictamente estadístico debería decirse que la concentración de los datos presentó un reducido grado de concentración alrededor de los parámetros de centralidad de la variable, la cercanía de esta cifra al cero nos reafirma el dictamen de que

Página 111 de 264









la distribución es mesocúrtica, es decir, similar a la de una distribución de probabilidad normal.

En cuanto a la desviación estándar, tiene una magnitud de 6.56 µg/m³, dando cuenta de una distancia media de cada observación de PM2.5 a la media (19.95 µg/m³) permitiendo decir que, aproximadamente el 96.7% de las observaciones de nuestra variable PM2.5 toman valores que se alejan a lo sumo del valor promedio en 6.56 µg/m³.

Tabla 3-2. Estadísticos asociados a la concentración de PM2.5

Est	Estadisticos Concentración PM2.5												
Mean (μg/m3)	Sd(µg/m3)	IQR	skewness	kurtosis									
19.95	6.56	8.77	0.48	-0.13									

Tanto el histograma como la función de densidad (Figura 3-36) muestran un comportamiento que puede entenderse como meso curtico, pero ambos dan indicios de la presencia de dos distribuciones de probabilidad mezcladas en los datos.

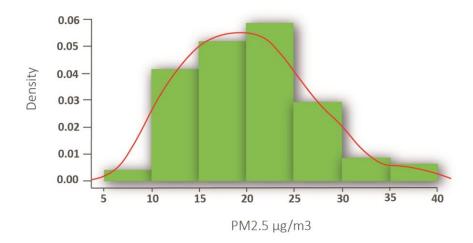


Figura 3-36. Histograma de frecuencias Concentración PM2.5 (μg/m³) y función densidad. Abril -diciembre 2019 Estación MED-BEME. Medellín. Colombia. Fuente: Elaboración propia Grupo GHYGAM, 2020.

Para probar esta hipótesis los datos de concentración se dividieron en días laborables y días no laborales en razón que se tiene evidencia histórica que los días no laborales muestran una disminución en la concentración de PM2.5 en aire ambiente para el Valle de Aburrá, de acuerdo con los reportes de SIATA. En la Figura 3-37, se presenta el comportamiento diario del PM2.5 durante el tiempo de toma de muestra clasificados según el factor tipo de día, cuyos niveles son días laborables y días no laborables, siendo días

Página 112 de 264









laborables los correspondientes entre lunes a viernes no feriados y los no laborables sábados, domingos y festivos. Un análisis de ambas poblaciones de datos se realizará en los siguientes apartados. Los estadísticos asociados a estos niveles se describen en la

Tabla 3-3.

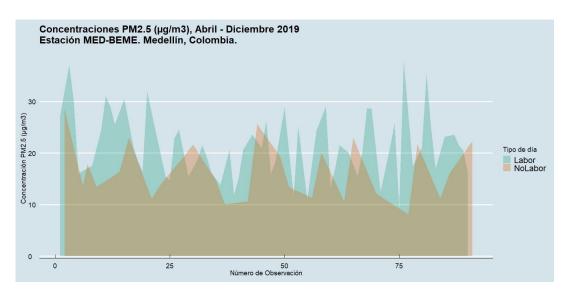


Figura 3-37. Concentraciones PM2.5 (μg/m³), abril - diciembre 2019 Estación MED-BEME. Medellín, Colombia. Fuente: Elaboración propia Grupo GHYGAM, 2020.

Tabla 3-3. Estadísticos asociados a la concentración de PM2.5 definido por niveles

	Estadísticos Concentración PM2.5 definido por niveles														
level	mean	sd	se(mean)	IQR	skewness	kurtosis	0%	25%	50%	75%	100%	n			
Labor	21.49344	6.424163	0.8030203	8.900	0.4789899	-0.111072	9.40	16.3725	21.04	25.2725	37.86	64			
NoLabor	16.30407	5.450523	1.0489537	9.565	0.4982834	-0.798501	8.15	11.2800	14.74	20.8450	28.33	27			

A partir de la Figura 3-38 son notables principalmente los siguientes aspectos:

➤ La dispersión de las observaciones de PM2.5 correspondientes a los días laborales, es superior a las de los días no laborales; esto es, la desviación estándar de la variable PM2.5 en los días laborales se espera superior que en los días que no lo son.

Página 113 de 264







- La asimetría observada a través de la localización de la mediana al interior de la caja así como la extensión de los bigotes para cada uno de los niveles del factor tipo de días, indican que para los días laborables, hay una asimetría escasa, con una media muy similar a la mediana en torno a 21.49 μg/m³, mientras que para los días no laborables, se evidencia con mayor claridad una asimetría a la derecha, lo que permite inferir que la concentración de las observaciones es mayor en niveles por debajo de la media, en este caso, de 16.3 μg/m³. Estas dos observaciones dan luz sobre una marcada diferencia en la distribución de densidad de probabilidad para la concentración de PM2.5 para los días laborables en relación con los no laborables.
- La localización de la mediana para los días laborales está localizada a un nivel diferente de la de los días no laborables; esto es, la primera corresponde a 21.04 μg/m³, mientras que la mediana de los días no laborables alcanza 14.74 μg/m³, diferencia que debió ser probada estadísticamente.

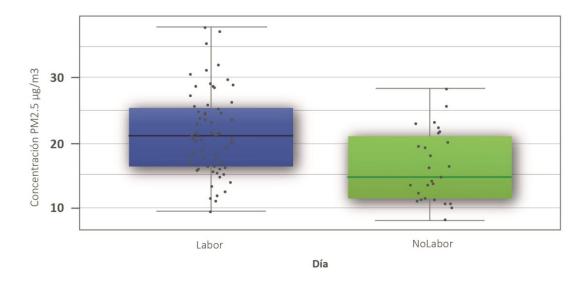


Figura 3-38. Diagrama de caja y bigotes de concentración PM2.5 (μg/m³) por tipo de día. Abril - diciembre 2019.

Estación MED-BEME. Medellín, Colombia. Fuente: Elaboración propia Grupo GHYGAM, 2020.

Con base en las observaciones previas resultó pertinente construir los gráficos de densidad de probabilidad de la variable PM2.5 para cada uno de los niveles del factor Tipo de día (Días Laborables, días no laborables) como se presenta en la Figura 3-39. Se encontró que la función de densidad de probabilidad para PM2.5 asociada el factor tipo de día en el nivel "días no laborables", presenta una clara asimetría a la derecha, además de visualmente presentar una forma leptocurtica, esto es, una alta concentración de los datos en torno a su propia medida de tendencia central, que en este caso es de 16.3 μ g/m³ (la mediana es de 14.74 μ g/m³).

Página 114 de 264







Para este nivel, es notable una segunda moda en la distribución asociada a dos días en los que el marcador de concentración de PM2.5 fueron 25.61 µg/m³ que se presentó el día 10 de agosto en razón de alta congestión vehicular por el desfile de autos clásicos y antiguos en el marco de la Feria de las Flores, sin evidenciarse efectos por corrientes externas según información satelital descargada para este día. Así mismo, el segundo punto corresponde a una concentración de 22.32 µg/m³ obtenido el día 29 de diciembre como consecuencia asociable a la congestión vehicular en las salidas de la ciudad presuntamente motivado por las celebraciones de fin de año.

En el caso de la variable PM2.5 asociada al factor tipo de día en su nivel "Día laborable" se evidencia que la distribución es simétrica, con una curtosis mesocúrtica con una cima en torno a una media de 21.49 μg/m³ (la mediana es de 21.04 μg/m³).

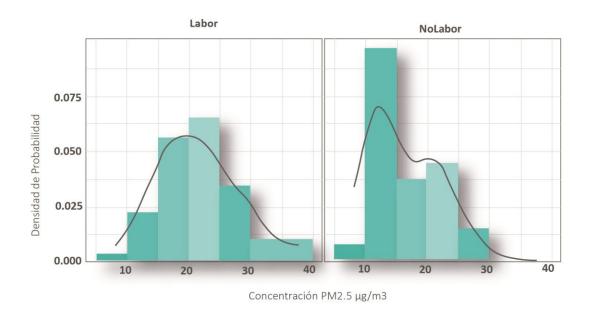


Figura 3-39. Densidad de probabilidad de la variable PM2.5 para cada uno de los niveles del factor Tipo de día. Abril - diciembre 2019

Estación MED-BEME. Medellín, Colombia.

Fuente: Elaboración propia Grupo GHYGAM, 2020.

Un factor relevante es el día de la semana en el cual se hacen las correspondientes mediciones, ordenados de lunes a domingo, característica que la convierte en cualitativa ordinal. Este factor fue evaluado desde cuatro ópticas: (i) el gráfico de caja y bigotes del PM2.5 por día, (ii) el gráfico de medias de PM2.5 por día, (iii) las funciones de densidad de probabilidad por cada nivel del factor y (iv), una revisión de los estadísticos básicos del PM2.5 para cada uno de los niveles del factor en mención.

Del gráfico de caja y bigotes por día (Figura 3-40), se encontró que: el día domingo tiene diferencia significativa con los días martes y viernes evaluado esto a partir del rango intercuartílico (altura de las cajas), sin embargo, es notable para el día domingo, la

Página 115 de 264







diferencia en la posición de su mediana en relación con los demás días, notándose en éste una posición considerablemente inferior.

El sábado, si bien presenta una localización de su medida de tendencia central inferior a los lunes a viernes, no podemos a partir de este gráfico considerar una diferencia significativa con el resto de los días de la semana.

Se evidencia una tendencia creciente en la concentración de PM2.5 desde el lunes hasta el viernes con una clara disminución en la concentración de PM2.5 a partir del sábado y aún menos concentración el domingo, lo que ratifica lo observado en el análisis con el factor tipo de día.

Se infiere que los días con mayor variabilidad en la concentración de PM2.5 en $\mu g/m^3$ es el jueves, día en el cual se presentó la mayor medición (37.8 $\mu g/m^3$) el 14 de noviembre; esta observación pudo ocasionar que la amplitud del rango intercuartil para este día fuese la mayor.

El día que muestra el rango intercuartil más pequeño es el viernes, a pesar de la presencia de la segunda medición más alta (35.29 $\mu g/m^3$) el 29 de noviembre, considerándose para este día un valor fuertemente atípico.

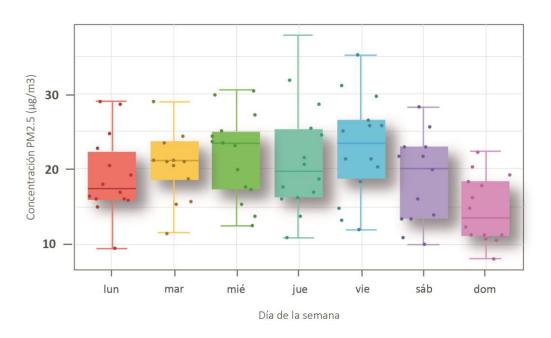


Figura 3-40. Diagrama de caja y bigotes por día entre abril - diciembre 2019 Estación MED-BEME. Medellín, Colombia. Fuente: Elaboración propia Grupo GHYGAM, 2020.

El gráfico de medias (Figura 3-41) por su parte presenta la media de la concentración de PM2.5, además de un intervalo asociado al error estándar de la media, aunque similar a la

Página 116 de 264









Figura anterior, ahora se usarán estadísticos suficientes para evaluar el comportamiento del PM2.5 por día de la semana.

De los días laborales, se encontró que el lunes es el que presenta un menor nivel de concentración media de PM2.5 (19.45 $\mu g/m^3$), sin embargo, este valor se ve afectado por los días 19 de agosto y 11 de noviembre, ambos días festivos con concentración de 15.95 y 9.4 $\mu g/m^3$ respectivamente e inferior a los datos de esta población debido al cese de actividades cotidianas y de tráfico. Si estos días no fuesen considerados dentro de este análisis por ser días festivos, la media para los lunes pasaría a 20.69 $\mu g/m^3$, comportamiento similar a los martes, miércoles y jueves.

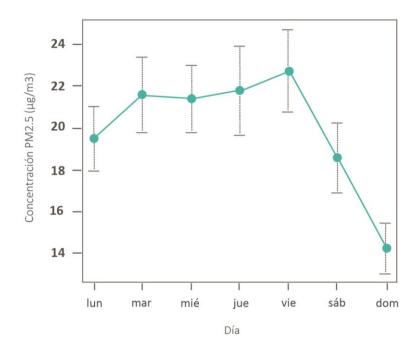


Figura 3-41. Gráfico de medias de la concentración de PM2.5 por día de la semana.

Abril - diciembre 2019

Estación MED-BEME. Medellín, Colombia.

Fuente: Elaboración propia Grupo GHYGAM, 2020.

3.4 CORRELACIÓN DATOS DE CONCENTRACIÓN Y VARIABLES METEOROLOGICAS

Teniendo en cuenta que la Precipitación influencia directamente el balance hídrico de la atmósfera y la superficie, a la vez que modifica las condiciones termodinámicas de la atmósfera para el Valle de Aburrá, la distribución de la lluvia a lo largo del año está determinada por la posición relativa del territorio con respecto al sol y en consecuencia al paso de la Zona de Convergencia Inter- tropical (ZCIT). Esto provoca mayor acumulado de Página 117 de 264







precipitación al rededor del mes de abril y el mes de noviembre, tal como se observa en el Ciclo Anual presentado en la Figura 3-42.

De forma generalizada para el Valle de Aburrá, las precipitaciones durante el día se concentran en horas de la tarde, la noche y la madrugada. De acuerdo con los datos (Figura 3-42), la precipitación para el punto de muestreo presenta el máximo acumulado sobre la noche y la madrugada, seguido por la precipitación de la tarde.

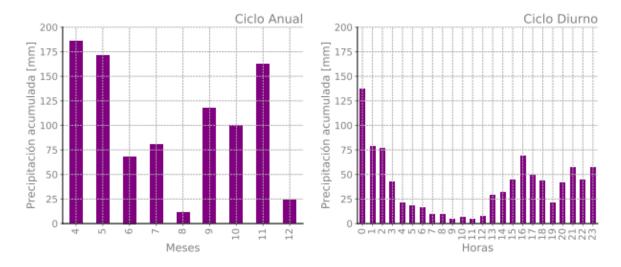


Figura 3-42. Ciclo Diurno y Anual de la precipitación en la estación de muestreo Fuente: Proyecto AMVA- SIATA, 2019.

El rol de la precipitación en la concentración de materia particulado debe ser analizado como el efecto neto de la remoción de contaminantes y la estabilización atmosférica. De este modo, el efecto neto de la precipitación cambia dependiendo del periodo del día; de manera favorecedora para el periodo nocturno, en donde las condiciones a priori de la atmósfera son de estabilidad, y desfavorecedoras para el periodo diurno, cuando la atmósfera puede inestabilizarse más fácilmente y permitir la dispersión vertical de los contaminantes, pero que en consecuencia de la precipitación presenta condiciones de estabilidad.

En la Figura 3-43 se observa la distribución de los contaminantes en periodo diurno (7:00 a 18:59) y en periodo nocturno (19:00 a 06:59), para condiciones de precipitación y condiciones de no precipitación (acumulado=0). A partir de las distribuciones y la mediana de las concentraciones, se identifica para el periodo nocturno una distribución que, aunque similar, tiende a presentar menores valores de PM2.5 bajo condiciones de lluvia; diferente al periodo diurno, en donde las mayores concentraciones son atribuidas a las condiciones de lluvia, en consecuencia, de la estabilización atmosférica.

Página **118** de **264**





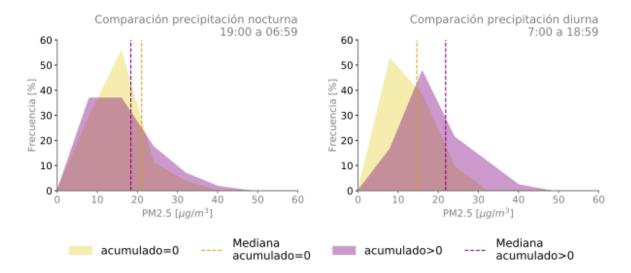


Figura 3-43. Comparación de la distribución de las concentraciones en días en condiciones de lluvia diurna y nocturna

Fuente: Fuente: Proyecto AMVA- SIATA, 2019.

El viento está involucrado en el transporte de parcelas de aire cargadas de partículas y gases en diferentes concentraciones. De este modo, el viento tiene la capacidad de modificar las concentraciones de contaminantes puntuales, bien sea de manera positiva o negativa. Para el punto de muestreo, la mediana de la dirección del viento se ubica alrededor de los 42° (nororiente), lo que significa el desplazamiento predominante de parcelas de aire procedentes de la zona urbana del municipio de Medellín.

Al lado izquierdo de la Figura 3-44, se observa la dispersión de las concentraciones de PM2.5 asociados a la magnitud de la velocidad del viento (radio) y su dirección y el alto porcentaje de datos de PM2.5 tomados bajo condiciones de velocidad del viento menor a los 1.0 m/s. Se muestra además, los colores más oscuros relacionados con concentraciones mayores; lo cual es caracterizado claramente en la Figura 3-57, observándose como las velocidades del viento de 0.6 m/s en adelante, tienen en promedio de concentraciones de PM2.5 asociada de alrededor de 8.0 µg/m³ menor que las de velocidad del viento de magnitud 0.1 m/s. Por otro lado, a la derecha, se destaca la frecuencia de datos en rangos de dirección del viento y su magnitud para el periodo diurno y nocturno. Es notoria la concentración de los datos en la dirección nororiente, con menores magnitud para el periodo nocturno.



Periodo Diurno (06 COT - 18 COT)

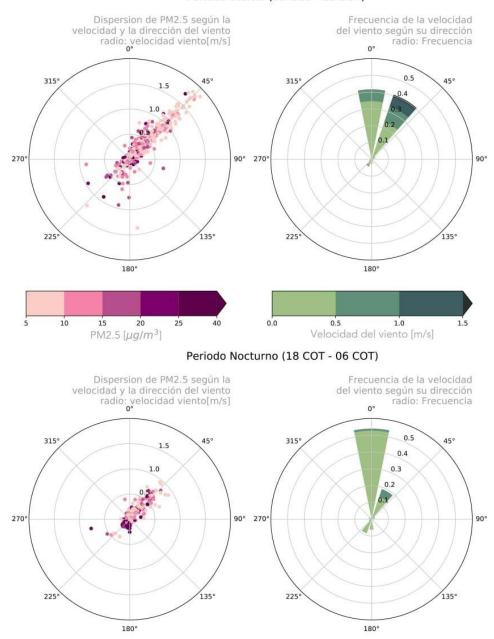


Figura 3-44. Dispersión y frecuencia de las concentraciones de PM2.5 según la dirección y la velocidad del viento.

Fuente: Proyecto AMVA- SIATA, 2019.

Página 120 de 264



1.0

Velocidad del viento [m/s]

0.5

20

PM2.5 $[\mu g/m^3]$

25

10

15





La capacidad del viento para transportar los contaminantes o dispersarlos depende fuertemente de la magnitud de la velocidad del viento. Para el punto de muestreo, se identifica una tendencia de disminución de las concentraciones de contaminantes a mayores velocidades del viento, como se presenta en la Figura 3-45.

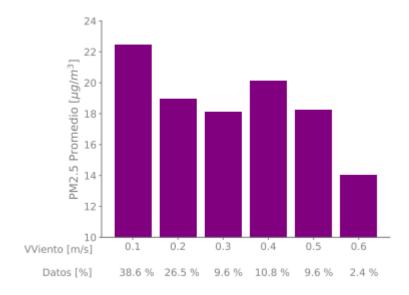


Figura 3-45. Concentraciones promedio de PM2.5 a diferentes magnitudes de la velocidad del viento Fuente: Fuente: Proyecto AMVA- SIATA, 2019.

3.5 CARACTERIZACIÓN QUIMICA PM2.5

Las muestras tomadas entre el 04 de abril y 29 de diciembre de 2019, se enviaron al Laboratorio Ambiental de la Universidad Nacional de Costa Rica para el análisis de materia carbonácea método NIOSH 5040, iones cromatografía iónica y metales por el método de espectrometría de masas por plasma acoplado inductivamente (ICP-MS) de acuerdo a las metodologías descritas (numeral 2.3), según los procedimientos del instructivo FD-MEA189 custodia muestras y registrados en el formato FD-MEA230 Control Muestras Caracterizadas. El análisis elemental aplicando la técnica AAN fue realizada en el laboratorio TAN, Departamento Química Nuclear de la Comisión Nacional de Energía Atómica - CNEA (Buenos Aires, Argentina) y en Servicio Geológico Colombiano - SGC del Ministerio de Minas y Energía de Colombia. En la Tabla 3-4, se presenta la relación de las 91 muestras y las fechas del envío, de las cuales 61 corresponden a la vigencia del Convenio 734 de 2019 y nueve (9), son blancos de análisis, identificados como BA. Adicionalmente, en el Anexo 3-2 se encuentra el registro fotográfico de las muestras y en el Anexo 3-3, las guías de envío a través de las empresas de transporte DHL y FEDEX. Las muestras para el análisis en CNEA fueron entregadas personalmente por la profesora Miriam Gómez al laboratorio.

Página 121 de 264







Tabla 3-4. Relación muestras PM2.5. abril 03– diciembre 29 de 2019 Estación MED-BEME. Medellín, Colombia

		Parámetr	o/ Método				
N° Muestra	Etiqueta muestra	EC, OC NIOSH 5040	Aniones- Cationes Cromatografía.	Metales ICP-MS	AAN	Laboratorio de Análisis	Fecha envío
Widestia		WIO3H 3040	lónica				
1	3002	X	X	X		UNA-CR	06/05/2019
2	3003	X	X	X		UNA-CR	06/05/2019
3	3007	Χ	X	X		UNA-CR	06/05/2019
4	3009	X	X	X		UNA-CR	06/05/2019
5	3012	Χ	X	X		UNA-CR	06/05/2019
6	3015	X	X	X		UNA-CR	06/05/2019
7	3016	Χ	X	X		UNA-CR	06/05/2019
8	3019	X	X	X		UNA-CR	06/05/2019
9	3020	Χ	X	Χ		UNA-CR	06/05/2019
10	3023	X	X	X		UNA-CR	06/05/2019
11	3028*	Χ	X	X		UNA-CR	06/05/2019
12	3024	Χ	X	Χ		UNA-CR	04/06/2019
13	3025	Χ	X	Χ		UNA-CR	04/06/2019
14	3031	Χ	X	Χ		UNA-CR	04/06/2019
15	3034	Χ	X	Χ		UNA-CR	04/06/2019
16	3035	X	X	Χ		UNA-CR	04/06/2019
17	3036	Χ	X	Χ		UNA-CR	04/06/2019
18	3037	Χ	X	Χ		UNA-CR	04/06/2019
19	3040	Χ	X	X		UNA-CR	04/06/2019
20	3043	Χ	X	Χ		UNA-CR	04/06/2019
21	3044	Χ	X	Χ		UNA-CR	04/06/2019
22	3051*	Χ	X	Χ		UNA-CR	04/06/2019
23	3052	Χ	X	Χ		UNA-CR	16/07/2019
24	3053	Χ	Χ	X		UNA-CR	16/07/2019
25	3054	Х	Χ	Х		UNA-CR	16/07/2019
26	3058	Χ	Χ	Χ		UNA-CR	16/07/2019
27	3059	Х	X	Χ		UNA-CR	16/07/2019
28	3061	Χ	X	Χ		UNA-CR	16/07/2019





		Parámetr	o/ Método				
N°	Etiqueta muestra	EC, OC	Aniones- Cationes	Metales ICP-MS	AAN	Laboratorio de Análisis	Fecha envío
Muestra	muestru	NIOSH 5040	Cationes Cromatografía. Iónica			ac Allansis	
29	3062	X	X	Χ		UNA-CR	16/07/2019
30	3064	Χ	X	Χ		UNA-CR	16/07/2019
31	3065	Χ	X	Χ		UNA-CR	16/07/2019
32	3069	Χ	X	Χ		UNA-CR	16/07/2019
33	3070*	X	Χ	X		UNA-CR	16/07/2019
34	3071	Χ	X	Χ		UNA-CR	16/07/2019
35	3072	X	X	Χ		UNA-CR	16/07/2019
36	3073	Χ	X	Χ		UNA-CR	16/08/2019
37	3081	Χ	Χ	Χ		UNA-CR	16/08/2019
38	3082	X	X	Χ		UNA-CR	16/08/2019
39	3083	Χ	X	Χ		UNA-CR	16/08/2019
40	3085*	Χ	X	Χ		UNA-CR	16/08/2019
41	3086	Χ	X	Χ		UNA-CR	16/08/2019
42	3087	Χ	X	Χ		UNA-CR	16/08/2019
43	3096	Χ	X	Χ		UNA-CR	16/08/2019
44	3097	X	X	Χ		UNA-CR	16/08/2019
45	3098	Χ	X	Χ		UNA-CR	16/08/2019
46	3099	Χ	X	Χ		UNA-CR	16/08/2019
47	3100	Χ	X	Χ		UNA-CR	17/09/2019
48	3111	Χ	X	Χ		UNA-CR	17/09/2019
49	3112	X	X	Χ		UNA-CR	17/09/2019
50	3113	X	X	Χ		UNA-CR	17/09/2019
51	3114	Χ	X	Χ		UNA-CR	17/09/2019
52	3115	Χ	X	Χ		UNA-CR	17/09/2019
53	3116	Х	X	Χ		UNA-CR	17/09/2019
54	3117	X	X	Χ		UNA-CR	17/09/2019
55	3118	Х	X	Χ		UNA-CR	17/09/2019
56	3119	X	Χ	Χ		UNA-CR	17/09/2019
57	3120*	Х	Χ	Χ		UNA-CR	17/09/2019
58	3121	X	Χ	Χ		UNA-CR	15/10/2019
59	3122	X	Х	Χ		UNA-CR	15/10/2019
60	3139	Χ	Χ	Χ		UNA-CR	15/10/2019

Página 123 de 264







		Parámetr	o/ Método				
N° Muestra	Etiqueta muestra	EC, OC NIOSH 5040	Aniones- Cationes Cromatografía. Iónica	Metales ICP-MS	AAN	Laboratorio de Análisis	Fecha envío
61	3141	X	X	Χ		UNA-CR	15/10/2019
62	3142	X	X	Χ		UNA-CR	15/10/2019
63	3143	X	X	Χ		UNA-CR	15/10/2019
64	3144	X	X	Χ		UNA-CR	15/10/2019
65	3145	Χ	X	Χ		UNA-CR	15/10/2019
66	3146	X	X	Χ		UNA-CR	15/10/2019
67	3147	X	X	X		UNA-CR	15/10/2019
68	3148*	Χ	X	Χ		UNA-CR	15/10/2019
69	3149	X	Χ	X		UNA-CR	18/11/2019
70	3158	X	X	Χ		UNA-CR	18/11/2019
71	3161	Χ	X	X		UNA-CR	18/11/2019
72	3162	X	X	Χ		UNA-CR	18/11/2019
73	3163	Χ	Χ	Χ		UNA-CR	18/11/2019
74	3164	X	X	Χ		UNA-CR	18/11/2019
75	3165	Χ	Χ	Χ		UNA-CR	18/11/2019
76	3166	Χ	X	Χ		UNA-CR	18/11/2019
77	3167	X	X	X		UNA-CR	18/11/2019
78	3169*	X	X	Χ		UNA-CR	18/11/2019
79	3170	Χ	X	X		UNA-CR	18/11/2019
80	3008				X	CNEA	20/11/2019
81	3017				X	CNEA	20/11/2019
82	3021				X	CNEA	20/11/2019
83	3026				X	CNEA	20/11/2019
84	3038				X	CNEA	20/11/2019
85	3047				X	CNEA	20/11/2019
86	3050				X	CNEA	20/11/2019
87	3056				X	CNEA	20/11/2019
88	3066				X	CNEA	20/11/2019
89	3074				X	CNEA	20/11/2019
90	3076				X	CNEA	20/11/2019
91	3079				X	CNEA	20/11/2019
92	3089				X	CNEA	20/11/2019

Página 124 de 264







		Parámetr	o/ Método				
N° Muestra	Etiqueta muestra	EC, OC NIOSH 5040	Aniones- Cationes Cromatografía. Iónica	Metales ICP-MS	AAN	Laboratorio de Análisis	Fecha envío
93	3101				X	CNEA	20/11/2019
94	3104				X	CNEA	20/11/2019
95	3106				X	CNEA	20/11/2019
96	3109				X	CNEA	20/11/2019
97	3134				X	CNEA	20/11/2019
98	3130				X	CNEA	20/11/2019
99	3196				X	CNEA	20/11/2019
100	3231*				X	CNEA	20/11/2019
101	3232*				X	CNEA	20/11/2019
102	3233*				X	CNEA	20/11/2019
103	3234*				X	CNEA	20/11/2019
104	3008				X	SGC	16/12/2019
105	3017				X	SGC	16/12/2019
106	3021				X	SGC	16/12/2019
107	3026				X	SGC	16/12/2019
108	3038				X	SGC	16/12/2019
109	3047				X	SGC	16/12/2019
110	3050				X	SGC	16/12/2019
111	3056				X	SGC	16/12/2019
112	3066				X	SGC	16/12/2019
113	3074				X	SGC	16/12/2019
114	3076				X	SGC	16/12/2019
115	3079				X	SGC	16/12/2019
116	3089				X	SGC	16/12/2019
117	3101				X	SGC	16/12/2019
118	3104				X	SGC	16/12/2019
119	3106				X	SGC	16/12/2019
120	3109				X	SGC	16/12/2019
121	3134				X	SGC	16/12/2019
122	3130				X	SGC	16/12/2019
123	3196				X	SGC	16/12/2019
124	3231*				X	SGC	16/12/2019







		Parámetr	o/ Método				
N° Muestra	Etiqueta muestra	EC, OC NIOSH 5040	Aniones- Cationes Cromatografía. Iónica	Metales ICP-MS	AAN	Laboratorio de Análisis	Fecha envío
125	3232*				X	SGC	16/12/2019
126	3233*				X	SGC	16/12/2019
127	3234*				X	SGC	16/12/2019
128	3172	X	X	Χ		UNA-CR	20/01/2020
129	3173	Χ	X	X		UNA-CR	20/01/2020
130	3181	X	X	Χ		UNA-CR	20/01/2020
131	3182	Χ	X	X		UNA-CR	20/01/2020
132	3184	X	X	Χ		UNA-CR	20/01/2020
133	3185	Χ	X	X		UNA-CR	20/01/2020
134	3186	X	X	Χ		UNA-CR	20/01/2020
135	3187	Χ	X	Χ		UNA-CR	20/01/2020
136	3188	Χ	X	Χ		UNA-CR	20/01/2020
137	3190	X	X	Χ		UNA-CR	20/01/2020
138	3191	X	X	Χ		UNA-CR	20/01/2020
139	3200	Χ	X	Χ		UNA-CR	20/01/2020
140	3201	X	X	Χ		UNA-CR	20/01/2020
141	3203	Χ	X	Χ		UNA-CR	20/01/2020
142	3204	X	X	Χ		UNA-CR	20/01/2020
143	3205	Χ	X	Χ		UNA-CR	20/01/2020
144	3208	X	X	Χ		UNA-CR	20/01/2020
145	3209	X	X	Χ		UNA-CR	20/01/2020
146	3189*	Χ	Χ	Χ		UNA-CR	20/01/2020
147	3202*	X	X	Χ		UNA-CR	20/01/2020
148	3211*	X	X	Χ		UNA-CR	20/01/2020
149	3212*	X	Χ	Χ		UNA-CR	20/01/2020

Fuente: Elaboración Propia. Grupo GHYGAM, 2019

3.5.1 Composición Elemental, Iónica y Carbonácea PM2.5 Estación MDE-BEME. Medellín

Tal como se describió en la metodología de análisis químico (sección 2.3), la composición elemental, iónica y carbonácea, se llevó a cabo por espectrometría de masas con fuente de plasma (ICP-MS), los aniones y cationes por cromatografía iónica, la materia carbonácea usando el protocolo NIOSH 5040 (NIOSH, 1999) y por Activación Neutrónica (AAN), los elementos traza Ag, Sb, Cd, Co, Zn, As, Hg, Pb, Fe y Cr.

Página 126 de 264







Es importante aclarar que la caracterización del PM2.5 obtenida en el laboratorio, está en función de los principios, límites de detección y cuantificación de los métodos analíticos para las sustancias en elemental, soluble, insoluble, iónico y formas de la materia carbonácea como EC y OC, hallándose en general una fracción importante de No Detectables, que hacen parte de agua absorbida, volátiles y las sustancias propias de las interferencias analíticas específicas aplicadas. Igualmente también debe considerarse, que en general los componentes de los aerosoles, se encuentran en diferentes formas y estructuras químicas similares a las emitidas por las fuentes, conllevando a los científicos a desarrollar diferentes métodos de balance químico (Judith C. Chow et al., 2015; Genga et al., 2017c; Lewis et al., 2003) para realizar la reconstrucción de la masa medida experimentalmente y calcular de la composición promedio balanceada del PM2.5, tal como fue analizado en la Sección 0.

Para el análisis, discusión e interpretación, los resultados analíticos de la caracterización se presentan de la Tabla 3-5 a Tabla 3-11.

En la Tabla 3-1 se presentan las concentraciones promedio de las especies evaluadas en el PM2.5 captado en el área de influencia de la estación MDE-BEME desde el mes de abril hasta el mes de diciembre de 2019, de acuerdo con los datos validados. Se resalta que en este periodo se encuentran las 61 muestras que debían analizarse en el periodo 02 de julio a 29 de diciembre de 2019, según Convenio 734 de 2019. Como puede observarse en la fracción PM2.5, los componentes elementales para el promedio de todas las muestras caracterizadas conforman el 7.9%, la fracción iónica el 12.7% y la materia carbonácea constituye la mayor parte con el 50%. Esta especiación se diferencia a las típicas zonas de tráfico con un menor contenido en EC, indicador de emisiones vehiculares primarias. En la Sección 3.6 se realiza un análisis comparativo detallado entre varias zonas caracterizadas del Valle de Aburrá.





Tabla 3-5. Concentración PM2.5 (μg/m³), Masa Elemental (μg). Abril 03–diciembre 29 de 2019. Estación MED-BEME. Medellín-Colombia

FECHA	PM2.5	Be	Na	Mg	Al	K	Ca	Ti	٧	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	Se	Мо	Ag	Cd	Sb	Ba	Hg	Pb
MONITOREO		μg	μg	μg	μg	μg	μg	μg	μg	μg	μg	μg	μg	μg	μg	μg	μg	μg	μg	μg	μg	μg	μg	μg	μg
3/4/19	27,23	0,0	21,9	26,8	349,5	444,5	120,9	17,0	1,3	0,8	4,1	373,0	0,3	7,7	10,1	34,8	2,1	1,0	0,5	0,1	0,4	3,3	8,8	0,2	4,2
6/4/19	28,33	0,0	21,9	70,3	282,4	437,6	212,2	13,9	1,1	0,5	5,0	314,0	0,2	4,6	5,1	24,2	1,2	1,6	0,3	0,0	0,3	1,0	8,3	0,2	5,5
9/4/19	37,09	0,0	279,9	168,2	557,5	924,7	463,1	28,5	2,1	4,1	10,8	503,7	0,6	5,8	27,7	108,7	2,4	3,4	0,9	0,3	1,1	12,6	21,5	0,2	12,0
12/4/19	29,84	0,0	21,9	153,4	537,3	385,7	435,8	26,2	1,9	2,9	6,0	448,2	0,2	4,5	49,9	46,2	2,4	1,7	0,4	0,0	0,2	20,2	16,0	0,0	7,8
15/4/19	16,08	0,0	34,5	140,0	401,6	369,2	377,0	18,3	1,3	1,3	3,8	261,1	0,2	2,5	8,6	25,2	0,7	1,0	0,3	0,0	0,3	1,0	9,3	0,1	3,1
18/4/19	13,65	0,0	255,1	117,9	328,4	41,8	260,5	13,8	0,9	1,1	1,8	198,0	0,3	2,2	3,6	22,3	2,4	1,2	0,3	0,0	0,8	1,2	7,6	0,2	9,4
21/4/19	17,90	0,0	559,3	88,7	260,3	21,5	203,7	12,2	1,0	1,2	2,4	182,8	0,4	2,2	14,6	30,4	1,8	1,6	0,4	0,0	0,2	3,0	8,2	0,1	5,3
24/4/19	17,57	0,0	21,6	103,6	360,5	249,5	443,0	19,6	1,3	2,1	7,4	361,0	0,2	2,4	6,7	62,7	1,5	1,6	0,4	0,1	0,4	1,4	10,8	0,2	5,2
27/4/19	13,46	0,0	719,1	158,9	425,7	375,1	412,3	17,6	1,3	1,9	4,2	271,0	0,3	2,6	14,2	78,7	1,9	2,0	0,5	0,0	0,5	1,8	12,3	0,2	8,0
30/4/19	24,45	0,0	224,0	145,3	692,5	520,8	486,9	32,7	2,3	2,3	5,5	438,9	0,9	3,3	5,4	26,5	7,6	2,1	0,4	0,0	0,4	1,5	16,5	0,2	4,6
3/5/19	31,11	0,0	21,9	110,4	875,0	437,8	437,1	44,4	2,8	2,4	7,8	589,9	0,4	3,8	27,1	951,5	1,1	2,0	0,6	0,1	2,1	1,4	21,9	0,2	17,2
6/5/19	29,02	0,0	21,9	167,0	1045,0	429,2	585,3	53,6	3,0	2,1	9,7	715,2	0,5	3,6	11,2	70,2	1,1	1,3	0,4	0,2	1,3	1,6	21,1	0,3	7,0
9/5/19	25,58	0,0	21,9	110,9	456,1	472,3	308,5	21,6	1,3	1,1	5,6	285,2	0,3	2,4	10,2	119,6	4,4	1,6	0,5	0,1	1,4	1,6	10,6	0,2	8,0
12/5/19	16,30	0,0	21,9	111,7	526,6	64,8	350,1	23,7	1,8	0,9	5,1	324,2	0,4	2,1	8,7	30,7	1,1	1,2	0,3	0,1	0,5	1,4	15,0	0,2	7,5
15/5/19	30,47	0,0	21,9	160,0	924,6	382,6	565,7	50,1	3,3	2,4	8,8	598,7	0,8	4,8	12,6	59,8	3,9	2,6	0,7	0,1	0,9	3,4	22,3	0,3	12,9
18/5/19	23,04	0,0	21,9	112,5	589,4	376,0	272,5	25,7	1,9	1,3	6,5	351,6	0,6	3,5	7,7	86,6	1,6	2,1	0,6	0,0	0,4	2,0	12,5	0,2	6,5
21/5/19	21,18	0,0	21,9	43,8	408,5	344,5	210,9	22,6	1,3	1,6	10,3	430,7	0,3	2,4	13,4	67,0	1,3	1,7	0,5	0,1	0,4	1,9	10,4	0,2	9,6
24/5/19	18,45	0,0	21,9	6,4	466,4	335,7	96,1	27,6	2,0	1,7	10,6	510,1	0,3	2,9	12,9	82,6	1,8	2,2	0,5	0,1	0,3	2,5	11,6	0,2	8,0
27/5/19	16,42	0,0	21,9	6,4	365,1	264,7	109,6	21,0	1,4	1,4	7,3	378,6	0,3	1,7	10,6	33,3	3,0	1,2	0,5	0,0	0,1	2,2	9,9	0,0	5,8
30/5/19	31,89	0,0	21,9	138,8	673,3	958,0	325,3	35,2	2,7	14,7	10,2	560,4	0,8	4,4	13,8	98,2	2,7	3,0	0,9	0,3	0,8	4,0	23,1	0,4	44,8
2/6/19	11,16	0,0	910,0	187,4	316,5	108,3	569,7	15,5	0,9	2,7	2,2	119,6	0,2	1,3	4,3	15,2	1,3	0,7	1,2	0,0	0,1	1,5	10,6	0,1	4,2
5/6/19	23,71	0,0	508,8	213,5	736,8	371,4	678,2	38,8	1,9	2,7	9,7	478,3	0,4	2,8	7,5	44,5	1,7	1,5	0,5	0,0	0,4	1,9	21,7	0,4	10,2
8/6/19	13,93	0,0	606,6	71,1	378,3	276,7	334,0	21,0	1,5	1,3	5,3	341,4	0,5	2,5	7,0	18,9	0,9	1,2	0,5	0,0	0,1	1,2	15,9	0,1	4,3
11/6/19	15,67	0,0	1527,7	233,1	655,5	262,6	750,0	32,4	1,7	3,3	8,9	444,9	0,6	2,9	9,7	29,7	1,8	1,4	1,0	0,0	0,3	3,5	16,7	0,2	5,7





FECHA	PM2.5	Be	Na	Mg	Al	К	Ca	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Со	Ni	Cu	Zn	As	Se	Мо	Ag	Cd	Sb	Ba	Hg	Pb
MONITOREO	μg/m3	μg	μg	μg	μg	μg	μg	μg	μg	μg	μg	μg	μg	μв	μg	μg	μg	μg	μg		μg	μg	μg	μg	μg
14/6/19	14,76	0,0	845,6	190,7	795,1	240,9	617,7	35,4	2,1	3,5	6,8	449,5	0,4	2,4	6,2	29,1	1,6	1,0	0,6	0,0	0,3	1,6	21,4	0,0	5,8
17/6/19	22,90	0,0	772,5	177,3	1179,7	763,4	729,3	47,0	3,6	2,7	7,3	551,7	0,9	3,5	8,2	39,3				0,0		1,9	30,5	0,4	7,6
20/6/19	24,54	0,0	1008,1	247,1	1520,6	729,0	911,2	60,9	4,1	3,3	9,4	693,2	0,9	4,2	9,6	44,9	1000	2,6	54/4	0,0	0.5000	3,3	44,0	0,4	10,8
23/6/19	19,27	0,0	791,5	166,3	1123,8	208,0	540,6	43,0	3,4	2,1	5,1	460,8	0,9	3,6	7,4	16,3			0,5	0,0		1,7	26,9	0,3	5,6
26/6/19	15,42 21,63	0,0	21,9	158,5	1057,3	332,6	529,2	42,8	2,7	2,5	7,1	543,0 728,6	1,0	2,3	7,0	22,5	0,8	1,4	0,4		0,2	1,6	20,8	0,0	5,4
29/6/19 2/7/19	18,69	0,0	21,9	229,9 148,0	1690,5 856,4	686,8 612,9	674,7 466,0	61,7 39,4	5,1	3,4	7,7 8,3	514,6	0,4	4,8 2,3	8,3	36,4		1,5	0,4	0,0	1,1	1,8	45,6 19,6	0,3	12,2 12,6
5/7/19	21,49	0,0	21,9	187,8	1330,1	432,3	562,9	53,5	3,9	3,2	9,2	700,0	0,8	4,0	10,1	46,4				0.1	and and	2,1	33,1	0,3	17,2
8/7/19	19,24	0,0	58.9	259,1	1600,1	302,9	673,0	64,7	4,5	3,3	9,2	743,1	0,7	3,7	9,0	566,3	2,0			0,1		1,7	34,6	0,5	15,9
11/7/19	16,23	0,0	222,0	123,9	899,7	314,8	574,4	46,6	2,9	3,5	7,6	517,5	0,6	77,2	14,8	82,7				0,1		1,9	23,5	0,1	9,3
14/7/19	14,74	0,0	534,2	113,0	501,8	133,9	387,7	26,1	1,9	2,2	4,6	288,7	0,4	138,2	17,4	76,6	2,8	1,4	1,2	0,1	0,5	1,4	16,9	0,2	7,8
17/7/19	13,77	0,0	21,9	83,7	632,2	307,9	487,8	34,7	2,2	2,1	6,5	395,1	0,4	45,3	10,7	18,2	1,0	1,2	0,4	0,0	0,1	0,8	20,0	0,2	5,6
20/7/19	10,06	0,0	291,4	134,3	636,9	89,8	570,8	31,5	2,1	2,0	4,5	321,2	0,3	44,3	5,9	33,7	0,5	0,7	0,3	0,0	0,2	0,9	18,8	0,0	4,1
23/7/19	20,60	0,0	125,2	204,0	811,8	420,5	540,9	42,6	3,1	3,0	7,9	454,0	0,5	35,5	15,5	545,2	1,7	2,2	0,7	0,1	1,0	1,9	28,4	0,3	21,3
26/7/19	11,89	0,0	21,9	145,8	1012,3	117,7	621,1	48,4	2,9	2,6	7,3	507,2	0,4	13,7	11,1	25,6	0,7	1,2	0,5	0,0	0,2	1,7	26,1	0,2	7,3
29/7/19	15,08	0,0	21,9	77,3	590,6	168,8	1386,7	41,7	2,0	2,3	7,1	387,7	0,3	0,0	4,7	0,0	0,5	1,0	0,3	0,0	0,0	0,6	14,6	0,0	4,2
1/8/19	20,63	0,0	406,7	203,2	1266,8	578,0	797,5	64,8	3,7	3,9	11,8	716,0	0,6	0,0	15,6	1394,4	1,0	1,9	0,7	0,1	3,6	2,4	33,2	0,2	93,7
4/8/19	10,68	0,0	909,7	228,4	772,4	182,0	653,6	43,2	2,3	3,3	8,6	511,5	0,3	0,0	4,9	0,0	0,6	1,4	0,3	0,0	0,0	0,8	21,6	0,0	4,5
7/8/19	23,57	0,0	1122,8	263,0	1313,3	478,8	1161,6	65,6	4,3	5,1	10,2	714,0	0,7	18,4	10,2	45,0	0,9	2,5	0,7	0,0	0,4	1,9	35,4	0,2	8,0
10/8/19	25,61	0,0	1113,9	279,9	1721,2	379,7	1135,7	73,7	4,5	4,6	11,4	696,2	0,7	5,9	12,4	52,8			0,6	0,0		1,3	51,9	0,8	5,2
13/8/19	21,00	0,0	1347,2	382,6	2333,2	444,7	1644,4	110,3	6,2	7,8	21,8	1097,7	1,2	9,6	15,8	87,7		1,6		0,0		3,3	63,5	0,4	10,0
16/8/19	26,57	0,0	989,9	142,9	1355,1	759,4	867,6	57,9	4,0	5,2	13,3	646,2	1,0	9,0	15,7	73,3	2,6			0,0		3,2	41,5	0,3	18,3
19/8/19	15,98	0,0	801,1	245,0	2429,5	457,1	1366,9	98,8	10,1	6,1	16,1	1179,7		8,3	15,4	21,1		4,3	1,5	0,0	105,600	5,3	70,2	0,6	13,9
25/8/19	18,76 20,38	0,0	970,1 1388.9	264,9	2248,7 1948,2	905,6	1368,6	101,9	6,5	7,6	18,9	1177,4 849,5	1,4	10,3	20,9	81,4 71,5		4,1 2,3	1,4	0,0	-	2,7	49,8 59,7	0,5	10,7
28/8/19	25,20				4129,2	358,7	1268,1 1600,7	86,7	6,0	5,9	35,6	1993,4		6,1	18,8	60,1				0,0		2,6 4,6	84,1	0,4	24,8
Charles and Desired	23,20	0,0	1131,4	303,1	4123,2	701,3	1000,7	130,0	11,0	10,5	33,0	2555,1	2,0	10,2	10,0	00,1	0,0	0,0	5,1	0,0	0,0	4,0	04,1	0,7	24,0
FECHA	PM2.5	Ве	Na	Mg	Al	К	Ca	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Со	Ni	Cu	Zn	As	Se	Мо	Ag	Cd	Sb	Ва	Hg	Pb
FECHA MONITOREO	μg/m3	μg	μg	μg	μg	μg	μg	μg	μg	μg	μg	μg	μg	μg	μg	μg	μв	μg	μg	μв	μg	μg	μg	μg	μg
MONITOREO 31/8/19	<mark>µg/m3</mark> 13,36	µg 0,0	μg 721,7	μ g 181,3	μ g 1668,0	µg 265,0	μg 1009,7	μg 64,7	μg 3,5	μg 5,5	μg 19,4	µg 836,3	μg 0,7	μg 7,3	µg 9,8	μg 121,0	µg 1,6	μg 2,2	μg 0,6	μg 0,0	μg 0,3	μg 1,6	µg 35,9	μg 0,2	μg 8,9
31/8/19 3/9/19	д <mark>д/m3</mark> 13,36 11,53	μg 0,0 0,0	μg 721,7 390,9	μg 181,3 165,4	µg 1668,0 1391,3	µg 265,0 305,6	μg 1009,7 1247,4	μg 64,7 67,5	μg 3,5 3,5	μg 5,5 6,4	μg 19,4 16,2	µg 836,3 906,9	μg 0,7 0,8	μg 7,3 10,9	μg 9,8 22,7	μg 121,0 154,7	µg 1,6 7,7	μg 2,2 1,6	μg 0,6 0,7	µg 0,0 0,0	µg 0,3 0,2	µg 1,6 2,6	μg 35,9 31,3	μg 0,2 0,1	μg 8,9 8,0
31/8/19 3/9/19 6/9/19	д <mark>g/m3</mark> 13,36 11,53 25,17	0,0 0,0 0,0	μg 721,7 390,9 21,9	μg 181,3 165,4 138,3	μg 1668,0 1391,3 1117,7	μg 265,0 305,6 660,2	μg 1009,7 1247,4 1017,6	μg 64,7 67,5 49,6	μg 3,5 3,5 4,9	µg 5,5 6,4 5,9	μg 19,4 16,2 16,8	ив 836,3 906,9 850,9	μg 0,7 0,8 1,0	μg 7,3 10,9 7,8	μg 9,8 22,7 21,2	μg 121,0 154,7 148,7	µg 1,6 7,7 7,6	μg 2,2 1,6 5,8	μg 0,6 0,7 0,9	0,0 0,0	μg 0,3 0,2 0,6	1,6 2,6 4,1	μg 35,9 31,3 50,9	μg 0,2 0,1 0,2	μg 8,9 8,0 18,7
31/8/19 3/9/19 6/9/19 9/9/19	μg/m3 13,36 11,53 25,17 17,97	0,0 0,0 0,0 0,0	μg 721,7 390,9 21,9 32,5	µg 181,3 165,4 138,3 189,5	μg 1668,0 1391,3 1117,7 1017,7	μg 265,0 305,6 660,2 690,5	μg 1009,7 1247,4 1017,6 1027,1	μg 64,7 67,5 49,6 45,6	μg 3,5 3,5 4,9 4,0	μg 5,5 6,4 5,9 4,8	μg 19,4 16,2 16,8 15,1	μg 836,3 906,9 850,9 856,1	μg 0,7 0,8 1,0 0,7	μg 7,3 10,9 7,8 9,8	μg 9,8 22,7 21,2 6,6	μg 121,0 154,7 148,7 96,6	µg 1,6 7,7 7,6 2,0	μg 2,2 1,6 5,8 2,3	μg 0,6 0,7 0,9 0,6	μg 0,0 0,0 0,0 0,6	0,3 0,2 0,6 0,4	1,6 2,6 4,1 1,7	μg 35,9 31,3 50,9 30,3	μg 0,2 0,1 0,2 0,6	μg 8,9 8,0 18,7 8,7
31/8/19 3/9/19 6/9/19 9/9/19 12/9/19	μg/m3 13,36 11,53 25,17 17,97 10,97	μg 0,0 0,0 0,0 0,0	μg 721,7 390,9 21,9 32,5 21,9	μg 181,3 165,4 138,3 189,5 79,6	µg 1668,0 1391,3 1117,7 1017,7 643,4	265,0 305,6 660,2 690,5 51,8	μg 1009,7 1247,4 1017,6 1027,1 385,3	μg 64,7 67,5 49,6 45,6 18,0	μg 3,5 3,5 4,9 4,0 2,2	5,5 6,4 5,9 4,8 5,8	μg 19,4 16,2 16,8 15,1 8,0	μg 836,3 906,9 850,9 856,1 432,0	μg 0,7 0,8 1,0 0,7 0,6	μg 7,3 10,9 7,8 9,8 64,9	μg 9,8 22,7 21,2 6,6 0,7	121,0 154,7 148,7 96,6 94,9	1,6 7,7 7,6 2,0 1,4	μg 2,2 1,6 5,8 2,3 2,8	μg 0,6 0,7 0,9 0,6 1,0	μg 0,0 0,0 0,0 0,0 0,6 0,1	0,3 0,2 0,6 0,4 0,5	μg 1,6 2,6 4,1 1,7	μg 35,9 31,3 50,9 30,3 15,1	μg 0,2 0,1 0,2 0,6 0,2	μg 8,9 8,0 18,7 8,7
31/8/19 3/9/19 6/9/19 9/9/19 12/9/19 15/9/19	μg/m3 13,36 11,53 25,17 17,97	0,0 0,0 0,0 0,0	μg 721,7 390,9 21,9 32,5 21,9 21,9	µg 181,3 165,4 138,3 189,5	μg 1668,0 1391,3 1117,7 1017,7 643,4 653,9	265,0 305,6 660,2 690,5 51,8 284,1	μg 1009,7 1247,4 1017,6 1027,1 385,3 870,9	μg 64,7 67,5 49,6 45,6 18,0 28,2	μg 3,5 3,5 4,9 4,0 2,2 3,3	5,5 6,4 5,9 4,8 5,8 2,1	19,4 16,2 16,8 15,1 8,0 16,2	µg 836,3 906,9 850,9 856,1 432,0 384,9	μg 0,7 0,8 1,0 0,7	7,3 10,9 7,8 9,8 64,9 7,4	μg 9,8 22,7 21,2 6,6	μg 121,0 154,7 148,7 96,6	µg 1,6 7,7 7,6 2,0	μg 2,2 1,6 5,8 2,3	μg 0,6 0,7 0,9 0,6 1,0	0,0 0,0 0,0 0,6 0,1 0,0	0,3 0,2 0,6 0,4 0,5	μg 1,6 2,6 4,1 1,7 1,7	μg 35,9 31,3 50,9 30,3 15,1 22,6	0,2 0,1 0,2 0,6 0,2 0,4	нв 8,9 8,0 18,7 8,7 8,2 9,0
31/8/19 3/9/19 6/9/19 9/9/19 12/9/19	13,36 11,53 25,17 17,97 10,97 11,36	μg 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0	μg 721,7 390,9 21,9 32,5 21,9	181,3 165,4 138,3 189,5 79,6 104,5	µg 1668,0 1391,3 1117,7 1017,7 643,4	265,0 305,6 660,2 690,5 51,8	μg 1009,7 1247,4 1017,6 1027,1 385,3	μg 64,7 67,5 49,6 45,6 18,0	μg 3,5 3,5 4,9 4,0 2,2	5,5 6,4 5,9 4,8 5,8	μg 19,4 16,2 16,8 15,1 8,0	μg 836,3 906,9 850,9 856,1 432,0	μg 0,7 0,8 1,0 0,7 0,6 0,7	μg 7,3 10,9 7,8 9,8 64,9	9,8 22,7 21,2 6,6 0,7 7,5	121,0 154,7 148,7 96,6 94,9 247,9	1,6 7,7 7,6 2,0 1,4 3,7 5,5	μg 2,2 1,6 5,8 2,3 2,8 2,6	μg 0,6 0,7 0,9 0,6 1,0 0,5	0,0 0,0 0,0 0,6 0,1 0,0	0,3 0,2 0,6 0,4 0,5 0,4 2,0	μg 1,6 2,6 4,1 1,7	μg 35,9 31,3 50,9 30,3 15,1	μg 0,2 0,1 0,2 0,6 0,2	μg 8,9 8,0 18,7 8,7
31/8/19 3/9/19 6/9/19 9/9/19 12/9/19 15/9/19 18/9/19	μg/m3 13,36 11,53 25,17 17,97 10,97 11,36 24,33	0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0	μg 721,7 390,9 21,9 32,5 21,9 21,9 19,6	ив 181,3 165,4 138,3 189,5 79,6 104,5 64,6	ре 1668,0 1391,3 1117,7 1017,7 643,4 653,9 853,6	265,0 305,6 660,2 690,5 51,8 284,1 55,4	μg 1009,7 1247,4 1017,6 1027,1 385,3 870,9 455,5	μg 64,7 67,5 49,6 45,6 18,0 28,2 17,9	μg 3,5 3,5 4,9 4,0 2,2 3,3 2,9	5,5 6,4 5,9 4,8 5,8 2,1 3,4	19,4 16,2 16,8 15,1 8,0 16,2 13,0	нв 836,3 906,9 850,9 856,1 432,0 384,9 372,0	0,7 0,8 1,0 0,7 0,6 0,7 0,8	7,3 10,9 7,8 9,8 64,9 7,4 4,2	9,8 22,7 21,2 6,6 0,7 7,5 27,6	рв 121,0 154,7 148,7 96,6 94,9 247,9 2910,1	1,6 7,7 7,6 2,0 1,4 3,7 5,5	μg 2,2 1,6 5,8 2,3 2,8 2,6 3,5	μg 0,6 0,7 0,9 0,6 1,0 0,5 1,3	0,0 0,0 0,0 0,6 0,1 0,0	0,3 0,2 0,6 0,4 0,5 0,4 2,0	μg 1,6 2,6 4,1 1,7 1,7 1,1 3,9	μg 35,9 31,3 50,9 30,3 15,1 22,6 18,1	μg 0,2 0,1 0,2 0,6 0,2 0,4 0,3	же 8,9 8,0 18,7 8,7 8,2 9,0 59,9
31/8/19 3/9/19 6/9/19 9/9/19 12/9/19 15/9/19 18/9/19 21/9/19	μg/m3 13,36 11,53 25,17 17,97 10,97 11,36 24,33 20,06	0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0	нв 721,7 390,9 21,9 32,5 21,9 21,9 19,6 737,7	181,3 165,4 138,3 189,5 79,6 104,5 64,6 140,1	1668,0 1391,3 1117,7 1017,7 643,4 653,9 853,6 1059,9	265,0 305,6 660,2 690,5 51,8 284,1 55,4 755,1	μg 1009,7 1247,4 1017,6 1027,1 385,3 870,9 455,5 886,8	μg 64,7 67,5 49,6 45,6 18,0 28,2 17,9 47,0	μg 3,5 3,5 4,9 4,0 2,2 3,3 2,9 4,3	5,5 6,4 5,9 4,8 5,8 2,1 3,4 4,1	19,4 16,2 16,8 15,1 8,0 16,2 13,0 13,6	рв 836,3 906,9 850,9 856,1 432,0 384,9 372,0 500,3	μg 0,7 0,8 1,0 0,7 0,6 0,7 0,8 1,2	7,3 10,9 7,8 9,8 64,9 7,4 4,2 7,4	9,8 22,7 21,2 6,6 0,7 7,5 27,6 5,9	μg 121,0 154,7 148,7 96,6 94,9 247,9 2910,1 222,8	дв 1,6 7,7 7,6 2,0 1,4 3,7 5,5 5,0 3,6	μg 2,2 1,6 5,8 2,3 2,8 2,6 3,5 3,2	μg 0,6 0,7 0,9 0,6 1,0 0,5 1,3 1,0	ДВ 0,0 0,0 0,0 0,6 0,1 0,0 0,7	0,3 0,2 0,6 0,4 0,5 0,4 2,0 0,5	μg 1,6 2,6 4,1 1,7 1,7 1,1 3,9 3,7	μg 35,9 31,3 50,9 30,3 15,1 22,6 18,1 32,2	μg 0,2 0,1 0,2 0,6 0,2 0,4 0,3 0,5	μg 8,9 8,0 18,7 8,7 8,2 9,0 59,9 14,7
31/8/19 3/9/19 6/9/19 9/9/19 12/9/19 15/9/19 18/9/19 21/9/19 24/9/19	13,36 11,53 25,17 17,97 10,97 11,36 24,33 20,06 29,00	0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0	ре 721,7 390,9 21,9 32,5 21,9 21,9 19,6 737,7 21,9	рв 181,3 165,4 138,3 189,5 79,6 104,5 64,6 140,1 77,0	1668,0 1391,3 1117,7 1017,7 643,4 653,9 853,6 1059,9 882,2	μg 265,0 305,6 660,2 690,5 51,8 284,1 55,4 755,1 173,6	рв 1009,7 1247,4 1017,6 1027,1 385,3 870,9 455,5 886,8 388,3	μg 64,7 67,5 49,6 45,6 18,0 28,2 17,9 47,0 27,5	μg 3,5 3,5 4,9 4,0 2,2 3,3 2,9 4,3 3,2	μg 5,5 6,4 5,9 4,8 5,8 2,1 3,4 4,1 2,6	19,4 16,2 16,8 15,1 8,0 16,2 13,0 13,6 9,1	рв 836,3 906,9 850,9 856,1 432,0 384,9 372,0 500,3 405,5	μg 0,7 0,8 1,0 0,7 0,6 0,7 0,8 1,2	7,3 10,9 7,8 9,8 64,9 7,4 4,2 7,4 3,2	9,8 22,7 21,2 6,6 0,7 7,5 27,6 5,9 8,9	μg 121,0 154,7 148,7 96,6 94,9 247,9 2910,1 222,8 74,3	дв 1,6 7,7 7,6 2,0 1,4 3,7 5,5 5,0 3,6	μg 2,2 1,6 5,8 2,3 2,8 2,6 3,5 3,5 3,5	μg 0,6 0,7 0,9 0,6 1,0 0,5 1,3 1,0	рия 0,0 0,0 0,0 0,6 0,1 0,0 0,7 0,1 0,2 0,3	0,3 0,2 0,6 0,4 0,5 0,4 2,0 0,5	1,6 2,6 4,1 1,7 1,7 1,1 3,9 3,7 2,6	μg 35,9 31,3 50,9 30,3 15,1 22,6 18,1 32,2 24,7	μg 0,2 0,1 0,2 0,6 0,2 0,4 0,3 0,5 0,5	μg 8,9 8,0 18,7 8,7 8,2 9,0 59,9 14,7 11,1
31/8/19 3/9/19 6/9/19 9/9/19 12/9/19 15/9/19 18/9/19 21/9/19 24/9/19 27/9/19	13,36 11,53 25,17 17,97 10,97 11,36 24,33 20,06 29,00 13,33	0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0	ру 721,7 390,9 21,9 32,5 21,9 21,9 19,6 737,7 21,9	рв 181,3 165,4 138,3 189,5 79,6 104,5 64,6 140,1 77,0 80,5	ру 1668,0 1391,3 1117,7 1017,7 643,4 653,9 853,6 1059,9 882,2 561,9	μg 265,0 305,6 660,2 690,5 51,8 284,1 55,4 755,1 173,6 504,2	рев 1009,7 1247,4 1017,6 1027,1 385,3 870,9 455,5 886,8 388,3 503,1	μg 64,7 67,5 49,6 45,6 18,0 28,2 17,9 47,0 27,5 20,5	3,5 3,5 4,9 4,0 2,2 3,3 2,9 4,3 3,2 2,4	5,5 6,4 5,9 4,8 5,8 2,1 3,4 4,1 2,6 2,8	19,4 16,2 16,8 15,1 8,0 16,2 13,0 13,6 9,1 9,6	рв 836,3 906,9 850,9 856,1 432,0 384,9 372,0 500,3 405,5 386,3	0,7 0,8 1,0 0,7 0,6 0,7 0,8 1,2 1,1	7,3 10,9 7,8 9,8 64,9 7,4 4,2 7,4 3,2	9,8 22,7 21,2 6,6 0,7 7,5 27,6 5,9 8,9 18,5	реверия 121,0 154,7 148,7 96,6 94,9 247,9 2910,1 222,8 74,3 1850,2	1,6 7,7 7,6 2,0 1,4 3,7 5,5 5,0 3,6 1,8	μg 2,2 1,6 5,8 2,3 2,8 2,6 3,5 3,2 3,5 1,8	ив 0,6 0,7 0,9 0,6 1,0 0,5 1,3 1,0 0,8	μg 0,0 0,0 0,0 0,6 0,1 0,0 0,7 0,1 0,2 0,3	0,3 0,2 0,6 0,4 0,5 0,4 2,0 0,5 0,9	1,6 2,6 4,1 1,7 1,7 1,1 3,9 3,7 2,6	рв 35,9 31,3 50,9 30,3 15,1 22,6 18,1 32,2 24,7 27,0	μg 0,2 0,1 0,2 0,6 0,2 0,4 0,3 0,5 0,5 0,1	8,9 8,0 18,7 8,7 8,2 9,0 59,9 14,7 11,1 40,5
31/8/19 3/9/19 6/9/19 9/9/19 12/9/19 15/9/19 18/9/19 21/9/19 24/9/19 27/9/19 30/9/19 3/10/19 6/10/19	ug/m3 13,36 11,53 25,17 17,97 10,97 11,36 24,33 20,06 29,00 13,33 16,97	84 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0	μg 721,7 390,9 21,9 32,5 21,9 21,9 19,6 737,7 21,9 21,9	нв 181,3 165,4 138,3 189,5 79,6 104,5 64,6 140,1 77,0 80,5 73,0	1668,0 1391,3 1117,7 1017,7 643,4 653,9 853,6 1059,9 882,2 561,9 577,6	265,0 305,6 660,2 690,5 51,8 284,1 55,4 755,1 173,6 504,2 205,3	μg 1009,7 1247,4 1017,6 1027,1 385,3 870,9 455,5 886,8 388,3 503,1 647,0	μg 64,7 67,5 49,6 45,6 18,0 28,2 17,9 47,0 27,5 20,5 25,1	1,5 3,5 4,9 4,0 2,2 3,3 2,9 4,3 3,2 2,4 3,4	5,5 6,4 5,9 4,8 5,8 2,1 3,4 4,1 2,6 2,8 2,4	19,4 16,2 16,8 15,1 8,0 16,2 13,0 13,6 9,1 9,6 9,4	#8 836,3 906,9 850,9 856,1 432,0 384,9 372,0 500,3 405,5 386,3 376,9	μg 0,7 0,8 1,0 0,7 0,6 0,7 0,8 1,2 1,1 0,4	7,3 10,9 7,8 9,8 64,9 7,4 4,2 7,4 3,2 1,2	9,8 22,7 21,2 6,6 0,7 7,5 27,6 5,9 8,9 18,5 46,4	121,0 154,7 148,7 96,6 94,9 247,9 2910,1 222,8 74,3 1850,2 343,7 348,3 28,5	1,6 7,7 7,6 2,0 1,4 3,7 5,5 5,0 3,6 1,8 3,7 4,4 2,7	μg 2,2 1,6 5,8 2,3 2,6 3,5 3,2 3,5 1,8 5,1 4,7	μg 0,6 0,7 0,9 0,6 1,0 0,5 1,3 1,0 0,8 0,8 1,4 0,6	µв 0,0 0,0 0,0 0,0 0,1 0,0 0,7 0,1 0,2 0,3 0,7 0,2	0,3 0,2 0,6 0,4 0,5 0,4 2,0 0,5 0,9 7,7 2,0 1,5	1,6 2,6 4,1 1,7 1,7 1,1 3,9 3,7 2,6 2,4 5,2	рв 35,9 31,3 50,9 30,3 15,1 22,6 18,1 32,2 24,7 27,0 22,5	μg 0,2 0,1 0,2 0,6 0,2 0,4 0,3 0,5 0,5 0,1 1,3	нв 8,9 8,0 18,7 8,7 8,2 9,0 59,9 14,7 11,1 40,5 50,4 33,8 11,5
31/8/19 3/9/19 6/9/19 9/9/19 12/9/19 15/9/19 18/9/19 21/9/19 24/9/19 27/9/19 30/9/19 3/10/19 6/10/19 9/10/19	13,36 11,53 25,17 17,97 10,97 11,36 24,33 20,06 29,00 13,33 16,97 21,49 10,63 20,05	0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0	рек 721,7 390,9 21,9 32,5 21,9 21,9 19,6 737,7 21,9 21,9 193,9 21,9 405,0	нв 181,3 165,4 138,3 189,5 79,6 104,5 64,6 140,1 77,0 80,5 73,0 188,8 108,8 247,4	нв 1668,0 1391,3 1117,7 1017,7 643,4 653,9 853,6 1059,9 882,2 561,9 577,6 1326,0 779,3 1391,4	265,0 305,6 660,2 690,5 51,8 284,1 55,4 755,1 173,6 504,2 205,3 725,7 163,9	μg 1009,7 1247,4 1017,6 1027,1 385,3 870,9 455,5 886,8 388,3 503,1 647,0 1314,0 728,7	μg 64,7 67,5 49,6 45,6 18,0 28,2 17,9 47,0 27,5 20,5 25,1 55,3	3,5 3,5 4,9 4,0 2,2 3,3 2,9 4,3 3,2 2,4 3,4 6,4	μg 5,5 6,4 5,9 4,8 5,8 2,1 3,4 4,1 2,6 2,8 2,4 6,5	19,4 16,2 16,8 15,1 8,0 16,2 13,0 13,6 9,1 9,6 9,4 18,1 9,0 22,5	#8 836,3 906,9 850,9 856,1 432,0 384,9 372,0 500,3 405,5 386,3 376,9 940,2 479,3 1078,4	0,7 0,8 1,0 0,7 0,6 0,7 0,8 1,2 1,1 0,4 0,8 2,4 0,7 1,1	7,3 10,9 7,8 9,8 64,9 7,4 4,2 7,4 3,2 1,2 4,3 6,9 3,4 7,1	9,8 22,7 21,2 6,6 0,7 7,5 27,6 5,9 8,9 18,5 46,4 21,3 15,3 37,9	121,0 154,7 148,7 96,6 94,9 247,9 2910,1 222,8 74,3 1850,2 343,7 348,3 28,5 1743,4	1,6 7,7 7,6 2,0 1,4 3,7 5,5 5,0 3,6 1,8 3,7 4,4 2,7 5,1	μg 2,2 1,6 5,8 2,3 2,8 2,6 3,5 3,2 3,5 1,8 5,1 4,7 3,4 6,1	0,6 0,7 0,9 0,6 1,0 0,5 1,3 0,8 0,8 0,8 1,4 0,6 1,4	рв 0,0 0,0 0,0 0,6 0,1 0,2 0,3 0,7 0,2 0,2 0,2	0,3 0,2 0,6 0,4 0,5 0,4 2,0 0,5 0,9 7,7 2,0 1,5 0,4 2,8	1,6 2,6 4,1 1,7 1,7 1,1 3,9 3,7 2,6 2,4 5,2	35,9 31,3 50,9 30,3 15,1 22,6 18,1 32,2 24,7 27,0 22,5 45,4 27,5 72,4	0,2 0,1 0,2 0,6 0,2 0,4 0,3 0,5 0,5 0,1 1,3 0,4 0,4	нв 8,9 8,0 18,7 8,7 8,2 9,0 59,9 14,7 11,1 40,5 50,4 33,8 11,5 44,1
31/8/19 3/9/19 6/9/19 9/9/19 12/9/19 15/9/19 21/9/19 24/9/19 27/9/19 30/9/19 3/10/19 6/10/19 9/10/19	13,36 11,53 25,17 17,97 10,97 11,36 24,33 20,06 29,00 13,33 16,97 21,49 10,63 20,05 22,92	0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0	μg 721,7 390,9 21,9 32,5 21,9 19,6 737,7 21,9 21,9 21,9 21,9 405,0 382,5	181,3 165,4 138,3 189,5 79,6 104,5 64,6 140,1 77,0 80,5 73,0 188,8 108,8 247,4	1668,0 1391,3 1117,7 1017,7 643,4 653,9 853,6 1059,9 882,2 561,9 577,6 1326,0 779,3 1391,4 707,5	265,0 305,6 660,2 690,5 51,8 284,1 55,4 755,1 173,6 504,2 205,3 725,7 163,9 1279,7	μg 1009,7 1247,4 1017,6 1027,1 385,3 870,9 455,5 886,8 388,3 503,1 647,0 1314,0 728,7 878,7 131,9	45,6 18,0 28,2 17,9 47,0 27,5 20,5 25,1 55,3 30,7 65,9 32,7	3,5 3,5 4,9 4,0 2,2 3,3 2,9 4,3 3,2 2,4 3,4 6,4 3,7 6,5 3,5	5,5 6,4 5,9 4,8 5,8 2,1 3,4 4,1 2,6 2,8 2,4 6,5 3,0 7,2	19,4 16,2 16,8 15,1 8,0 16,2 13,0 9,1 9,6 9,4 18,1 9,0 22,5 7,4	нв 836,3 906,9 850,9 856,1 432,0 384,9 372,0 500,3 405,5 386,3 376,9 940,2 479,3 1078,4	0,7 0,8 1,0 0,7 0,6 0,7 0,8 1,2 1,1 0,4 0,8 2,4 0,7 1,1	7,3 10,9 7,8 9,8 64,9 7,4 4,2 7,4 3,2 1,2 4,3 6,9 3,4 7,1	9,8 22,7 21,2 6,6 0,7 7,5 27,6 5,9 8,9 18,5 46,4 21,3 15,3 37,9 15,5	121,0 154,7 148,7 96,6 94,9 247,9 2910,1 222,8 74,3 1850,2 343,7 348,3 28,5 1743,4 69,0	1,6 7,7 7,6 2,0 1,4 3,7 5,5 5,0 3,6 1,8 3,7 4,4 2,7 5,1 2,6	2,2 1,6 5,8 2,3 2,8 2,6 3,5 3,2 3,5 1,8 5,1 4,7 3,4 6,1 4,5	0,6 0,7 0,9 0,6 1,0 0,5 1,3 1,0 0,8 0,8 0,8 1,4 0,6 1,4	рв 0,0 0,0 0,6 0,1 0,0 0,7 0,1 0,2 0,3 0,7 0,2 0,2 0,2 0,2	0,3 0,2 0,6 0,4 0,5 0,4 2,0 0,5 0,9 7,7 2,0 1,5 0,4 2,8 0,6	1,6 2,6 4,1 1,7 1,7 1,1 3,9 3,7 2,6 2,4 5,2 4,6 3,7 3,9 3,4	μg 35,9 31,3 50,9 30,3 15,1 22,6 18,1 32,2 24,7 27,0 22,5 45,4 27,5 72,4 24,8	0,2 0,1 0,2 0,6 0,2 0,4 0,3 0,5 0,5 0,1 1,3 0,4 0,4 0,2	ив 8,9 8,0 18,7 8,7 8,2 9,0 59,9 14,7 11,1 40,5 50,4 33,8 11,5 44,1 36,2
31/8/19 3/9/19 6/9/19 9/9/19 12/9/19 15/9/19 21/9/19 24/9/19 27/9/19 30/9/19 3/10/19 6/10/19 9/10/19 15/10/19	13,36 11,53 25,17 17,97 10,97 11,36 24,33 20,06 29,00 13,33 16,97 21,49 10,63 20,05 22,92 15,44	0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0	721,7 390,9 21,9 32,5 21,9 19,6 737,7 21,9 21,9 21,9 21,9 405,0 382,5 612,6	181,3 165,4 138,3 189,5 79,6 104,5 64,6 140,1 77,0 80,5 73,0 188,8 108,8 247,4 125,4 184,8	1668,0 1391,3 1117,7 1017,7 643,4 653,9 853,6 1059,9 882,2 561,9 577,6 1326,0 779,3 1391,4 707,5 1017,9	265,0 305,6 660,2 690,5 51,8 284,1 55,4 755,1 173,6 504,2 205,3 725,7 163,9 1279,7 765,9 1162,4	1009,7 1247,4 1017,6 1027,1 385,3 870,9 455,5 886,8 388,3 503,1 647,0 1314,0 728,7 878,7 131,9	H8 64,7 67,5 49,6 45,6 18,0 28,2 17,9 47,0 27,5 20,5 25,1 55,3 30,7 65,9 32,7 44,9	3,5 3,5 4,9 4,0 2,2 3,3 2,9 4,3 3,2 2,4 3,4 6,4 3,7 6,5 3,5 4,2	5,5 6,4 5,9 4,8 5,8 2,1 3,4 4,1 2,6 2,8 2,4 6,5 3,0 7,2 2,6 4,5	19,4 16,2 16,8 15,1 8,0 16,2 13,0 13,6 9,1 9,6 9,4 18,1 9,0 22,5 7,4 12,6	#8 836,3 906,9 850,9 856,1 432,0 384,9 372,0 500,3 405,5 386,3 376,9 940,2 479,3 1078,4 501,6 635,2	0,7 0,8 1,0 0,7 0,6 0,7 0,8 1,2 1,1 0,4 0,8 2,4 0,7 1,1 1,0	7,3 10,9 7,8 9,8 64,9 7,4 4,2 7,4 3,2 1,2 4,3 6,9 3,4 7,1 4,8 10,0	9,8 22,7 21,2 6,6 0,7 7,5 27,6 5,9 8,9 18,5 46,4 21,3 15,3 37,9 15,5	121,0 154,7 148,7 96,6 94,9 247,9 2910,1 222,8 74,3 1850,2 343,7 348,3 28,5 1743,4 69,0 676,3	1,6 7,7 7,6 2,0 1,4 3,7 5,5 5,0 3,6 1,8 3,7 4,4 2,7 5,1 2,6 2,1	2,2 1,6 5,8 2,3 2,8 2,6 3,5 3,2 3,5 1,8 5,1 4,7 3,4 6,1 4,5 3,3	0,6 0,7 0,9 0,6 1,0 0,5 1,3 1,0 0,8 0,8 1,4 0,6 1,4 0,9	0,0 0,0 0,0 0,6 0,1 0,0 0,7 0,1 0,2 0,3 0,7 0,2 0,2 0,2 0,1	0,3 0,2 0,6 0,4 0,5 0,4 2,0 0,5 0,9 7,7 2,0 1,5 0,4 2,8 0,6 0,9	1,6 2,6 4,1 1,7 1,7 1,1 3,9 3,7 2,6 2,4 5,2 4,6 3,7 3,9 3,4 3,3	35,9 31,3 50,9 30,3 15,1 22,6 18,1 32,2 24,7 27,0 22,5 45,4 27,5 72,4 24,8 57,0	0,2 0,1 0,2 0,6 0,2 0,4 0,3 0,5 0,5 0,1 1,3 0,4 0,4 0,2 0,5 0,1	8,9 8,0 18,7 8,7 8,2 9,0 59,9 14,7 11,1 40,5 50,4 33,8 11,5 44,1 36,2 27,6
31/8/19 3/9/19 6/9/19 9/9/19 12/9/19 15/9/19 21/9/19 24/9/19 27/9/19 30/9/19 3/10/19 6/10/19 9/10/19 15/10/19 18/10/19	13,36 11,53 25,17 17,97 10,97 11,36 24,33 20,06 29,00 13,33 16,97 21,49 10,63 20,05 22,92 15,44 20,25	94 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,	721,7 390,9 21,9 32,5 21,9 19,6 737,7 21,9 21,9 21,9 405,0 382,5 612,6 369,6	181,3 165,4 138,3 189,5 79,6 104,5 64,6 140,1 77,0 80,5 73,0 188,8 108,8 247,4 125,4 184,8 200,5	1117,7 1017,7 643,4 653,9 853,6 1059,9 882,2 561,9 577,6 1326,0 779,3 1391,4 707,5 1017,9 1130,7	µ8 265,0 305,6 660,2 690,5 51,8 284,1 755,1 173,6 504,2 205,3 725,7 163,9 1279,7 765,9 1162,4 1076,4	1009,7 1247,4 1017,6 1027,1 385,3 870,9 455,5 886,8 388,3 503,1 647,0 1314,0 728,7 878,7 131,9 1085,2 1004,9	49,6 45,6 45,6 18,0 28,2 17,9 47,0 27,5 20,5 25,1 55,3 30,7 65,9 32,7 44,9 54,1	3,5 3,5 4,9 4,0 2,2 3,3 3,2 2,4 4,3 3,7 6,4 3,7 6,5 3,5 4,2 5,7	5,5 6,4 5,9 4,8 5,8 2,1 3,4 4,1 2,6 2,8 2,4 6,5 3,0 7,2 2,6 4,5 5,3	19,4 16,2 16,8 15,1 8,0 13,6 9,1 9,6 9,4 18,1 9,0 22,5 7,4 12,6 15,1	#8 836,3 906,9 850,9 856,1 432,0 384,9 372,0 500,3 405,5 386,3 376,9 940,2 479,3 1078,4 501,6 635,2 797,8	0,7 0,8 1,0 0,7 0,6 0,7 0,8 1,2 1,1 0,4 0,7 1,1 1,0 0,7	7,3 10,9 7,8 9,8 64,9 7,4 4,2 7,4 3,2 1,2 4,3 6,9 3,4 7,1 4,8 10,0 6,8	9,8 22,7 21,2 6,6 0,7 7,5 27,6 5,9 8,9 18,5 46,4 21,3 15,3 37,9 15,5 191,0 40,7	121,0 154,7 148,7 96,6 94,9 2247,9 2910,1 222,8 74,3 343,7 348,3 28,5 1743,4 69,0 676,3 1403,6	1,6 7,7 7,6 2,0 1,4 3,7 5,5 5,0 3,6 1,8 3,7 4,4 2,7 5,1 2,6 2,1 3,5	2,2 1,6 5,8 2,3 2,6 3,5 3,5 1,8 5,1 4,7 3,4 6,1 4,5 3,3 5,1	0,6 0,7 0,9 0,6 1,0 0,5 1,3 0,8 0,8 0,8 1,4 0,6 1,4 0,9 1,0	0,0 0,0 0,0 0,6 0,1 0,7 0,1 0,2 0,3 0,7 0,2 0,2 0,1 0,6 0,0	0,3 0,2 0,6 0,4 0,5 0,4 2,0 0,5 0,9 7,7 2,0 1,5 0,4 2,8 0,6 0,9 2,3	1,6 2,6 4,1 1,7 1,7 1,1 3,9 3,7 2,6 2,4 5,2 4,6 3,7 3,9 3,4 3,3 3,9	#8 35,9 31,3 50,9 30,3 15,1 22,6 18,1 32,2 24,7 27,0 22,5 45,4 27,5 72,4 24,8 57,0 43,0	0,2 0,1 0,2 0,6 0,2 0,4 0,3 0,5 0,5 0,1 1,3 0,4 0,4 0,2 0,5 0,1	8,9 8,0 18,7 8,7 8,2 9,0 59,9 14,7 11,1 40,5 50,4 33,8 11,5 44,1 36,2 27,6 48,4
31/8/19 3/9/19 6/9/19 9/9/19 12/9/19 15/9/19 21/9/19 24/9/19 3/10/19 6/10/19 9/10/19 15/10/19 18/10/19 18/10/19	13,36 11,53 25,17 17,97 10,97 11,36 24,33 20,06 29,00 13,33 16,97 21,49 10,63 20,05 22,92 15,44 20,25 28,63	0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0	721,7 390,9 21,9 32,5 21,9 19,6 737,7 21,9 21,9 21,9 405,0 382,5 612,6 369,6 430,2	181,3 165,4 138,3 189,5 79,6 104,5 64,6 140,1 77,0 80,5 73,0 188,8 247,4 125,4 184,8 200,5 136,0	NB 1668,0 1391,3 1117,7 1017,7 643,4 653,9 853,6 1059,9 882,2 561,9 577,6 1326,0 779,3 1391,4 707,5 1017,9 1130,7 867,7	HE 265,0 305,6 660,2 690,5 51,8 284,1 173,6 504,2 205,3 725,7 163,9 1162,4 1076,4 958,6	HE 1009,7 1247,4 1017,6 1027,1 385,3 870,9 455,5 886,8 388,3 503,1 647,0 1314,0 728,7 878,7 131,9 1085,2 1004,9 130,1	HE 64,7 67,5 49,6 45,6 18,0 28,2 17,9 47,0 27,5 20,5 25,1 55,3 30,7 65,9 32,7 44,9 54,1 39,3	3,5 4,9 4,0 2,2 3,3 2,9 4,3 3,2 2,4 3,4 6,4 3,7 6,5 3,5 4,2 5,7 4,5	5,5 6,4 5,9 4,8 5,8 2,1 3,4 4,1 2,6 2,8 2,4 6,5 3,0 7,2 2,6 4,5 5,3 4,9	19,4 16,2 16,8 15,1 8,0 16,2 13,0 13,6 9,1 9,6 9,4 18,1 9,0 22,5 7,4 12,6 15,1 17,6	#8 836,3 906,9 850,9 856,1 432,0 500,3 384,9 372,0 500,3 376,9 940,2 479,3 1078,4,475 501,6 635,2 797,8 642,7	0,7 0,8 1,0 0,7 0,6 0,7 0,8 1,2 1,1 0,4 0,8 2,4 0,7 1,1 1,0 0,7 0,9	7,3 10,9 7,8 9,8 64,9 7,4 4,2 7,4 3,2 1,2 4,3 6,9 3,4 7,1 4,8 10,0 6,8 3,9	9,8 22,7 21,2 6,6 0,7 7,5 27,6 5,9 8,9 18,5 46,4 21,3 37,9 15,5 191,0 40,7 26,1	121,0 154,7 148,7 96,6 94,9 247,9 2910,1 222,8 74,3 1850,2 343,7 348,3 28,5 1743,4 69,0 676,3 1403,6 56,3	1,6 7,7 7,6 2,0 1,4 3,7 5,5 5,0 3,6 1,8 3,7 4,4 2,7 5,1 2,6 2,1 3,5 6,7	2,2 1,6 5,8 2,3 2,8 2,6 3,5 3,2 3,5 1,8 5,1 4,7 3,4 6,1 4,5 3,3 5,1 5,7	0,6 0,7 0,9 0,6 1,0 0,5 1,3 1,0 0,8 0,8 1,4 0,6 1,4 0,9 1,0 1,4 1,3	0,0 0,0 0,0 0,0 0,1 0,0 0,7 0,1 0,2 0,3 0,7 0,2 0,2 0,1 0,6 0,2 3,8	0,3 0,2 0,6 0,4 0,5 0,4 2,0 0,5 0,9 7,7 2,0 1,5 0,4 2,8 0,6 0,9 2,3 2,1	1,6 2,6 4,1 1,7 1,7 1,1 3,9 3,7 2,6 2,4 4,6 3,7 3,9 3,4 3,3 3,9 5,3	#8 35,9 31,3 50,9 30,3 15,1 22,6 18,1 32,2 24,7 27,0 22,5 45,4 27,5 72,4 24,8 57,0 43,0 28,2	0,2 0,6 0,2 0,4 0,3 0,5 0,5 0,1 1,3 0,4 0,2 0,5 0,1 0,2	8,9 8,0 18,7 8,7 8,2 9,0 59,9 14,7 11,1 40,5 50,4 33,8 11,5 44,1 36,2 27,6 48,4 23,3
31/8/19 3/9/19 6/9/19 9/9/19 12/9/19 15/9/19 21/9/19 27/9/19 3/10/19 6/10/19 9/10/19 15/10/19 18/10/19 24/10/19	13,36 11,53 25,17 17,97 10,97 11,36 24,33 20,06 29,00 13,33 16,97 21,49 10,63 20,05 22,92 15,44 20,25 28,63 28,72	0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0	721,7 390,9 21,9 32,5 21,9 21,9 19,6 737,7 21,9 21,9 21,9 405,0 382,5 612,6 369,6 430,2 612,1	181,3 165,4 138,3 189,5 79,6 104,5 64,6 140,1 77,0 80,5 73,0 188,8 247,4 125,4 184,8 200,5 136,0 204,1	NE 1668,0 1391,3 1117,7 1017,7 643,4 653,9 853,6 1059,9 882,2 561,9 577,6 1326,0 779,3 1391,4 707,5 1017,9 1130,7 867,7 1255,2	H8 265,0 305,6 660,2 690,5 51,8 284,1 173,6 504,2 205,3 725,7 163,9 1162,4 1076,4 958,6 926,1	HE 1009,7 1247,4 1017,6 1027,1 385,3 870,9 455,5 886,8 388,3 503,1 647,0 1314,0 728,7 311,9 1085,2 1004,9 130,1 411,8	H8 64,7 67,5 49,6 45,6 18,0 28,2 17,9 47,0 27,5 20,5 25,1 55,3 30,7 65,9 32,7 44,9 54,1 39,3 53,1	3,5 4,9 4,0 2,2 3,3 2,9 4,3 3,2 2,4 3,4 6,4 3,7 6,5 3,5 4,2 5,7 4,5 5,4	5,5 6,4 5,9 4,8 5,8 2,1 3,4 4,1 2,6 2,8 2,4 6,5 3,0 7,2 2,6 4,5 5,3 4,9 5,8	19,4 16,2 16,8 15,1 8,0 16,2 13,0 13,6 9,1 19,6 9,4 18,1 9,0 22,5 7,4 12,6 15,1 17,6 19,8	#8 836,3 906,9 850,9 856,1 432,0 372,0 500,3 384,9 940,2 479,3 1078,4479,3 501,6 635,2 797,8 642,7 867,0	0,7 0,8 1,0 0,7 0,6 0,7 0,8 1,2 1,1 0,4 0,8 2,4 0,7 1,1 1,0 0,7 0,9 0,8 1,2	7,3 10,9 7,8 9,8 64,9 7,4 4,2 7,4 3,2 1,2 4,3 6,9 3,4 7,1 4,8 10,0 6,8 3,9 7,1	9,8 22,7 21,2 6,6 0,7 7,5 27,6 5,9 8,9 18,5 46,4 21,3 37,9 15,5 191,0 40,7 26,1 24,3	121,0 154,7 148,7 96,6 94,9 247,9 2910,1 222,8 74,3 1850,2 343,7 348,3 28,5 1743,4 69,0 676,3 1403,6 56,3 39,6	1,6 7,7 7,6 2,0 1,4 3,7 5,5 5,0 3,6 1,8 3,7 4,4 2,7 5,1 2,6 2,1 3,5 6,7 5,1	2,2 1,6 5,8 2,3 2,8 2,6 3,5 3,5 1,8 5,1 4,7 3,4 6,1 4,5 3,3 5,1 5,7	0,6 0,7 0,9 0,6 1,0 0,5 1,3 1,0 0,8 0,8 1,4 0,6 1,4 0,9 1,0 1,4 1,3	0,0 0,0 0,0 0,6 0,1 0,0 0,7 0,1 0,2 0,3 0,7 0,2 0,1 0,6 0,2 3,8 0,3	0,3 0,2 0,6 0,4 0,5 0,4 2,0 0,5 0,9 7,7 2,0 1,5 0,4 2,8 0,6 0,9 2,3 2,1 1,3	1,6 2,6 4,1 1,7 1,7 1,1 3,9 2,6 2,4 4,6 3,7 3,9 3,4 3,3 3,9 5,3 5,6	H8 35,9 31,3 50,9 30,3 15,1 22,6 18,1 32,2 24,7 27,0 22,5 45,4 27,5 72,4 24,8 57,0 43,0 28,2 38,3	0,2 0,6 0,2 0,4 0,3 0,5 0,5 0,1 1,3 0,4 0,2 0,5 0,1 0,4 0,2 0,5 0,1 0,2 0,5	8,9 8,0 18,7 8,7 8,2 9,0 59,9 14,7 11,1 40,5 50,4 33,8 11,5 44,1 36,2 27,6 48,4 23,3 30,9
31/8/19 3/9/19 6/9/19 9/9/19 12/9/19 15/9/19 21/9/19 27/9/19 3/10/19 6/10/19 9/10/19 15/10/19 18/10/19 24/10/19 24/10/19 27/10/19	13,36 11,53 25,17 17,97 10,97 11,36 24,33 20,06 29,00 13,33 16,97 21,49 10,63 20,05 22,92 15,44 20,25 28,63 28,72 12,26	0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0	721,7 390,9 21,9 32,5 21,9 19,6 737,7 21,9 21,9 21,9 405,0 382,5 612,6 369,6 430,2 612,1 502,6	181,3 165,4 138,3 189,5 79,6 104,5 64,6 140,1 77,0 80,5 73,0 188,8 247,4 125,4 184,8 200,5 136,0 204,1 193,9	NE 1668,0 1391,3 1117,7 1017,7 643,4 653,9 853,6 1059,9 882,2 561,9 577,6 1326,0 779,3 1391,4 707,5 1017,9 1130,7 867,7 1255,2 1130,8	H8 265,0 305,6 660,2 690,5 51,8 284,1 173,6 504,2 205,3 725,7 163,9 1162,4 1076,4 958,6 926,1 506,7	HE 1009,7 1247,4 1017,6 1027,1 385,3 870,9 455,5 886,8 388,3 503,1 647,0 1314,0 728,7 311,9 1085,2 1004,9 130,1 411,8 762,4	HE 64,7 67,5 49,6 45,6 18,0 28,2 17,9 47,0 55,3 30,7 65,9 54,1 39,3 53,1 50,1	3,5 4,9 4,0 2,2 3,3 2,9 4,3 3,2 2,4 3,4 6,4 3,7 6,5 5,7 4,2 5,7 4,5 5,4 4,3	5,5 6,4 5,9 4,8 5,8 2,1 3,4 4,1 2,6 6,5 3,0 7,2 2,6 4,5 5,3 4,9 5,8 4,5	19,4 16,2 16,8 15,1 8,0 16,2 13,0 13,6 9,1 9,6 9,4 18,1 9,0 22,5 7,4 12,6 15,1 17,6 19,8 12,2	#8 836,3 906,9 850,9 856,1 432,0 372,0 500,3 384,9 940,2 479,3 1078,445,5 501,6 635,2 797,8 642,7 867,0 634,2	0,7 0,8 1,0 0,7 0,6 0,7 0,8 1,2 1,1 0,4 0,7 1,1 1,0 0,7 0,9 0,8 1,2	7,3 10,9 7,8 9,8 64,9 7,4 4,2 7,4 3,2 1,2 4,3 6,9 3,4 7,1 4,8 10,0 6,8 3,9 7,1 20,0	9,8 22,7 21,2 6,6 0,7 7,5 27,6 5,9 8,9 18,5 46,4 21,3 37,9 15,5 191,0 40,7 26,1 24,3 14,4	121,0 154,7 148,7 96,6 94,9 247,9 2910,1 222,8 74,3 1850,2 343,7 348,3 28,5 1743,4 69,0 676,3 1403,6 56,3 39,6 81,4	1,6 7,7 7,6 2,0 1,4 3,7 5,5 5,0 3,6 1,8 3,7 4,4 2,7 5,1 2,6 2,1 3,5 6,7 5,1 2,2	2,2 1,6 5,8 2,3 2,8 2,6 3,5 3,5 1,8 5,1 4,7 3,4 6,1 4,5 3,3 5,1 5,7 5,7	0,6 0,7 0,9 0,6 1,0 0,5 1,3 1,0 0,8 0,8 1,4 0,6 1,4 0,9 1,0 1,4 1,3 1,5 0,7	0,0 0,0 0,0 0,6 0,1 0,0 0,7 0,1 0,2 0,3 0,7 0,2 0,2 0,1 0,6 0,2 3,8 0,3 0,3	0,3 0,2 0,6 0,4 0,5 0,4 2,0 0,5 0,9 7,7 2,0 1,5 0,4 2,8 0,6 0,9 2,3 2,1 1,3 0,8	1,6 2,6 4,1 1,7 1,7 1,1 3,9 3,7 2,6 2,4 5,2 4,6 3,7 3,9 3,4 3,3 3,9 5,3 5,6 1,7	#8 35,9 31,3 50,9 30,3 15,1 22,6 18,1 32,2 24,7 27,0 22,5 45,4 27,5 72,4 24,8 57,0 43,0 28,2 38,3 35,3	0,2 0,6 0,2 0,4 0,3 0,5 0,1 1,3 0,4 0,4 0,2 0,5 0,1 0,2 0,1 0,2 0,1 0,2	8,9 8,0 18,7 8,7 8,2 9,0 59,9 14,7 11,1 40,5 50,4 33,8 11,5 44,1 36,2 27,6 48,4 23,3 30,9 9,0
31/8/19 3/9/19 6/9/19 9/9/19 12/9/19 15/9/19 21/9/19 27/9/19 3/10/19 6/10/19 9/10/19 15/10/19 15/10/19 18/10/19 24/10/19 27/10/19 30/10/19	13,36 11,53 25,17 17,97 10,97 11,36 24,33 20,06 29,00 13,33 16,97 21,49 10,63 20,05 22,92 15,44 20,25 28,63 28,72 12,26 12,47	0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0	721,7 390,9 21,9 32,5 21,9 19,6 737,7 21,9 21,9 21,9 405,0 382,5 612,6 369,6 430,2 612,1 502,6 298,0	181,3 165,4 138,3 189,5 79,6 104,5 64,6 140,1 77,0 80,5 73,0 188,8 247,4 125,4 184,8 200,5 136,0 204,1 193,9 178,2	NE 1668,0 1391,3 1117,7 1017,7 643,4 653,9 853,6 1059,9 882,2 561,9 577,6 1326,0 779,3 1391,4 707,5 1017,9 1130,7 255,2 1130,8 909,2	HE 265,0 305,6 660,2 690,5 51,8 284,1 173,6 504,2 205,3 725,7 163,9 1162,4 1076,4 958,6 926,1 506,7 222,6	HE 1009,7 1247,4 1017,6 1027,1 385,3 870,9 455,5 886,8 388,3 503,1 647,0 1314,0 728,7 311,9 1085,2 1004,9 130,1 411,8 762,4 734,9	HE 64,7 67,5 49,6 45,6 18,0 28,2 17,9 47,0 27,5 20,5 25,1 55,3 30,7 65,9 32,7 44,9 54,1 39,3 53,1 50,1 35,9	3,5 4,9 4,0 2,2 3,3 3,2 2,9 4,3 3,2 2,4 3,4 6,5 3,5 4,2 5,7 4,5 5,4 4,3 3,4	5,5 6,4 5,9 4,8 5,8 2,1 3,4 4,1 2,6 6,5 3,0 7,2 2,6 4,5 5,3 4,9 5,8 4,5	19,4 16,2 16,8 15,1 8,0 16,2 13,0 13,6 9,1 9,6 9,4 18,1 9,0 22,5 7,4 12,6 15,1 17,6 19,8 12,2 15,6	#8 836,3 906,9 850,9 856,1 432,0 500,3 384,9 372,0 500,3 376,9 940,2 479,3 1078,447,5 501,6 635,2 797,8 642,7 867,0 634,2 2368,9	0,7 0,8 1,0 0,7 0,6 0,7 0,8 1,2 1,1 0,4 0,7 1,1 1,0 0,7 0,9 0,8 1,2 0,7 0,9 0,7	7,3 10,9 7,8 9,8 64,9 7,4 4,2 7,4 3,2 1,2 4,3 6,9 3,4 7,1 4,8 10,0 6,8 3,9 7,1 20,0 4,7	9,8 22,7 21,2 6,6 0,7 7,5 27,6 5,9 8,9 18,5 46,4 21,3 37,9 15,5 191,0 40,7 26,1 24,3 14,4 547,3	121,0 154,7 148,7 96,6 94,9 247,9 2910,1 222,8 74,3 1850,2 343,7 348,3 28,5 1743,4 69,0 676,3 1403,6 56,3 39,6 81,4 1560,1	1,6 7,7 7,6 2,0 1,4 3,7 5,5 5,0 3,6 1,8 3,7 4,4 2,7 5,1 2,6 2,1 3,5 6,7 5,1 2,2	2,2 1,6 5,8 2,3 2,8 2,6 3,5 3,2 3,5 1,8 5,1 4,7 3,4 6,1 4,5 3,3 5,1 5,7 5,7 2,3	0,6 0,7 0,9 0,6 1,0 0,5 1,3 1,0 0,8 0,8 1,4 0,6 1,4 0,9 1,0 1,4 1,3 1,5 0,7	0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,7 0,1 0,2 0,3 0,7 0,2 0,2 0,1 0,6 0,2 3,8 0,3 0,1 0,2	0,3 0,2 0,6 0,4 0,5 0,4 2,0 0,5 0,9 7,7 2,0 1,5 0,4 2,8 0,6 0,9 2,3 2,1 1,3 0,8 0,3	1,6 2,6 4,1 1,7 1,7 1,1 3,9 3,7 2,6 2,4 5,2 4,6 3,7 3,9 3,4 3,3 3,9 5,3 5,6 1,7 2,1	#8 35,9 31,3 50,9 30,3 15,1 22,6 18,1 32,2 24,7 27,0 22,5 45,4 27,5 72,4 24,8 57,0 43,0 28,2 38,3 35,3 37,1	0,2 0,6 0,2 0,4 0,3 0,5 0,1 1,3 0,4 0,2 0,5 0,1 0,2 0,1 0,2 0,4	8,9 8,0 18,7 8,7 8,2 9,0 59,9 14,7 11,1 40,5 50,4 33,8 11,5 44,1 36,2 27,6 48,4 23,3 30,9 9,0
31/8/19 3/9/19 6/9/19 9/9/19 12/9/19 15/9/19 21/9/19 27/9/19 3/10/19 6/10/19 9/10/19 15/10/19 15/10/19 24/10/19 27/10/19 30/10/19 27/10/19 27/10/19 27/10/19	13,36 11,53 25,17 17,97 10,97 11,36 24,33 20,06 29,00 13,33 16,97 21,49 10,63 20,05 22,92 15,44 20,25 28,63 28,72 12,26 12,47 10,96	0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0	721,7 390,9 21,9 32,5 21,9 19,6 737,7 21,9 21,9 21,9 405,0 382,5 612,6 369,6 430,2 612,1 502,6 298,0 359,1	HE 181,3 165,4 138,3 189,5 79,6 104,5 64,6 140,1 77,0 80,5 73,0 188,8 247,4 125,4 184,8 200,5 136,0 204,1 193,9 178,2 95,0	NE 1668,0 1391,3 1117,7 1017,7 643,4 653,9 853,6 1059,9 882,2 561,9 577,6 1326,0 779,3 1391,4 707,5 1017,9 1130,7 255,2 1130,8 909,2 418,9	H8 265,0 305,6 660,2 690,5 51,8 284,1 173,6 504,2 205,3 725,7 163,9 1162,4 1076,4 958,6 926,1 506,7 222,6 130,5	HE 1009,7 1247,4 1017,6 1027,1 385,3 870,9 455,5 886,8 388,3 1314,0 728,7 131,9 1085,2 1004,9 130,1 411,8 762,4 734,9 14,2	HE 64,7 67,5 49,6 45,6 18,0 28,2 17,9 47,0 27,5 20,5 25,1 55,3 30,7 65,9 32,7 44,9 54,1 39,3 53,1 50,1 35,9 17,4	3,5 4,9 4,0 2,2 3,3 3,2 9 4,3 3,2 2,4 3,4 6,4 3,7 6,5 3,5 4,2 5,7 4,5 5,4 4,3 3,4 1,6	5,5 6,4 5,9 4,8 5,8 2,1 3,4 4,1 2,6 2,8 2,4 6,5 3,0 7,2 2,6 4,5 5,3 4,9 5,8 4,5 5,8	19,4 16,2 16,8 15,1 8,0 16,2 13,0 13,6 9,1 9,6 9,4 18,1 9,0 22,5 7,4 12,6 15,1 17,6 19,8 12,2 15,6 9,9	#8 836,3 906,9 850,9 856,1 432,0 384,9 372,0 500,3 386,3 376,9 940,2 479,3 1078,445,5 501,6 635,2 797,8 642,7 867,0 634,2 2368,9,9,9	0,7 0,8 1,0 0,7 0,6 0,7 0,8 1,2 1,1 0,4 0,7 1,1 1,0 0,7 0,9 0,8 1,2 0,7 0,7 0,9 0,8	7,3 10,9 7,8 9,8 64,9 7,4 4,2 7,4 3,2 1,2 4,3 6,9 3,4 7,1 4,8 10,0 6,8 3,9 7,1 20,0 4,7	9,8 22,7 21,2 6,6 0,7 7,5 27,6 5,9 8,9 18,5 46,4 21,3 37,9 15,5 191,0 40,7 26,1 24,3 14,4 547,3 15,4	121,0 154,7 148,7 96,6 94,9 247,9 2910,1 222,8 74,3 1850,2 343,7 348,3 28,5 1743,4 69,0 676,3 39,6 81,4 1560,1 0,0	1,6 7,7 7,6 2,0 1,4 3,7 5,5 5,0 3,6 1,8 3,7 4,4 2,7 5,1 2,6 2,1 3,5 6,7 5,1 2,2 1,9 2,7	2,2 1,6 5,8 2,3 2,8 2,6 3,5 3,2 3,5 1,8 5,1 4,7 3,4 6,1 4,5 3,3 5,1 5,7 5,7 5,7 2,8 0,9	0,6 0,7 0,9 0,6 1,0 0,5 1,3 1,0 0,8 0,8 1,4 0,6 1,4 0,9 1,0 1,4 1,3 1,5 0,7	0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,7 0,1 0,2 0,3 0,7 0,2 0,1 0,6 0,2 3,8 0,3 0,1 0,2 0,0	0,3 0,2 0,6 0,4 0,5 0,4 2,0 0,5 0,9 7,7 2,0 1,5 0,4 2,8 0,6 0,9 2,3 2,1 1,3 0,8 0,3 0,0	1,6 2,6 4,1 1,7 1,7 1,1 3,9 3,7 2,6 2,4 5,2 4,6 3,7 3,9 3,4 3,3 3,9 5,3 5,6 1,7 2,1	H8 35,9 31,3 50,9 30,3 15,1 22,6 18,1 32,2 24,7 27,0 22,5 45,4 27,5 72,4 24,8 57,0 43,0 28,2 38,3 35,3 37,1 15,3	0,2 0,4 0,5 0,5 0,1 1,3 0,4 0,4 0,2 0,5 0,1 0,2 0,4 0,2 0,4 0,1 0,0 0,0	8,9 8,0 18,7 8,7 8,2 9,0 59,9 14,7 11,1 40,5 50,4 33,8 11,5 44,1 36,2 27,6 48,4 23,3 30,9 9,0 9,0 9,4 5,6
31/8/19 3/9/19 6/9/19 9/9/19 12/9/19 15/9/19 21/9/19 27/9/19 3/10/19 6/10/19 9/10/19 15/10/19 15/10/19 18/10/19 24/10/19 27/10/19 30/10/19	13,36 11,53 25,17 17,97 10,97 11,36 24,33 20,06 29,00 13,33 16,97 21,49 10,63 20,05 22,92 15,44 20,25 28,63 28,72 12,26 12,47 10,96 21,08	0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0	721,7 390,9 21,9 32,5 21,9 19,6 737,7 21,9 21,9 21,9 405,0 382,5 612,6 430,2 612,1 502,6 298,0 359,1 505,6	181,3 165,4 138,3 189,5 79,6 104,5 64,6 140,1 77,0 80,5 73,0 188,8 247,4 125,4 184,8 200,5 136,0 204,1 193,9 178,2 95,0 201,5	NE 1668,0 1391,3 1117,7 1017,7 643,4 653,9 853,6 1059,9 882,2 561,9 577,6 1326,0 779,3 1391,4 707,5 1017,9 1130,7 255,2 1130,8 909,2 418,9 1086,2	HE 265,0 305,6 660,2 690,5 51,8 284,1 173,6 504,2 205,3 725,7 163,9 1162,4 1076,4 958,6 926,1 506,7 222,6 130,5 638,3	HE 1009,7 1247,4 1017,6 1027,1 385,3 870,9 455,5 886,8 388,3 103,1 647,0 1314,0 728,7 311,9 1085,2 1004,9 130,1 411,8 762,4 734,9 14,2 684,6	HE 64,7 67,5 49,6 45,6 18,0 28,2 17,9 47,0 27,5 20,5 25,1 55,3 30,7 65,9 32,7 44,9 50,1 35,9 17,4 50,2	3,5 4,9 4,0 2,2 3,3 3,2 9 4,3 3,2 2,4 3,4 6,4 3,7 6,5 3,5 4,2 5,7 4,5 5,4 4,3 3,4 1,6 4,0	5,5 6,4 5,9 4,8 5,8 2,1 3,4 4,1 2,6 2,8 2,4 6,5 3,0 7,2 2,6 4,5 5,3 4,9 5,8 4,5 5,8	19,4 16,2 16,8 15,1 8,0 16,2 13,0 13,6 9,1 9,6 9,4 18,1 9,0 22,5 7,4 12,6 15,1 17,6 19,8 12,2 15,6 9,9 16,3	#8 836,3 906,9 850,9 856,1 432,0 372,0 500,3 384,9 940,2 479,3 1078,445,5 501,6 635,2 797,8 642,7 867,0 634,2 2368,9,9 808,9	0,7 0,8 1,0 0,7 0,6 0,7 0,8 1,2 1,1 0,4 0,7 1,1 1,0 0,7 0,9 0,8 1,2 0,7 0,7 0,9 0,8	7,3 10,9 7,8 9,8 64,9 7,4 4,2 7,4 3,2 1,2 4,3 6,9 3,4 7,1 4,8 10,0 6,8 3,9 7,1 20,0 4,7 2,4 4,6	9,8 22,7 21,2 6,6 0,7 7,5 27,6 5,9 8,9 18,5 46,4 21,3 37,9 15,5 191,0 40,7 26,1 24,3 14,4 547,3	121,0 154,7 148,7 96,6 94,9 247,9 2910,1 222,8 74,3 1850,2 343,7 348,3 28,5 1743,4 69,0 676,3 1403,6 56,3 39,6 81,4 1560,1	1,6 7,7 7,6 2,0 1,4 3,7 5,5 5,0 3,6 1,8 3,7 4,4 2,7 5,1 2,6 2,1 3,5 6,7 5,1 2,2 1,9 2,7 3,2	2,2 1,6 5,8 2,3 2,8 2,6 3,5 1,8 5,1 4,7 3,4 6,1 4,5 3,3 5,1 5,7 5,7 5,7 2,3 2,8	0,6 0,7 0,9 0,6 1,0 0,5 1,3 1,0 0,8 0,8 1,4 0,6 1,4 1,4 0,9 1,0 1,4 1,3 1,5 0,7 1,0 0,3	0,0 0,0 0,0 0,0 0,1 0,0 0,7 0,1 0,2 0,3 0,3 0,7 0,2 0,2 0,1 0,6 0,2 3,8 0,3 0,1 0,2 0,0 0,0 0,0 0,7	0,3 0,2 0,6 0,4 0,5 0,9 7,7 2,0 1,5 0,4 2,8 0,6 0,9 2,3 2,1 1,3 0,8 0,3 0,0 0,3	1,6 2,6 4,1 1,7 1,7 1,1 3,9 3,7 2,6 2,4 5,2 4,6 3,7 3,9 3,4 3,3 3,9 5,3 5,6 1,7 2,1 2,0 8,8	H8 35,9 31,3 50,9 30,3 15,1 22,6 18,1 32,2 24,7 27,0 22,5 45,4 27,5 72,4 24,8 57,0 43,0 28,2 38,3 35,3 37,1 15,3 38,2	0,2 0,4 0,5 0,5 0,1 1,3 0,4 0,4 0,2 0,5 0,1 0,2 0,4 0,2 0,5 0,1 0,2 0,4 0,2 0,5 0,1 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0	8,9 8,0 18,7 8,7 8,2 9,0 59,9 14,7 11,1 40,5 50,4 33,8 11,5 44,1 36,2 27,6 48,4 23,3 30,9 9,0 9,0 9,4 5,6
31/8/19 3/9/19 6/9/19 9/9/19 12/9/19 15/9/19 21/9/19 27/9/19 3/10/19 6/10/19 9/10/19 15/10/19 18/10/19 24/10/19 27/10/19 20/10/19 27/10/19 30/10/19 27/10/19 30/10/19 2/11/19 5/11/19	13,36 11,53 25,17 17,97 10,97 11,36 24,33 20,06 29,00 13,33 16,97 21,49 10,63 20,05 22,92 15,44 20,25 28,63 28,72 12,26 12,47 10,96	0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0	721,7 390,9 21,9 32,5 21,9 19,6 737,7 21,9 21,9 21,9 405,0 382,5 612,6 369,6 430,2 612,1 502,6 298,0 359,1	181,3 165,4 138,3 189,5 79,6 104,5 64,6 140,1 77,0 80,5 73,0 188,8 247,4 125,4 184,8 200,5 136,0 204,1 193,9 178,2 95,0 201,5	NE 1668,0 1391,3 1117,7 1017,7 643,4 653,9 853,6 1059,9 882,2 561,9 577,6 1326,0 779,3 1391,4 707,5 1017,9 1130,7 255,2 1130,8 909,2 418,9	HE 265,0 305,6 660,2 690,5 51,8 284,1 173,6 504,2 205,3 725,7 163,9 1162,4 1076,4 958,6 926,1 506,7 222,6 130,5 638,3	HE 1009,7 1247,4 1017,6 1027,1 385,3 870,9 455,5 886,8 388,3 103,1 647,0 1314,0 728,7 311,9 1085,2 1004,9 130,1 411,8 762,4 734,9 14,2 684,6 847,7	HE 64,7 67,5 49,6 45,6 18,0 28,2 17,9 47,0 27,5 20,5 25,1 55,3 30,7 65,9 32,7 44,9 50,1 35,9 17,4 50,2 61,5	3,5 4,9 4,0 2,2 3,3 2,9 4,3 3,2 2,4 3,4 6,4 3,7 6,5 3,5 4,2 5,7 4,5 5,4 4,3 3,4 4,0 3,8	5,5 6,4 5,9 4,8 5,8 2,1 3,4 4,1 2,6 2,8 2,4 6,5 3,0 7,2 2,6 4,5 5,3 4,9 5,8 4,5 5,8	19,4 16,2 16,8 15,1 8,0 16,2 13,0 13,6 9,1 9,6 9,4 18,1 9,0 22,5 7,4 12,6 15,1 17,6 19,8 12,2 15,6 9,9	#8 836,3 906,9 850,9 856,1 432,0 372,0 500,3 384,9 940,2 479,3 1078,445,5 501,6 635,2 797,8 642,7 867,0 634,2 2368,9,9 808,9	0,7 0,8 1,0 0,7 0,6 0,7 0,8 1,2 1,1 0,4 0,7 1,1 1,0 0,7 0,9 0,8 1,2 0,7 0,7 0,9 0,8	7,3 10,9 7,8 9,8 64,9 7,4 4,2 7,4 3,2 1,2 4,3 6,9 3,4 7,1 4,8 10,0 6,8 3,9 7,1 20,0 4,7	9,8 22,7 21,2 6,6 0,7 7,5 27,6 5,9 8,9 18,5 46,4 21,3 15,3 37,9 15,5 191,0 40,7 26,1 24,3 14,4 547,3 15,4 31,1	HE 121,0 154,7 148,7 96,6 94,9 247,9 2910,1 222,8 74,3 1850,2 343,7 348,3 28,5 1743,4 69,0 676,3 39,6 81,4 1560,1 0,0 122,3	1,6 7,7 7,6 2,0 1,4 3,7 5,5 5,0 3,6 1,8 3,7 4,4 2,7 5,1 2,6 6,7 5,1 2,2 1,9 2,7 3,2 4,1	2,2 1,6 5,8 2,3 2,8 2,6 3,5 3,2 3,5 1,8 5,1 4,7 3,4 6,1 4,5 3,3 5,1 5,7 5,7 2,3 2,8 0,9 4,7 3,0	0,6 0,7 0,9 0,6 1,0 0,5 1,3 1,0 0,8 0,8 1,4 0,6 1,4 1,4 0,9 1,0 1,4 1,3 1,5 0,7 1,0 0,3	0,0 0,0 0,0 0,0 0,1 0,0 0,7 0,1 0,2 0,3 0,7 0,2 0,2 0,1 0,6 0,2 3,8 0,3 0,1 0,2 0,0 0,0 0,0	0,3 0,2 0,6 0,4 0,5 0,9 7,7 2,0 1,5 0,4 2,8 0,6 0,9 2,3 2,1 1,3 0,8 0,3 0,0 0,3 1,4	1,6 2,6 4,1 1,7 1,7 1,1 3,9 3,7 2,6 2,4 5,2 4,6 3,7 3,9 3,4 3,3 3,9 5,3 5,6 1,7 2,1	H8 35,9 31,3 50,9 30,3 15,1 22,6 18,1 32,2 24,7 27,0 22,5 45,4 27,5 72,4 24,8 57,0 43,0 28,2 38,3 35,3 37,1 15,3	0,2 0,4 0,5 0,5 0,1 1,3 0,4 0,2 0,5 0,1 1,3 0,4 0,2 0,5 0,1 0,2 0,4 0,1 0,0 0,0 0,0	8,9 8,0 18,7 8,7 8,2 9,0 59,9 14,7 11,1 40,5 50,4 33,8 11,5 44,1 36,2 27,6 48,4 23,3 30,9 9,0 9,0 9,4 5,6
31/8/19 3/9/19 6/9/19 9/9/19 12/9/19 15/9/19 21/9/19 27/9/19 3/10/19 6/10/19 9/10/19 15/10/19 18/10/19 24/10/19 27/10/19 24/10/19 27/10/19 30/10/19 21/10/19 30/10/19 21/11/19 8/11/19	13,36 11,53 25,17 17,97 10,97 11,36 24,33 20,06 29,00 13,33 16,97 21,49 10,63 20,05 22,92 15,44 20,25 28,63 28,72 12,26 12,47 10,96 21,08 25,76 9,40	0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0	198, HE 1721,7 1890,9 21,9 21,9 19,6 1737,7 21,9 21,9 193,9 21,9 405,0 382,5 612,6 430,2 612,1 502,6 298,0 359,1 505,6 325,3 198,8	181,3 165,4 138,3 189,5 79,6 104,5 64,6 140,1 77,0 80,5 73,0 188,8 247,4 125,4 184,8 200,5 136,0 204,1 193,9 178,2 95,0 201,5 256,1 79,9	NE 1668,0 1391,3 1117,7 1017,7 643,4 653,9 853,6 1059,9 882,2 561,9 577,6 1326,0 779,3 1391,4 707,5 1017,9 1130,7 1255,2 1130,8 909,2 418,9 1086,2 1165,7	HE 265,0 305,6 660,2 690,5 51,8 284,1 173,6 504,2 205,3 725,7 163,9 1162,4 1076,4 958,6 926,1 506,7 222,6 130,5 638,3 670,4 210,7	HE 1009,7 1247,4 1017,6 1027,1 385,3 870,9 455,5 886,8 388,3 103,1 1314,0 1314,0 1314,0 1411,8 762,4 734,9 14,2 684,6 847,7 393,5	HE 64,7 67,5 49,6 45,6 18,0 28,2 17,9 47,0 27,5 20,5 25,1 55,3 30,7 65,9 32,7 44,9 54,1 39,3 53,1 50,1 35,9 17,4 50,2 61,5 22,7	3,5 4,9 4,0 2,2 3,3 3,2 9 4,3 3,2 2,4 3,4 6,4 3,7 6,5 3,5 4,2 5,7 4,5 5,4 4,3 3,4 1,6 4,0	5,5 6,4 5,9 4,8 5,8 2,1 3,4 4,1 2,6 2,8 2,4 6,5 3,0 7,2 2,6 4,5 5,3 4,9 5,8 4,5 4,5 2,9 4,5 4,5 4,5 2,8	19,4 16,2 16,8 15,1 8,0 16,2 13,0 13,6 9,1 9,6 9,4 18,1 9,0 22,5 7,4 12,6 15,1 17,6 19,8 12,2 15,6 9,9 16,3 15,2	#8 836,3 906,9 850,9 856,1 432,0 372,0 500,3 384,9 940,2 479,3 1078,447,5 501,6 635,2 797,8 642,7 867,0 634,2 2368,9,9 905,6	0,7 0,8 1,0 0,7 0,6 0,7 0,8 1,2 1,1 0,4 0,7 1,1 1,0 0,7 0,9 0,8 1,2 0,7 0,1 0,0 0,7 0,9 0,8 1,2 0,7 1,1 1,0 0,7 0,6 0,7 0,7 0,8 0,7 0,7 0,8 0,7 0,7 0,8 0,7 0,7 0,8 0,7 0,7 0,7 0,7 0,7 0,7 0,7 0,7 0,7 0,7	7,3 10,9 7,8 9,8 64,9 7,4 4,2 7,4 3,2 1,2 4,3 6,9 3,4 7,1 4,8 10,0 6,8 3,9 7,1 20,0 4,7 2,4 4,6 29,2 11,3	9,8 22,7 21,2 6,6 0,7 7,5 27,6 5,9 8,9 18,5 46,4 21,3 15,3 37,9 15,5 191,0 40,7 26,1 24,3 14,4 547,3 15,4 31,1 40,3 26,7	HE 121,0 154,7 148,7 96,6 94,9 247,9 2910,1 222,8 74,3 1850,2 343,7 348,3 28,5 1743,4 69,0 676,3 39,6 81,4 1560,1 0,0 122,3 139,2	1,6 7,7 7,6 2,0 1,4 3,7 5,5 5,0 3,6 1,8 3,7 4,4 2,7 5,1 2,6 6,7 5,1 2,2 1,9 2,7 3,2 4,1 1,3	2,2 1,6 5,8 2,3 2,8 2,6 3,5 3,2 3,5 1,8 5,1 4,7 3,4 6,1 4,5 3,3 5,1 5,7 5,7 2,3 2,8 0,9 4,7 3,0 1,0	0,6 0,7 0,9 0,6 1,0 0,5 1,3 1,0 0,8 0,8 1,4 0,6 1,4 0,9 1,0 0,7 1,0 0,3 0,6 1,4 0,9 1,0 0,5 1,3 1,0 0,8	0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0	0,3 0,2 0,6 0,4 0,5 0,4 2,0 0,5 0,9 7,7 2,0 0,4 2,8 0,6 0,9 2,3 2,1 1,3 0,8 0,3 0,0 0,3 1,4 0,5	1,6 2,6 4,1 1,7 1,7 1,1 3,9 3,7 2,6 2,4 5,2 4,6 3,7 3,9 3,4 3,3 5,6 1,7 2,1 2,0 8,8 3,1	H8 35,9 31,3 50,9 30,3 15,1 22,6 18,1 32,2 24,7 27,0 22,5 45,4 27,5 72,4 24,8 57,0 43,0 28,2 38,3 35,3 37,1 15,3 38,2 43,0 15,2	0,2 0,4 0,5 0,5 0,1 1,3 0,4 0,2 0,5 0,1 0,2 0,5 0,1 0,2 0,5 0,1 0,2 0,0 0,0 0,0 0,0	8,9 8,0 18,7 8,7 8,2 9,0 59,9 14,7 11,1 40,5 50,4 33,8 11,5 44,1 36,2 27,6 48,4 23,3 30,9 9,0 9,0 9,4 5,6 10,5

Página 129 de 264







FECHA	PM2.5	Ве	Na	Mg	Al	К	Ca	Ti	v	Cr	Mn	Fe	Со	Ni	Cu	Zn	As	Se	Мо	Ag	Cd	Sb	Ba	Hg	Pb
MONITOREO	$\mu g/m3$	μg	μg	μg	μg	μg	μg	μg	μg	μg	μg	μg	μg	μg	μg	μg	μg	μg	μg	μв	μg	μg	μg	μg	μg
17/11/19	8,15	0,0	194,4	116,6	563,6	291,3	331,0	26,1	1,7	1,9	5,9	432,2	0,4	13,5	18,7	152,3	1,5	1,4	0,4	0,1	0,3	1,6	15,0	0,1	10,3
20/11/19	17,39	0,0	488,2	142,7	813,4	501,7	756,5	43,0	3,5	2,7	9,0	722,5	0,7	22,7	59,7	385,7	2,8	1,9	0,9	0,1	1,0	2,5	26,5	0,2	17,8
23/11/19	21,74	0,0	487,2	215,9	948,3	494,3	658,4	54,7	3,9	3,5	10,7	868,9	0,7	19,4	86,3	442,4	3,1	2,2	0,6	0,1	1,4	4,5	33,4	0,4	14,5
26/11/19	21,14	0,0	683,0	260,7	1155,6	503,0	970,9	50,1	4,4	5,6	12,5	818,0	1,0	27,1	21,7	495,4	2,8	3,1	1,2	0,5	1,1	2,7	40,6	0,4	21,6
29/11/19	35,29	0,0	458,8	359,3	2044,8	930,7	1384,0	82,3	5,0	5,1	20,8	851,2	1,4	8,0	100,9	983,6	4,7	3,3	1,1	0,3	1,3	6,8	52,1	0,4	21,2
2/12/19	24,80	0,0	755,1	289,8	1456,3	728,9	930,7	57,8	4,2	4,5	13,4	1088,2	0,9	8,4	70,7	624,8	3,9	4,0	1,0	0,5	1,2	5,1	44,8	0,4	21,2
5/12/19	16,93	0,0	318,0	221,1	1245,1	420,1	755,2	47,3	3,0	3,3	11,4	688,0	0,8	13,6	73,5	394,0	3,6	2,3	1,0	0,2	1,5	3,9	28,8	0,4	15,6
8/12/19	11,20	0,0	381,9	141,7	671,7	353,4	564,7	36,1	2,2	3,0	7,2	530,9	0,5	16,9	41,3	215,4	1,8	1,6	0,7	0,1	0,8	2,2	21,1	0,2	15,6
11/12/19	23,18	0,0	825,0	258,3	1963,0	750,6	1223,2	77,8	6,3	5,1	19,4	1091,9	1,3	14,0	36,7	283,6	5,2	4,4	1,3	0,3	0,9	5,4	42,6	0,5	16,7
14/12/19	16,12	0,0	329,6	152,2	1174,2	483,7	786,9	36,5	3,6	3,5	12,0	540,5	0,8	10,8	43,5	171,6	2,9	2,1	0,7	0,1	0,6	3,3	27,1	0,3	15,9
17/12/19	23,58	0,0	926,1	268,8	1266,1	826,4	937,5	61,0	4,5	4,5	18,3	1019,0	1,0	23,5	103,0	634,5	4,4	3,6	1,4	0,5	1,5	6,3	36,1	0,5	29,5
20/12/19	21,49	0,0	898,0	270,8	1694,8	657,0	1200,5	65,3	4,6	5,2	14,9	818,6	1,2	38,6	95,5	91,8	4,6	3,8	1,1	0,5	0,8	5,1	50,4	0,4	16,8
23/12/19	20,49	0,0	512,2	253,9	1459,0	591,5	824,1	75,1	5,5	4,5	16,2	1084,1	1,2	23,0	65,0	423,1	4,3	4,0	1,4	0,4	2,1	5,1	44,3	0,4	28,8
26/12/19	16,02	0,0	671,2	202,3	1461,7	689,4	888,6	52,3	4,0	5,1	12,0	885,2	1,0	25,3	29,9	622,1	3,7	3,4	0,8	0,4	0,9	4,7	30,4	0,4	27,3
29/12/19	22,32	0,0	610,9	263,0	1400,4	536,6	1106,0	70,5	5,1	5,3	14,3	1058,1	0,8	35,8	30,9	405,5	3,5	3,1	1,2	0,1	1,2	3,5	40,3	0,5	14,9

Fuente: Elaboración Propia. Grupo GHYGAM, 2020





Tabla 3-6. Concentración PM2.5 (μg/m³), Masa de Iones, EC y OC (μg). Abril 03–diciembre 29 de 2019. Estación MED-BEME. Medellín-Colombia

FECHA	PM2.5	Fluoruro	Cloruro	Nitrato	Sulfato	C Orgánico	C Elemental
MONITOREO	μg/m3	μg	μg	μg	μg	μg	μg
3/4/19	27,23	4,57	1053,89	1051,14	4540,58	39498	9717
6/4/19	28,33	4,57	247,77	936,74	3584,36	20565	2167
9/4/19	37,09	4,57	199,65	4599,85	7027,92	20317	3248
12/4/19	29,84	4,57	203,26	1171,08	4833,29	13030	1326
15/4/19	16,08	4,57	186,34	790,22	3450,26	9873	1487
18/4/19	13,65	26,38	305,91	808,85	2218,24	9420	655
21/4/19	17,90	4,57	77,98	1735,08	2818,14	8339	1543
24/4/19	17,57	32,21	554,88	1137,47	3471,64	9968	2282
27/4/19	13,46	23,26	395,95	637,62	2654,59	8757	1612
30/4/19	24,45	18,42	113,63	938,78	5761,25	13514	1197
3/5/19	31,11	44,46	181,80	1179,73	8480,90	18772	1487
6/5/19	29,02	43,07	52,12	479,03	5614,05	15175	1968
9/5/19	25,58	38,88	156,94	1427,34	4309,84	9453	2238
12/5/19	16,30	4,57	52,12	1046,77	11924,21	11099	1190
15/5/19	30,47	48,93	161,12	1190,32	6183,61	13557	2156
18/5/19	23,04	4,57	301,73	1342,58	5765,86	13136	1665
21/5/19	21,18	4,57	52,12	1858,59	3709,96	9230	2086
24/5/19	18,45	28,63	52,12	1084,93	3477,39	8851	2047
27/5/19	16,42	66,71	52,12	916,51	2323,24	8594	1980
30/5/19	31,89	30,38	219,51	2339,88	4329,01	19574	2365
2/6/19	11,16	4,57	52,12	735,97	2303,23	7467	751
5/6/19	23,71	4,57	155,69	1724,93	2559,58	18465	2189
8/6/19	13,93	20,66	52,12	993,76	3047,29	9264	806
11/6/19	15,67	30,02	52,12	1008,97	4041,34	9231	1586
14/6/19	14,76	54,86	52,12	913,35	2751,80	7167	1426
17/6/19	22,90	66,32	274,77	765,53	3128,05	16773	1754
20/6/19	24,54	46,23	170,50	450,99	4187,40	16238	1858
23/6/19	19,27	54,77	52,12	835,98	2716,80	12944	776
26/6/19	15,42	23,12	52,12	455,20	4227,56	9415	1340
29/6/19	21,63	69,93	166,28	935,83	4508,45	15095	1326
2/7/19	18,69	22,69	180,47	1388,86	2711,57	9873	1551
5/7/19	21,49	47,23	233,33	1384,18	3106,76	14951	1337

Página 131 de 264





FECHA	PM2.5	Fluoruro	Cloruro	Nitrato	Sulfato	C Orgánico	C Elemental
MONITOREO	μg/m3	μg	μg	μg	μg	μg	μg
8/7/19	19,24	36,96	52,12	674,06	2560,18	48652	15514
11/7/19	16,23	4,57	158,08	962,34	3388,37	10968	1755
14/7/19	14,74	4,57	52,12	428,00	1807,03	8483	1280
17/7/19	13,77	4,57	52,12	43,89	2229,06	10943	1833
20/7/19	10,06	11,76	52,12	43,89	1830,64	6630	1177
23/7/19	20,60	4,57	52,12	488,24	3378,49	15209	2317
26/7/19	11,89	4,57	52,12	43,89	1624,02	11539	1778
29/7/19	15,08	4,57	52,12	43,89	2248,17	13403	1552
1/8/19	20,63	4,57	182,93	1258,78	3307,90	14899	2573
4/8/19	10,68	4,57	52,12	685,35	2136,79	9751	1127
7/8/19	23,57	4,57	52,12	666,21	2467,62	20134	1178
10/8/19	25,61	4,57	439,50	574,40	1526,38	13468	955
13/8/19	21,00	21,27	283,17	985,95	2260,69	16128	1617
16/8/19	26,57	4,57	392,00	2664,98	4614,52	18842	1686
19/8/19	15,98	59,12	352,53	967,48	2610,56	20112	1516
22/8/19	18,76	25,96	388,55	1157,84	3217,27	18035	1692
25/8/19	20,38	18,43	242,68	655,36	2352,38	11282	988
28/8/19	25,20	82,60	560,68	1420,19	3403,57	20959	1758
31/8/19	13,36	4,57	302,13	951,25	2450,84	11194	937
3/9/19	11,53	4,57	245,11	956,27	1689,09	11017	1584
6/9/19	25,17	43,54	396,17	1778,15	2615,40	16992	1929
9/9/19	17,97	4,57	52,12	1101,15	2939,70	9690	1382
12/9/19	10,97	4,57	52,12	889,22	2372,24	8245	1296
15/9/19	11,36	42,42	52,12	643,99	1895,67	7033	1108
18/9/19	24,33	29,45	274,34	1824,66	2571,93	14905	2125
21/9/19	20,06	30,32	170,09	1358,84	4336,47	10876	1505
24/9/19	29,00	4,57	199,21	1734,77	4145,95	16852	2439
27/9/19	13,33	4,57	52,12	662,36	2703,83	11521	1800
30/9/19	16,97	4,57	243,63	942,14	4001,49	16096	2241
3/10/19	21,49	36,85	353,79	1598,88	4347,11	20325	2719
6/10/19	10,63	20,34	52,12	930,64	2696,05	8979	1414
9/10/19	20,05	7,14	247,31	1521,05	5018,36	20299	2740
12/10/19	22,92	4,57	52,12	1549,75	4093,03	19774	2958
15/10/19	15,44	4,57	52,12	1093,20	4298,10	11710	1710
18/10/19	20,25	4,57	52,12	1696,38	4674,97	18972	2530
21/10/19	28,63	4,57	52,12	2362,75	6074,72	25405	3328

Página 132 de 264







FECHA	PM2.5	Fluoruro	Cloruro	Nitrato	Sulfato	C Orgánico	C Elemental
MONITOREO	μg/m3	μg	μg	μg	μg	μg	μg
24/10/19	28,72	4,57	194,33	1914,40	5222,48	34010	4265
27/10/19	12,26	4,57	52,12	1762,00	3395,19	7735	1387
30/10/19	12,47	4,57	52,12	1556,51	2794,21	8146	1403
2/11/19	10,96	4,57	52,12	1257,22	3223,99	4942	945
5/11/19	21,08	4,57	52,12	1999,07	4708,68	12114	1963
8/11/19	25,76	18,7	217,5	1500,3	4455,0	15977	3542
11/11/19	9,40	3,5	80,9	705,8	1655,2	7352	857
14/11/19	37,86	34,0	221,4	2050,0	6708,6	22112	4151
17/11/19	8,15	3,7	109,2	807,1	2771,5	9697	1379
20/11/19	17,39	6,3	179,4	1325,5	4056,0	15269	2819
23/11/19	21,74	17,8	148,0	1716,4	5233,3	18509	2570
26/11/19	21,14	29,0	175,2	1470,3	5355,9	15592	3266
29/11/19	35,29	38,0	319,3	2642,8	8006,7	24865	5419
2/12/19	24,80	19,8	352,5	1872,5	6067,9	18731	3211
5/12/19	16,93	26,2	157,2	1599,2	4656,7	15876	1850
8/12/19	11,20	10,3	187,9	796,4	3686,8	10798	1920
11/12/19	23,18	33,0	280,0	1823,1	6542,7	22260	2763
14/12/19	16,12	21,6	250,6	1427,6	3709,9	16414	2697
17/12/19	23,58	12,7	350,3	2292,0	6622,5	24259	3003
20/12/19	21,49	19,9	329,3	1559,6	7418,6	25604	4479
23/12/19	20,49	27,6	375,3	1778,5	6490,5	23975	3700
26/12/19	16,02	11,1	241,7	1977,8	4721,1	21941	3720
29/12/19	22,32	15,8	191,8	2042,2	5495,8	22369	3185

Fuente: Elaboración Propia. Grupo GHYGAM, 2020





Tabla 3-7 Concentración PM2.5 (µg/m³), Concentración Elemental (% P/P). Abril 03–diciembre 29 de 2019. Estación MED-BEME. Medellín-Colombia

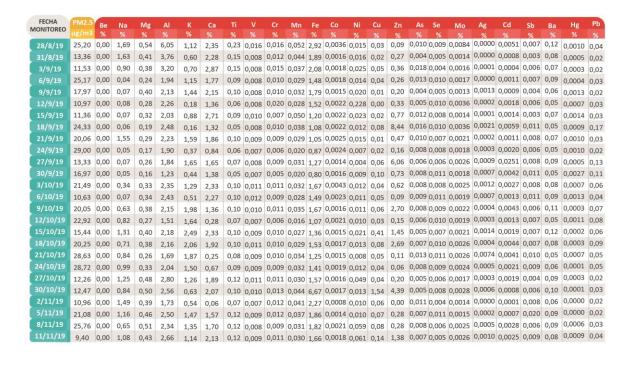
FECHA	PM2.5	Be	Na	Mg	Al	К	Ca	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Со	Ni	Cu	Zn	As	Se	Mo	Ag	Cd	Sb	Ba	Hg	Pb
MONITOREO																				%		%			%
3/4/19	27,23	0,00	0,06	0,08	1,01	1,29	0,35	0,05	0,004	0,002	0,012	1,08	0,0009	0,022	0,03	0,10	0,006	0,003	0,0014	0,0003	0,0010	0,010	0,03	0,0006	0,01
6/4/19	28,33	0,00	0,06	0,20	0,80	1,24	0,60	0,04	0,003	0,001	0,014	0,89	0,0006	0,013	0,01	0,07	0,003	0,004	0,0009	0,0000	0,0008	0,003	0,02	0,0005	0,02
9/4/19	37,09	0,00	0,57	0,35	1,14	1,90	0,95	0,06	0,004	0,008	0,022	1,03	0,0013	0,012	0,06	0,22	0,005	0,007	0,0018	0,0005	0,0022	0,026	0,04	0,0004	0,02
12/4/19	29,84	0,00	0,05	0,36	1,28	0,92	1,04	0,06	0,004	0,007	0,014	1,07	0,0006	0,011	0,12	0,11	0,006	0,004	0,0010	0,0000	0,0006	0,048	0,04	0,0000	0,02
15/4/19	16,08	0,00	0,12	0,47	1,35	1,24	1,27	0,06	0,004	0,004	0,013	0,88	0,0006	0,008	0,03	0,08	0,002	0,003	0,0010	0,0000	0,0010	0,004	0,03	0,0004	0,01
18/4/19	13,65	0,00	1,17	0,54	1,51	0,19	1,19	0,06	0,004	0,005	0,008	0,91	0,0014	0,010	0,02	0,10	0,011	0,005	0,0012	0,0000	0,0039	0,006	0,03	0,0010	0,04
21/4/19	17,90	0,00	1,68	0,27	0,78	0,06	0,61	0,04	0,003	0,004	0,007	0,55	0,0011	0,007	0,04	0,09	0,006	0,005	0,0012	0,0000	0,0007	0,009	0,02	0,0004	0,02
24/4/19	17,57	0,00	0,08	0,38	1,33	0,92	1.64	0,07	0.005	0,008	0,027	1,34	0,0008	0,009	0,02	0,23	0,005	0,006	0,0015	0,0002	0,0014	0,005	0,04	0,0006	0.02
27/4/19	13,46	0,00	2,42	0,53	1,43	1,26	1,39	0,06	0.004	0,006	0,014	0.91	0,0011	0,009	0,05	0,26	0,006	0,007	0,0015	0,0000	0,0016	0,006	0,04	0,0006	0,03
30/4/19	24,45	0,00	0,60	0,39	1,84	1,39	1,30	0,09	0.006	0,006	0.015	1.17	0,0025	0.009	0.01	0,07	0,020	0,006	0,0010	0,0000	0,0010	0,004	0,04	0,0005	0.01
3/5/19	31,11	0,00	0,04	0,22	1,74	0,87	0,87	0.09	0.006	0,005	0.016	1.18	0,0009	0.008	0.05	1,90	0,002	0,004	0,0013	0,0002	0,0042	0,003	0,04	0,0004	0.03
6/5/19	29.02	0.00	0.05	0,42	2,60	1.07	1.45					-,	0,0014		,	0.17	0,003	0,003	0,0011	0,0004	0,0033	0,004	0,05	0,0008	0.02
9/5/19	25.58	0,00	0,06	0,31	1,29	1,33	0,87	0.06	0.004	0,003	0.016	0.80	0,0010	0.007	0.03	0,34	0,012	0,004	0,0013	0,0003	0,0041	0,004	0,03	0,0005	0.02
12/5/19	16,30	0,00	0,07	0,38	1,79	0,22	1,19	Designation of the last of the					0,0013				0,004	0,004	0.0012	0,0002	0,0018	0,005	0,05	0,0008	0.03
15/5/19	30,47	200000	0.05	0,34	1,97	0.82	1,21	200000	T. Carrie		BOAT DESCRIPTION	55000000	0,0017	DO-REGISSION IN	1000000	0550333		100000	CONTRACTOR OF THE PARTY OF THE					0,0005	100000
18/5/19		0,00	0,06	0,30	1,58	1,01	0,73						0,0015		0.80,0000	238500310								0,0006	22000
21/5/19	Control & Control	0,00	0.06	0,11	1,07	0.90	0.55		-,			-,	0,0007			DOOR NOON		0.00000000						0,0006	
24/5/19		0,00	0,07	0,02	1,45	1,05	0,30		1000000000			and the same	0,0010		100000000				0,0014					0.0006	
27/5/19	16,42		0,07	0,02	1,18	0.85	0,35		100			20/00/200	0,0009	-		0.0000								0,0000	0.02
30/5/19		0,00	0,04	0,24	1,18	100.7	0,53						0,0014											0,0008	- Common
2/6/19	11.16	20000000	4,40	0,24	1,53	1,69	2.76					100	0,0014	001800000000		and the second								0,0004	10000000
5/6/19	23,71		1.06	0,91		0,52			-,			-,		.,,	,	1000			The second second					0,0009	1
8/6/19		10000000	000000000	STATE OF THE STATE	1,54	0,78	1,42																		
0/0/13	13,93	0,00	2,12	0,25	1,32	0,97	1,17	0,07	0,005	0,005	0,018	1,19	0,0016	0,009	0,02	0,07	0,003	0,004	0,0017	0,0000	0,0003	0,004	0,06	0,0004	0,02

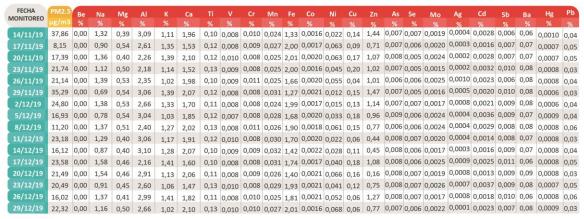
FECHA	PM2.5	Be	Na	Mg	Al	K	Ca	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Со	Ni	Cu	Zn	As	Se	Мо	Ag	Cd	Sb	Ba	Hg	Pb
MONITOREO																									%
11/6/19	15,67	0,00	4,03	0,61	1,73	0,69	1,98	0,09	0,004	0,009	0,023	1,17	0,0017	0,008	0,03	0,08	0,005	0,004	0,0027	0,0000	0,0008	0,009	0,009	0,0005	0,01
14/6/19	14,76	0,00	2,45	0,55	2,31	0,70	1,79	0,10	0,006	0,010	0,020	1,30	0,0012	0,007	0,02	0,08	0,005	0,003	0,0017	0,0000	0,0008	0,005	0,005	0,0000	0,02
17/6/19	22,90	0,00	1,56	0,36	2,38	1,54	1,47	0,09	0,007	0,005	0,015	1,11	0,0018	0,007	0,02	0,08	0,004	0,004	0,0014	0,0000	0,0010	0,004	0,004	0,0008	0,02
20/6/19	24,54	0,00	2,00	0,49	3,01	1,44	1,81	0,12	0,008	0,007	0,019	1,37	0,0019	0,008	0,02	0,09	0,004	0,005	0,0015	0,0000	0,0012	0,006	0,006	0,0008	0,02
23/6/19	19,27	0,00	1,96	0,41	2,78	0,52	1,34	0,11	0,008	0,005	0,013	1,14	0,0021	0,009	0,02	0,04	0,004	0,005	0,0013	0,0000	0,0008	0,004	0,004	0,0007	0,01
26/6/19	15,42	0,00	0,07	0,51	3,41	1,07	1,71	0,14	0,009	0,008	0,023	1,75	0,0014	0,008	0,02	0,07	0,003	0,005	0,0013	0,0001	0,0005	0,005	0,005	0,0001	0,02
29/6/19	21,63	0,00	0,04	0,45	3,29	1,34	1,31	0,12	0,010	0,007	0,015	1,42	0,0019	0,009	0,02	0,05	0,005	0,005	0,0011	0,0001	0,0008	0,003	0,003	0,0007	0,02
2/7/19	18,69	0,00	0,06	0,42	2,44	1,75	1,33	0,11	0,007	0,007	0,024	1,47	0,0012	0,007	0,02	0,10	0,004	0,004	0,0010	0,0005	0,0033	0,013	0,013	0,0001	0,04
5/7/19	21,49	0,00	0,05	0,41	2,93	0,95	1,24	0,12	0,009	0,007	0,020	1,54	0,0018	0,009	0,02	0,10	0,005	0,005	0,0013	0,0001	0,0010	0,005	0,005	0,0006	0,04
8/7/19	19,24	0,00	0,13	0,57	3,51	0,66	1,48	0,14	0,010	0,007	0,020	1,63	0,0016	0,008	0,02	1,24	0,004	0,003	0,0012	0,0002	0,0010	0,004	0,004	0,0011	0,03
11/7/19	16,23	0,00	0,62	0,34	2,50	0,88	1,60	0,13	0,008	0,010	0,021	1,44	0,0015	0,215	0,04	0,23	0,003	0,005	0,0024	0,0002	0,0007	0,005	0,005	0,0004	0,03
14/7/19	14,74	0,00	1,50	0,32	1,41	0,38	1,09	0,07	0,005	0,006	0,013	0,81	0,0012	0,389	0,05	0,22	0,008	0,004	0,0033	0,0002	0,0013	0,004	0,004	0,0004	0,02
17/7/19	13,77	0,00	0,06	0,22	1,68	0,82	1,29	0,09	0,006	0,005	0,017	1,05	0,0010	0,120	0,03	0,05	0,003	0,003	0,0011	0,0000	0,0003	0,002	0,002	0,0005	0,01
20/7/19	10,06	0,00	1,14	0,52	2,48	0,35	2,23	0,12	0,008	0,008	0,017	1,25	0,0012	0,173	0,02	0,13	0,002	0,003	0,0012	0,0000	0,0009	0,003	0,003	0,0000	0,02
23/7/19	20,60	0,00	0,27	0,43	1,72	0,89	1,15	0,09	0,007	0,006	0,017	0,96	0,0010	0,075	0,03	1,16	0,004	0,005	0,0014	0,0001	0,0020	0,004	0,004	0,0006	0,05
26/7/19	11,89	0,00	0,06	0,37	2,56	0,30	1,57	0,12	0,007	0,006	0,019	1,29	0,0010	0,035	0,03	0,06	0,002	0,003	0,0012	0,0000	0,0005	0,004	0,004	0,0005	0,02
29/7/19	15,08	0,00	0,05	0,18	1,41	0,40	3,31	0,10	0,005	0,005	0,017	0,93	0,0007	0,000	0,01	0,00	0,001	0,002	0,0006	0,0000	0,0001	0,001	0,001	0,0000	0,01
1/8/19	20,63	0,00	0,74	0,37	2,31	1,06	1,46	0,12	0,007	0,007	0,021	1,31	0,0011	0,000	0,03	2,55	0,002	0,003	0,0013	0,0001	0,0066	0,004	0,004	0,0003	0,17
4/8/19	10,68	0,00	3,06	0,77	2,59	0.61	2.20	0,15	0.008	0,011	0,029	1.72	0,0012	0,000	0,02	0,00	0,002	0,005	0,0011	0,0000	0,0001	0,003	0,003	0,0000	0,02
7/8/19	23,57	0,00	1,90	0,45	2,22	0.81	1,97	0,11	0.007	0,009	0,017	1.21	0,0013	0,031	0,02	0,08	0,002	0,004	0,0011	0,0000	0,0006	0,003	0,003	0,0004	0,01
10/8/19	25,61	0,00	3,10	0,78	4,79	1,06	3,16	0,21	0,013	0,013	0,032	1,94	0,0020	0,016	0,03	0,15	0,003	0,005	0,0017	0,0000	0,0003	0,004	0,004	0,0023	0,01
13/8/19	21,00	0,00	2,29	0,65	3,97	0.76	2,80	0,19	0.010	0,013	0,037	1.87	0,0021	0,016	0,03	0,15	0,006	0,003	0,0017	0,0000	0,0006	0,006	0,006	0,0008	0,02
16/8/19	26,57	0,00	1,67	0,24	2,29	1.28	1,46	0,10	0.007	0,009	0,023	1.09	0,0018	0,015	0,03	0,12	0,004	0,005	0,0018	0,0000	0,0008	0,005	0,005	0,0005	0,03
19/8/19	15,98	0,00	1,45	0,44	4,41	0,83	2,48	0,18	0.018	0,011	0,029	2.14	0,0038	0.015	0.03	0,04	0,005	0,008	0,0027	0,0000	0,0011	0,010	0,010	0,0011	0,03
22/8/19	18,76	0,00	1,68	0,46	3,89	1.57	2.37		-				0,0025											0,0009	
25/8/19	20,38	0,00	2,89	0,60	4.05	-/	2,63										0,005	0,005	0,0019	0,0006	0,0010	0,005	0,005	0,0007	0,14

f v m m @areametropol www.metropol.gov.co









Fuente: Elaboración Propia. Grupo GHYGAM, 2020





Tabla 3-8. Concentración PM2.5 (μg/m³), Concentración Iones (%), EC, OC (%), Relación OC/EC. abril 03–diciembre 29 de 2019. Estación MED-BEME. Medellín-Colombia.

FECHA	PM2.5	Fluoruro	Cloruro	Nitrato	Sulfato	C Orgánico	C Elemental	OC/EC
MONITOREO		%	%	%	%	%	%	OC/EC
3/4/19	27,23	0,01	3,05	3,05	13,2	114,49	28,17	4,06
6/4/19	28,33	0,01	0,70	2,65	10,2	58,26	6,14	9,49
9/4/19	37,09	0,01	0,41	9,45	14,4	41,72	6,67	6,25
12/4/19	29,84	0,01	0,48	2,79	11,5	31,00	3,16	9,82
15/4/19	16,08	0,02	0,63	2,66	11,6	33,24	5,01	6,64
18/4/19	13,65	0,12	1,40	3,71	10,2	43,21	3,01	14,37
21/4/19	17,90	0,01	0,23	5,21	8,5	25,02	4,63	5,40
24/4/19	17,57	0,12	2,05	4,21	12,8	36,87	8,44	4,37
27/4/19	13,46	0,08	1,33	2,14	8,9	29,42	5,42	5,43
30/4/19	24,45	0,05	0,30	2,50	15,3	35,95	3,18	11,29
3/5/19	31,11	0,09	0,36	2,35	16,9	37,42	2,96	12,62
6/5/19	29,02	0,11	0,13	1,19	14,0	37,72	4,89	7,71
9/5/19	25,58	0,11	0,44	4,02	12,2	26,65	6,31	4,22
12/5/19	16,30	0,02	0,18	3,56	40,5	37,71	4,04	9,33
15/5/19	30,47	0,10	0,34	2,54	13,2	28,95	4,60	6,29
18/5/19	23,04	0,01	0,81	3,60	15,5	35,25	4,47	7,89
21/5/19	21,18	0,01	0,14	4,87	9,7	24,20	5,47	4,43
24/5/19	18,45	0,09	0,16	3,38	10,8	27,57	6,38	4,32
27/5/19	16,42	0,21	0,17	2,95	7,5	27,69	6,38	4,34
30/5/19	31,89	0,05	0,39	4,12	7,6	34,44	4,16	8,28
2/6/19	11,16	0,02	0,25	3,56	11,1	36,13	3,63	9,95
5/6/19	23,71	0,01	0,33	3,61	5,4	38,60	4,58	8,43
8/6/19	13,93	0,07	0,18	3,47	10,7	32,39	2,82	11,50
11/6/19	15,67	0,08	0,14	2,66	10,7	24,34	4,18	5,82
14/6/19	14,76	0,16	0,15	2,65	8,0	20,79	4,14	5,02
17/6/19	22,90	0,13	0,55	1,55	6,3	33,86	3,54	9,56
20/6/19	24,54	0,09	0,34	0,89	8,3	32,18	3,68	8,74
23/6/19	19,27	0,14	0,13	2,07	6,7	32,07	1,92	16,67
26/6/19	15,42	0,07	0,17	1,47	13,6	30,34	4,32	7,03
29/6/19	21,63	0,14	0,32	1,82	8,8	29,41	2,58	11,38
2/7/19	18,69	0,06	0,51	3,96	7,7	28,13	4,42	6,37
5/7/19	21,49	0,10	0,51	3,05	6,9	32,98	2,95	11,18



TERRITORIOS INTEGRADOS



FECHA	PM2.5	Fluoruro	Cloruro	Nitrato	Sulfato	C Orgánico	C Elemental	OC/EC
MONITOREO		%	%	%	%	%	%	OC/LC
8/7/19	19,24	0,08	0,11	1,48	5,6	106,77	34,05	3,14
11/7/19	16,23	0,01	0,44	2,68	9,4	30,49	4,88	6,25
14/7/19	14,74	0,01	0,15	1,20	5,1	23,87	3,60	6,63
17/7/19	13,77	0,01	0,14	0,12	5,9	29,03	4,86	5,97
20/7/19	10,06	0,05	0,20	0,17	7,1	25,87	4,59	5,64
23/7/19	20,60	0,01	0,11	1,04	7,2	32,27	4,92	6,56
26/7/19	11,89	0,01	0,13	0,11	4,1	29,24	4,50	6,49
29/7/19	15,08	0,01	0,12	0,10	5,4	32,04	3,71	8,64
1/8/19	20,63	0,01	0,33	2,30	6,0	27,20	4,70	5,79
4/8/19	10,68	0,02	0,18	2,30	7,2	32,76	3,79	8,65
7/8/19	23,57	0,01	0,09	1,13	4,2	34,09	1,99	17,10
10/8/19	25,61	0,01	1,22	1,60	4,3	37,52	2,66	14,10
13/8/19	21,00	0,04	0,48	1,68	3,8	27,43	2,75	9,98
16/8/19	26,57	0,01	0,66	4,50	7,8	31,79	2,85	11,17
19/8/19	15,98	0,11	0,64	1,75	4,7	36,48	2,75	13,27
22/8/19	18,76	0,04	0,67	2,00	5,6	31,20	2,93	10,66
25/8/19	20,38	0,04	0,50	1,36	4,9	23,44	2,05	11,42
28/8/19	25,20	0,12	0,82	2,08	5,0	30,73	2,58	11,92
31/8/19	13,36	0,01	0,68	2,15	5,5	25,25	2,11	11,95
3/9/19	11,53	0,01	0,56	2,20	3,9	25,31	3,64	6,95
6/9/19	25,17	0,08	0,69	3,09	4,5	29,55	3,35	8,81
9/9/19	17,97	0,01	0,11	2,30	6,1	20,24	2,89	7,01
12/9/19	10,97	0,02	0,18	3,13	8,3	29,00	4,56	6,36
15/9/19	11,36	0,13	0,16	2,00	5,9	21,86	3,45	6,34
18/9/19	24,33	0,09	0,80	5,29	7,5	43,25	6,16	7,02
21/9/19	20,06	0,06	0,36	2,86	9,1	22,87	3,16	7,23
24/9/19	29,00	0,01	0,43	3,74	8,9	36,29	5,25	6,91
27/9/19	13,33	0,01	0,17	2,17	8,9	37,73	5,89	6,40
30/9/19	16,97	0,01	0,52	2,01	8,5	34,34	4,78	7,18
3/10/19	21,49	0,07	0,63	2,83	7,7	36,04	4,82	7,47
6/10/19	10,63	0,06	0,16	2,90	8,4	27,97	4,40	6,35
9/10/19	20,05	0,01	0,38	2,35	7,8	31,42	4,24	7,41
12/10/19	22,92	0,01	0,11	3,31	8,8	42,28	6,32	6,69
15/10/19	15,44	0,01	0,11	2,34	9,2	25,09	3,67	6,85
18/10/19	20,25	0,01	0,10	3,25	9,0	36,32	4,84	7,50
21/10/19	28,63	0,01	0,10	4,60	11,8	49,49	6,48	7,63





FECHA	PM2.5	Fluoruro	Cloruro	Nitrato	Sulfato	C Orgánico	C Elemental	OC/EC
MONITOREO		%	%	%	%	%	%	00/20
24/10/19	28,72	0,01	0,32	3,10	8,5	55,15	6,92	7,98
27/10/19	12,26	0,01	0,13	4,36	8,4	19,16	3,43	5,58
30/10/19	12,47	0,01	0,15	4,38	7,9	22,95	3,95	5,81
2/11/19	10,96	0,02	0,22	5,20	13,3	20,45	3,91	5,23
5/11/19	21,08	0,01	0,12	4,59	10,8	27,83	4,51	6,17
8/11/19	25,76	0,04	0,44	3,01	8,95	32,10	7,12	4,51
11/11/19	9,40	0,02	0,44	3,82	8,96	39,81	4,64	8,58
14/11/19	37,86	0,06	0,41	3,82	12,51	41,23	7,74	5,33
17/11/19	8,15	0,02	0,51	3,74	12,83	44,89	6,38	7,03
20/11/19	17,39	0,02	0,50	3,68	11,27	42,41	7,83	5,42
23/11/19	21,74	0,04	0,34	3,95	12,05	42,62	5,92	7,20
26/11/19	21,14	0,06	0,36	2,99	10,90	31,73	6,65	4,77
29/11/19	35,29	0,06	0,48	3,96	11,99	37,22	8,11	4,59
2/12/19	24,80	0,04	0,64	3,42	11,09	34,24	5,87	5,83
5/12/19	16,93	0,06	0,38	3,91	11,38	38,78	4,52	8,58
8/12/19	11,20	0,04	0,67	2,85	13,20	38,66	6,87	5,62
11/12/19	23,18	0,05	0,44	2,85	10,21	34,75	4,31	8,06
14/12/19	16,12	0,06	0,66	3,76	9,78	43,27	7,11	6,09
17/12/19	23,58	0,02	0,60	3,91	11,29	41,35	5,12	8,08
20/12/19	21,49	0,03	0,57	2,68	12,73	43,94	7,69	5,72
23/12/19	20,49	0,05	0,67	3,17	11,58	42,76	6,60	6,48
26/12/19	16,02	0,02	0,49	4,05	9,67	44,93	7,62	5,90
29/12/19	22,32	0,03	0,36	3,87	10,42	42,42	6,04	7,02

Fuente: Elaboración Propia. Grupo GHYGAM, 2020

Tabla 3-9 Concentración PM2.5 (μg/m³), Concentración Elemental (μg/m³). Abril 03–diciembre 29 de 2019. Estación MED-BEME. Medellín-Colombia.

FECHA	PM2.5	Be	Na	Mg	Al	К	Ca		V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	Se	Мо	Ag	Cd	Sb	Ba	Hg	Pb
MONITOREO	μg/m3	(µg/m')	(μg/m ⁻)	(µg/m')	(µg/m ¹)	(µg/m ¹)	(µg/m²)		(µg/m ⁻)		(µg/m')		(µg/m')		(µg/m ⁻)		(µg/m')		(hg/m·)		(µg/m [*])				(µg/m
3/4/19	27,23	0,00	0,02	0,022	0,28	0,36	0,10	0,01	0,0011	0,001	0,003	0,30	0,0002	0,006	0,008	0,03	0,0017	0,0008	0,0004	0,0001	0,0003	0,0027	0,007	0,00016	0,003
	28,33	0,00	0,02	0,076	0,30	0,47	0,23	0,01	0,0012	0,001	0,005	0,34	0,0002	0,005	0,005	0,03	0,0013	0,0017	0,0004	0,0000	0,0003	0,0011	0,009	0,00018	0,006
9/4/19	37,09	0,00	0,22	0,132	0,44	0,72	0,36	0,02	0,0017	0,003	0,008	0,39	0,0005	0,005	0,022	0,09	0,0019	0,0026	0,0007	0,0002	0,0008	0,0098	0,017	0,00016	0,009
12/4/19	29,84	0,00	0,02	0,124	0,44	0,31	0,35	0,02	0,0015	0,002	0,005	0,36	0,0002	0,004	0,040	0,04	0,0019	0,0014	0,0003	0,0000	0,0002	0,0164	0,013	0,00001	0,006
15/4/19	16,08	0,00	0,03	0,113	0,33	0,30	0,31	0,01	0,0011	0,001	0,003	0,21	0,0001	0,002	0,007	0,02	0,0005	0,0008	0,0002	0,0000	0,0002	0,0008	0,008	0,00009	0,003
18/4/19	13,65	0,00	0,22	0,101	0,28	0,04	0,22	0,01	0,0008	0,001	0,002	0,17	0,0003	0,002	0,003	0,02	0,0021	0,0010	0,0002	0,0000	0,0007	0,0011	0,007	0,00019	0,008
21/4/19	17,90	0,00	0,46	0,074	0,22	0,02	0,17	0,01	0,0008	0,001	0,002	0,15	0,0003	0,002	0,012	0,03	0,0015	0,0013	0,0003	0,0000	0,0002	0,0025	0,007	0,00011	0,004
24/4/19	17,57	0,00	0,02	0,086	0,30	0,21	0,37	0,02	0,0011	0,002	0,006	0,30	0,0002	0,002	0,006	0,05	0,0012	0,0013	0,0003	0,0000	0,0003	0,0011	0,009	0,00013	0,004
27/4/19	13,46	0,00	0,53	0,117	0,31	0,28	0,30	0,01	0,0009	0,001	0,003	0,20	0,0002	0,002	0,010	0,06	0,0014	0,0015	0,0003	0,0000	0,0004	0,0013	0,009	0,00014	0,006
30/4/19	24,45	0,00	0,17	0,108	0,51	0,39	0,36	0,02	0,0017	0,002	0,004	0,33	0,0007	0,002	0,004	0,02	0,0057	0,0016	0,0003	0,0000	0,0003	0,0011	0,012	0,00013	0,003
3/5/19	31,11	0,00	0,02	0,082	0,65	0,32	0,32	0,03	0,0021	0,002	0,006	0,44	0,0003	0,003	0,020	0,70	0,0008	0,0015	0,0005	0,0001	0,0016	0,0011	0,016	0,00014	0,013
	29,02	0,00	0,02	0,124	0,78	0,32	0,44	0,04	0,0022	0,002	0,007	0,53	0,0004	0,003	0,008	0,05	0,0008	0,0010	0,0003	0,0001	0,0010	0,0012	0,016	0,00023	0,005
9/5/19	25,58	0,00	0,02	0,082	0,34	0,35	0,23	0,02	0,0010	0,001	0,004	0,21	0,0002	0,002	0,007	0,09	0,0032	0,0012	0,0004	0,0001	0,0011	0,0012	0,008	0,00014	0,006
12/5/19	16,30	0,00	0,02	0,085	0,40	0,05	0,27	0,02	0,0014	0,001	0,004	0,25	0,0003	0,002	0,007	0,02	0,0008	0,0009	0,0003	0,0000	0,0004	0,0010	0,011	0,00018	0,006
15/5/19	30,47	0,00	0,02	0,118	0,68	0,28	0,42	0,04	0,0024	0,002	0,006	0,44	0,0006	0,004	0,009	0,04	0,0029	0,0019	0,0005	0,0000	0,0006	0,0025	0,016	0,00019	0,009
18/5/19	23,04	0,00	0,02	0,083	0,43	0,28	0,20	0,02	0,0014	0,001	0,005	0,26	0,0004	0,003	0,006	0,06	0,0012	0,0016	0,0005	0,0000	0,0003	0,0015	0,009	0,00018	0,005
21/5/19	21,18	0,00	0,02	0,032	0,30	0,25	0,16	0,02	0,0010	0,001	0,008	0,32	0,0002	0,002	0,010	0,05	0,0010	0,0012	0,0003	0,0001	0,0003	0,0014	0,008	0,00016	0,007
24/5/19	18,45	0,00	0,02	0,005	0,34	0,25	0,07	0,02	0,0015	0,001	0,008	0,38	0,0002	0,002	0,010	0,06	0,0014	0,0016	0,0003	0,0000	0,0002	0,0019	0,009	0,00014	0,006
27/5/19	16,42	0,00	0,02	0,005	0,27	0,20	0,08	0,02	0,0011	0,001	0,005	0,28	0,0002	0,001	0,008	0,02	0,0022	0,0009	0,0003	0,0000	0,0001	0,0017	0,007	0,00001	0,004
30/5/19	31,89	0,00	0,02	0,102	0,49	0,70	0,24	0,03	0,0020	0,011	0,007	0,41	0,0006	0,003	0,010	0,07	0,0020	0,0022	0,0007	0,0002	0,0006	0,0029	0,017	0,00032	0,033
2/6/19	11,16	0,00	0,67	0,138	0,23	0,08	0,42	0,01	0,0007	0,002	0,002	0,09	0,0002	0,001	0,003	0,01	0,0010	0,0005	0,0009	0,0000	0,0001	0,0011	0,008	0,00006	0,003
5/6/19	23,71	0,00	0,38	0,157	0,54	0,27	0,50	0,03	0,0014	0,002	0,007	0,35	0,0003	0,002	0,006	0,03	0,0013	0,0011	0,0003	0,0000	0,0003	0,0014	0,016	0,00031	0,008

Página 138 de 264







FECHA	PM2.5	Be	Na	Mg	Al	K	Ca	Ti	٧	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	Se	Mo	Ag	Cd	Sb	Ва	Hg	Pb
MONITOREO	μg/m3																								
8/6/19	13,93	0,00	0,46	0,054	0,29	0,21	0,25	0,02	0,0011	0,001	0,004	0,26	0,0003	0,002	0,005	0,01	0,0007	0,0009	0,0004	0,0000	0,0001	0,0009	0,012	0,00008	0,003
11/6/19	15,67	0,00	1,16	0,177	0,50	0,20	0,57	0,02	0,0013	0,003	0,007	0,34	0,0005	0,002	0,007	0,02	0,0014	0,0011	0,0008	0,0000	0,0002	0,0027	0,013	0,00014	0,004
14/6/19	14,76	0,00	0,61	0,138	0,57	0,17	0,45	0,03	0,0015	0,003	0,005	0,32	0,0003	0,002	0,004	0,02	0,0012	0,0007	0,0004	0,0000	0,0002	0,0012	0,015	0,00001	0,004
17/6/19	22,90	0,00	0,57	0,132	0,87	0,57	0,54	0,03	0,0027	0,002	0,005	0,41	0,0007	0,003	0,006	0,03	0,0014	0,0013	0,0005	0,0000	0,0004	0,0014	0,023	0,00028	0,006
20/6/19	24,54	0,00	0,75	0,183	1,12	0,54	0,67	0,05	0,0030	0,002	0,007	0,51	0,0007	0,003	0,007	0,03	0,0016	0,0019	0,0006	0,0000	0,0005	0,0024	0,032	0,00030	0,008
23/6/19	19,27	0,00	0,58	0,123	0,83	0,15	0,40	0,03	0,0025	0,002	0,004	0,34	0,0006	0,003	0,005	0,01	0,0011	0,0015	0,0004	0,0000	0,0002	0,0013	0,020	0,00021	0,004
26/6/19	15,42	0,00	0,02	0,118	0,78	0,25	0,39	0,03	0,0020	0,002	0,005	0,40	0,0003	0,002	0,005	0,02	0,0006	0,0011	0,0003	0,0000	0,0001	0,0012	0,015	0,00002	0,004
29/6/19	21,63	0,00	0,02	0,173	1,27	0,52	0,51	0,05	0,0038	0,003	0,006	0,55	0,0007	0,004	0,006	0,02	0,0021	0,0020	0,0004	0,0000	0,0003	0,0013	0,034	0,00026	0,009
2/7/19	18,69	0,00	0,02	0,111	0,64	0,46	0,35	0,03	0,0018	0,002	0,006	0,39	0,0003	0,002	0,006	0,03	0,0012	0,0011	0,0003	0,0001	0,0009	0,0034	0,015	0,00002	0,009
5/7/19	21,49	0,00	0,02	0,141	1,00	0,33	0,42	0,04	0,0029	0,002	0,007	0,53	0,0006	0,003	0,008	0,03	0,0018	0,0017	0,0004	0,0000	0,0003	0,0016	0,025	0,00019	0,013
8/7/19	19,24	0,00	0,04	0,195	1,20	0,23	0,51	0,05	0,0034	0,002	0,007	0,56	0,0005	0,003	0,007	0,43	0,0015	0,0012	0,0004	0,0001	0,0003	0,0013	0,026	0,00038	0,012
11/7/19	16,23	0,00	0,17	0,093	0,68	0,24	0,43	0,04	0,0022	0,003	0,006	0,39	0,0004	0,058	0,011	0,06	0,0008	0,0014	0,0006	0,0000	0,0002	0,0014	0,018	0,00011	0,007
14/7/19	14,74	0,00	0,40	0,085	0,38	0,10	0,29	0,02	0,0014	0,002	0,003	0,22	0,0003	0,104	0,013	0,06	0,0021	0,0011	0,0009	0,0000	0,0003	0,0010	0,013	0,00012	0,006
17/7/19	13,77	0,00	0,02	0,063	0,48	0,23	0,37	0,03	0,0017	0,002	0,005	0,30	0,0003	0,034	0,008	0,01	0,0008	0,0009	0,0003	0,0000	0,0001	0,0006	0,015	0,00013	0,004
20/7/19	10,06	0,00	0,22	0,101	0,48	0,07	0,43	0,02	0,0016	0,002	0,003	0,24	0,0002	0,033	0,004	0,03	0,0004	0,0005	0,0002	0,0000	0,0002	0,0006	0,014	0,00001	0,003
23/7/19	20,60	0,00	0,09	0,153	0,61	0,32	0,41	0,03	0,0023	0,002	0,006	0,34	0,0004	0,027	0,012	0,41	0,0012	0,0017	0,0005	0,0000	0,0007	0,0015	0,021	0,00022	0,016
26/7/19	11,89	0,00	0,02	0,110	0,76	0,09	0,47	0,04	0,0022	0,002	0,005	0,38	0,0003	0,010	0,008	0,02	0,0005	0,0009	0,0004	0,0000	0,0001	0,0013	0,020	0,00014	0,006
29/7/19	15,08	0,00	0,02	0,058	0,44	0,13	1,04	0,03	0,0015	0,002	0,005	0,29	0,0002	0,000	0,004	0,00	0,0004	0,0007	0,0002	0,0000	0,0000	0,0004	0,011	0,00001	0,003
1/8/19	20,63	0,00	0,31	0,152	0,95	0,43	0,60	0,05	0,0027	0,003	0,009	0,54	0,0005	0,000	0,012	1,05	0,0007	0,0014	0,0005	0,0001	0,0027	0,0018	0,025	0,00014	0,070
4/8/19	10,68	0,00	0,68	0,171	0,58	0,14	0,49	0,03	0,0017	0,002	0,006	0,38	0,0003	0,000	0,004	0,00	0,0005	0,0011	0,0002	0,0000	0,0000	0,0006	0,016	0,00001	0,003
7/8/19	23,57	0,00	0,84	0,197	0,98	0,36	0,87	0,05	0,0033	0,004	0,008	0,54	0,0006	0,014	0,008	0,03	0,0007	0,0019	0,0005	0,0000	0,0003	0,0014	0,027	0,00016	0,006
10/8/19	25,61	0,00	0,82	0,205	1,26	0,28	0,83	0,05	0,0033	0,003	0,008	0,51	0,0005	0,004	0,009	0,04	0,0009	0,0014	0,0005	0,0000	0,0001	0,0009	0,038	0,00061	0,004
13/8/19	21,00	0,00	0,99	0,281	1,71	0,33	1,21	0,08	0,0045	0,006	0,016	0,81	0,0009	0,007	0,012	0,06	0,0028	0,0012	0,0007	0,0000	0,0002	0,0024	0,047	0,00033	0,007
16/8/19	26,57	0,00	0,70	0,101	0,96	0,54	0,62	0,04	0,0029	0,004	0,009	0,46	0,0007	0,006	0,011	0,05	0,0018	0,0020	0,0007	0,0000	0,0003	0,0023	0,029	0,00022	0,013
19/8/19	15,98	0,00	0,59	0,179	1,78	0,33	1,00	0,07	0,0074	0,004	0,012	0,86	0,0015	0,006	0,011	0,02	0,0022	0,0032	0,0011	0,0000	0,0004	0,0039	0,051	0,00046	0,010
22/8/19	18,76	0,00	0,71	0,194	1,65	0,66	1,00	0,07	0,0048	0,006	0,014	0,86	0,0010	0,008	0,015	0,06	0,0015	0,0030	0,0010	0,0000	0,0009	0,0020	0,036	0,00036	0,008

FECHA	PM2.5	Ве	Na	Mg	Al	К	Ca	Ti	٧	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	Se	Мо	Ag	Cd	Sb	Ва	Hg	Pb
MONITOREO	μg/m3		(µg/m [*])		(µg/m [*])				(µg/m ⁻)				(µg/m')				(µg/m')								
25/8/19	20,38	0,00	1,10	0,229	1,54	0,28	1,00	0,07	0,0047	0,005	0,010	0,67	0,0008	0,005	0,023	0,06	0,0019	0,0018	0,0007	0,0002	0,0004	0,0021	0,047	0,00028	0,055
28/8/19	25,20	0,00	0,84	0,267	3,02	0,56	1,17	0,11	0,0080	0,008	0,026	1,46	0,0018	0,007	0,014	0,04	0,0050	0,0044	0,0042	0,0000	0,0025	0,0034	0,061	0,00051	0,018
31/8/19	13,36	0,00	0,53	0,133	1,22	0,19	0,74	0,05	0,0026	0,004	0,014	0,61	0,0005	0,005	0,007	0,09	0,0012	0,0016	0,0005	0,0000	0,0002	0,0011	0,026	0,00018	0,007
3/9/19	11,53	0,00	0,29	0,125	1,05	0,23	0,94	0,05	0,0027	0,005	0,012	0,68	0,0006	0,008	0,017	0,12	0,0058	0,0012	0,0005	0,0000	0,0001	0,0020	0,024	0,00010	0,006
6/9/19	25,17	0,00	0,02	0,105	0,85	0,50	0,77	0,04	0,0037	0,004	0,013	0,65	0,0008	0,006	0,016	0,11	0,0058	0,0044	0,0007	0,0000	0,0005	0,0031	0,039	0,00017	0,014
9/9/19	17,97	0,00	0,02	0,144	0,77	0,53	0,78	0,03	0,0031	0,004	0,012	0,65	0,0006	0,007	0,005	0,07	0,0015	0,0018	0,0005	0,0005	0,0003	0,0013	0,023	0,00046	0,007
12/9/19	10,97	0,00	0,02	0,061	0,49	0,04	0,29	0,01	0,0017	0,004	0,006	0,33	0,0005	0,049	0,001	0,07	0,0011	0,0021	0,0008	0,0000	0,0004	0,0013	0,011	0,00016	0,006
15/9/19	11,36	0,00	0,02	0,079	0,50	0,22	0,66	0,02	0,0025	0,002	0,012	0,29	0,0005	0,006	0,006	0,19	0,0028	0,0020	0,0003	0,0000	0,0003	0,0008	0,017	0,00033	0,007
18/9/19	24,33	0,00	0,01	0,047	0,62	0,04	0,33	0,01	0,0021	0,002	0,009	0,27	0,0005	0,003	0,020	2,11	0,0040	0,0025	0,0009	0,0005	0,0015	0,0029	0,013	0,00022	0,043
21/9/19	20,06	0,00	0,54	0,102	0,77	0,55	0,64	0,03	0,0031	0,003	0,010	0,36	0,0009	0,005	0,004	0,16	0,0036	0,0023	0,0007	0,0001	0,0004	0,0027	0,023	0,00034	0,011
24/9/19	29,00	0,00	0,02	0,059	0,67	0,13	0,30	0,02	0,0024	0,002	0,007	0,31	0,0008	0,002	0,007	0,06	0,0028	0,0027	0,0006	0,0001	0,0007	0,0020	0,019	0,00037	0,008
27/9/19	13,33	0,00	0,02	0,056	0,39	0,35	0,35	0,01	0,0017	0,002	0,007	0,27	0,0003	0,001	0,013	1,28	0,0012	0,0013	0,0005	0,0002	0,0053	0,0016	0,019	0,00010	0,028
30/9/19	16,97	0,00	0,01	0,049	0,38	0,14	0,43	0,02	0,0022	0,002	0,006	0,25	0,0005	0,003	0,031	0,23	0,0025	0,0034	0,0005	0,0002	0,0013	0,0035	0,015	0,00083	0,034
3/10/19	21,49	0,00	0,13	0,125	0,88	0,48	0,87	0,04	0,0042	0,004	0,012	0,63	0,0016	0,005	0,014	0,23	0,0029	0,0031	0,0009	0,0005	0,0010	0,0031	0,030	0,00025	0,022
6/10/19	10,63	0,00	0,01	0,067	0,48	0,10	0,45	0,02	0,0023	0,002	0,006	0,29	0,0005	0,002	0,009	0,02	0,0017	0,0021	0,0004	0,0001	0,0002	0,0023	0,017	0,00025	0,007
9/10/19	20,05	0,00	0,26	0,158	0,89	0,82	0,56	0,04	0,0042	0,005	0,014	0,69	0,0007	0,005	0,024	1,11	0,0033	0,0039	0,0009	0,0001	0,0018	0,0025	0,046	0,00011	0,028
12/10/19	22,92	0,00	0,24	0,080	0,45	0,49	0,08	0,02	0,0022	0,002	0,005	0,32	0,0006	0,003	0,010	0,04	0,0017	0,0029	0,0006	0,0001	0,0004	0,0022	0,016	0,00034	0,023
15/10/19	15,44	0,00	0,39	0,118	0,65	0,74	0,69	0,03	0,0027	0,003	0,008	0,41	0,0004	0,006	0,122	0,43	0,0014	0,0021	0,0006	0,0004	0,0006	0,0021	0,036	0,00007	0,018
18/10/19	20,25	0,00	0,22	0,118	0,67	0,64	0,59	0,03	0,0034	0,003	0,009	0,47	0,0005	0,004	0,024	0,83	0,0020	0,0030	0,0008	0,0001	0,0014	0,0023	0,025	0,00009	0,029
21/10/19	28,63	0,00	0,29	0,090	0,58	0,64	0,09	0,03	0,0030	0,003	0,012	0,43	0,0005	0,003	0,017	0,04	0,0045	0,0038	0,0009	0,0025	0,0014	0,0035	0,019	0,00024	0,015
24/10/19	28,72	0,00	0,39	0,130	0,80	0,59	0,26	0,03	0,0035	0,004	0,013	0,55	0,0008	0,005	0,016	0,03	0,0033	0,0036	0,0009	0,0002	0,0008	0,0035	0,024	0,00004	0,020
27/10/19	12,26	0,00	0,32	0,124	0,72	0,32	0,49	0,03	0,0028	0,003	0,008	0,40	0,0004	0,013	0,009	0,05	0,0014	0,0015	0,0004	0,0001	0,0005	0,0011	0,023	0,00007	0,006
30/10/19	12,47	0,00	0,21	0,127	0,65	0,16	0,53	0,03	0,0025	0,003	0,011	1,69	0,0004	0,003	0,391	1,12	0,0014	0,0020	0,0007	0,0002	0,0002	0,0015	0,027	0,00002	0,007
2/11/19	10,96	0,00	0,28	0,074	0,33	0,10	0,01	0,01	0,0013	0,002	0,008	0,43	0,0002	0,002	0,012	0,00	0,0021	0,0007	0,0003	0,0000	0,0000	0,0016	0,012	0,00001	0,004
5/11/19	21,08	0,00	0,39	0,157	0,84	0,50	0,53	0,04	0,0031	0,004	0,013	0,63	0,0005	0,004	0,024	0,10	0,0025	0,0037	0,0005	0,0001	0,0002	0,0069	0,030	0,00001	0,008
8/11/19	25,76	0,00	0,25	0,199	0,91	0,52	0,66	0,05	0,0030	0,003	0,012	0,70	0,0008	0,023	0,031	0,11	0,0032	0,0024	0,0010	0,0002	0,0011	0,0024	0,033	0,00024	0,013





FECHA	PM2.5	Be	Na	Mg	Al	К	Ca	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	Se	Mo	Ag	Cd	Sb	Ва	Hg	Pb
MONITOREO	μg/m3	(µg/m²)	(µg/m')	(µg/m ⁻)	(µg/m ⁻)	(µg/m [*])	(µg/m')	(µg/m ¹)	(µg/m ⁻)		(µg/m')	(µg/m')	(µg/m')		(µg/m ¹)	(µg/m¹)	(µg/m ⁻)	(µg/m')	(µg/m ⁻)		(µg/m')				
11/11/19	9,40	0,00	0,15	0,062	0,38	0,16	0,31	0,02	0,0013	0,002	0,004	0,24	0,0003	0,009	0,021	0,20	0,0010	0,0007	0,0004	0,0001	0,0004	0,0013	0,012	0,00013	0,006
14/11/19	37,86	0,00	0,55	0,162	1,29	0,46	0,82	0,04	0,0032	0,004	0,010	0,55	0,0007	0,009	0,059	0,60	0,0029	0,0030	0,0008	0,0002	0,0012	0,0025	0,027	0,00041	0,016
17/11/19	8,15	0,00	0,15	0,091	0,44	0,23	0,26	0,02	0,0013	0,001	0,005	0,34	0,0003	0,011	0,015	0,12	0,0012	0,0011	0,0003	0,0000	0,0003	0,0012	0,012	0,00011	0,008
20/11/19	17,39	0,00	0,38	0,111	0,63	0,39	0,59	0,03	0,0027	0,002	0,007	0,56	0,0006	0,018	0,046	0,30	0,0022	0,0015	0,0007	0,0001	0,0008	0,0020	0,021	0,00019	0,014
23/11/19	21,74	0,00	0,38	0,168	0,74	0,38	0,51	0,04	0,0030	0,003	0,008	0,67	0,0005	0,015	0,067	0,34	0,0024	0,0017	0,0005	0,0001	0,0011	0,0035	0,026	0,00028	0,011
26/11/19	21,14	0,00	0,51	0,194	0,86	0,38	0,72	0,04	0,0033	0,004	0,009	0,61	0,0007	0,020	0,016	0,37	0,0021	0,0023	0,0009	0,0004	0,0009	0,0020	0,030	0,00029	0,016
29/11/19	35,29	0,00	0,34	0,267	1,52	0,69	1,03	0,06	0,0037	0,004	0,015	0,63	0,0010	0,006	0,075	0,73	0,0035	0,0025	0,0008	0,0002	0,0010	0,0051	0,039	0,00031	0,016
2/12/19	24,80	0,00	0,56	0,215	1,08	0,54	0,69	0,04	0,0031	0,003	0,010	0,81	0,0007	0,006	0,052	0,46	0,0029	0,0029	0,0007	0,0003	0,0009	0,0038	0,033	0,00026	0,016
5/12/19	16,93	0,00	0,24	0,164	0,92	0,31	0,56	0,04	0,0023	0,002	0,008	0,51	0,0006	0,010	0,054	0,29	0,0027	0,0017	0,0007	0,0001	0,0011	0,0029	0,021	0,00026	0,012
8/12/19	11,20	0,00	0,28	0,105	0,50	0,26	0,42	0,03	0,0016	0,002	0,005	0,39	0,0004	0,013	0,031	0,16	0,0013	0,0012	0,0005	0,0001	0,0006	0,0016	0,016	0,00016	0,011
11/12/19	23,18	0,00	0,60	0,188	1,43	0,55	0,89	0,06	0,0046	0,004	0,014	0,79	0,0010	0,010	0,027	0,21	0,0038	0,0032	0,0009	0,0002	0,0006	0,0039	0,031	0,00035	0,012
14/12/19	16,12	0,00	0,24	0,112	0,86	0,36	0,58	0,03	0,0026	0,003	0,009	0,40	0,0006	0,008	0,032	0,13	0,0022	0,0015	0,0005	0,0001	0,0004	0,0024	0,020	0,00023	0,012
17/12/19	23,58	0,00	0,69	0,199	0,94	0,61	0,69	0,05	0,0033	0,003	0,014	0,75	0,0007	0,017	0,076	0,47	0,0033	0,0027	0,0011	0,0004	0,0011	0,0047	0,027	0,00036	0,022
20/12/19	21,49	0,00	0,67	0,201	1,26	0,49	0,89	0,05	0,0034	0,004	0,011	0,61	0,0009	0,029	0,071	0,07	0,0034	0,0028	0,0008	0,0003	0,0006	0,0038	0,037	0,00033	0,012
23/12/19	20,49	0,00	0,38	0,188	1,08	0,44	0,61	0,06	0,0041	0,003	0,012	0,80	0,0009	0,017	0,048	0,31	0,0032	0,0030	0,0011	0,0003	0,0015	0,0037	0,033	0,00029	0,021
26/12/19	16,02	0,00	0,50	0,150	1,09	0,51	0,66	0,04	0,0030	0,004	0,009	0,66	0,0008	0,019	0,022	0,46	0,0028	0,0025	0,0006	0,0003	0,0007	0,0035	0,023	0,00030	0,020
29/12/19	22,32	0,00	0,45	0,194	1,03	0,40	0,82	0,05	0,0038	0,004	0,011	0,78	0,0006	0,026	0,023	0,30	0,0026	0,0023	0,0009	0,0001	0,0009	0,0026	0,030	0,00036	0,011

Fuente: Elaboración Propia. Grupo GHYGAM, 2020





Tabla 3-10 Concentración PM2.5 (μg/m³), Concentración Iones, EC y OC (μg/m³). Abril 03–diciembre 29 de 2019. Estación MED-BEME. Medellín-Colombia

FECHA	PM2.5	Fluoruro	Cloruro	Nitrato	Sulfato	C Orgánico	C Elemental
MONITOREO	μg/m3	(µg/m³)	(µg/m³)	(µg/m³)	(µg/m³)	(µg/m³)	(μg/m³)
3/4/19	27,23	0,0037	0,850	0,85	3,66	31,8	7,8
6/4/19	28,33	0,0049	0,267	1,01	3,86	22,2	2,3
9/4/19	37,09	0,0036	0,156	3,60	5,50	15,9	2,5
12/4/19	29,84	0,0037	0,165	0,95	3,92	10,6	1,1
15/4/19	16,08	0,0037	0,151	0,64	2,80	8,0	1,2
18/4/19	13,65	0,0226	0,262	0,69	1,90	8,1	0,6
21/4/19	17,90	0,0038	0,065	1,44	2,33	6,9	1,3
24/4/19	17,57	0,0268	0,461	0,95	2,89	8,3	1,9
27/4/19	13,46	0,0172	0,293	0,47	1,96	6,5	1,2
30/4/19	24,45	0,0137	0,084	0,70	4,28	10,0	0,9
3/5/19	31,11	0,0329	0,135	0,87	6,28	13,9	1,1
6/5/19	29,02	0,0321	0,039	0,36	4,18	11,3	1,5
9/5/19	25,58	0,0286	0,115	1,05	3,17	6,9	1,6
12/5/19	16,30	0,0035	0,039	0,79	9,03	8,4	0,9
15/5/19	30,47	0,0361	0,119	0,88	4,56	10,0	1,6
18/5/19	23,04	0,0034	0,222	0,99	4,24	9,7	1,2
21/5/19	21,18	0,0034	0,038	1,37	2,73	6,8	1,5
24/5/19	18,45	0,0211	0,038	0,80	2,56	6,5	1,5
27/5/19	16,42	0,0493	0,038	0,68	1,72	6,3	1,5
30/5/19	31,89	0,0223	0,161	1,72	3,18	14,4	1,7
2/6/19	11,16	0,0034	0,038	0,54	1,70	5,5	0,6
5/6/19	23,71	0,0034	0,115	1,27	1,89	13,6	1,6
8/6/19	13,93	0,0156	0,039	0,75	2,31	7,0	0,6
11/6/19	15,67	0,0227	0,039	0,76	3,06	7,0	1,2
14/6/19	14,76	0,0396	0,038	0,66	1,98	5,2	1,0
17/6/19	22,90	0,0492	0,204	0,57	2,32	12,4	1,3
20/6/19	24,54	0,0342	0,126	0,33	3,10	12,0	1,4
23/6/19	19,27	0,0405	0,039	0,62	2,01	9,6	0,6
26/6/19	15,42	0,0172	0,039	0,34	3,14	7,0	1,0
29/6/19	21,63	0,0526	0,125	0,70	3,39	11,4	1,0
2/7/19	18,69	0,0171	0,136	1,04	2,04	7,4	1,2





FECHA	PM2.5	Fluoruro	Cloruro	Nitrato	Sulfato	C Orgánico	C Elemental
MONITOREO	μg/m3	(µg/m³)	(μg/m³)	(μg/m³)	(µg/m³)	(µg/m³)	(µg/m³)
5/7/19	21,49	0,0355	0,175	1,04	2,34	11,2	1,0
8/7/19	19,24	0,0278	0,039	0,51	1,93	36,6	11,7
11/7/19	16,23	0,0034	0,119	0,72	2,55	8,3	1,3
14/7/19	14,74	0,0034	0,039	0,32	1,36	6,4	1,0
17/7/19	13,77	0,0034	0,039	0,03	1,68	8,2	1,4
20/7/19	10,06	0,0089	0,039	0,03	1,38	5,0	0,9
23/7/19	20,60	0,0034	0,039	0,37	2,54	11,4	1,7
26/7/19	11,89	0,0034	0,039	0,03	1,22	8,7	1,3
29/7/19	15,08	0,0034	0,039	0,03	1,69	10,1	1,2
1/8/19	20,63	0,0034	0,137	0,94	2,48	11,2	1,9
4/8/19	10,68	0,0034	0,039	0,51	1,60	7,3	0,8
7/8/19	23,57	0,0034	0,039	0,50	1,85	15,1	0,9
10/8/19	25,61	0,0034	0,323	0,42	1,12	9,9	0,7
13/8/19	21,00	0,0156	0,208	0,72	1,66	11,8	1,2
16/8/19	26,57	0,0032	0,278	1,89	3,28	13,4	1,2
19/8/19	15,98	0,0432	0,258	0,71	1,91	14,7	1,1
22/8/19	18,76	0,0190	0,285	0,85	2,36	13,2	1,2
25/8/19	20,38	0,0146	0,192	0,52	1,86	8,9	0,8
28/8/19	25,20	0,0604	0,410	1,04	2,49	15,3	1,3
31/8/19	13,36	0,0033	0,221	0,70	1,80	8,2	0,7
3/9/19	11,53	0,0034	0,185	0,72	1,27	8,3	1,2
6/9/19	25,17	0,0331	0,301	1,35	1,99	12,9	1,5
9/9/19	17,97	0,0035	0,040	0,84	2,24	7,4	1,1
12/9/19	10,97	0,0035	0,040	0,68	1,80	6,3	1,0
15/9/19	11,36	0,0323	0,040	0,49	1,44	5,3	0,8
18/9/19	24,33	0,0214	0,199	1,32	1,87	10,8	1,5
21/9/19	20,06	0,0220	0,123	0,99	3,15	7,9	1,1
24/9/19	29,00	0,0035	0,151	1,32	3,15	12,8	1,9
27/9/19	13,33	0,0032	0,036	0,46	1,88	8,0	1,2
30/9/19	16,97	0,0030	0,162	0,63	2,66	10,7	1,5
3/10/19	21,49	0,0245	0,235	1,06	2,89	13,5	1,8
6/10/19	10,63	0,0125	0,032	0,57	1,65	5,5	0,9
9/10/19	20,05	0,0046	0,158	0,97	3,20	13,0	1,7
12/10/19	22,92	0,0029	0,033	0,99	2,61	12,6	1,9
15/10/19	15,44	0,0029	0,033	0,70	2,75	7,5	1,1

Página 142 de 264







FECHA MONITOREO	PM2.5 μg/m3	Fluoruro (µg/m³)	Cloruro (μg/m³)	Nitrato (μg/m³)	Sulfato (μg/m³)	C Orgánico (μg/m³)	C Elemental (μg/m³)
18/10/19	20,25	0,0027	0,031	1,00	2,76	11,2	1,5
21/10/19	28,63	0,0030	0,035	1,57	4,04	16,9	2,2
24/10/19	28,72	0,0029	0,124	1,22	3,33	21,7	2,7
27/10/19	12,26	0,0029	0,033	1,13	2,17	4,9	0,9
30/10/19	12,47	0,0033	0,037	1,11	2,00	5,8	1,0
2/11/19	10,96	0,0036	0,041	0,98	2,51	3,8	0,7
5/11/19	21,08	0,0036	0,041	1,55	3,66	9,4	1,5
8/11/19	25,76	0,0145	0,169	1,17	3,46	12,4	2,8
11/11/19	9,40	0,0028	0,063	0,55	1,29	5,7	0,7
14/11/19	37,86	0,0264	0,172	1,59	5,21	17,2	3,2
17/11/19	8,15	0,0029	0,085	0,63	2,16	7,5	1,1
20/11/19	17,39	0,0049	0,139	1,03	3,15	11,9	2,2
23/11/19	21,74	0,0138	0,115	1,33	4,06	14,4	2,0
26/11/19	21,14	0,0217	0,131	1,10	3,99	11,6	2,4
29/11/19	35,29	0,0283	0,238	1,97	5,96	18,5	4,0
2/12/19	24,80	0,0147	0,261	1,39	4,49	13,9	2,4
5/12/19	16,93	0,0194	0,117	1,19	3,45	11,8	1,4
8/12/19	11,20	0,0076	0,139	0,59	2,72	8,0	1,4
11/12/19	23,18	0,0240	0,203	1,32	4,75	16,2	2,0
14/12/19	16,12	0,0159	0,184	1,05	2,73	12,1	2,0
17/12/19	23,58	0,0094	0,259	1,70	4,91	18,0	2,2
20/12/19	21,49	0,0147	0,244	1,16	5,50	19,0	3,3
23/12/19	20,49	0,0204	0,278	1,32	4,81	17,8	2,7
26/12/19	16,02	0,0082	0,179	1,47	3,51	16,3	2,8
29/12/19	22,32	0,0117	0,142	1,51	4,06	16,5	2,4

Fuente: Elaboración Propia. Grupo GHYGAM, 2020





Tabla 3-11. Concentraciones promedio PM2.5 (μg/m³) de especies químicas (μg/m³), Desviación estándar (STD), intervalos (mínimo-máximo). Abril– diciembre de 2019. Estación MED-BEME. Medellín, Colombia.

	Concentración promedio		Máximo	Mínimo	STD	
Especie	μg/m³	%	μg/m³	μg/m³	μg/m³	
PM2.5	20,11		37,1	10,1	6,3	
Al	0,450	8,54	1,526	0,140	0,269	
Ca	0,298	3,89	0,810	0,055	0,144	
Fe	0,263	3,76	0,737	0,065	0,120	
K	0,202	2,24	0,704	0,012	0,133	
Na	0,190	2,85	0,794	0,007	0,204	
Mg	0,0778	0,664	0,1996	0,0034	0,0354	
Zn	0,0520	0,292	0,5902	0,0000	0,1092	
Ti	0,0207	0,314	0,0579	0,0066	0,0107	
Ва	0,0121	0,0677	0,0370	0,0044	0,0069	
Cu	0,00639	0,0382	0,03539	0,00171	0,00541	
Pb	0,00593	0,0305	0,03529	0,00150	0,00656	
Ni	0,00475	0,0806	0,05734	0,00001	0,00946	
Mn	0,00432	0,0340	0,01314	0,00115	0,00218	
Cr	0,00159	0,0230	0,00826	0,00039	0,00122	
Sb	0,00145	0,0171	0,01431	0,00020	0,00225	
V	0,00140	0,0249	0,00406	0,00051	0,00074	
As	0,00110	0,0284	0,00495	0,00019	0,00089	
Se	0,000982	0,00667	0,002566	0,000261	0,000507	
Mo	0,000337	0,00255	0,002117	0,000097	0,000285	
Cd	0,000308	0,00160	0,001366	0,000009	0,000339	
Co	0,000296	0,00186	0,000909	0,000099	0,000167	
Hg	0,000114	0,000583	0,000594	0,000004	0,000095	
Ag	0,0000247	0,000227	0,0002015	0,0000021	0,0000415	
Be	0,0000125	0,000181	0,0000202	0,0000067	0,0000033	
C Orgánico	6,53	31,7	16,51	2,60	2,94	
C Elemental	0,821	4,06	2,474	0,282	0,417	
OC/EC	8,67		17,10	4,22	3,22	

Fuente: Elaboración Propia. Grupo GHYGAM, 2020

Para tener una dimensión de las masas de las especies en el PM2.5, de acuerdo con los valores analizados, se seleccionaron las siguientes escalas para la comparación de las concentraciones de las especies identificadas y cuantificadas:

Página 144 de 264







- > Escala mayoritaria (1 μg/m³– 0.1 μg/m³),
- \triangleright Escala minoritaria (0.1 µg/m³– 0.01 µg/m³),
- Escala trazas (0.01 μg/m³ 0.001 μg/m³),
- Escala ultratrazas (0.001 μg/m³- 0.0001 μg/m³) de alta importancia por su nivel de toxicidad.

En la escala mayoritaria se determinaron Aluminio (Al), Calcio (Ca), Hierro (Fe), Potasio (K), Sodio (Na) y Magnesio (Mg). En los componentes minoritarios Zinc (Zn), Titanio (Ti) y Bario (Ba), en cantidades trazas Cobre (Cu), Plomo (Pb), Níquel (Ni), Manganeso (Mn), Cromo (Cr) Antimonio (Sb), Vanadio (V) y Arsénico (As) y como ultratrazas, Selenio (Se), Molibdeno (Mo), Cadmio (Cd), Cobalto (Co), Mercurio (Hg), Plata (Ag) y Berilio (Be). De acuerdo con campañas previas de caracterización en la región, es la primera vez que una especiación se logran cuantificar sustancias en cantidades inferiores a 0,01 μg/m³, lo cual es el resultado de la aplicación de técnicas analíticas nucleares AAN. La comparación gráfica de los elementos, de acuerdo a la escala, se observa en la Figura 3-46.

De acuerdo con su origen y formación el Hierro (Fe), Zinc (Zn), Cobre (Cu), Manganeso (Mn) y el Cromo (Cr) provienen de lubricantes; Zinc (Zn) y Níquel (Ni) de la combustión del diésel (Gómez D., Dawidowski L., Giné M.F., Sánchez Bellato A., 2004), infiriendo el aporte de emisiones vehiculares directas en la el área de influencia de la estación tipo poblacional MED-BEME. La presencia de Zinc (Zn), Cobre(Cu), Plomo (Pb), Cadmio, Antimonio (Sb) y Molibdeno (Mo) están asociado al desgaste de neumáticos , pastas de frenos y llantas (Gómez D., Giné A., Sánchez P., 2005). La determinaron Aluminio (Al), Calcio (Ca), Hierro (Fe) indican presencia de minerales del suelo y material resuspendido. Igualmente, el Selenio (Se) en cantidad traza, es un trazador de combustión de carbón (W.C Malm, Iyer, & Gebhart, 1990; Thurston & Spengler, 1985).





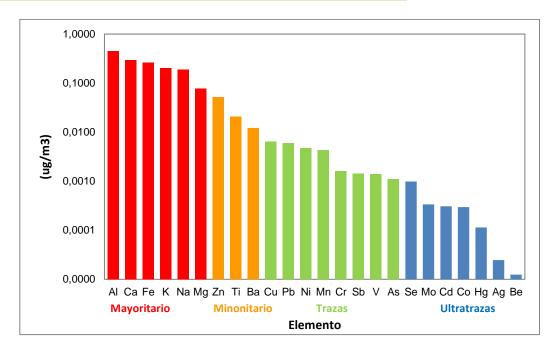


Figura 3-46. Composición elemental de PM2.5. Abril–diciembre de 2019. Estación MED-BEME. Medellín, Colombia.

Fuente: Elaboración propia. Grupo GHYGAM, 2020

En referencia a la composición iónica del PM2.5 (Ver la Figura 3-48), se determinó un 12.7% con la presencia de sulfatos, nitratos, cloruros y fluoruros, siendo la mayor proporción de sulfatos del 74.1 % equivalente a 1.9 μg/m³ de la concentraciones de iones y del total PM2.5 (20.1μg/m³). Estos resultados están de acuerdo con los estudios reportados por varios autores (Banerjee, Murari, Kumar, & Raju, 2015; Chen et al., 2015; Liang, Duan, He, & Ma, 2016; D. Wang et al., 2014), que muestran tanto en zonas urbanas y áreas rurales en varias partes del mundo, los iones SO4⁻² como contaminantes secundarios, son los constituyentes principales de partículas PM2.5 y PM10 originadas por emisiones secundarias derivadas del tráfico automotor y procesos de combustión industrial.

En este caso de estudio dado que la zona Belén Las Mercedes, de acuerdo con aforo vehicular realizado, se caracteriza por un mediano flujo vehicular en su mayoría vehículos livianos categoría 1 y motos, y en menor proporción vehículos de carga pesada, la mayor concentración de SO4-2 son explicables parcialmente tanto por emisiones enriquecidas de combustión y procesos industriales 39.6% ± 13,8% (Area Metropolitana del Valle de Aburrá & Politecnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid, 2008), similar a reportes científicos de 28,7 ± 22,6% (Judith C. Chow, Watson, Kuhns, et al., 2004) como también asociadas a quemas de biomasa (Judith C. Chow, Watson, Chen, et al., 2004). Estas emisiones son transportadas por las corrientes de vientos propias de la zona en la dirección oriente dominante durante el día y occidente durante la noche como se observa en la Figura 3-47.

Página 146 de 264



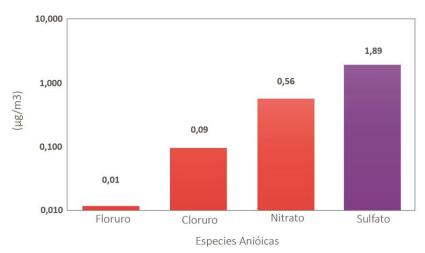




Los nitratos NO₃- hacen parte en menor cantidad, 0,56% de la masa PM2.5 formados por reacciones secundarias asociada con los NO_x. Los cloruros y fluoruros se encuentran en fracción traza provenientes del transporte regional de aerosoles marinos y transporte local de emisiones de procesos industriales como fabricación de vidrio y fundiciones metálicas. El análisis del balance iónico mostrará el impacto de estos iones en la neutralidad química del PM2.5 y en el balance de masa.



Figura 3-47.



Página 147 de 264







Figura 3-48. Composición iónica de PM2.5. Abril–diciembre de 2019. Zona habitacional MED-BEME. Medellín, Colombia

Fuente: Elaboración propia. Grupo GHYGAM, 2020

Para la interpretación de los diferentes tipos de materia carbonácea constituyente del PM2.5, es importante tener presente que este parámetro incluye el Carbono Elemental (EC) y Carbono Orgánico (OC). El OC suele contener compuestos mutagénicos y/o carcinógenos, tales como HAP, PCB y PCDF, que son perjudiciales para la salud humana al igual que el EC (Feng et al., 2006; Li et al., 2008).

El Carbono Elemental EC tiene una estructura química similar al grafito puro o diamante, de color oscuro, poco volátil. Es una fracción de carbono que no evoluciona apreciablemente sin oxidantes a temperaturas inferiores a 700 °C, con propiedades especiales de superficie que facilita la adsorción para muchos compuestos semivolátiles tales como los HAP (Pio et al., 2011). Es un contaminante 100% primario emitido directamente de la combustión de fósiles y biomasa y por ello, por lo general, se considera como un marcador de tráfico local (Song, Polissar, & Hopke, 2001) y buen Indicador de contaminantes antropogénicos primarios. Esta fracción de la materia carbonácea, tiene una fuerte absorción de energía solar y es uno de los impulsores importantes del calentamiento global (J. Hansen et al., 2005).

El OC es una mezcla de compuestos orgánicos complejos denominado explícitamente Carbono Orgánico total OC Total, que representa una mezcla de cientos de compuestos orgánicos, algunos de los cuales son mutagénicos y/o cancerígeno, como los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) y dibenzo-p-dioxinas y dibenzofuranos policlorados (PCDD / Fs) (Feng et al., 2006; Li et al., 2008). Es un dispersor de luz efectivo y puede contribuir significativamente tanto a la perdida de visibilidad como al forzamiento directo del cambio climático en aerosol (William C. Malm & Day, 2000; Tegen et al., 1997). Su origen puede ser primario (OC primario, POC) o secundario (OC secundario, SOC) (Pandis, Harley, Cass, & Seinfeld, 1992; Turpin & Huntzicker, 1995). Las fuentes primarias del OC incluyen emisiones de combustión de biomasa y quema de vegetación, incendios, (generalmente partículas finas y submicronicas), esporas y el polen de las plantas, restos de vegetación, neumáticos de caucho y sustancias orgánicas del suelo (generalmente como partículas gruesas entre 10 y 2,5 micras). El carbono Orgánico secundario SOC, se forma de algunas reacciones heterogéneas importantes de gas a partícula con dióxido de azufre (SO₂), óxidos de nitrógeno (NO_x), ozono (O₃) y otros gases y compuestos de las condensaciones de orgánicos volátiles (Novakov, 1984).

Teniendo en cuenta estos fundamentos científicos aplicados para zona Belén Las Mercedes según se presenta en la Figura 3-49, el Carbono Elemental EC, se evaluó en 4.1% equivalente a 0.8 µg/m³ del PM2.5 (20.1µg/m³). Es notoria la menor cantidad de EC, cuyo origen primario está asociado directamente a emisiones de combustión industrial y tráfico vehicular, en comparación con la evaluación en zonas de tráfico de la región, como se analizará más adelante.

El Carbono Orgánico total (TOC), constituye el 34.8 % del PM2.5, equivalente a 7 (µg/m³), (Ver Figura 3-49). Es importante observar la distribución del total de la materia carbonácea

Página 148 de 264







en OC representado en un 49,5% de origen primario y 55.5% secundario, evidencia una importante reactividad atmosférica que conlleva a la formación de PM2.5 secundario, característica evaluada en otras zonas del área metropolitana (Area Metropolitana del Valle de Aburrá & Politecnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid, 2019a; Gómez Marín et al., 2015). Este indicador a su vez se correlaciona con la alta relación OC/EC de 8.5 típica de emisiones secundarias y extraemisones como igualmente se analiza en los ítems siguientes.

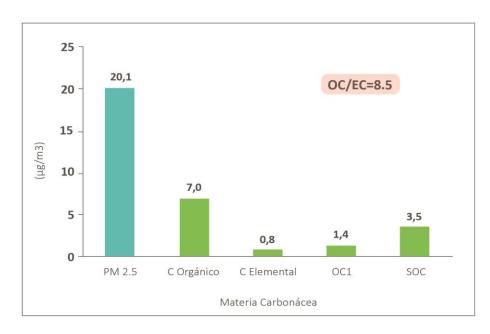


Figura 3-49. Composición materia carbonácea de PM2.5. Abril—diciembre de 2019. Zona habitacional MED-BEME. Medellín, Colombia Fuente: Elaboración propia. Grupo GHYGAM, 2020

3.5.2 Análisis de las fracciones de materia carbonácea y correlación con fuentes de emisión PM2.5

La diferenciación de fracciones de carbono en el método TOR (IMPROVE), es confiable y da componentes químicos relativamente claros y características físicas de diferentes partes de carbono (Han, Lee, Cao, Ho, & An, 2009). El grado en que estas fracciones pueden diferenciar las contribuciones de diferentes fuentes de combustión, fue determinado usando en estudios científicos con un enfoque de Monte Carlo (J. C. Chow, 1985; Judith C. Chow et al., 1992; Javitz & Watson, 1988; J. G. Watson, 1979).

Con base en este contexto científico y dados los reportes sobre el impacto de incendios y quemas de biomasa sobre la calidad del aire en el Valle de Aburrá (Area Metropolitana del Valle de Aburrá & Politecnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid, 2019a) se realizó un análisis de las fracciones analíticas del OC1, OC2, OC3 y EC2 como indicadores de combustión de Biomasa (John G Watson, 2004), emisiones de vehículos a diésel (Zhu et al., 2010a) y gasolina (Cao et al., 2006; Liu, Wang, Russell, & Edgerton, 2006), en muestras Página 149 de 264







PM2.5 tomadas durante los eventos identificados entre abril y diciembre de 2019, según se referencia en la Sección 4.

La fracción OC1 indicadora de quemas de biomasa, fue evaluada en promedio entre abril y diciembre del 2019 en 6.4 % del PM2.5 equivalente al 16.4 % del TOC, siendo un indicador importante como un trazador para los estudios de salud y comprensión de la complejidad del control de estas fuentes difusas de emisión de PM2.5. Igualmente, el Potasio (K) evaluado en 0.01 µg/m³ (Tabla 3-12).

La fracción EC2, en promedio aporta $0.2 \,\mu g/m^3$, 1.1% del PM2.5 como indicador de impacto de las emisiones diésel en la zona de influencia de la Estación MED-BEME, en diferenciación al mayor indicador de emisiones de vehículos a gasolina en la cuantificación de OC2 y OC3 en PM2.5, de $1.5 \, y \, 0.6 \, \mu g/m^3$, coherente con la influencia de fuentes móviles compuesta en un mayor porcentaje por vehículos de categoría vehículos livianos y motos y vehículos de carga pesada en menor proporción.

El impacto de emisiones de combustión de calderas a carbón también es posible observarlo en las fracciones OC2 y EC1 analizadas de 1.5 y 0.06b bvggg µg/m³ en PM2.5, el cual será cuantificado a partir de la alimentación de estos datos al Modelo PMF.

Una manera de comprender la importancia de la determinación analítica de las ocho (8) fracciones de carbón en los Métodos IMPROVE y NIOSH 5040, es la obtención de perfiles de fuentes de emisión a partir de esta información, como se observa en la Tabla 25 de la página 206 (Judith C. Chow, Watson, Kuhns, et al., 2004). Esta especiación aplicada al Modelo PFM permitirá al cierre del Proyecto ARCAL 7023, tener un mayor acercamiento a perfiles de fuentes de emisión en la región.





Tabla 3-12. Concentraciones promedio de Fracciones de Carbón en μg/m3 en PM2,5. Abril 03-diciembre 29 de 2019. Estación MED-BEME. Medellín, Colombia.

Unidades	OC1	OC2	ОСЗ	OC4	PC	EC1	EC2	EC3	ОС	EC	OC/EC
ug/m³	1.3	1.5	0.6	1.0	2.2	0.06	0.22	0.44	7.0	0.8	8.5
% PM2.5	6.4	7.2	2.8	5.0	11.0	0.3	1.1	2.2	35.0	4.0	

Fuente: Elaboración propia. Grupo GHYGAM, 2020

Tabla 3-13. Perfiles de Fuentes de Emisión PM2.5 en la correlación de las ocho (8) fracciones de carbón en el análisis de materia carbonácea, Método IMPROVE (Judith C. Chow, Watson, Kuhns, et al., 2004)

Source	Carbon fraction (%)							
	OC1	OC2	OC3	OC4	OP	EC1	EC2	EC3
Motor vehicle composite (BVRDMV)	16.0 ± 12.3	18.0 ± 7.0	13.4 ± 5.5	6.9 ± 3.3	4.4 ± 4.6	15.6±9.3	23.3 ± 10.4	2.6 ± 4.3
Vegetative burning composite (BURN)	23.9 ± 12.4	11.9 ± 4.2	13.8 ± 6.6	8.8 ± 3.8	6.1 ± 9.3	13.9 ± 7.3	7.8 ± 15.1	0.13 ± 0.13
Coal-fired boiler composite (CFPP)	7.5 ± 10.1	9.4±9.6	5.2 ± 5.8	2.7 ± 2.4	2.4 ± 2.5	2.1 ± 2.0	1.5 ± 1.1	0.10 ± 0.1
Cement kiln composite (CEM)	1.0 ± 2.6	2.0 ± 1.4	4.0 ± 1.6	4.5 ± 3.1	1.3 ± 1.0	2.7 ± 1.5	1.5 ± 1.1	0.07 ± 0.2
Cooking composite (COOK)	13.2 ± 9.0	25.4 ± 13.9	37.6 ± 15.9	8.5 ± 3.7	2.0 ± 2.5	9.5 ± 6.8	2.3 ± 2.4	0.35 ± 0.40
Catalytic cracker	0.11 ± 0.08	0.00 ± 0.03	0.04 ± 0.02	0.16 ± 0.06	0.16 ± 0.06	0.08 ± 0.04	0.15 ± 0.05	0.007 ± 0.0

^a Eight carbon fractions including: OC1 (120 °C), OC2 (250 °C), OC3 (450 °C), and OC4 (550 °C) combusted in a 100% helium atmosphere; and EC1 (550 °C), EC2 (700 °C), and EC3 (800 °C) combusted in a mixture of 2% oxygen and 98% helium atmosphere. A 630 nm helium–neon laser is used to monitor pyrolyzed carbon (OP) based on the IMPROVE thermal/optical reflectance (TOR) carbon analysis protocol (Chow et al., 1993, 2001).

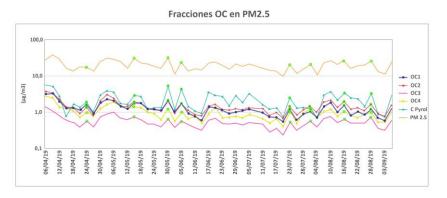
Fuente: Tomada de (Judith C. Chow, Watson, Kuhns, et al., 2004) página 206.

Se realizó una correlación entre los valores OC1 y el PM2.5, para los días donde se declararon eventos asociados con transporte de contaminantes por incendios forestales y quemas de biomasa, de acuerdo con el levantamiento de información satelital durante el presente estudio. En la Figura 3-50, se observan claramente como en las imágenes de los días donde se identificaron eventos con espesas plumas de humo por incendios al norte y centro de Brasil, se evaluaron mayores concentraciones del OC1 y a la vez coincidentes con picos del PM2.5, aunque sin exceder la norma diaria de calidad del aire. Igualmente se evidencian picos de las fracciones EC1 y EC2 asociadas a emisiones de combustión y tráfico vehicular. Está huella de las emisiones permitirá la identificación y cuantificación de sus aportes en la aplicación del Modelo PMF.

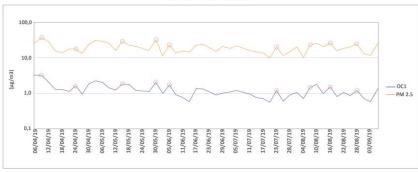
Página **151** de **264**







Fracción OC1 y PM2.5

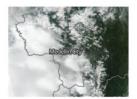




Visualización Colombia 5 de junio de 2019



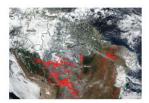
Posibles focos y seguimiento de plumas 5 de junio de 2019



Visualización Valle De Aburrá 5 de junio de 2019



Visualización Colombia 16 de agosto 2019



Posibles focos y seguimiento de plumas 16 de agosto 2019



Visualización Valle De Aburrá 16 de agosto 2019

Figura 3-50. Fracciones de OC en (μg/m³). Mayo –septiembre de 2019. Estación MED-BEME. Medellín, Colombia.

Página 152 de 264









Fuente: Elaboración propia. Grupo GHYGAM, 2020

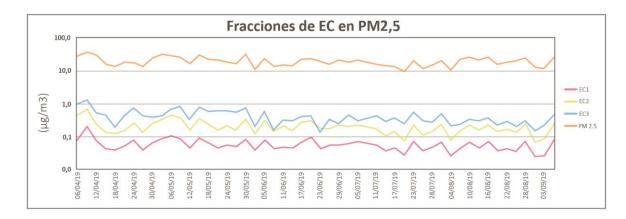


Figura 3-51. Fracciones de EC en (μg/m³). Mayo –septiembre de 2019. Estación MED-BEME. Medellín, Colombia.

Fuente: Elaboración propia. Grupo GHYGAM, 2020

3.5.3 Análisis de la relación OC/EC

Dado que los aerosoles carbonosos representan una mezcla de diversas fuentes de emisión (EC y OC primarios) y OC secundario SOC, formado por procesos de reacción atmosférica, la relación de OC a EC (OC/EC) medidos por el método IMPROVE (J. C. Chow et al., 1993; Judith C. Chow, Watson, Crow, Lowenthal, & Merrifield, 2001) se aplica en el estudio de las características de las emisiones y transformación de las mismas en la atmosfera. Las relaciones OC/EC son altamente variables dependiendo del tipo de proceso de generación, tipo y nivel de tecnologías de operación, calidad de materias primas y combustibles, entre otras variables muy específica de cada emisión, como se observa en los textos siguientes producto de una revisión científica en el tema:

- ➤ Una correlación de OC/EC con R² entre 0.7 1.0 indica que ambos contaminantes proceden de fuentes comunes y que ha ocurrido un proceso de dispersión atmosférica similar para ambos.
- ➤ Una Emisión típica las fuentes vehiculares a diésel y gasolina de manera no diferenciada, es dominante en una relación (OC/EC = 1.0 4.2) (Schauer, Fraser, Cass, & Simoneit, 2002; Schauer, Kleeman, Cass, & Simoneit, 1999), para vehículos diésel (0.28 e 0.92) (J. O. Allen, Mayo, Hughes, Salmon, & Cass, 2001) y para partículas finas en las muestras tomadas en túnel, emisiones frescas de vehículos, se halló una baja relación promedio de (0,56) (He et al., 2006).
- ➤ Para emisiones de quema de biomasa hay variación en las relaciones OC/EC obtenidas en diferentes estudios, pero siempre éstas se encuentran en los mayores rangos reportados, (7.7) (Judith C. Chow, Watson, Kuhns, et al., 2004; Guo, Zhang,

Página 153 de 264







- SHI, & Wang, 2007), (9.0) (Cao et al., 2006, 2005; Judith C. Chow et al., 2001; Hitzenberger et al., 1999) y (22,6) (Zhu et al., 2010b).
- ➤ En emisiones PM2.5 de combustión de carbón una relación OC/EC fue evaluada en (2.7) por (Cao et al., 2006, 2005; Judith C. Chow et al., 2001; Hitzenberger et al., 1999) y (1.31) (Judith C. Chow, Watson, Kuhns, et al., 2004).

En síntesis, de la revisión de resultados científicos, se concluye que relaciones bajas de OC/EC cercanas a 1.0 indican aportes de emisiones vehiculares y para diésel específicamente en los valores bajos de este intervalo. Para emisiones de combustión de carbón la relación es mayor a 2.0.

La relación OC/EC promedio más altas, en las muestras ambientales indican emisiones secundarias o extraemisiones por transformaciones físicas como condensación de gases, coagulación o precipitación húmeda de material particulado, eventos de contaminación por incendios locales y/o regionales.

Una vez revisado el marco teórico de este indicador base para la identificación de fuentes de emisión, se concluye para el presente estudio, enfocado en una zona habitacional del Valle de Aburrá, sin influencia directa de fuentes de emisión, que dada la relación OC/EC =8.5, se evidencia un enriquecimiento por extraemisiones secundarias derivadas de transformaciones físicas como condensación de gases, coagulación o precipitación húmeda de material particulado y ocurrencia de eventos de incendios y quema de biomasa locales y/o regionales.

Un comparativo entre los tipos de materia carbonácea en varias ciudades del mundo incluyendo el Valle de Aburrá se presenta en la Tabla 3-14.







Tabla 3-14. Comparativo entre los tipos de materia carbonácea en varias ciudades del mundo

Location	Period	Concentrat OC	ion μg/m3 EC	OC/EC	
Seoul, Korea	11/27-12/09/99	15.2 ± 9.9	7.3 ± 5.9	2.1	Park et al (2002)
Beijing, China	6-7/2002 1/12/2002	10.7 ± 7.36 36.7 ± 19.4	5.7 ± 2.9 15.2 ± 11.1	2.2 3.5	This current study
Kaohsiung, Taiwan	11/1998-4/1999	10.4	4	2.6	Lin and Tai (2001)
Los Angeles, USA	6–9/1987 11–12/1987	8.3 18.5	7.3	3.5 2.5	Chow et al (1994)
PRDc, China	1-2/2002	14.7 ± 11.9	6.1 ± 4.0	2.4	Cao et al (2003)
Nairobi, Kenya	mar-00	13 ± 3	2.3 ± 3	5.7	Gatari and Bomana (2003)
Medellin, Colombia	2009 - 2010	12.2 ± 3.9	10.2 ± 5.5	1.24 ± 0.58	Gómez et al (2010)
Seoul, Korea	jun-94	9,97	7,57	1,3	Kim et al (1999)
PolyU, Hong Kong	11/2000-2/2001	9.45 ± 2.01	5.80 ± 1.14	1.6	Ho et al (2002)
Kwangju, Korea	06/07-06/20/00	7.6 ± 3.7	4.9 ± 2.1	1.6	Park et al (2002)
Itagüi, Colombia	2009 - 2010	7.05 ± 5.17	4.53 ± 3.46	1.67 ± 0.97	Gómez et al (2010)
Meru, Kenya	5-6/1999	6 ± 1	1.4 ± 0.1	4.3	Gatari and Bomana (2003)
HT, Hong Kong	11/2000-2/2001	5.52 ± 1.13	1.36 ± 0.40	4.1	Ho et al (2002)
Bello, Colombia	2009 - 2010	5.11 ± 2.7	2.89 ± 0.86	1.81 ± 1.42	Gómez et al (2010)
Helsinki, Finland	7/2001–7/2002	3,0	1,2	2,5	Viidanoja et al (2002)
Disburgo, Alemania	10/2002-11/2002	22,0	9,0	2,4	Sillanpaa et al. (2006)
Praga, Rep. Checa	11/2002-01/2003	38,6	5,7	6,8	Sillanpaa et al. (2006)
Amsterdam, Holanda	01/2003-03/2003	16,4	5,4	3,0	Sillanpaa et al. (2006)
Helsinki, Finland	03/2003-05/2003	33,0	8,4	3,9	Sillanpaa et al. (2006)
Barcelona-España	03/2003-05/2003	15,0	7,6	2,0	Sillanpaa et al. (2006)
Atenas-Grecia	06/2003-07/2003	25,0	6,6	3,8	Sillanpaa et al. (2006)
Tianjin-China	abr-08	14,4	5,0	2,9	Jinxia et al., 2010
Tianjin-China	jul-08	10,2	5,5	1,9	Jinxia et al., 2011
Tianjin-China	oct-08	20,2	6,5	3,1	Jinxia et al., 2012
Tianjin-China	ene-08	22,9	5,6	4,1	Jinxia et al., 2013
Kosan-Korea	9/10/1997	3,6	0,4	8,5	Jinxia et al., 2010
Port City - Italia	06/2012-10/2012	2,9	0,6	4,8	Genga et al., 2017
Sao Paulo-Brasil	01/2014-09/2014	10,2	7,0	1,5	Pereira et al., 2017
Medellin, Colombia (MED-PJIC)	2014-2015	22,8	22,9	1,0	Gómez et al (2015)
Medellin, Colombia (MED-PJIC)	2018-2019	40,3	19,7	2,0	Gómez et al (2019)
Medellin, Colombia (MED-PJIC)	04/2019-05/2019	43,6	23,6	1,8	Gómez et al (2019)
Medellin, Colombia (MED-BEME)	04/2019-12/2019	7,0	0,8	8,5	Gómez et al (2020)
Girardota, Colombia (GIR-SOSN)	04/2019-05/2019	6,8	4,0	1,7	Gómez et al (2019)
Medellin, Colombia (MED-LAYE)	04/2019-05/2019	7,7	3,0	2,6	Gómez et al (2019)
Medellin, Colombia (MED-SELE)	ene-15	1,0	1,5	0,7	Gómez et al (2015)

Fuente: Elaboración propia. Grupo GHYGAM, 2020

Página 155 de 264







Un análisis comparativo de la caracterización del PM2.5 con estudios previos de zonas de tráfico, de fondo urbano y rural y de alta influencia industrial se realizará en la Sección 3.6.

3.5.4 Balance iónico y másico.

De acuerdo con la metodología presentada en la Sección 2.4, el balance masico se realiza a partir de la comparación de la masa gravimétrica del PM con la suma de masas de componentes químicos individuales en función de los tipos de especies o fuentes relevantes

- Masa orgánica (OM)
- Inorgánicos Secundarios
- Carbono elemental
- Minerales geológicos
- sal
- Elementos traza
- Otros

La Figura 3-52 representa el resultado del balance iónico en términos de eq.gr/m³, para el caso de la Estación MED-BEME. Se encontró variabilidad entre la proporción de anionescationes en cada día de muestreo, llegándose a un balance total de exceso de cationes, asociado a falta del amonio NH⁴+ que, durante esta fase del estudio, aún no se ha evaluado. Para compensar esta pérdida, se consideró en la aplicación de los modelos de reconstrucción másica citados, que no todos los elementos metálicos se encuentran como cationes dado que algunos pueden existir como óxidos llegándose a una buena aproximación a la masa gravimétrica. En la fase siguiente de este estudio esta condición será reevaluada.





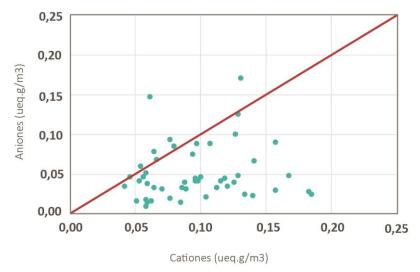


Figura 3-52. Balance iónico de PM2.5. Campaña abril 03 – diciembre 29 de 2019. Estación MED-BEME.

Medellín, Colombia

Fuente: Elaboración propia. Grupo GHYGAM, 2020

Un análisis de los métodos de reconstrucción másica (Judith C. Chow et al., 2015) (Ver Tabla 2-2. Resumen de 11 ecuaciones de reconstrucción de masa de PM2.5 y sus principales componentes químicos) se aplicaron para cada día de muestreo, encontrando que el Método No. 9 (DeBell et al., 2006) una mayor aproximación a la masa PM2.5 medida y teniendo en cuenta que no se realizaron mediciones de amonio NH⁴⁺ en esta fase del proyecto, dado el diseño experimental y pruebas locales de análisis que deben realizarse máximo dos horas posteriores a la toma de muestra. Este análisis será realizado en el 2020.

El cálculo de la masa reconstruida, Método No. 9 (DeBell et al., 2006), se detalla en la Ecuación 3-1:

$$Reconstrucción \ m\'{a}sica = (4.125\ 5*SO_4) + (1.29*NO_3) + (1.8*CO) + CE + (2.2*Al) + (2.49*Si) + (1.63*Ca) + (1.94*Ti) + (2.42*Fe)$$
 Ecuación 3-1

FO es el factor para contabilizar el peso de los elementos asociados al carbono orgánico (generalmente hidrógenos y oxígenos).

Para la zona poblacional MED-BEME se usó se usó un FO de 1,8.

En general se obtuvo una buena correlación entre las masas reconstruidas para cada día de muestreo y las determinados gravimétricamente, como se observa en la Figura 3-53. A partir de la aplicación del Modelo receptor PMF se obtuvo un factor de correlación R^2 = 0.89, representado en la ecuación Y = 1.09981-2.06192 para todo el monitoreo Abril –diciembre de 2019 donde, Y: masa reconstruida, X: masa gravimétrica.

Página 157 de 264







De acuerdo con lo expuesto la masa reconstruida calculada reflejó entre el 64% y el 108% de la masa gravimétrica para cada uno de los días muestreados, con un promedio del 85%, logrando reflejarse de manera aceptable, la masa gravimétrica obtenida en la mayoría de los días muestreados. Los componentes no identificables NI, podrían ser amonio no medido experimentalmente, elementos traza y otros componentes no considerados en el modelo de reconstrucción másica como el agua contenida en los aerosoles, elementos volátiles y compuestos polares. Es de tener en cuenta que los modelos receptores se basan en algoritmos matemáticos científicos para ajustar el balance y estimar los aportes de las fuentes bajo niveles de incertidumbre validados.

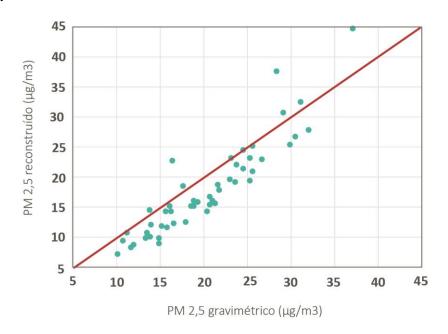


Figura 3-53. Concentraciones PM2.5 medidas vs. Reconstruidas a partir del cierre el balance de masa.

Abril –diciembre de 2019. Estación MED-BEME. Medellín-Colombia

Fuente: Elaboración propia. Grupo GHYGAM, 2020

Una vez reconstruida la masa gravimétrica RM aplicando el modelo de (DeBell et al., 2006), con buena aproximación R²= 0.89, se obtuvo la composición promedia (balanceada) de los componentes químicos individuales del PM2.5 en función de los tipos de especies o fuentes relevantes de influencia de la Estación MED-BEME, zona habitacional, entre el 03 de abril y el 29 de diciembre del 2019, y representado en la Figura 3-54:

- ➤ La materia orgánica evaluada como 1.8*OC, conforma el 57%, EC (4%), representando el 61 % de la masa PM2.5 las especies carbonáceas, provenientes de emisiones de combustión.
- Sustancias iónicas 16%, conformado mayoritariamente por sulfatos.
- Minerales geológicos 11% proveniente de procesos erosivos del suelo, corteza terrestre y resuspendido, etc., enriquecidos en (Si, Al, Ca, Fe, Ti).

Página 158 de 264







- ➤ El 4% lo representan de elementos trazas, donde el Zn es el más aportante proveniente de desgaste de pastas de frenos, llantas neumáticas.
- No Identificables (NI) 12% amonio no medido experimentalmente, elementos traza y otros componentes no considerados en el modelo de reconstrucción másica como el agua contenida en los aerosoles, elementos volátiles y compuestos polares), según Modelo (DeBell et al., 2006)

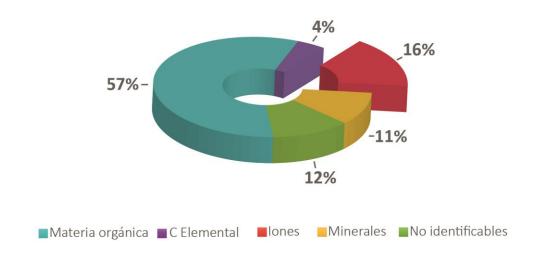


Figura 3-54. Composición media porcentual del PM2.5. Abril –diciembre de 2019. Estación MED-BEME.

Medellín-Colombia

Fuente: Elaboración propia. Grupo GHYGAM, 2020

3.5.5 Correlación entre las especies químicas e inferencia de fuentes de emisión.

De acuerdo con la metodología descrita en la sección 2.5 y un análisis documental científico sobre la correlación entre la especiación química del material particulado fino y fuentes de emisión, se definieron criterios para la identificación preliminar de posibles perfiles de fuentes de emisión que alimentarán un Modelo receptor especifico, en este caso el PMF, para la estimación de los aportes de las fuentes del PM2.5 en la zona de estudio.

La revisión bibliográfica recopilada en la Tabla, valida que componentes EC, OC y K como indicadores de emisiones de Combustión Biomasa, emisiones vehiculares, humo de quema de madera, Ni, Zn de emisiones diésel, Sb, Cu, Mo están asociados a desgaste de llantas y neumáticos así sucesivamente, pueden inferirse aportes de fuentes específicas.

Página 159 de 264







Un segundo criterio considerado para la inferencia de perfiles de fuentes en la zona, es la correlación lineal por pares de elementos y componentes del PM2.5, cuyo comportamiento e interacción (Sonibare, Akeredolu, Osibanjo, & Latinwo, 2005), es la estructura básica de los Modelos Receptor. La presunción básica se fundamenta en que cada tipo de fuente emite una distribución característica de un conjunto de elementos específicos de su naturaleza; por ejemplo, la proporción de Sodio y Potasio en la naturaleza (Na/K) exhibe una mayor cantidad del primero. Para el análisis, se calcularon las correlaciones de Pearson entre todas las especies químicas, seleccionando relaciones lineales estadísticamente significativas, coeficiente Pearson, Ver

fy o the

@areametropol

www.metropol.gov.co

Página 160 de 264





Tabla 3-16. Correlaciones (coeficiente Pearson) entre los componentes del PM2.5. Abril – diciembre de 2019. Estación MED-BEME. Medellín-Colombia.

Finalmente, el tercer criterio aplicado es la relación OC/EC y las fracciones de materia carbonácea, ya presentada en la Tabla 3-13. Perfiles de Fuentes de Emisión PM2.5 en la correlación de las ocho (8) fracciones de carbón en el análisis de materia carbonácea, Método IMPROVE (Judith C. Chow, Watson, Kuhns, et al., 2004), referente al grado en que las fracciones de carbono pueden diferenciar las contribuciones de diferentes fuentes de combustión (J. C. Chow, 1985; Judith C. Chow et al., 1992; Javitz & Watson, 1988; J. G. Watson, 1979). Igualmente, la correlación de OC/EC, R² entre 0.7 -1.0 indica que ambos contaminantes proceden de fuentes comunes de combustión y que ha ocurrido un proceso de dispersión atmosférica similar para ambos.

Con base en estos postulados científicos a continuación se describen los perfiles de fuentes de emisión que afectan la calidad del aire zona tipo habitacional de la ciudad de Medellín y el Valle de Aburrá:

- Emisiones vehiculares directas: OC, EC, SO₄-2 (Song et al., 2001); R² Poisson> 0.5: NO₃-/ SO₄-2 (A. G. Allen & Miguel, 1995; Guo et al., 2007; Zhou, Ye, Liu, Liu, & Peng, 2007)
- Emisiones diésel: EC2 principalmente (Cao et al., 2006; Liu et al., 2006), Zinc (Zn) y Níquel (Ni) (Gómez D., Dawidowski L., Giné M.F., Sánchez Bellato A., 2004).
- Emisiones de vehículos a gasolina OC2 y OC3 (Cao et al., 2006; Liu et al., 2006); Vanadio(V).
- Vehicule non exhaust: Hierro (Fe), Zinc (Zn), Cobre (Cu), , Manganeso (Mn) y el Cromo (Cr) provienen de lubricantes; Zinc (Zn), Cobre(Cu), Plomo (Pb), Cadmio, Antimonio (Sb) y Molibdeno (Mo) están asociado al desgaste de neumáticos , pastas de frenos y llantas (Gómez D., Giné A., Sánchez P., 2005).
- ➤ Combustión carbón y procesos industriales: Se, SO₄-2,(39.6% ± 13,8%) (Area Metropolitana del Valle de Aburrá & Politecnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid, 2008) (28,7 ± 22,6%) (Judith C. Chow, Watson, Kuhns, et al., 2004), OC2 y EC1 (Judith C. Chow, Watson, Chen, et al., 2004)
- Combustión de biomasa, biocombustibles e incendios: SO4^{-2,} OC1 dominante en el rango 23.9 ± 12.4%, y en menor proporción OC2 (11.9 ± 4.2%), OC3 (13.8± 6.6%), OC4 (8.8± 3.8%) y OP 6.(1± 9.3%) (John G Watson, 2004), siendo un indicador importante en los estudios de perfiles de fuentes. Correlación aceptable a buena R² Poisson> 0.5: K⁺ / NO₃⁻¹, Ca⁺²/ Mg²⁺, K⁺, Na⁺.
- ➤ Fuentes secundarias o extraemisiones por transformaciones físicas como condensación de gases, coagulación o precipitación húmeda de material particulado, eventos de contaminación locales y/ o regionales: Sodio(Na⁺), Calcio (Ca), NO_x, SO₄-², SOC, OC/EC = 8.5 Rango alto (A. D. A. Hansen, Rosen, & Novakov, 1984; Zhu et al., 2010a).

Página 161 de 264







- Minerales del suelo, explotación de materiales: Aluminio (Al), Calcio (Ca), Hierro (Fe), Titanio (Ti), Potasio (K). Relación (Na/K), en promedio para las 91 muestras fue de 1,4 (Na/K≈3/2), Correlación aceptable a buena R² Poisson> 0.5: Al/Mg, Ca⁺²/Mg⁺² (Chebbi & Carlier, 1996; Y. Wang, Zhuang, Xu, & An, 2007; Zhou et al., 2007). Para resuspendido son indicadores importantes fracciones OC2 OC3 y OC4.
- Polvo resuspendido: Aluminio (Al), Calcio (Ca), Hierro (Fe), Titanio (Ti), Potasio (K), Correlación aceptable a buena R² Poisson> 0.5: Al/Mg, Ca+²/ Mg+²((Chebbi & Carlier, 1996; Y. Wang et al., 2007; Zhou et al., 2007), OC2 OC3 y OC4 (Judith C. Chow, Watson, Kuhns, et al., 2004).





Tabla 3-15. Correlaciones entre especies e inferencia de fuentes comunes. Referencias Bibliográficas

Elementos o compuestos	Fuente	Lugar de procedencia del PM	Bibliografía
S, Se	Combustión de carbón	Noroeste de USA	Song X. et al (2001)
Ni, V	Quema de lubricantes	Noroeste de USA	Song X. et al (2001)
Al, Ca, Fe, K, Si y Ti	Re-suspensión del suelo	Noroeste de USA	Song X. et al (2001)
Pb y Zn	Incinerador	Noroeste de USA	Song X. et al (2001)
Na y S	Sal marina (aerosoles marinos)	Noroeste de USA	Song X. et al (2001)
Nitrato (NO3-), OC y EC	Fuentes vehiculares, con presencia de resuspendido el suelo	Noroeste de USA	Song X. et al (2001)
OC, EC y K	Combustión Biomasa, Fuentes vehiculares, humo de quema de madera	Noroeste de USA	Song X. et al (2001)
Mn, Cu y Ni	Humo de quema de madera	Noroeste de USA	Song X. et al (2001)
Cl, Na	Sal	Noroeste de USA	Song X. et al (2001)
NOx/EC	Combustión de Diesel	Pittsburgh USA	Modey W.K., et al
Ni, Zn	Combustión de Diesel	Buenos Aires-Argentina	Gómez D., et al (2005)
Sb, Cu, Mo	Pastillas de frenos	Buenos Aires-Argentina	Gómez D., et al (2005)
S, V	Combustión de gasolina	Buenos Aires-Argentina	Gómez D., et al (2005)
Ca, Mn	Lubricantes	Buenos Aires-Argentina	Gómez D., et al (2005)
Pt, Rh	Convertidores catalíticos	Buenos Aires-Argentina	Gómez D., et al (2006)
Na, Cl	Aerosoles marinos	Genoa-Italy	Ariola V., et al (2006)
Al, Si, Ca, Ti, Fe	Re-suspensión del suelo	Genoa-Italy	Ariola V., et al (2006)
Mg, Ca	Re-suspensión del suelo	N.D.	Allen et al., 1996 Kai et al., 2007 Wang et al., 2007
OC, EC, NH ₄₊ , SO ₄ ² , NO ₃₋	Fuentes vehiculares	Genoa-Italy	Ariola V., et al (2006)





Elementos o compuestos	Fuente	Lugar de procedencia del PM	Bibliografía
SO ₄ , NO ₃ -	Aerosoles secundarios	Genoa-Italy	Ariola V., et al (2006)
SO ₄ , NO ₃ -	Quema de residuos agrícolas	Genoa-Italy	Ariola V., et al (2006)
EC	Procesos de combustión: Calefacción residencial (carbón, madera), emisiones vehiculares, biomasa y reacciones fotoquímicas	Helsinki, Amsterdam, Duisburg, Prague, Barcelona, Athens	Turpin and Huntzinker, 1995 Sillanpää et al., 2006
Other Elements (OE) > 1.0%	Industria metalúrgica	Disburgo	Sillanpää et al., 2006
CaCO3 y/o CaO	Re-suspensión del suelo	Barcelona y Atenas	Sillanpää et al., 2006
NO	Sal Marina alcalina, resuspedido del suelo	N.D.	Song and Carmichael, 1999
Ca ⁺² / K ⁺	Quema de Biomasa, Compuestos solubles en agua (derivados del suelo), Re-suspensión del suelo	N.D.	Allen and Miguel, 1995; Echalar et al., 1995
SO ²	Centrales térmicas e Industria metalúrgica	N.D.	Singhai, Habib, Raman, & Gupta, 2017
Pb	Resuspendido de carreteras con trazas de gasolina con plomo	N.D.	Artaxo et al. 1999
Pb Zn, Cu, Pb, Cd, Sb y Mo	Desgaste de neumáticos	N.D.	Aatmeeyata et al. 2009 Gómez et al., 2005
Pb	Producción de Baterías	Wazirabad	Singhai et al., 2017
K⁺, Na⁺	Quema de biomasa y biocombustibles	Nueva Deli	Singhai et al., 2017
0,6 < K/Na < 2,9 en relación molar	Quema de biomasa	N.D.	Andreae et al. (1998)
0,6 < K/Na < 2,9 en relación molar	Quema de residuos agrícolas	India	Singhai et al., 2017
CaSO ₄	Materiales de construcción (cemento-estuco)	India	Singhai et al., 2017
Zn, Mn, Cu, Cr, Ni y Pb	Fuentes vehiculares	Nueva Deli	Singhai et al., 2017
OC/EC ~ 1.0	Fuentes vehiculares (Emisiones de exosto)	N.D.	Diapouli, 2016
Ca, Ba, Sb (Desgaste de frenos) Zn (Desgaste de neumáticos) Zn, Ca (Combustión de aceites lubricantes)	Non - exhaust	N.D.	Diapouli, 2016 Almeida, 2016
Ni, V, SO42- V/Ni = 2 - 3	Combustión de aceite pesado	N.D.	Diapouli, 2016
Zn, Pb, S, Cu, Cd, Sb, Mn en industrias metalúrgicas o Ca en industrias cementeras	Emisiones industriales	N.D.	Diapouli, 2016 Almeida, 2016
K+, OC, Cl- Zn, Br, Pb (quema de madera tratada)	Quemas de biomasa	N.D.	Diapouli, 2016 Almeida, 2016
Al, Si, Ca, Fe, K, Ti, Sr, Mg	Polvo resuspendido (polvo mineral)	N.D.	Diapouli, 2016
Na, Cl, Mg (Cl/Na = 1.8 y Mg/Na = 0.119)	Sal Marina fresca	N.D.	Diapouli, 2016 Almeida, 2016
Na, NO2-, Mg	Sal Marina envejecida	N.D.	Diapouli, 2016
Al, Si, Ti, Sc, Sm, K	Crustal (Corteza)	N.D.	Almeida, 2016

Página 164 de 264







Elementos o compuestos	Fuente	Lugar de procedencia del PM	Bibliografía
Fe, Mn, Cr, Ni, Mo, Zn, W y Rb	Industria de hierro y acero	N.D.	Almeida, 2016
Cu, As	Industria metalúrgica de producción de Cobre	N.D.	Almeida, 2016
Ce, Zr y Pb	Industria Cerámica	N.D.	Almeida, 2016
Ti, V, Cr, Co, Ni, Zn, As y Sb	Industria pesada (refinería, minería de carbón, termoeléctricas)	N.D.	Almeida, 2016
Ni, V	Industria petroquímica	N.D.	Almeida, 2016
V, Ni, Mn, Fe, Cr, As, S y SO42-	Quema de aceite	N.D.	Almeida, 2016
Al, Sc, Se, Co, As, Tl, Th, S, Pb y Sb	Quema de carbón	N.D.	Almeida, 2016
Zn, Cu, As, Sb, Pb y Al	Industria metalúrgica no ferrosa	N.D.	Almeida, 2016
K, Zn, Pb y Sb	Incineración de residuos	N.D.	Almeida, 2016
K, Pb, Ba, Sb y Sr	Fuegos pirotécnicos	N.D.	Almeida, 2016
Ce, Mo y Zn. Además de los compuestos de platino	Tubo de escape de vehículos	N.D.	Almeida, 2016
Ce, La, Pt, SO42-, NO3-, OC, EC	Vehículos a gasolina	N.D.	Almeida, 2016
S, SO42-, NO3-, OC, EC	Vehículos diésel	N.D.	Almeida, 2016
Ba, Cu, Sb	Desgaste de frenos	N.D.	Almeida, 2016
SO42-, NO3-, NH4+	Aerosoles secundarios	N.D.	Almeida, 2016
Fracción OC1	Quema de biomasa	"Parque Nacional "Big Bend" en Texas	Watson et al., 1994 Chow et al., 2004
Fracciones OC3 y OC4	Polvo resuspendido	Parque Nacional "Big Bend" en Texas	Watson et al., 1994 Chow et al., 2004
Fracción EC2	Exosto de vehículos diésel	Autopista Taipei-Yilan (Taiwan)	Zhu, et al. 2010
Fracciones OC2 y OC3	Exosto de vehículos a gasolina	Autopista Taipei-Yilan (Taiwan)	Zhu, et al. 2010

Fuente: Elaboración propia. Grupo GHYGAM, 2020





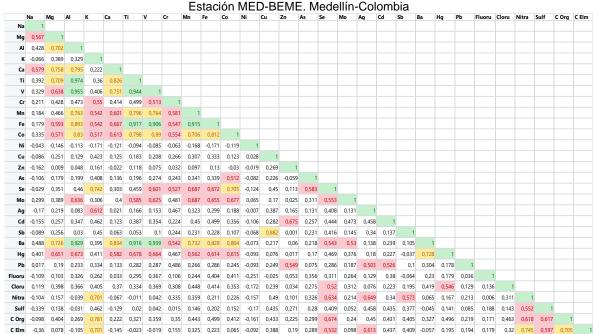


Tabla 3-16. Correlaciones (coeficiente Pearson) entre los componentes del PM2.5. Abril –diciembre de 2019.

Fuente: Elaboración propia. Grupo GHYGAM, 2020

3.5.6 Comparación MED-BEME con otras ciudades del mundo

Aprovechando los datos de caracterización química del PM2.5 en la Campaña realizada entre el 3 de abril y el 29 de diciembre de 2019 en la Estación MED-BEME (Estación urbana de carácter habitacional), se realiza un análisis de las concentraciones promedio obtenidas con datos de estudios realizados en otras ciudades del mundo, incluyendo la ciudad de Bogotá.

Sillanpaa y sus colaboradores (2006) realizaron Campañas de siete (7) semanas en seis (6) ciudades urbanas en Europa (Duisburgo, Praga, Ámsterdam, Helsinki, Barcelona y Atenas) en las cuales realizó caracterización del PM2.5, obteniendo valores similares al obtenido en Belén en la ciudad de Barcelona (20 µg/m³), pero con un valor inferior en OC (15%) y mayor en EC (7.6%) con OC/EC de 2.0, incluido en el rango de 1.0 a 4.2 típico de emisiones de fuentes vehiculares a diésel y gasolina (Schauer et al., 1999, 2002), mostrando en Barcelona una mayor influencia de fuentes vehiculares, debido a la relación de OC/EC para la zona Belén es de 8.5.

Al igual que para la zona de Belén, los contenidos de sulfatos son dominantes entre los aniones en todas las ciudades estudiadas, lo que muestra la importancia de los procesos de combustión como fuente aportante de material particulado PM2.5. En cuanto al contenido de OC, los valores más cercanos al obtenido para la estación MED-BEME (35%),

Página 166 de 264







fueron los obtenidos para las ciudades de Helsinki y Praga (Sillanpää et al., 2006) siendo la fracción más aportante en la mayoría de las ciudades.

En el Plan Decenal de descontaminación de Bogotá parte 1 (Behrentz, Sánchez, Fandiño, & Rodriguez, 2009) se realizó por parte de la Universidad de los Andes un estudio de caracterización de PM2.5 entre mayo y diciembre de 2007 en una zona residencial y una de alto tráfico vehicular obteniéndose valores de 26 y 25 μg/m³ respectivamente, que comparados con la zona residencial de Belén (20.1) al 2019, son mucho más altos en estas ciudades de Bogotá. Los aniones representaron el 11% para la zona residencial en Bogotá similar al 13% obtenido en la zona de Belén, siendo los sulfatos los de mayor peso en esta fracción para ambas ciudades.

En cuanto al material resuspendido, en la zona residencial de Bogotá (Behrentz et al., 2009), se encontró un valor de 7%, inferior al 11% de la zona de Belén en Medellín y la composición elemental fue 5.5% en Bogotá y el 7.9% en Medellín. La materia carbonácea no se identificó en Bogotá, por lo que esta fracción no pudo compararse.

En (2010), Jinxia y colaboradores caracterizaron el PM2.5 en la ciudad de Tianjin (China), en los meses de abril, julio y octubre de 2008 encontrando valores de 16,9 y 5,7 ug/m³ en OC y EC con una relación OC/EC de 3.0, indicador de influencia directa de fuentes vehiculares a diferencia del encontrado en Belén, 2019, con un valor de 8.5, lo que muestra las diferentes fuentes que influyen en las dos zonas urbanas comparadas. Adicionalmente, los mismos autores recopilaron información de caracterización de materia carbonácea en 19 ciudades entre China, Korea y Taiwán en períodos de 1994 al 2008, encontrándose valores similares en OC y EC a los obtenidos para la zona residencial de Belén en Kosan, Korea con una relación OC/EC igual.

Un estudio de materia carbonácea en la ciudad de Port City en el sur de Italia (Genga, Ielpo, Siciliano, & Siciliano, 2017a) influenciada por tráfico vehicular, barcos, quemas de biomasa y emisiones industriales, mostró valores de 17.0 y 3.5% en el PM2.5 para OC y EC, comparado con los valores obtenidos para Belén (2019) de 34.8 y 4.1%, siendo similares los valores de EC mostrando como comunes las fuentes vehiculares.

Estudios de PM2.5 en la ciudad de São Paulo en Brasil (Martins Pereira et al., 2017) mostraron valores promedio en PM2.5 dos veces mayor (45 ug/m³) a los encontrados en la Estación de Belén en Medellín (2019), con valores de sulfatos de 7% menor que en Belén (9%) siendo éste el mayor componente en la fracción iónica para las dos zonas urbanas y con una relación OC/EC de 1.5 propio de emisiones vehiculares con contribución de aerosoles orgánicos secundarios a diferencia del valor de 8.5 encontrado en la zona residencial del Valle de Aburrá

f y ® ™ @areametropol

www.metropol.gov.co







3.5.7 Mediciones directas de Black carbón, estación MED-BEME. Medellín

El Carbono Elemental puede determinarse por dos categorías analíticas en términos de metodologías: térmica como EC denominado BCe al ser un método equivalente del EC usando Aetalómetro a una longitud de onda de 880 nm (IR) (A. D. A. Hansen et al., 1984). Las diferencias entre el EC y BCe se deben a las propiedades físicas y químicas del EC como absorbente de calor y gran impactador del cambio climático(Hitzenberger et al., 1999).

El comportamiento diario de BCe (μ g/m³) en la zona Belén Las Mercedes entre abril y diciembre de 2019 a una rata de flujo de 5 Lpm y tiempo de almacenamiento de datos de 5 minutos, se observa en la Figura 3-55, con un valor promedio de 2.4 μ g/m³, máximo y mínimo de 5.7 μ g/m³ de 1.1 μ g/m³ respectivamente. Ambas evaluaciones se encuentran por debajo de la Norma diaria de calidad del aire vigente en Colombia para PM2.5 de 37 μ g/m³ (Ministerio de Ambiente y Desarrollo sostenible, 2017), conformando el BCe el 27% del PM fino absorbente de calor. De la misma manera, se puede observar que los picos se presentan principalmente en los meses de abril y octubre-noviembre, siendo consecuente con los estados de alerta declarados por el Área Metropolitana del Valle de Aburrá en los meses anteriormente mencionados.

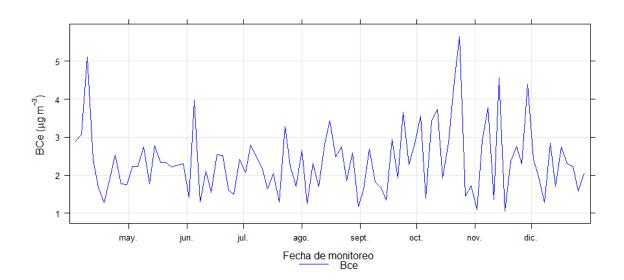


Figura 3-55. Comportamiento diario BCe (μg/m³). Abril –diciembre de 2019. Estación MED-BEME. Medellín-Colombia

Fuente: Elaboración propia. Grupo GHYGAM, 2020

Dada la relación directa del BC con las emisiones de combustión y en especial con las emisiones vehiculares, se procedió a analizar los datos obtenidos para cada día de monitoreo en las franjas horarias, incluyendo además las variables mes del año y día de la

Página 168 de 264







semana, para tener una mayor comprensión del contaminante y sus fuentes de emisión. En la Figura 3-56 se puede apreciar la variación temporal del BCe con el siguiente análisis:

- Para el factor "Día y hora" es claro que para todos los días sin importar si éste es laboral o no laboral, hay incrementos máximos del BCe entre las 5:00 7:00 y 17:00 y 19:00 horas respectivamente atribuibles principalmente a las franjas horarias de mayor flujo vehicular además de la dinámica de la ciudad de la ciudad en torno a la medida de pico y placa.
- ➤ El factor "Hora del día" presenta 3 picos de concentración. El máximo y medio en la franja horaria discutida basado en el factor "Día y hora"; sin embargo, se aprecia un pico bajo entre las 12:00 y 16:00 horas, atribuible principalmente al flujo vehicular presentado en el interior del punto de monitoreo, zona escolar, afectado por el regreso a casa de los estudiantes del Instituto Salesiano.
- Para el factor "Mes del año", se presentan picos de concentración alta en los meses abril, octubre y agosto. Los dos primeros son atribuibles a los fenómenos de inversión térmica que causan deterioro en la calidad del aire del Valle de Aburrá. Para el mes de agosto, el incremento de la concentración fue causado por llegadas de plumas de viento cargadas con material suspendido de quemas de biomasa en la Amazonía. Este incremento puedo observase claramente en el diagrama de niveles presentado en la Figura 3-57. Así mismo, este comportamiento atípico se confirmó por las mayores concentraciones de la fracción orgánica OC1 en PM2.5 con presencia de K+ clasificados como trazador de quema de biomasa.
- Finalmente, un análisis por día de la semana presenta un comportamiento similar al PM2.5 diario presentado en la Sección 3.3 Análisis de datos de concentración de PM2.5, donde se evidencio un comportamiento similar entre los martes, miércoles, jueves y viernes, un especial tratado a los lunes y una diferencia significativa para los días sábado y domingo (NoLabor).

@areametropol





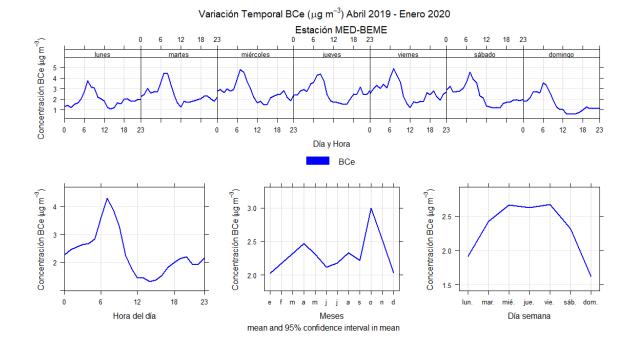


Figura 3-56. Variación temporal BCe (μg/m³). Estación MED-BEME, abril 2019 - enero 2020. Medellín, Colombia.

Fuente: Elaboración propia Grupo GHYGAM, 2020.

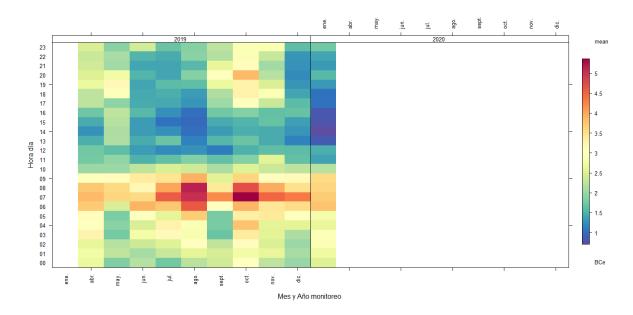


Figura 3-57. Diagrama de niveles BCe (μg/m³) Estación MED-BEME, abril 2019 -enero 2020, Medellín, Colombia.

Fuente: Elaboración propia Grupo GHYGAM, 2020.

Página 170 de 264







Con respecto a la variación horaria del BC mostrado en el diagrama de caja y bigotes en la Figura, el BCe presenta una variabilidad bien marcada a lo largo del día. Se observan dos (2) picos máximos bien definidos para los diez (10) meses estudiados. El primer pico se presentó en la mañana de 06:00 a 09:00 y segundo, en la tarde de 17:00 y 21:00 horas, nuevamente entre estas horas de mayor tráfico vehicular. La variación horaria encontrada de BCe en la Estación MED-BEME, es similar a lo reportado en otros estudios realizados en Brasil (Krecl, Targino, Wiese, Ketzel, & de Paula Corrêa, 2016), donde en días laborales el primer pico se presenta por la mañana de 07:00 a 08:00 y el segundo pico por la tarde de 18:00 a 19:00 y en la India (Begam et al., 2016) con el primer pico durante la mañana de 06:00 a 08:00 y segundo pico por la tarde 19:00 a 21:00.





Comportamiento horario BCe (µg/m3), Estación MED-BEME, Abril 2019 - Enero 2020

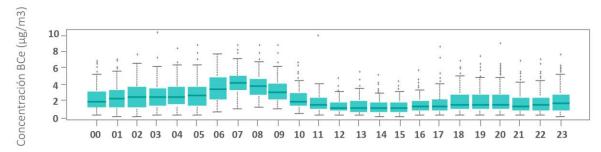


Figura 3-58. Variación horaria BCe (μg/m³) Estación MED-BEME, abril 2019 -enero 2020, Medellín, Colombia. Fuente: Elaboración propia Grupo GHYGAM, 2020.







3.6 COMPARACIÓN DE LA CARACTERIZACIÓN QUÍMICA PM2.5 EN VARIAS ZONAS DEL VALLE DE ABURRÁ.

Tomando como referencia las diferentes Campañas de caracterización del PM2.5 realizadas por el Grupo GHYGAM del Politécnico Jaime Isaza Cadavid para el Área Metropolitana en varias zonas del Valle de Aburrá, se hace un análisis comparativo de los resultados obtenidos en la Estación MDE-BEME, zona de carácter Habitacional ubicada en el Barrio Belén Las Mercedes, con la Estación de tráfico Politécnico MED-PJIC, Estación MED-LAYE, Estación de fondo urbano, Estación GIR-SOSN de tipo sub urbana industrial, entre el 27 de abril y el 17 de mayo de 2019. Para el Corregimiento de Santa Elena, Estación MDE-SELE, se tomó como referencia en el tiempo de una zona de fondo rural la campaña realizada en 2015, que, aunque no tenga datos contemporáneos, permite tener una idea de la diferencia en caracterización, tomando como base el crecimiento del parque automotor 2010-2019.

Dado el histórico de caracterización disponible para los períodos 2010, 2014-2015, 2018-2019 y 2019 para la Estación de tráfico Politécnico MED-PJIC, se analizó el cambio en el tiempo de las especies más aportadas por tráfico vehicular y otras fuentes importantes.

3.6.1 Comparación Estación de tráfico MED-PJIC y Estación habitacional MED-BEME

La Estación MED-BEME, evalúa la calidad del aire en una zona de carácter habitacional (Barrio Belén Las Mercedes), con afectación de tráfico vehicular moderado, influencia directa de una ladrillera ubicada a 620 metros, polvo resuspendido originado por el desprendimiento de materiales, producto de las corrientes de viento y la turbulencia generada por los vehículos y de emisiones locales transportadas por el viento en dirección dominante NE. Así mismo, se ha avanzado en el aporte de contaminantes por corrientes regionales procedentes de varios países de Suramérica, tal como fue presentado en ítems anteriores.

La Estación MED-PJIC está ubicada en el Barrio Patio Bonito, en área urbanizada e influenciada por un alto tráfico vehicular en vías arteriales de la ciudad como la Avenida Las Vegas, la calle 10, el corredor vial de la Avenida El Poblado (Carrera 43) y la Avenida Regional. Igualmente se miden contaminantes aportados por fuentes industriales procedentes tanto del norte del Valle de Aburrá, como de las fuentes fijas de la zona.

Para la comparación de la composición elemental, se tuvo en cuenta la escala de clasificación aplicada en el análisis de datos, mayoritarios rangos de 1.0 $\mu g/m^3$ – 0.1 $\mu g/m^3$, minoritarios entre 0.1 $\mu g/m^3$ – 0.01 $\mu g/m^3$, trazas 0.01 $\mu g/m^3$ – 0.001 $\mu g/m^3$ y ultratrazas (0.001 $\mu g/m^3$ - 0.0001 $\mu g/m^3$). En la Figura 3-59, se muestran gráficamente las composiciones elementales correspondientes a ambas Estaciones MED-PJIC y MED-BEME.

Los elementos mayoritarios determinados para la Estación MED-PJIC, fueron el Calcio (Ca) y el Silicio (Si), y en la Estación MED-BEME, Aluminio (Al), Hierro (Fe) y Calcio (Ca), Página 173 de 264







sustancias típicas de los perfiles geológicos gruesos (Judith C. Chow, Watson, Kuhns, et al., 2004), actividades de explotación de materiales, polvo resuspendido y partículas del suelo, comúnmente predominantes como óxidos (Sillanpää et al., 2006). Hay una diferencia con MED-BEME por el mayor contenido en Calcio y cuantificación de Aluminio (Al), Hierro (Fe), infiriendo un mayor aporte al PM2.5 en esta zona por manejo y transporte de materiales.

En ambas zonas, el Potasio (K), en escala mayoritaria, evidencia la influencia de incendios (quema de biomasa) (Judith C. Chow, Watson, Kuhns, et al., 2004). En la estación Poblado son mayores las concentraciones de Zinc (Zn), Cobre (Cu), Cromo (Cr), Vanadio (V) y Cadmio (Cd), proveniente de emisiones vehiculares directas y de las denominadas por su término en inglés, vehicle non exhaust (emisiones vehiculares de no escape) (desgaste de pastillas de frenos y neumáticos), (Valavanidis et al., 2006), asociadas al Antimonio (Sb), Molibdeno (Mo) y Zinc (Zn) (Gómez D., Giné A., Sánchez P., 2005). Así mismo sucede con (Mn) y Cromo (Cr), provenientes de lubricantes (Gómez D., Dawidowski L., Giné M.F., Sánchez Bellato A., 2004).

Página 174 de 264





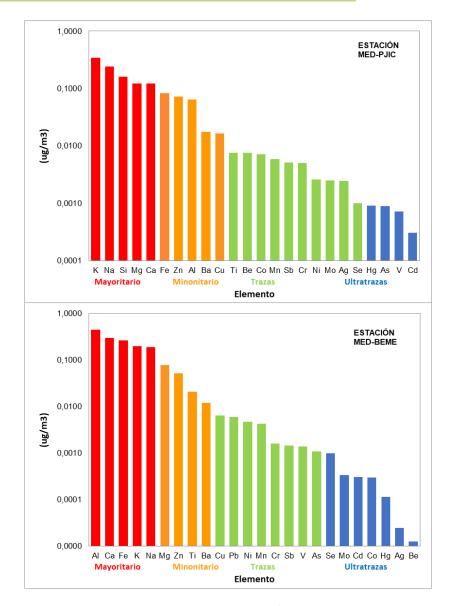


Figura 3-59. Comparación de la composición elemental (μg/m³) del PM2.5 en las Estaciones MED-PJIC y MED-BEME. Campañas abril 27-mayo 17 y abril 3–diciembre 29 de 2019. Medellín, Colombia Fuente: Elaboración propia. Grupo GHYGAM, 2020

La comparación de las especies aniónicas se observa en la Figura 3-60. Para la Estación MED-PJIC se determinó mayor contenido de sulfatos en comparación con MED-BEME, siendo los sulfatos característicos de mayor emisión en la combustión a nivel industrial de carbón y otros combustibles, biomasa y en menor proporción, gasolina y diésel. Es de anotar que, en ambas Estaciones, de los aniones determinados, los sulfatos conforman un alto porcentaje entre los aniones.

Página 175 de 264







Los nitratos están en mayor cantidad en la Estación MED-BEME, debido a fuentes secundarias de mayor influencia de esta Estación.

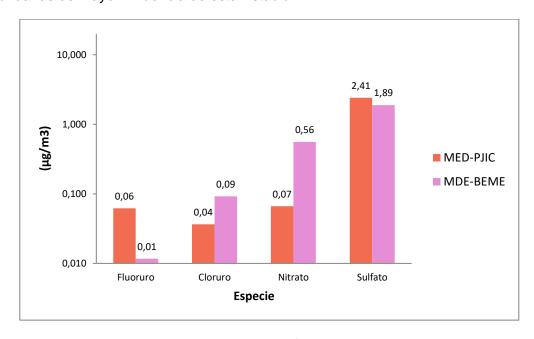


Figura 3-60. Comparación de las Especies Aniónicas (μg/m³) del PM2.5 de las Estaciones MED-PJIC y MED-BEME. Campañas abril 27-mayo 17 y abril 3–diciembre 29 de 2019. Medellín, Colombia Fuente: Elaboración propia. Grupo GHYGAM, 2019

En la Figura 3-61 se presenta la comparación del contenido de Materia Carbonácea en el PM2.5 caracterizado en las estaciones MED-PJIC y MED-BEME. La concentración PM2.5 promedio en Poblado (21.2 μg/m³), es ligeramente mayor a Belén Las Mercedes (20.1 μg/m³). Igualmente, el carbono total (OC +EC) es mayor en la Estación Politécnico, siendo más marcada la diferencia en el EC, contaminante primario, asociado a procesos combustión de carbón, biocombustibles e incendios, y a emisiones vehiculares. El OC, común en zonas urbanas (Pio et al., 2011; Querol et al., 2013; Srinivas & Sarin, 2014).

Analizando las relaciones OC/EC evaluadas, para la Estación MED-PJIC la relación de 1.9, se halla en el rango de 1.0 a 4.2, típico de las estaciones influenciadas por emisiones de fuentes vehiculares con motores a diésel y gasolina (Schauer et al., 2002, 1999), mientras la relación de 8.5 en la Estación MDE-BEME, valor cercano a de 7.7 (M. Zhang, Han, & Zhu, 2007), es indicador de emisiones secundarias y extraemisiones por eventos de contaminación por incendios locales y/o regionales. Esta relación OC/EC en el PM2.5 de Estación de Belén, evidencia adicionalmente mayor reactividad, mostrando emisiones formadas por reacciones secundarias, corroborando los mayores valores obtenidos en sulfatos, nitratos y el OC secundario (SOC) 3.5 μg/m³. Esta reactividad es propia de la dinámica atmosférica, condiciones meteorológicas y características variables en la emisión de los contaminantes precursores y deberá ser tema de investigación futura para su control.

Página 176 de 264







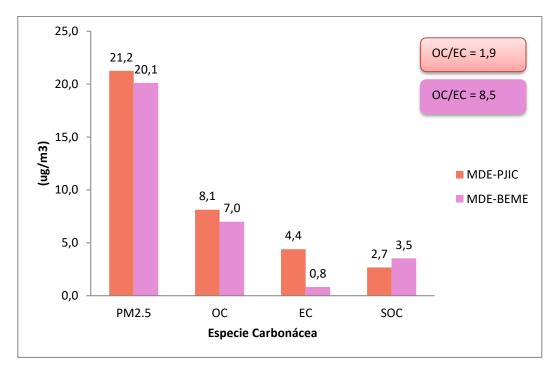


Figura 3-61. Comparación Materia Carbonácea (μg/m³) del PM2.5. Estaciones MED-PJIC y MED-BEME. Campañas abril 27-Mayo17 y abril 3–diciembre 29 de 2019. Medellín, Colombia Fuente: Elaboración propia. Grupo GHYGAM, 2019

Finalmente la comparación de la composición promedio del PM2.5 en las dos estaciones se puede observar en la Figura 3-62, donde se muestra como en ambas zonas el componente más abundante es la materia orgánica, como es lo común en las zonas urbanas en el mundo (Genga et al., 2017a; Querol et al., 2013), dada la influencia de emisiones vehiculares, emisiones de combustión industrial, incluyendo Carbón, biocombustibles e incendios y polvo resuspendido. La mayor presencia en la Estación PJIC de Cobre (Cu)-Zinc (Zn) en alta correlación, muestra un mayor impacto del desgaste de pastas de frenos y neumáticos de los vehículos. Es de resaltar como en el presente estudio para la zona Belén se evaluó la fracción OC1, indicadora de aportes de incendios y biocombustibles, aunque no se dispone de este dato para la Estación MED-PJIC, siendo un avance importante en las técnicas de caracterización avanzadas aplicadas en la actualidad. La fracción iónica es del orden del 12% en ambas zonas, donde los sulfatos son dominantes y procedentes de reacciones secundarias con fuentes precursoras de combustión. Los componentes minerales son más abundantes en Belén Las Mercedes, evaluados no solo en parte en esta fracción, sino también en el polvo resuspendido (11%), aportado por actividades de explotación de materiales y partículas del suelo.

Como zonas de tipo habitacional de tráfico, es evidente la mayor presencia de emisiones vehiculares en la zona Poblado tanto en emisiones directas como non exhaust. Es notable para Belén según los datos de trazadores de incendios y biocombustibles, que se alcanza a detectar el aporte de estas fuentes al PM2.5, en gran parte generado por corrientes regionales, emisiones de combustión industrial es común en ambas zonas, aunque no logra







diferenciarse por las técnicas más avanzadas que están siendo aplicadas en el Proyecto ARCAL ONU 7023 que tiene como aliado estratégico el AMVA y ECOPETROL.

ESTACIÓN MED-PJIC

PM 2.5 = 21,2 μg/m3 (100%) OC EC Total lones Total Elemental N.D. ESTACIÓN MED-BEME PM 2.5 = 20,1 μg/m3 (100%) 11% 4% 35% OC EC Total lones Resuspendido Total Elemental N.D.

Figura 3-62. Comparación Composición PM2.5 (%) promedio. Estaciones MED-PJIC y MED-BEME. Campañas abril 27-Mayo17 y abril 3–diciembre 29 de 2019. Medellín, Colombia Fuente: Elaboración propia. Grupo GHYGAM, 2020

3.6.2 Comparación Estación suburbana industrial Girardota GIR-SOSN y Estación habitacional MED-BEME.

De manera similar a las estaciones Politécnico y Belén Las Mercedes, se realizó un comparativo entre la Estación MED-BEME y la Estación GIR-SOSN ubicada en el municipio de Girardota. Esta última Estación, se encuentra en suelo urbano con ocupación para edificaciones destinados a espacios complementarios e influenciada por un sector industrial Página 178 de 264







con presencia de empresas como Enka de Colombia, Abracol, Italcol, Colcerámica S.A., Ferro Colombia S.A.S. (anteriormente Pigmentos S.A.), Agregados del Norte (Conconcreto), Interquim, Textiles Balalaika Ltda., Zeuss Petroleum y Productos Químicos Panamericanos.

Para la comparación de la composición elemental, se consideró la escala definida anteriormente en mayoritarios, minoritarios, trazas y ultratrazas. En la Figura 3-63 se muestran las composiciones elementales correspondientes a las estaciones GIR-SOSN y MED-BEME. En ambas Estaciones, los elementos mayoritarios (1.0 μ g/m³ – 0.1 μ g/m³), cuantificados en el mismo orden, permiten inferir el aporte de polvo resuspendido, actividades de beneficio de materiales y partículas del suelo (Brook, Dann, & Burnett, 1997), siendo comunes el Calcio (Ca), Hierro (Fe), y Potasio (K), a diferencia del Silicio (Si) y el Aluminio (Al) y Sodio (Na), aunque en Belén Las Mercedes, se evaluó específicamente el polvo resuspendido en 11%, como indicador adicional a estas fuentes de mayor impacto en esta zona.

El Potasio (K), que se observa en el rango mayoritario en las dos estaciones, evidenciando la influencia de incendios (quema de biomasa y biocombustibles) sumado a la presencia de Sodio (Na) (Judith C. Chow, Watson, Kuhns, et al., 2004).

Los contenidos de Zinc (Zn), Cobre (Cu), Cromo (Cr), Vanadio (V) y Cadmio (Cd), muestran la influencia de fuentes vehiculares en ambas zonas (Valavanidis et al., 2006), siendo mayor el Vanadio (V) en la zona Belén coherente con el rodamiento de vehículos livianos de mayor circulación. En cuanto a la influencia de emisiones vehicle non exhaust, (desgaste de pastillas de frenos y neumáticos), asociadas al Antimonio (Sb), Molibdeno (Mo), Cobre (Cu) y Zinc (Zn) (Gómez D., Giné A., Sánchez P., 2005), se encuentran en mayor concentración en Girardota, concordante con un mayor tráfico pesado, así como (Mn) y Cromo (Cr), provenientes de lubricantes (Gómez D., Dawidowski L., Giné M.F., Sánchez Bellato A., 2004).



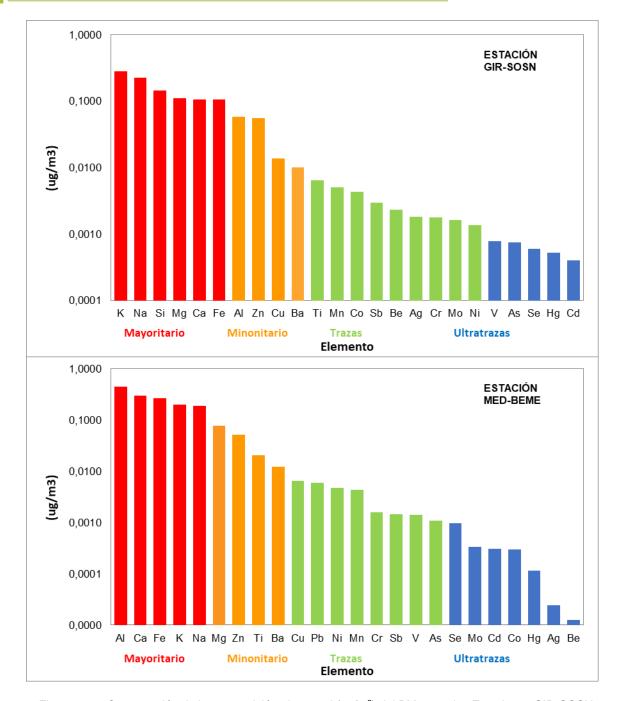


Figura 3-63. Comparación de la composición elemental (μg/m³) del PM2.5 en las Estaciones GIR-SOSN y MED-BEME. Campañas abril 27-mayo 17 y abril 3–diciembre 29 de 2019. Medellín, Colombia Fuente: Elaboración propia. Grupo GHYGAM, 2020

La comparación de las especies aniónicas entre las campañas, se observa en la Figura 3-64, donde la caracterización realizada en la Estación GIR-SOSN muestra una mayor cantidad de sulfatos provenientes de combustión de carbón, gasolina y diésel, que en esta Página 180 de 264







zona proviene de emisiones de calderas a carbón utilizadas en las empresas y de emisiones vehiculares, mientras que los nitratos se observan en mayor cantidad en la Estación MED-BEME, zona de mayores emisiones secundarias.

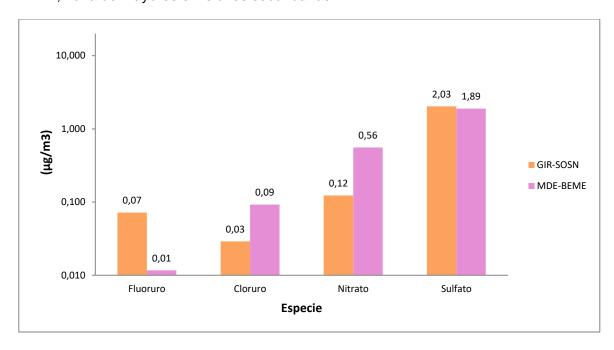


Figura 3-64. Comparación de las Especies Aniónicas (μg/m³) PM2.5 de las Estaciones GIR-SOSN y MED-BEME. Campañas abril 27-mayo 17 y abril 3-diciembre 29 de 2019. Medellín, Colombia Fuente: Elaboración propia. Grupo GHYGAM, 2020

En la Figura 3-65 se presenta la comparación del contenido de Materia Carbonácea encontrada en las campañas de monitoreo realizadas en las estaciones GIR-SOSN y MED-BEME. La concentración promedio de PM2.5 en la Estación de Belén fue de 20,1 μg/m³, mayor que la obtenida para la Estación de Girardota (16,7 μg/m³). En cuanto al OC, se observan concentraciones similares, a diferencia del EC, con un valor mayor en la Estación de Girardota característico de las emisiones de calderas de carbón y combustión diésel (Zhu et al., 2010a), concordante con el mayor flujo vehicular pesado e influencia de combustión industrial, lo cual se corrobora con el análisis morfológico SEM realizado en la campaña realizada en la Estación GIR-SOSN, según la morfología de la ceniza proveniente de combustión de carbón (Area Metropolitana del Valle de Aburrá & Politecnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid, 2019a).

Analizando las relaciones OC/EC en el PM2.5, para la Estación GIR-SOSN fue calculado un valor de 1.7 y está ubicado entre el rango de 1.0 a 4.2, indicador típico de emisiones vehiculares a Diesel y gasolina (Schauer et al., 2002, 1999), mientras que para la Estación MED-BEME, como ya fue analizado, fue de 8.5, cercano a 7.7, indicador de emisiones secundarias y extraemisiones por eventos de contaminación por incendios locales y/o regionales. Esta relación OC/EC en el PM2.5, evidencia una menor reactividad en la zona Girardota (SOC 14%).

Página 181 de 264







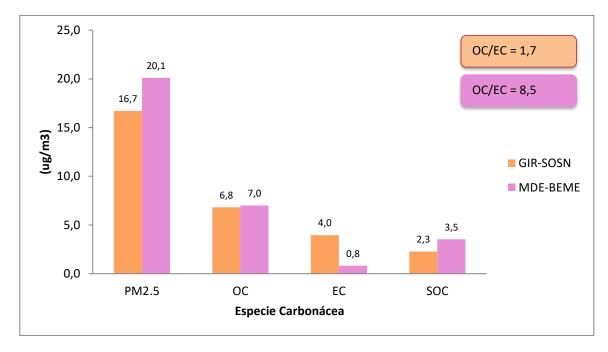


Figura 3-65. Comparación Materia Carbonácea (μg/m³) PM2.5 de las Estaciones GIR-SOSN y MED-BEME. Campañas abril 27-Mayo17 y abril 3-diciembre 29 de 2019. Medellín, Colombia Fuente: Elaboración propia. Grupo GHYGAM, 2020

La comparación de la composición promedio del PM2.5 entre las estaciones GIR-SOSN y MED-BEME (Ver Figura 3-66), muestra en ambas zonas, como componente más abundante la materia orgánica, la cual constituye la especie dominante en el material particulado atmosférico en las zonas urbanas (Genga, Ielpo, Siciliano, & Siciliano, 2017b; Querol et al., 2013).

En la Estación GIR-SOSN la composición de OC es de 41% comparado con un 35% para la Estación MED-BEME, dada la influencia en emisiones de combustión industrial, donde se usan calderas a carbón, que en la zona de Girardota tiene mayor influencia por ser suburbana industrial, además de las emisiones vehiculares, biocombustibles, incendios y polvo resuspendido presentes en las dos Estaciones. Las correlaciones altas entre el sulfato/Mg, Al/Ca y Bario (Ba), indican como fuente, material resuspendido y procesos minerales, acorde con actividades de explotación de minerales de influencia en el municipio de Girardota. La fracción iónica es del 13% en ambas zonas, donde los sulfatos son dominantes y se originan por reacciones secundarias con fuentes precursoras de combustión.

Los componentes minerales son similares en las dos zonas, evaluados no solo en parte en esta fracción, sino también en el polvo resuspendido (11%), el cual fue evaluado para la Estación Belén y es aportado por actividades de explotación de materiales y partículas del suelo.

Página 182 de 264









Como zonas de tipo habitacional y suburbana industrial, es apreciable la mayor presencia de indicadores de emisiones de combustión a carbón (Santanna et al., 2016), EC y Selenio (Se), Cobalto (Co), Arsénico (As) y Antimonio (Sb) y actividades de explotación y transporte de materiales, además del mayor impacto de las emisiones vehicle non exhaust, (desgaste de pastillas de frenos y neumáticos) en Girardota, asociado al mayor flujo vehicular pesado.

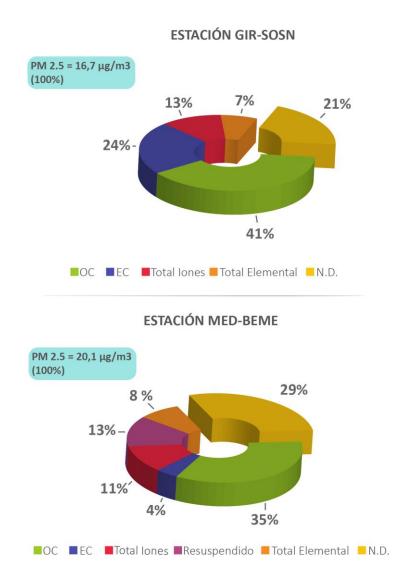


Figura 3-66. Comparación Composición PM2.5 (%) promedio. Estaciones GIR-SOSN y MED-BEME. Campañas abril 27-Mayo17 y abril 3-diciembre 29 de 2019. Medellín, Colombia Fuente: Elaboración propia. Grupo GHYGAM, 2020

Página 183 de 264







3.6.3 Comparación Estación de Fondo Urbano MED-LAYE y Estación habitacional MED-BEME.

La Estación MED-LAYE catalogada como estación de fondo urbano, se encuentra sobre la vía los balsos (Barrios Los Balsos No. 1), en la estación de bombeo MED-LAYE de EPM, ubicada en la Zona Alta de la comuna 14 Poblado, a una distancia de 1300 metros de la Transversal superior, a 450 metros de la vía El Tesoro y 600 metros de la Carretera Las Palmas. Al igual que para las demás estaciones, se realizó la comparación de la caracterización química entre la Estación MED-LAYE y la Estación MED-BEME. La campaña de caracterización en esta zona se hizo entre abril 27-mayo 17 de 2019.

Inicialmente se hizo la comparación de la composición elemental, considerando la escala definida anteriormente en mayoritarios, minoritarios, trazas y ultratrazas. En la Figura 3-67 se muestran las composiciones elementales. En la Estación de La Ye, los elementos mayoritarios (1.0 µg/m³ – 0.1 µg/m³), cuantificados Potasio (K), Sodio (Na), muestran la mayor influencia de quema de biomasa y biocombustibles (Chow et al., 2004b) y el Magnesio (Mg), típico de minerales y material resuspendido del suelo, mientras que en la Estación de Belén en esta misma escala, se encuentran el Aluminio (Al), Calcio (Ca), Hierro (Fe), y Potasio (K), indicadores de este mismo tipo de fuente (Brook et al., 1997). Además, para la zona de Belén se evaluó específicamente el polvo resuspendido en 11%, como indicador adicional. Por consiguiente, se observa claramente la mayor influencia de este tipo de fuente en la Estación MED-BEME.

La influencia de quema de biomasa, biocombustibles e incendios, se observa en las dos Estaciones, pero de acuerdo a la composición elemental con un contenido de Potasio (K) de un 1.3%, comparado con un 1.0% para la Estación de Belén, es más evidente la influencia de este tipo de fuentes en la zona de fondo urbano (La Ye), debida a su cercanía con el área rural, donde se practica la quema de biomasa y biocombustibles en los procesos agrícolas.

Los elementos Zinc (Zn), Cromo (Cr), Vanadio (V) y Cadmio (Cd), presentes en ambas zonas, muestran la influencia de fuentes vehiculares (Valavanidis et al., 2006), mostrando mayor contenido en la zona Belén, coherente con el rodamiento de vehículos livianos de mayor circulación. En cuanto a la influencia de emisiones vehicle non exhaust, (desgaste de pastillas de frenos y neumáticos), asociadas al Molibdeno (Mo), Cobre (Cu) y Zinc (Zn) (Gómez D., Giné A., Sánchez P., 2005), se encuentran en mayor concentración en Belén, concordante con un mayor tráfico, así como (Mn) y Cromo (Cr), provenientes de lubricantes (Gómez D., Dawidowski L., Giné M.F., Sánchez Bellato A., 2004). Solamente el Antimonio (Sb), indicador de desgaste de frenos (Gómez D., Giné A., Sánchez P., 2005), fue superior en la zona de influencia de La Ye, asociado con las emisiones vehiculares non exhaust, originadas en la vía Las Palmas que tiene una alta pendiente, que obliga al mayor uso del freno en la conducción de los vehículos, dada la correlación Zinc/EC de 0.77 y el mayor flujo de esta categoría de vehículos.

Página 184 de 264







En esta misma Estación, el Aluminio (Al), Potasio (K), Calcio (Ca) y Titanio (Ti) infieren como fuente, material resuspendido del suelo y transporte regional, y el Potasio (K) que presenta correlación alta con el sodio (Na), la presencia de biocombustibles.

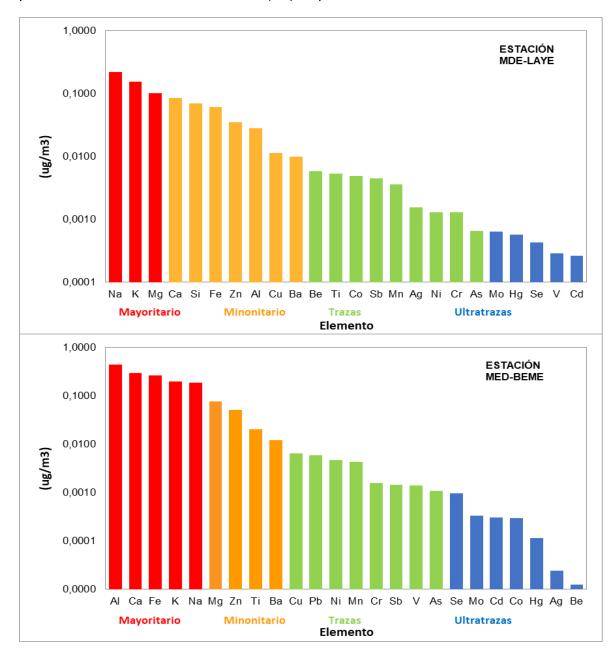


Figura 3-67. Comparación de la composición elemental (μg/m³) del PM2.5 en las Estaciones MED-LAYE y MED-BEME. Campañas abril 27-mayo 17 y abril 3–diciembre 29 de 2019. Medellín, Colombia Fuente: Elaboración propia. Grupo GHYGAM, 2020

Página 185 de 264







Con el objetivo de comparar las especies aniónicas en las campañas de caracterización de las Estaciones MED-LAYE y MED-BEME, se presenta la Figura 3-68, observándose valores similares en la cantidad de sulfatos provenientes de la combustión de carbón, gasolina y diésel, fuentes presentes en las zonas comparadas. En cuanto a los nitratos y cloruros, se observan en mayor cantidad en la Estación MED-BEME, zona de mayores emisiones secundarias.

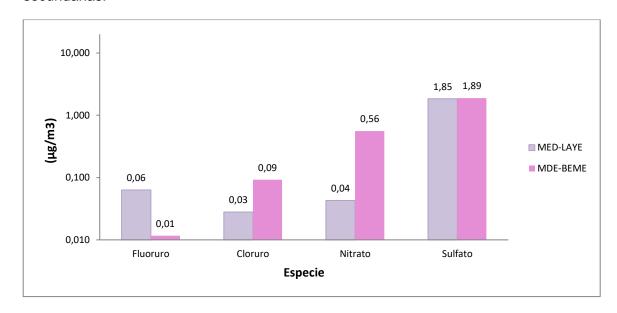


Figura 3-68. Comparación de las Especies Aniónicas (μg/m³) del PM2.5 de las Estaciones MED-LAYE y MED-BEME. Campañas abril 27-mayo 17 y abril 3-diciembre 29 de 2019. Medellín, Colombia Fuente: Elaboración propia. Grupo GHYGAM, 2020

La Figura 3-69 muestra la comparación del contenido de Materia Carbonácea para las campañas objeto de estudio. La concentración promedio de PM2.5 en la Estación de Belén fue de 20.1 µg/m³, mayor que la obtenida para la Estación de La Ye (17.3 µg/m³). En cuanto al OC, se observan concentraciones similares, a diferencia del EC, con un valor mayor en la Estación La Ye, indicador de combustión de carbón y diésel (Zhu et al., 2010a) en parte concordante con el flujo vehicular alto que transita por la Avenida Las Palmas y sus vías alimentadoras de influencia en la zona.

La relación OC/EC en el PM2.5, para la Estación MED-LAYE fue de 2.7, valor ubicado en el rango de 1.0 a 4.2, indicador típico de emisiones vehiculares a diésel y gasolina (Schauer et al., 2002, 1999) y en la Estación MED-BEME, 8.5, indicador de emisiones secundarias y extraemisiones por eventos de contaminación por incendios locales y/o regionales. Esta relación OC/EC en el PM2.5, evidencia una menor reactividad en la zona de La Ye (SOC 15%).

f 🛩 😇 🛗

@areametropol

www.metropol.gov.co

Página 186 de 264





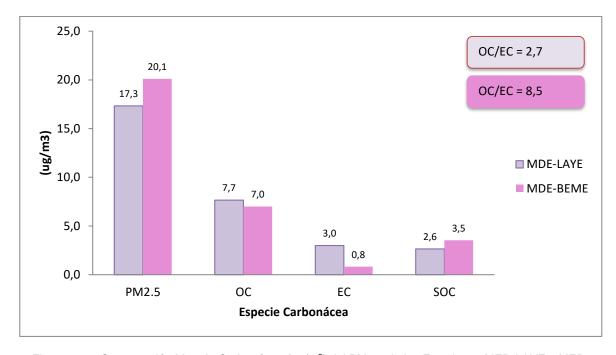


Figura 3-69. Comparación Materia Carbonácea (μg/m³) del PM2.5 de las Estaciones MED-LAYE y MED-BEME. Campañas abril 27-Mayo17 y abril 3-diciembre 29 de 2019. Medellín, Colombia Fuente: Elaboración propia. Grupo GHYGAM, 2020

La composición promedio del PM2.5 se puede observar en la Figura 3-70. De nuevo, en ambas zonas el componente más abundante del PM2.5 es la materia orgánica (Genga et al., 2017b; Querol et al., 2013) con valores de 44 y 35% para la Estación MED-LAYE y MED-BEME, respectivamente, dada la influencia en emisiones de combustión industrial, vehiculares, biocombustibles, incendios y polvo resuspendido presentes en las dos Estaciones. La fracción iónica es del mismo orden, 11% y 13%, y los sulfatos son dominantes, de origen secundario de fuentes precursoras de combustión. Los componentes minerales son mayores en la zona de Belén, evaluados para esta última no solo en parte en esta fracción, sino también en el polvo resuspendido (11%), aportado por actividades de explotación, manejo y transporte de materiales y partículas del suelo. En la Estación La Ye, igualmente se evaluaron indicadores de resuspendido, biocombustibles y transporte de partículas por quema de biomasa.

En síntesis para las zona tipo habitacional y de fondo urbano, con diferencias de tráfico vehicular y fuentes fijas cercanas, se validan emisiones del tráfico vehicular liviano en la zona Belén, al igual que la influencia de emisiones vehicle non exhaust, (desgaste de pastillas de frenos y neumáticos), igualmente en La Ye, estas emisiones son importantes dadas las pendientes, que obligan al mayor uso del freno en la conducción y es más notorio el impacto de emisiones diésel, dada la correlación Zinc/EC de 0.77 y el mayor flujo de esta categoría de vehículos. La correlación alta K/Na, muestra la presencia de emisiones de biocombustibles y quema de biomasa.

Página 187 de 264









La emisión de minerales y material resuspendido, aunque presente en ambas zonas por su relación con el rodamiento de vehículos y partículas del suelo, muestra mayor afectación en la zona poblacional, por la cercanía de actividades de manejo y transporte de materiales.

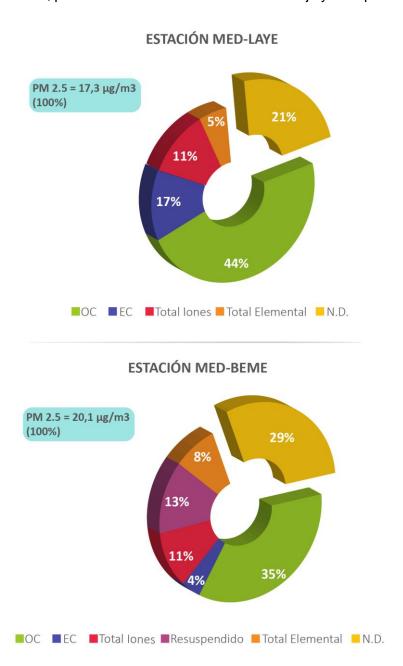


Figura 3-70. Comparación Composición PM2.5 (%) promedio. Estaciones GIR-SOSN y MED-BEME. Campañas abril 27-Mayo17 y abril 3-diciembre 29 de 2019. Medellín, Colombia Fuente: Elaboración propia. Grupo GHYGAM, 2020

Página 188 de 264







3.6.4 Comparación Estación de Fondo Rural MED-SELE y Estación habitacional MED-BEME.2019

La Estación MED-SELE catalogada como de fondo rural, está ubicada en el corregimiento de Santa Elena del Municipio de Medellín, sitio en el cual se realizó una campaña de monitoreo del PM2.5, en el período comprendido entre el 12 y el 22 de enero de 2015. La caracterización química de esta Estación se comparó con los resultados de caracterización química del PM2.5 realizada en la Estación MED-BEME, entre abril y diciembre de 2019, aunque no son coincidentes en el tiempo, se tendrá en cuenta el crecimiento del parque automotor, desarrollo de la zona, actividad turística, como variables importantes en el aumento de emisiones relacionadas.

Es muy importante el análisis de la zona Santa Elena dada su ubicación al nororiente de la ciudad de Medellín, por consiguiente, se hizo la comparación de la composición elemental, considerando la escala definida anteriormente. En la Figura 3-71 se muestran las composiciones elementales donde para la Estación de Santa Elena, los elementos mayoritarios (1.0 μg/m³ – 0.1 μg/m³) cuantificados, Potasio (K), Sodio (Na), mostraban para el 2015, la mayor influencia de quema de biomasa y biocombustibles (Judith C. Chow, Watson, Kuhns, et al., 2004), los cuales para el 2019, debería esperarse un aumento dado el incremento de incendios desde el 2015 a nivel de Suramérica según avances de estudios de investigadores en la región (Valencia Hernandez, Gomez Marín, Maya, & Toro Gómez, 2019), Calcio (Ca) y Silicio (Si), se encuentran en el perfil de minerales y material resuspendido del suelo, propios de la zona. Para la Estación de Belén en esta misma escala, se encuentran el Aluminio (Al), Calcio (Ca), Hierro (Fe), y Potasio (K), indicadores de este mismo tipo de fuente (Brook et al., 1997). Esta zona de tipo poblacional y la de fondo rural son representativas de la recepción de PM2.5 por fuentes que no son típicas de estudios en la región y hoy se abre una oportunidad para profundizar en la química atmosférica que favorece su transformación y transporte.

La influencia de quema de biomasa, biocombustibles e incendios se observa en las dos Estaciones, aún en diferente temporalidad, pero de acuerdo a la composición elemental encontrada, es más evidente en la zona de fondo rural MED-SELE, por estar en área rural, donde existen prácticas cotidianas de quema de madera y biomasas en los procesos agrícolas y en ocasiones para la cocción de alimentos en las residencias rurales.

En la Estación de Santa Elena no se observan elementos como el Antimonio (Sb), indicador de desgaste de frenos (Gómez D., Giné A., Sánchez P., 2005), ni de Cromo (Cr), indicador de aceites lubricantes, evidenciándose para el 2015, menor influencia de este tipo de fuentes en la zona rural, aunque durante fines de semana y festividades locales pueda incrementarse por la afluencia de turistas.

f y ® ⊞ @areametropol

www.metropol.gov.co



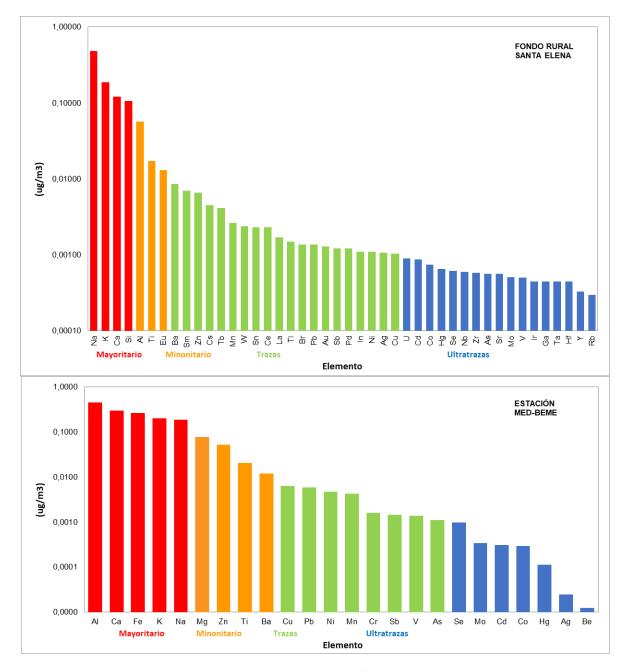


Figura 3-71. Comparación de la composición elemental (μg/m³) del PM2.5 en las Estaciones MED-LAYE y MED-BEME. Campañas enero 12 a 22 de 2015 y abril 3–diciembre 29 de 2019. Medellín, Colombia Fuente: Elaboración propia. Grupo GHYGAM, 2020

Las especies aniónicas entre las campañas de caracterización, (Ver Figura 3-72), tienen valores similares en sulfatos provenientes de la combustión de combustibles sólidos y líquidos como carbón, gasolina y diésel, proporción que se esperaría no tenga cambios considerables al 2019 en la zona de fondo rural, dada la menor influencia de fuentes de

Página 190 de 264







combustión industrial y la reducción del contenido de azufre en los combustibles desde el 2010.

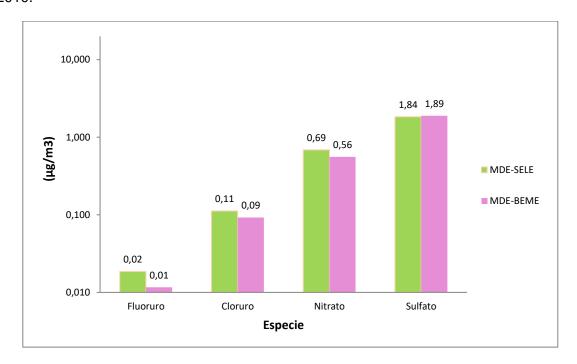


Figura 3-72. Comparación Especies Aniónicas (μg/m³) del PM2.5 de las Estaciones MED-SELE y MED-BEME. Campañas enero 12– enero 22 de 2015 y abril 3–diciembre 29 de 2019. Medellín, Colombia Fuente: Elaboración propia. Grupo GHYGAM, 2020

La Figura 3-73 muestra la comparación del contenido de Materia Carbonácea en las estaciones MED-SELE y MED-BEME. La concentración promedio de PM2.5 en la Estación de Belén fue de 20.1 μg/m³, mayor que la Estación de Santa Elena en 2014 (10.3 μg/m³) y (10.6 μg/m³) en 2019 de acuerdo a los reportes de AMVA proyecto SIATA, lo cual demuestra, como de acuerdo con las características de fondo rural, no se han registrado cambios considerables en la concentración al 2019. En cuanto al OC, la concentración encontrada en Belén es mayor, propio de zonas urbanas influenciadas por la emisiones secundarias (Genga et al., 2017b). En cuanto al valor de EC, se presentaba un valor mayor en la Estación Santa Elena en 2015, explicable por las emisiones de quema de madera y biomasa, prácticas propias de la cultura del tipo de zona, e igualmente, por el tráfico de vehículos que transportan productos agrícolas hacia la zona urbana. Es importante actualizar el perfil del PM2.5 en esta zona de fondo que se convierte en una entrada de aire al valle y saber si aún persiste esta diferencia.

Calculando las relaciones OC/EC en el PM2.5, para la Estación MED-SELE el valor fue de 0.7 cercano al rango de 1.0 a 4.2, indicador típico de emisiones vehiculares a diésel y gasolina (Schauer et al., 2002, 1999), mientras que para la Estación MED-BEME, como ya fue analizado, fue de 8.5, indicando emisiones secundarias y extraemisiones por eventos de contaminación por incendios locales y/o regionales. El análisis de las relaciones OC/EC

Página 191 de 264







evidencian una menor reactividad en la zona de Santa Elena con apenas un 8.7% de SOC en el PM2.5, en 2015, información que debe actualizarse.

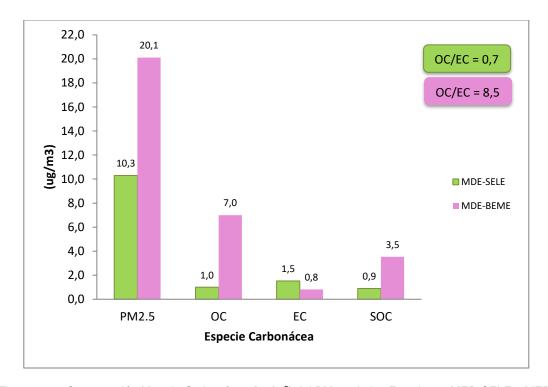


Figura 3-73. Comparación Materia Carbonácea (μg/m³) del PM2.5 de las Estaciones MED-SELE y MED-BEME. Campañas enero 12– enero 22 de 2015 y abril 3–diciembre 29 de 2019. Medellín, Colombia Fuente: Elaboración propia. Grupo GHYGAM, 2020

Finalmente, comparando las composiciones promedio del PM2.5 se puede observar en la Figura 3-74 que de los componentes que pudieron determinarse en la Estación Santa Elena en 2015, el grupo más abundante lo confirmaban los iones en un 26%, frente a un 13% en la Estación de Belén donde los sulfatos son dominantes y se originan por reacciones secundarias con fuentes precursoras de combustión. Los componentes elementales, en parte aportados por material resuspendido del suelo, se hallaban en mayor cantidad en Santa Elena, pero en Belén, no solo en esta fracción fue medida, sino también en el polvo resuspendido (11%), aportado por actividades de explotación, manejo y transporte de materiales y partículas del suelo. El menor contenido de OC en la partícula de Santa Elena, se explica por la menor influencia urbana asociada a combustión industrial y tráfico, se esperaría sea aún menor a la de una zona habitacional urbana.

f 🛩 🗑 🛗

@areametropol

www.metropol.gov.co



FONDO RURAL SANTA ELENA

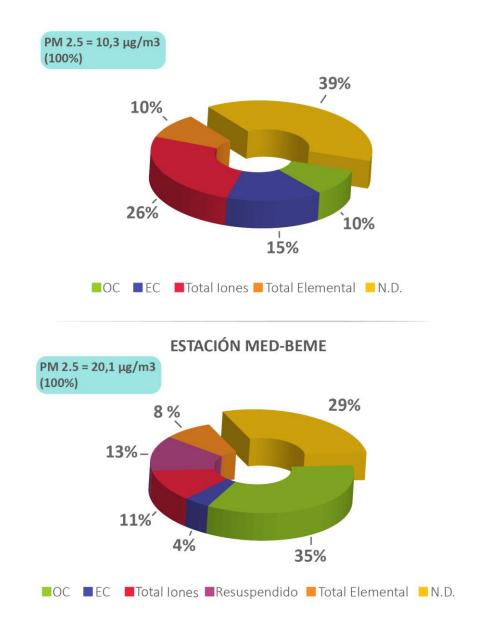


Figura 3-74. Comparación Composición PM2.5 (%) promedio. Estaciones MED-SELE y MED-BEME. Campañas abril 27-Mayo17 y abril 3-diciembre 29 de 2019. Medellín, Colombia Fuente: Elaboración propia. Grupo GHYGAM, 2020

Página 193 de 264







3.6.5 Comparación histórico caracterización 2010, 2014-2015, 2018-2019 y 2019 en la Estación MED-PJIC

De acuerdo con la evaluación de la calidad del aire en el Valle de Aburrá realizada por el AMVA a través del proyecto SIATA, las estaciones que de manera constante presentan los mayores niveles de PM2.5 son las clasificadas como tipo tráfico. Por lo anterior y teniendo en cuenta que la Estación Politécnico MED-PJIC pertenece a esta categoría y se dispone de información sobre la caracterización del PM2.5, a continuación se hace un análisis histórico de las campañas realizadas, entre los períodos julio-agosto de 2010, 2014-2015, 2018-2019 y abril-mayo de 2019, considerando variables como la implementación de las medidas del PIGECA, el mejoramiento en la calidad de los combustibles suministrados por ECOPETROL, aumento del parque automotor, entre otras.

Inicialmente se analizaron las especies aniónicas, luego el contenido de materia carbonácea y por último la comparación de la partícula promedio del PM2.5 y su evolución en el tiempo. La Figura 3-75 muestra la comparación de las especies aniónicas, donde el contenido de sulfatos en todas las campañas representan más del 80% de las especies aniónicas y están formados por reacciones secundarias derivadas de la formación primaria del SO₂, en relación directa con los procesos de combustión industrial, quemas de biomasa e incendios y el azufre contenido en los combustibles. En la campaña de 2010 se determinó una concentración de sulfatos de 6.2% en el PM2.5, aumentando a 13.6 %, en el período 2014-2015 muy relacionado con el aumento del parque automotor desde el 2015 (61.62%) (Asociación Colombiana de vehículos Automotores, 2016) disminuyendo y manteniéndose en el orden de 12% en los períodos noviembre 2018-febrero 2019 y abril-mayo 2019.

Esta disminución del contenido de sulfato entre el 2014-2015 y el período 2018-2019, muestra el impacto de las estrategias de mejoramiento de la calidad del aire implementadas en la región y entre ellas los programas de eficiencia en combustión industrial y la política de Ecopetrol referente a la producción de combustibles de mejor calidad reduciendo el azufre en el diésel de 50 ppm a 25 ppm en 2019. Es importante este impacto, el cual se mantuvo estable en el 2019, a pesar del aumento en parque automotor del Área Metropolitana.

Especies como fluoruro y cloruro (asociado principalmente al transporte de aerosoles marinos), aumentaron desde la campaña 2010 hacia la campaña 2014-2015 y posteriormente fueron disminuyendo o manteniéndose en el mismo rango en las siguientes campañas. Para el caso de los nitratos y sus sales asociadas también de origen secundario, se halló una ligera disminución del 2015 al 2019 en 0.3% con respecto al PM2.5 y equivalente a 0.3 (μ g/m³). Este cambio llama la atención por su relación con la formación de NO_X, gas primario de alta reactividad en la dinámica atmosférica.

Página **194** de **264**

f y 🗑 🛗

@areametropol

www.metropol.gov.co





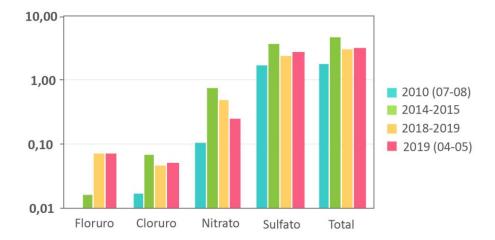


Figura 3-75. Comparación Especies Aniónicas (μg/m³) del PM2.5. Estación MED-PJIC. Campañas 2010, 2014-2015, 2018-2019 y 2019. Medellín, Colombia Fuente: Elaboración propia. Grupo GHYGAM, 2019

La Figura 3-76, muestra la comparación de la Materia Carbonácea, como son el carbono orgánico (OC) y carbono elemental (EC) en las campañas objeto de estudio. El análisis de los datos muestra claramente el incremento de la concentración promedio de OC con el transcurso del tiempo, asociado a la combustión de carbón, estudiada en el Área Metropolitana (Area Metropolitana del Valle de Aburrá & Politecnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid, 2008) contienen importantes cantidades de SO-4 (39.6% ± 13.8%), similar a algunas emisiones reportadas en las publicaciones científicas, SO-4 (28,7 ± 22,6%), OC(55.7 ± 11.9%), EC(2.4 ± 4.08%), (Judith C. Chow, Watson, Kuhns, et al., 2004), emisiones vehiculares, e incendios. Igualmente, el Selenio (Se) con frecuencia es un trazador de combustión de carbón,(W.C Malm et al., 1990; Thurston & Spengler, 1985).

Este aumento en el contenido de OC, permite inferir que también existe un aumento en la formación de OC secundario SOC, derivado de la acción de la radiación ultravioleta en reacciones entre SO₂, NO_x y O₃), conversiones de gas a partícula y/o condensaciones de compuestos orgánicos volátiles COV.

El Carbono Elemental EC en las diferentes campañas comparadas para la Estación MED-PJIC en el transcurso del tiempo, tiene un comportamiento oscilatorio y, difícil de predecir por ser un indicador de emisiones primarias de materia carbonácea, formado en sistemas complejos de combustión que derivan de la interacción dinámica de factores de diferente naturaleza, tales como: el tamaño del parque automotor, la calidad del combustible, las prácticas de conducción, las condiciones viales y topográficas, entre otros.

Podría esperarse que al aumentar el tamaño del parque automotor el EC incremente; pero esto no se puede concluir, porque a pesar del aumento en un 73% del parque automotor entre el 2015 y 2018 (Asociación Colombiana de vehículos automotores, 2018; Asociación Colombiana de vehículos Automotores, 2016), el EC presentó una disminución del 3.2%

Página 195 de 264







con respecto al PM2.5 y posteriormente del 2018 al 2019 aumentó nuevamente un 3.9%, lo que corrobora la dificultad en la predicción de la evolución de esta especie.

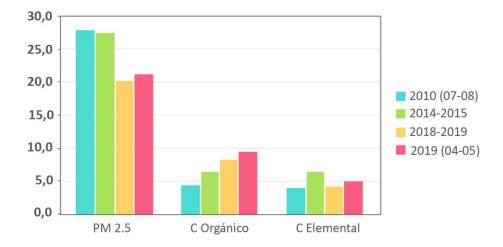


Figura 3-76. Comparación Materia Carbonácea (μg/m³) del PM2.5. Estación MED-PJIC. Campañas 2010, 2014-2015, 2018-2019 y 2019. Medellín, Colombia Fuente: Elaboración propia. Grupo GHYGAM, 2019

Finalmente, al comparar las composiciones promedio del PM2.5 para cada una de las campañas, en la Figura 3-77 se observa el aumento en la composición del OC en el transcurso del tiempo, siendo 15% del PM2.5 en 2010 y 43% en 2019, evidenciando el aumento de la reactividad atmosférica e influencia de contaminantes regionales transportados de otras latitudes. El EC muestra una disminución del 13% como indicador de la implementación de las medidas del PIGECA, relacionado con fuentes primarias.

En cuanto a los componentes elementales, los datos permiten inferir de manera permanente los minerales y el polvo resuspendido originado por el desprendimiento de materiales, producto de las corrientes de viento y la turbulencia generada por los vehículos, con valores variables en el tiempo. El actual estudio ARCAL 7023 permitirá ampliar este perfil de fuentes a partir de las técnicas analíticas AAN.







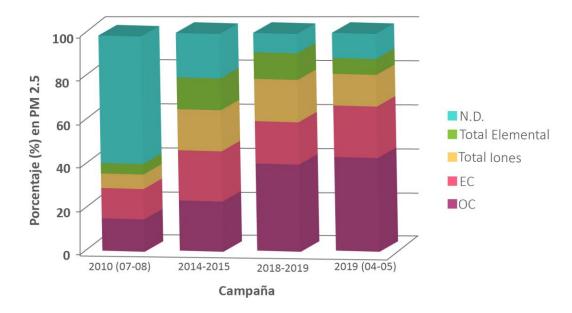


Figura 3-77. Comparación Composición PM2.5 (%) promedio. Estación MED-PJIC. Campañas 2010, 2014-2015, 2018-2019 y 2019. Medellín, Colombia Fuente: Elaboración propia. Grupo GHYGAM, 2020

www.metropol.gov.co







4. RESULTADOS DEL LEVANTAMIENTO DE INFORMACIÓN SATELITAL DISPONIBLE VINCULADA A LOS AEROSOLES Y COMPUESTOS GASEOSOS

4.1 RESULTADOS QUICK LOOK

La visualización de imágenes satelitales se presenta en la Tabla 4-1, la cual contiene la fecha de visualización de la imagen, que a su vez corresponde al día de monitoreo en superficie y tres tipos de visualizaciones a diferentes escalas, se presentan desde abril hasta diciembre del 2019. La imagen de la primera columna es la visualización para Colombia, la segunda columna es para la región con seguimiento de focos y plumas de vientos y la tercera columna es un acercamiento al Valle de Aburrá. Finalmente, se presentan observaciones para cada fecha, en las que se relaciona los resultados obtenidos con los monitoreos en tierra.







Tabla 4-1. Análisis visual de imágenes satelitales obtenidas a partir de MODIS. Colombia, abril de 2019 a diciembre de 2019







PROYECTO ARCAL RLA7023 - COLOMBIA

USO DE TÉCNICAS ANALÍTICAS NUCLEARES PARA EL ESTUDIO DE LA EMISIÓN Y LA PERSEPCIÓN DE MATERIAL PARTICULADO ATMOSFÉRICO POR PARTE DE LOS GRANDES CENTROS URBANOS DE AMÉRICA LATINA Y EL CARIBE

ANALISIS "QUICK LOOK" DE IMÁGENES SATELITALES DE DIFERENTES SENSORES NASA. MONITOREO PM 2.5

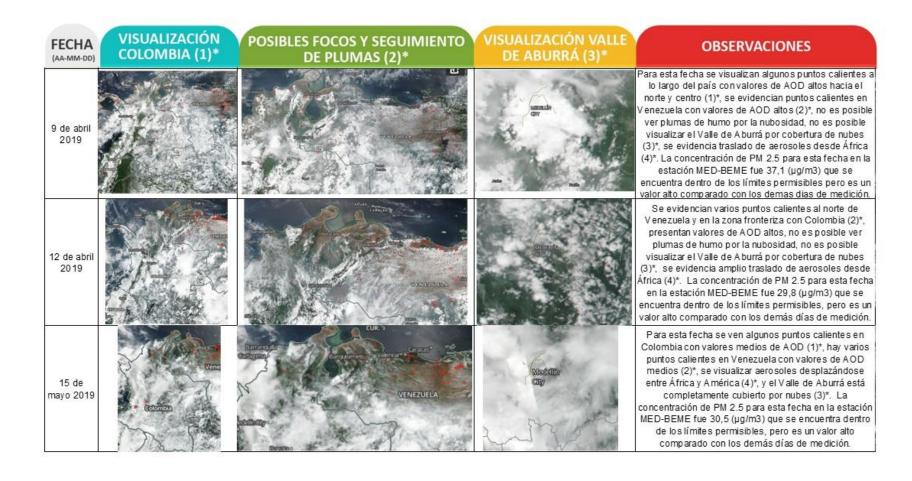


Página 199 de 264





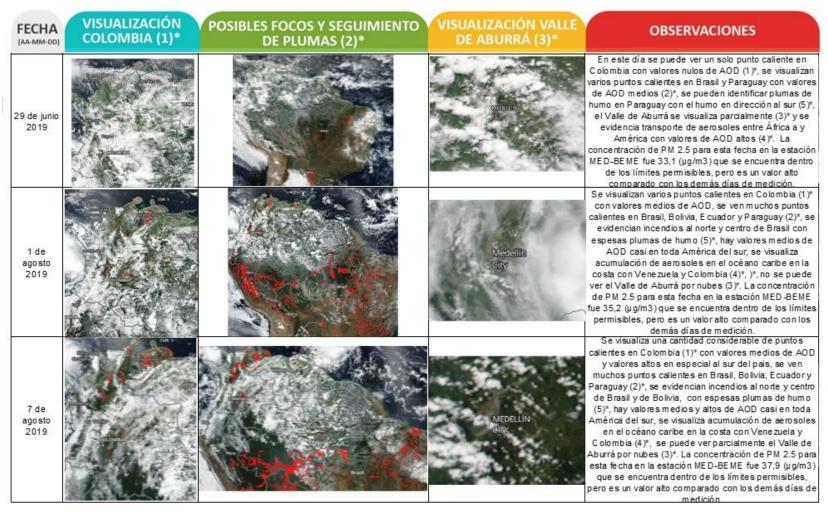






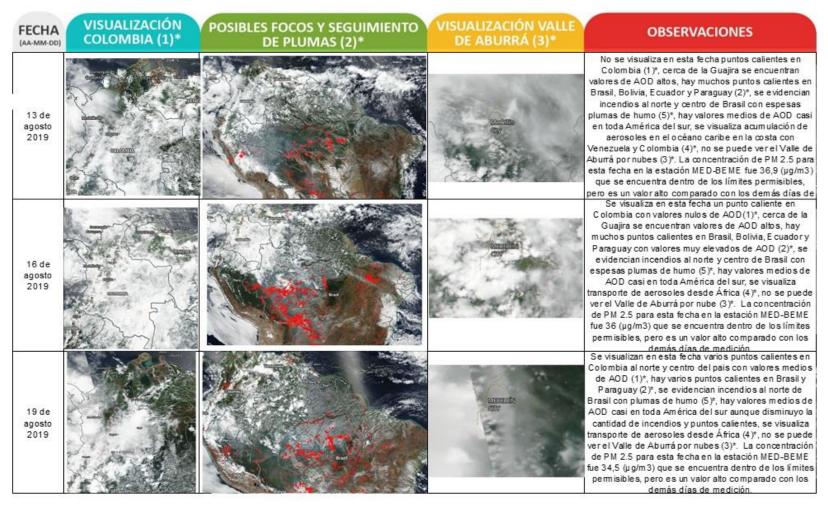






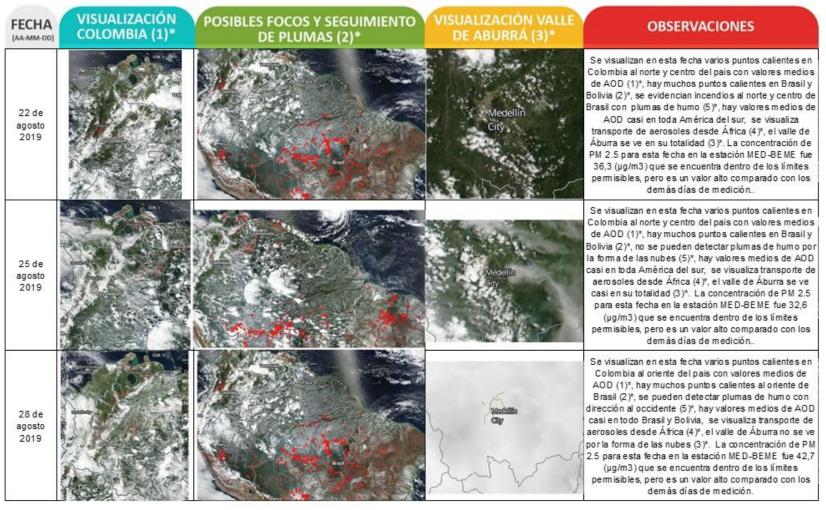








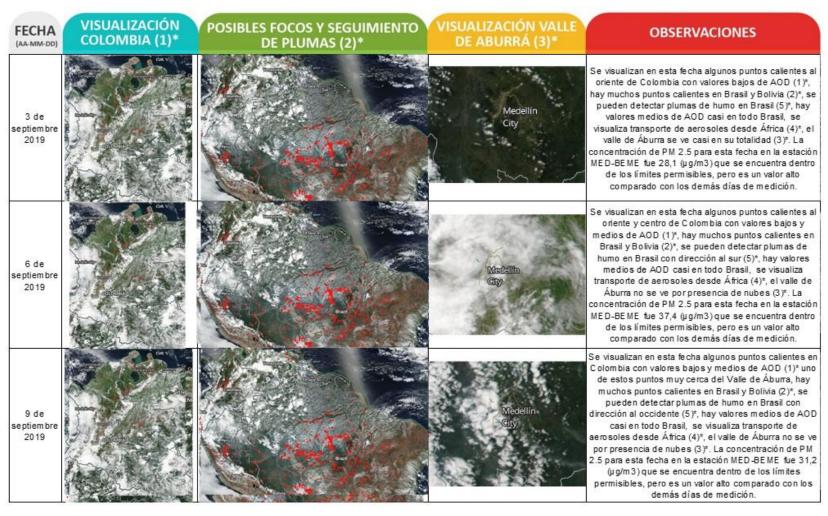




Página 203 de 264

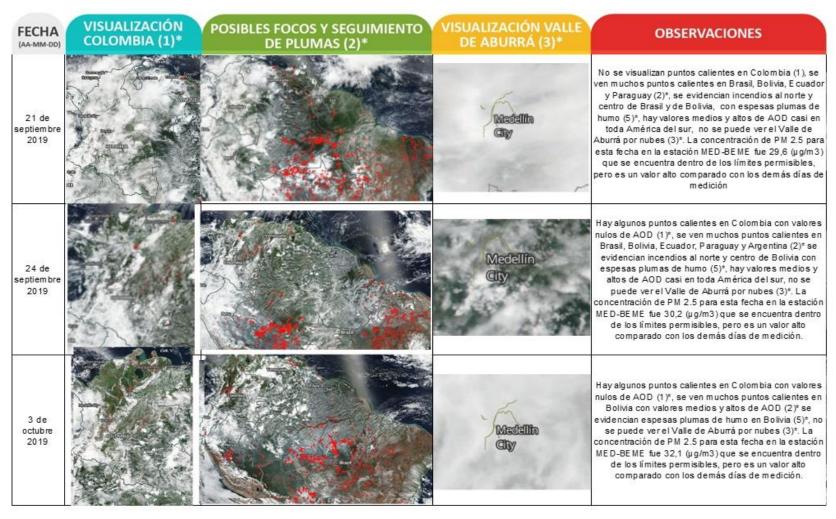








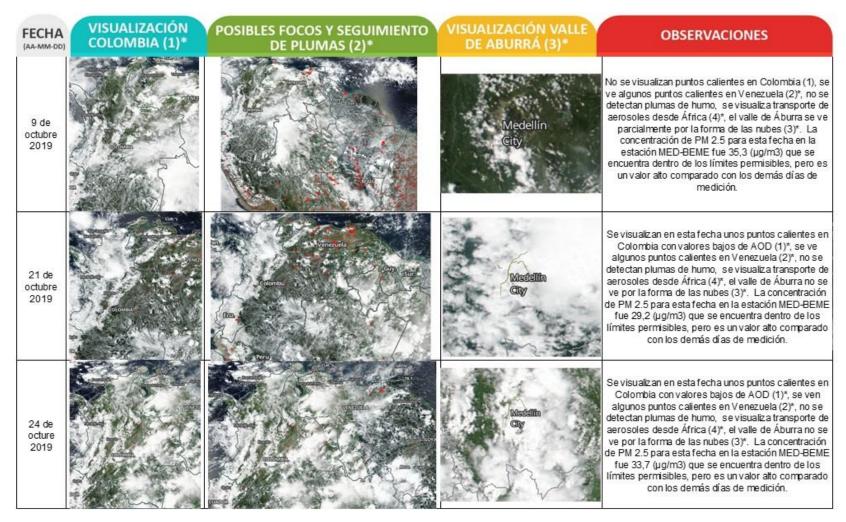










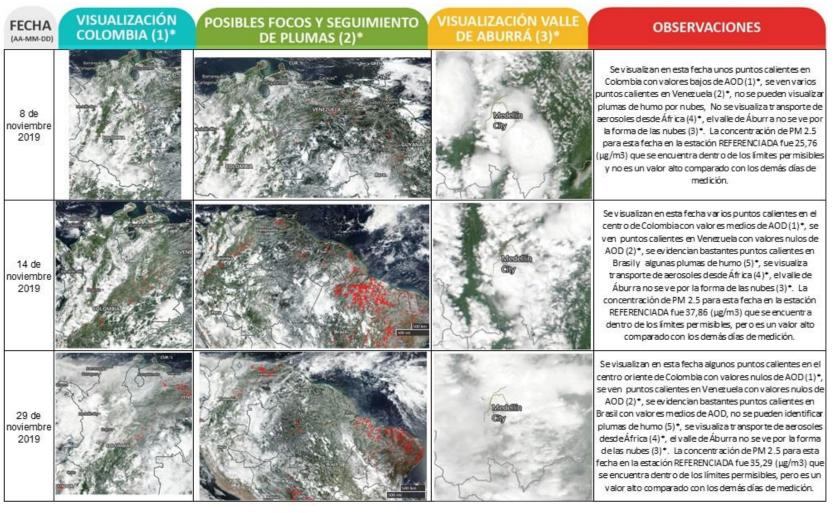


Página 206 de 264



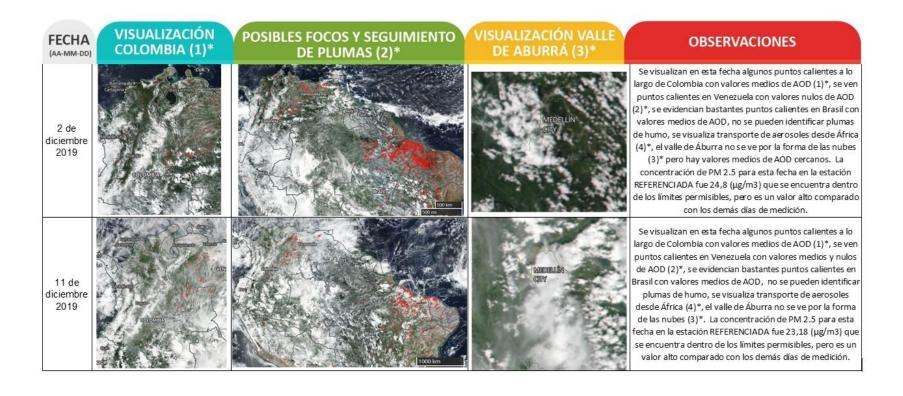
















Como criterio de análisis de los investigadores en el presente proyecto, para cada fecha de toma de muestras en la Estación MED-BEME, donde el valor de PM 2.5 obtenido superó 28 (µg/m³), se realizó una análisis visual de imágenes satelitales, aunque no se supere la norma diaria fijada en la Resolución 2254 de 2017 (Ministerio de Ambiente y Desarrollo sostenible, 2017), con el objetivo de identificar puntos calientes asociados a incendios y quemas, procedentes de países cercanos a Colombia o en zonas cercanas al Valle de Aburrá, que puedan afectar la calidad del aire.

En la Tabla 4-1 se evidencian los diferentes días en los que se identificaron eventos, como valores altos y medios de AOD. Este es el caso del mes de agosto, donde se pueden ver los puntos calientes en diferentes países de sur América como Bolivia y Brasil, se presentaron niveles medios de AOD en algunas zonas de Colombia y los valores de PM 2.5 medidos superaron los 28 (μ g/m³), esto se describe en la columna de observaciones. En el Anexo 4-1. se expone el cuadro en su totalidad y se muestra algunas imágenes adicionales de las plumas de humo que se pudieron identificar y de los aerosoles transportándose de África hacia América.

Estos resultados fueron considerados en la sección 3.3 de los resultados, donde se describen las imágenes presentadas para fechas como el 9 de abril y el 16 de agosto, dado que los valores de PM2.5 obtenidos por las mediciones en superficie, superan la norma de calidad diaria, se visualizaron quemas, en regiones de Colombia o países de Sur América, que permiten demostrar transporte de masas de aire de diferentes regiones hacia el Valle de Aburrá.

4.2 RESULTADOS IMÁGENES CLASIFICADAS POR AOD (MODIS)

Las imágenes obtenidas, se pueden descargar si se está inscrito en la página, la inscripción es gratuita:

https://urs.earthdata.nasa.gov/oauth/authorize?response_type=code&client_id=A6th7HB-3EBoO7iOCiCLIA&redirect_uri=https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/login&state=/

En la descarga se incluyen todas las bandas, por medio de las cuales se pueden realizar diferentes análisis tanto visuales como procesamiento digital de las mismas.

La clasificación por AOD no se realiza a toda la imagen en general, solo a zonas específicas de acuerdo con lo que el sensor detecte, esta clasificación se puede descargar para ser usada desde un software, aunque cuenta con una nota en la que se aclara que la imagen mostrada no es de calidad científica por lo que solo se puede usar como guía, el resultado se muestra en la Figura 4-1.

Página **209** de **264**









Figura 4-1. Imagen clasificada por AOD. Fuente: Elaboración propia. Grupo GHYGAM, 2020

En la Figura 4-2, se puede evidenciar el gran tamaño de una imagen MODIS, la ubicación de Belén en el Valle de Aburra, es una zona muy pequeña comparada con el total de la imagen, se puede usar como guía y observar que hay una zona con aerosoles en suspensión en la región fronteriza entre Venezuela y Colombia, puede ser neblina urbana, humo, polvo desértico, cenizas.







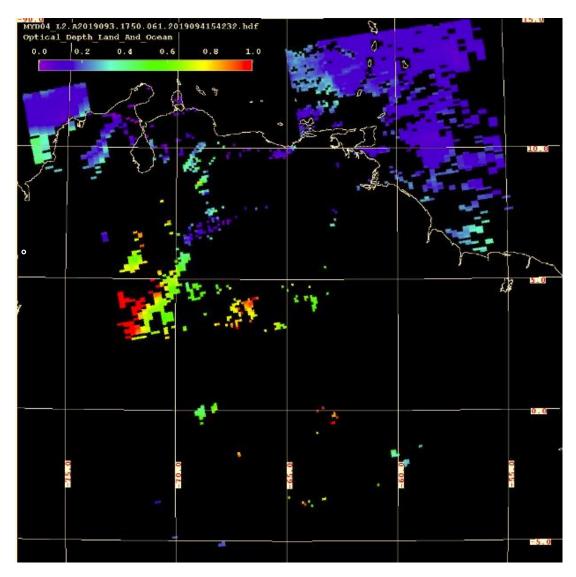


Figura 4-2. Visualización imagen (3/04/2019) Clasificación AOD. Fuente: Elaboración propia. Grupo GHYGAM, 2020

4.3 RESULTADOS CALIPSO

Los productos Vertical Feature Mask VFM, ofrecen información sobre localización y tipo de cada capa detectada, como se presenta en la Figura 4-3, donde se distingue aire limpio, nubes, aerosol, capa estratosférica y superfie, de acuerdo a los colores que se asignen, en la columna marcada con recuadro rojo se resalta el Valle de Aburrá (Nisperuza Toledo, 2015). Como desventaja se encuentra que no siempre se tiene información concreta de

Página 211 de 264









cada capa y a veces los datos presentan ruido, al igual que el tiempo para obtener un dato cada 16 días.

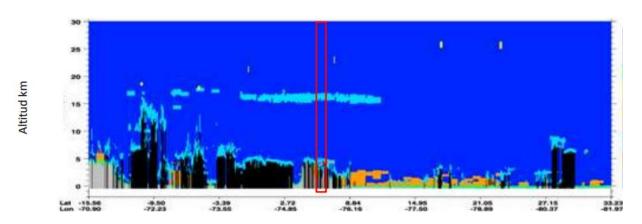


Figura 4-3. Mapas de Color de mediciones CALIOP para VFM nivel 2. Fuente: (Nisperuza Toledo, 2015)

4.4 RESULTADOS SENTINEL 5P

La lista de resultados de búsqueda proporciona todos los productos que coinciden con la consulta de búsqueda enviada. Cada resultado consta de:

- Miniatura de 64x64 cuando está disponible
- > nombre del producto
- URI del producto
- una fecha correspondiente a la fecha de inicio de detección
- el nombre del instrumento
- > el modo de imagen del instrumento
- el nombre del satélite
- el tamaño del producto

La búsqueda no arrojo resultados para ninguna fecha del mes de abril, por lo que se hizo nuevamente para mayo del 2019, encontrando el resultado que se presenta en la Figura 4-4.

Página 212 de 264









En el resultado muestra el nombre de la imagen, la hora y fecha en la que se tomó la información, el satélite, el tamaño, el tipo de producto, las coordenadas que cubre, el instrumento y la plataforma, en algunos casos se puede ver una imagen rápida del resultado.

Finalmente, la información se descarga en formato .NC para manipulación del usuario, en cualquier software GIS.

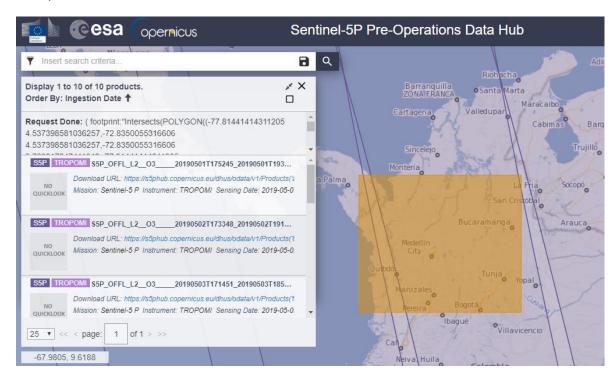


Figura 4-4. Búsqueda ozono mayo 2019 en zona de interés. Fuente: Elaboración propia. Grupo GHYGAM, 2020

4.5 RESULTADOS HYSPLIT

Como resultado se tiene un mapa interactivo como el que se presenta en la Figura 4-5, se ven las coordenadas de cada zona y el lugar origen de donde llegaron los aerosoles. También se obtiene un informe PDF con mapa y un perfil de las diferentes alturas en las que los aerosoles se desplazaron, coordenadas y modelo vertical, esto se presenta en la Figura 4-6.

Página **213** de **264**





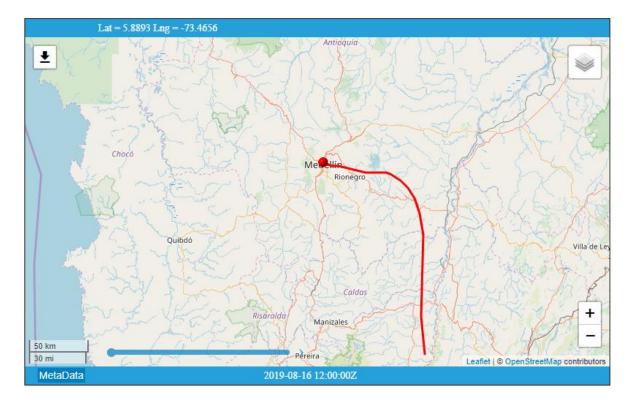


Figura 4-5. Resultado Mapa interactivo Fuente: Elaboración propia. Grupo GHYGAM, 2020

Las gráficas resultantes de retroyayectorias del modelo Hysplit, se usaron como apoyo y fueron consideradas en la sección 3.3 de los resultados, es posible visualizar de donde provienen las masas de aire detectadas en el Valle de Aburrá para fechas como el 9 de abril y el 16 de agosto, ya que los valores de PM2.5 obtenidos por las mediciones en superficie sobrepasaron los límites establecidos por la norma, se pudo confirmar el transporte de masas de aire de diferentes regiones, que ya habían sido detectadas por medio de las imágenes satelitales y que se dirigieron hacia el Valle de Aburrá.



NOAA HYSPLIT MODEL Backward trajectory ending at 1200 UTC 16 Aug 19 GFSQ Meteorological Data

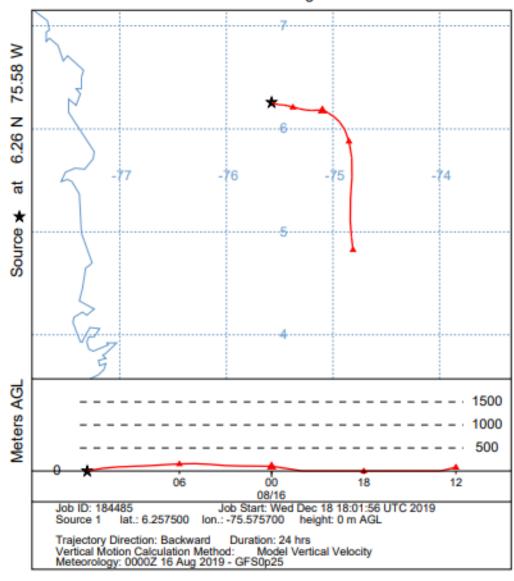


Figura 4-6. Resultado Informe HYSPLIT Fuente: Elaboración propia. Grupo GHYGAM, 2020

Página **215** de **264**







4.6 RESULTADOS INDICADOR DE ANOMALÍA DEL CICLO DIURNO PM2.5 Y PM10

De acuerdo con el análisis realizado por el proyecto AMVA SIATA, se presentan los resultados del indicador de anomalía del ciclo diurno para la red de equipos automáticos de PM2.5 y PM10 en el trimestre abril-mayo-junio, según Figura 4-7. En la Figura 4-7, se resaltan con color morado oscuro los días en que más del 30% de la red identificó concentraciones superiores al percentil 0.85 durante más de 8 horas. En el mes de mayo se presenta la mayor concentración de eventos anómalos en el trimestre de análisis, alcanzando el 9 de abril hasta el 95.7% de concentraciones de PM2.5 anómalas de acuerdo al indicado. Las mayores anomalías del ciclo diurno de PM2.5 se concentran entre el 7 y el 10 de abril, evidenciando eventos aislados el 13 de abril y el 3 de mayo.

Por su parte el PM10, resalta también el 10 y el 30 de mayo como días de análisis; aunque el indicador no supera el 50%. Para el mes de junio no se identificaron eventos de contaminación relevantes para el histórico de las concentraciones de PM2.5 y PM10 en el Valle de Aburrá.

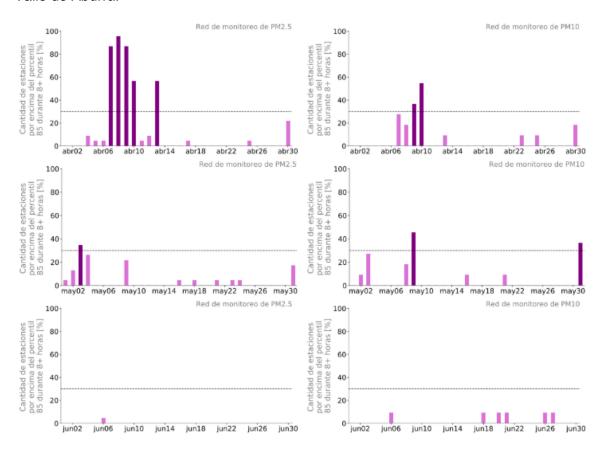


Figura 4-7. Resultados del trimestre marzo-mayo-junio para la identificación de picos en las concentraciones de PM2.5 y PM10, mediante el indicador de anomalía del ciclo diurno, Fuente: (AMVA – SIATA)

Fuente: Elaboración propia. Grupo GHYGAM, 2020

Página 216 de 264









4.7 RESULTADO INDICADOR POR RETRODISPERSIÓN (AMVA – SIATA)

En las Figura 4-8, Figura 4-9 y Figura 4-10, se observan los resultados del indicador de retrodispersión para el trimestre abril-mayo-junio. Además, se marcan con un cuadrado los días de muestreo del proyecto.

Para los meses de análisis, y en particular en los días de muestreo, se resalta el 9 de abril, 21 de abril, 9 de mayo, 21 de mayo y 30 de abril como fechas en las que el perfil backscatter presenta mayor estimación de partículas en relación a los días vecinos.

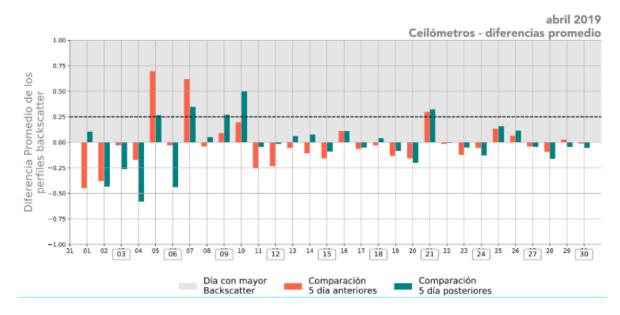


Figura 4-8. Indicador por retrodispersión para el mes de abril del 2019. Fuente: (AMVA – SIATA)



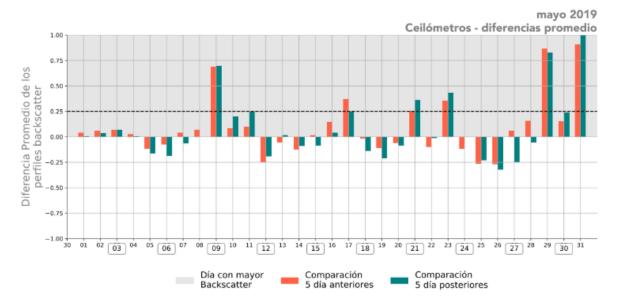


Figura 4-9. Indicador por retrodispersión para el mes de mayo del 2019. Fuente: (AMVA – SIATA)

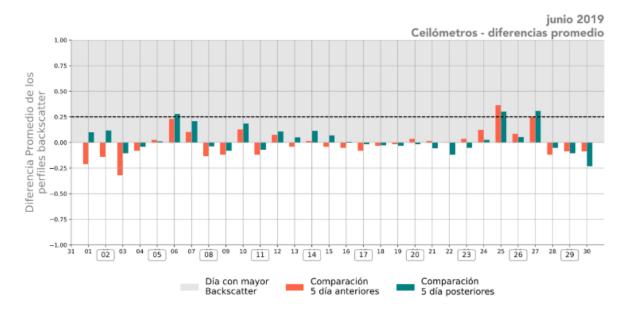


Figura 4-10. Indicador por retrodispersión para el mes de junio del 2019. Fuente: (AMVA – SIATA)

Página 218 de 264







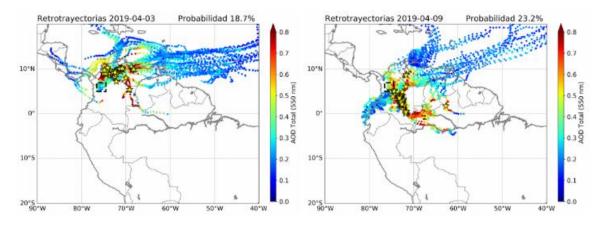
4.8 RESULTADO INDICADOR POR TRAYECTORIAS (AMVA – SIATA)

En la Nota: Las estrellas indican 'hot spot', lugares donde se excedió el umbral de AOD establecido

Figura 4-11, Nota: las estrellas indican 'hot spot', lugares donde se excedió el umbral de AOD establecido

Figura 4-12 y Nota: las estrellas indican 'hot spot', lugares donde se excedió el umbral de AOD establecido

Figura 4-13 se presentan las trayectorias calculadas para los días de muestreo en el trimestre abril-mayo-junio, cuya probabilidad de evento externo con posibilidades de afectar el valle sean mayores al 0.0 %.



Nota: Las estrellas indican 'hot spot', lugares donde se excedió el umbral de AOD establecido

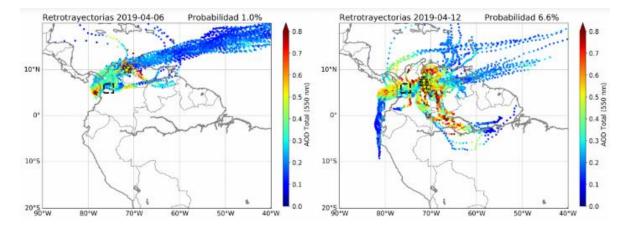
Figura 4-11. Trayectorias de los flujos de viento que interceptan el Valle de Aburrá en el día especifico de análisis

Fuente: (AMVA – SIATA)



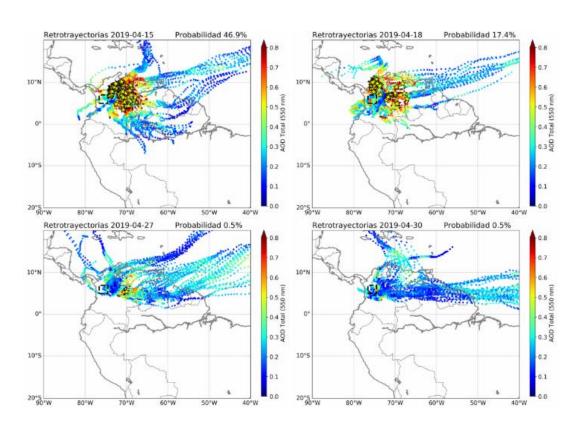






Nota: las estrellas indican 'hot spot', lugares donde se excedió el umbral de AOD establecido

Figura 4-12. Distribución de la red automática de monitoreo de PM10 en el Valle de Aburrá Fuente: (AMVA – SIATA)



Nota: las estrellas indican 'hot spot', lugares donde se excedió el umbral de AOD establecido

Figura 4-13. Distribución de la red automática de monitoreo de PM10 en el Valle de Aburrá Fuente: (AMVA – SIATA)

Página **220** de **264**







Durante el mes de abril, en mesoescala se destaca un patrón de vientos que confluye al Valle de Aburrá, desde el nor-oriente y en menor medida desde el sur. En el análisis el umbral de AOD es excedido principalmente en la región Caribe, en la frontera de la región andina del país con Venezuela y al sur del valle sobre los departamentos de Caquetá, Meta, Huila y Tolima.

fy 🗑 🛗

@areametropol

www.metropol.gov.co







5. RESULTADO DE TÉCNICAS DE MODELOS RECEPTORES

Para aplicar las técnicas de Modelos Receptores, en primera instancia se exploró la aplicación del Modelo CMB 8.2 EPA, alimentado con los datos de especiación entre abril y diciembre de 2019, de la Estación MED-BEME, como modelo de una zona habitacional en Colombia.

De igual manera se aplicó las condiciones para la corrida del Modelo para la obtención de aportes preliminares de las fuentes PM2.5 en el dominio de la estación Belén las Mercedes MED-BEME. A continuación, se presentan los resultados obtenidos

5.1 RESULTADOS MODELO CMB 8.2 CARACTERIZACIÓN PM2.5 04/03/2019-28/12/2019

Basada en la estructura teórica de los Modelos receptores presentada en sección 2.5.1, en el presente estudio, fue definida en este estudio la aplicación del Modelo CMB 8.0 como estrategia de investigación para validar el conjunto de factores finales del modelo PMF y comparar los aportes arrojados por ambos modelos, dando una mayor confiablidad a la identificación de los perfiles de fuentes locales y sus aportes a la calidad del aire.

Dado que en esta Fase II del Proyecto ARCAL 7023, se ha llegado a la estimación preliminar de los aportes al PM2.5 para la zona en estudio, esta validación se realizará en la Fase III siguiente. Sin embargo se decidió hacer una prueba se alimentaron perfiles basados en estudios previos en la región (Area Metropolitana del Valle de Aburrá & Politecnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid, 2010) y la base de perfiles EPA (Bray et al., 2019) y explorar perfiles de fuentes y aproximaciones al balance másico como condición irrestricta de la modelación.

Por lo tanto, de acuerdo con la metodología presentada en la sección 2.5, se prepararon las plantillas requeridas para la caracterización PM2.5 de la zona y de los perfiles de fuentes, ambas incluyendo las incertidumbres asociadas a la determinación analítica de las especies. De acuerdo con la algoritmia matemática del Modelo CMB 8.0, el perfil de las fuentes base para la realización de la reconstrucción de la masa del PM2.5, es un dato de entrada que debe definirse desde el estudio. Para ello se alimentaron perfiles basados en estudios previos en la región (Area Metropolitana del Valle de Aburrá & Politecnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid, 2010) y la base de perfiles EPA (Bray et al., 2019).

Para realizar las corridas del modelo, se aplicaron los criterios de configuración estadística e iteraciones que trae por defecto el software, con 5 decimales, 20 iteraciones, el grado de incertidumbre máxima es de 20%, las unidades de volumen de las concentraciones se tomaron en µg/m³.

Página 222 de 264







A continuación, se presenta una de las soluciones arrojadas por el CMB 8.0 y se realiza su análisis como respuesta no valida en la modelación, aunque se aprovecha para observar las fuentes que el modelo selecciona para ser comparadas con las salidas del PMF

De acuerdo con el conjunto de soluciones arrojadas por el Modelo, los resultados obtenidos aunque cumplieron los criterios estadísticos requeridos, R SQUARE, CHI SQUARE, % MASS, DEGREES FREEDOM, no se logró un conjunto de soluciones que conllevaran a la explicación de las masas del PM2.5 detallado para la estimación de los aportes de las fuentes de emisión del PM2.5 en la zona de estudio.Como puede observarse en la variable SCE (µg/m³), hay valores negativos de aportes para las fuentes, condición base de las iteraciones, inexistencia de aportes e implicando, la continuidad de ensayos y revisión de nuevos perfiles de fuentes.

Como ejercicio previo a la validación, se prueba la alta importancia de disponer de perfiles de fuentes locales actualizados y ampliados a otras actividades emisoras de PM2.5 y se tiene como ganancia la identificación de los perfiles de Calderas de carbón, diésel, gasolina, quemas vegetales (biomasa, resuspendido), que necesariamente van a ser cuantificados sus aportes finales en el cierre del estudio y a partir de ellos, se confirmarán con los resultados en CMB 8.0 y posiblemente otros modelos receptores.

Finalmente, lo más importante de este ejercicio previo a la modelación del PMF, es la evidencia de necesidad de avance y actualización de los perfiles de fuentes locales de la región y de modelaciones validadas y confiables para estimar sus aportes.







		Report D	ate: 4/25/2020		
SAMPLE: SITE: SAMPLE DATE: DURATION: START HOUR: SIZE:	MED-BEME 28/08/19 24 00 FINE	BRIT	IONS: T & LUECKE: RCE ELIMINATION: FIT:	No No No	INPUT FILES: INMED-BEMECSV. PRMED-BEME.Sel SPMED-BEME.Sel ADMED-BEME.Sel ADMED-BEME.CSV PRMED-BEME.CSV
Species Array: 6 Sources Array: 6					
FITTING STATISTICS	S:				
R SQUARE CHI SQUARE	0.88 0.95		% MASS DEGREES FREED	112.1 OOM 6	
SOURCE CONTRIBU	TION ESTIMAT	ES:			
EST C	ODE	NAME	SCE(μg/m³)	Std Err	Tstat
NO S	PE2.5	Coalco	25.48262	11.07937	2.30001
NO 3	201SP	PavedR	-2.38833	7.13855	-0.33457
VO 4	276SP	Vegeta	0.83283	10.48767	0.07941
res 4	856SP	Diesel	-0.00013	0.00060	-0.21208
NO 3	229SP	Gasoli	4.32599	7.00231	0.61779
VEC A	//GOME1	ResBra	-0.00352	0.00356	-0.98933
YES N					
MEASURED CONC			28.24947		

Figura 5-1. Ensayo identificación aportes modelo CMB Fuente: Elaboración propia – Grupo GHYGAM 2020

5.2 RESULTADOS MODELO PFM 5.0 CAMPAÑA DE CARACTERIZACIÓN PM2.5 ABRIL 2019-DICIEMBRE 2019

Para correr el modelo PMF de excluyeron los datos de concentración que se encuentran por debajo de los límites de detección. Para los datos del estudio se corrió el modelo con un valor predeterminado "Inicio aleatorio" para replicar las corridas durante la etapa de análisis e interpretación de los datos, tal como se anotó en la sección 2.5.3, se utilizó un valor de 55 indicando 20 iteraciones. El tiempo de ejecución no superó los dos minutos

Página 224 de 264







empleando el software PMF 5.0 de la EPA, en un computador con Windows 10, 4GB de RAM y un procesador QuadCore de 64-bit a 3.1 MHZ.

En el modelo PMF se ha corrido con un set de datos especiados de PM2.5 medido en la Estación de calidad del aire MED-BEME clasificada tipo habitacional, ubicada en la ciudad de Medellín, Colombia. La información colectada, corresponde al estudio realizado entre el 3 de abril y el 29 de diciembre de 2019. Se alimentó un conjunto de 51 muestras con 30 especies caracterizadas incluyendo las ocho (8) fracciones de materia carbonácea, para la modelación preliminar, de acuerdo con la validación a partir de las diferentes metodologías analíticas. Las especies reportadas con sus respectivos datos de concentración y límites de detección son: Be, Na, Mg, Al, K, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Se, Mo, Ag, Cd, Sb, Ba, Hg, Pb, F-, Cl-, NO₃-, SO₄-, OC [OC1, OC2, OC3, OC4], C Pyrol, EC [EC1, EC2, EC3, EC4].

Para correr el modelo se han completado los pasos presentados en el ítem 2.5.2.3 Los archivos de entrada, correspondientes a las concentraciones de los elementos y compuestos presentes en el PM2.5 e incertidumbres asociadas como se observan en la Tabla 5-2.





Tabla 5-2. Caracterización promedio PM2.5. Estación MED-BEME-Colombia Abril -diciembre de 2019

SITIO MUESTREO	ESTACIÓN BELEN LAS MERCEDES MED-BEME		
Componente	Concentración Promedio μg/m³		
Be	0.00001		
Na	0.17638		
Mg	0.07564		
Al	0.42518		
K	0.19054		
Ca	0.28820		
Ti	0.01975		
V	0.00133		
Cr	0.00137		
Mn	0.00405		
Fe	0.25160		
Со	0.00028		
Ni	0.00485		
Cu	0.00645		
Zn	0.05435		
As	0.00108		
Se	0.00094		
Mo	0.00030		
Ag	0.00002		
Cd	0.00029		
Sb	0.00145		
Ba	0.01155		
Hg	0.00011		
Pb	0.00547		
Fluoruro	0.01176		
Cloruro	0.08914		
Nitrato	0.52873		
Sulfato	1.92237		
OC1	1.24804		
OC2	1.41348		
OC3	0.54217		
OC4	0.98870		
C Pyrol	2.21325		
EC1	0.06022		
EC2	0.21109		
EC3	0.43326		
EC4	0.10174		
OC	6.40564		
EC .	0.80631		
Relación OC/EC	7.94439		
Total PM2,5 observado	19.45400		
Total PM2,5 reconstruido	19.26870		

Fuente: Elaboración propia – Grupo GHYGAM 2020

Página 226 de 264





La selección iterativa de la cantidad de factores base de la solución, se realizó de acuerdo con la caracterización química del PM2.5, relación OC/EC y la revisión de resultados científicos de matrices de correlación de componentes (Coeficiente de poisson), perfiles de fuentes, incluyendo las fracciones de materia carbonácea (Judith C. Chow et al., 2015) y estudios de caracterización en la zona Valle de Aburrá. Se definió un número de factores entre 5 y 8 para correr el modelo de acuerdo con los siguientes indicadores de perfiles, en correspondencia con la caracterización del PM2.5:

Para el punto de partida se eligió una semilla específica de perfiles de fuentes, según información científica recopilada y referenciada, (Tabla 3-14) y resultados del Taller de expertos realizado en la región metropolitana del Valle de Aburrá (Politecnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid, Ecopetrol, Area Metropolitana del Valle de Aburrá, & Universidad Pontificia Bolivariana, 2020) en cuanto a sus fuentes de tráfico, calidad de combustibles, industrias, quemas de biomasa y naturaleza del suelo entre otras fuentes, como se presenta a continuación:

- ➤ Emisiones vehiculares directas: OC, EC, SO4⁻² (Song et al., 2001); R² Poisson> 0.5: NO3^{-/} SO4⁻² (Chebbi & Carlier, 1996; Y. Wang et al., 2007; Zhou et al., 2007).
- Emisiones diésel: EC2 principalmente (Cao et al.,2006; Liu etal.,2006), Zinc (Zn) y Níquel (Ni) (Gómez D., Dawidowski L., Giné M.F., Sánchez Bellato A., 2004)
- ➤ Emisiones de vehículos a gasolina OC2 y OC3 (Cao et al., 2006; Liu et al., 2006); Vanadio(V).
- ➤ Vehicule non exhaust: Hierro (Fe), Zinc (Zn), Cobre (Cu), , Manganeso (Mn) y el Cromo (Cr) provienen de lubricantes; Zinc (Zn), Cobre(Cu), Plomo (Pb), Cadmio, Antimonio (Sb) y Molibdeno (Mo) están asociado al desgaste de neumáticos , pastas de frenos y llantas (Gómez D., Giné A., Sánchez P., 2005).
- Combustión carbón y procesos industriales: Se, SO4-2,(39.6% ± 13,8%) (AMVA, 2008) (28,7 ± 22,6%) (Judith C. Chow, Watson, Kuhns, et al., 2004), OC2 y EC1 (Chow et al., 2004, pp 22)
- Combustión de biomasa, biocombustibles e incendios: SO4^{-2,} OC1 dominante en el rango 23.9 ± 12.4%, y en menor proporción OC2 (11.9 ± 4.2%), OC3 (13.8± 6.6%), OC4 (8.8± 3.8%) y OP 6.(1± 9.3%) (John G Watson, 2004), siendo un indicador importante en los estudios de perfiles de fuentes. Correlación aceptable a buena R² Poisson> 0.5: K⁺ / NO₃⁻¹, Ca⁺²/ Mg⁺², K⁺, Na⁺.
- ➤ Fuentes secundarias o extraemisiones por transformaciones físicas como condensación de gases, coagulación o precipitación húmeda de material particulado, eventos de contaminación locales y/ o regionales: Sodio(Na⁺), Calcio (Ca), NO_x, SO₄-2, SOC, OC/EC = 8.5, Rango alto (Novakov, 1984; Zhu et al., 2010b)

Página 227 de 264







- Minerales del suelo, explotación de materiales: Aluminio (Al), Calcio (Ca), Hierro (Fe), Titanio (Ti), Potasio (K). relación (Na/K), en promedio para las 91 muestras fue de 1,4 (Na/K ≈ 3/2), Correlación aceptable a buena R² Poisson> 0.5: Al/Mg, Ca⁺²/Mg⁺² (Chebbi & Carlier, 1996; Y. Wang et al., 2007; Zhou et al., 2007) Para resuspendido son indicadores importantes fracciones OC2 OC3 y OC4.
- Polvo resuspendido: Aluminio (Al), Calcio (Ca), Hierro (Fe), Titanio (Ti), Potasio (K), Correlación aceptable a buena R² Poisson> 0.5: Al/Mg, Ca+²/ Mg+²((Chebbi & Carlier, 1996; Y. Wang et al., 2007; Zhou et al., 2007), OC2 OC3 y OC4 (Judith C. Chow, Watson, Kuhns, et al., 2004)

En concordancia con esta semilla y con la asesoría de la coordinación regional del Proyecto ARCAL7023, se modeló con 5, 6, 7 y 8 factores. Los resultados del Modelo PMF fueron analizados de manera independiente para cada número de factores, según los componentes y trazadores que permitieran una categorización preliminar de un factor en una fuente específica.

La corrida para seis (6) factores, por ejemplo, fue rechazada, dado que la semilla de modelación arrojada infería solo tres (3) fuentes con sulfatos y según la semilla de fuentes", se requieren cuatro (4) para la reconstrucción de la masa de sulfatos.

Se continúo analizando las salidas con 5, 7, y 8 factores, siempre corroborando la correspondencia entre los indicadores dominantes según la semilla y el perfil del factor. Se repitió el proceso anterior las veces necesarias, hasta obtener la primera solución base cero (0) de siete (7) factores asignados a fuentes conocidas, de acuerdo con criterios científicos y experticia propias de la región, siempre validando una reproducción de la masa del PM2.5 entre 80 % y 120 %.

Para esta fase preliminar de modelación con 51 datos validados, la mejor reconstrucción de la masa RM para siete (7) factores, se obtuvieron siete (7) perfiles de fuentes preliminares, siendo la base una solución que deberá someterse a la validación final en la Fase III de este Proyecto. La RM media de PM2.5 reconstruida fue de 19.3 μ g/m³ que, comparada con la observada (19.5 μ g/m³) representa el 98.02%, en el rango de aceptación $\pm 20\%$, es decir $\geq 80\%$, $\leq 120\%$.

En la Figura 5-2, se muestra el comportamiento de la concentración observada y la concentración reconstruida a partir del balance másico de la masa PM2.5 del 98%, cerrando altamente el balance másico. Los datos estimados por el Modelo PMF muestran una alta correlación con coeficiente R^2 = 0.88793, para todo el monitoreo Abril –diciembre de 2019, representado en la Ecuación 5-1 donde y = masa reconstruida y x = masa gravimétrica.

y = 1.09981x - 2.06192

Ecuación 5-1

Página 228 de 264







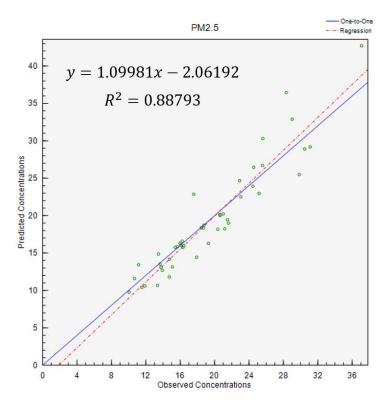


Figura 5-2. Concentración PM2.5 observada vs estimada reportado/estimado Fuente: Elaboración propia – Grupo GHYGAM 2019

Para esta fase preliminar de la modelación, en la Figura 5-3 se observan los perfiles de las fuentes del PM2.5 en la zona Belén como modelo de zonas habitacionales en el Valle de Aburrá -Colombia, Diesel, gasolina, secundarias, emisiones industriales, resuspendidos, combustión de carbón y un fuente mezcla de fuentes enriquecidas en Ca, Al, Na, Mg, Fe,, Mn, fluoruros, NO3-1, cloruros, Pb, trazas de OC, EC. En esta fase preliminar hubo una colinealidad entre las posibles fuentes para la diferenciación de otros perfiles (de allí su nombre irresoluble), lo cual demanda de otras validaciones del algoritmo y será objetivo del ajuste de la modelación según metodología (OIEA-RLA7023, 2020).

Las 30 especies caracterizadas incluyendo las ocho (8) fracciones de materia carbonácea, fueron claves para la identificación independiente de los perfiles preliminares de vehículos diésel, gasolina y fuentes secundarias. Igualmente es una experiencia exitosa en la identificación de los trazadores de quemas de biomasa OC1, K, y su presencia en el PM2.5 transportado por corrientes regionales, de alto impacto en la calidad del aire en varias ciudades del país, incluyendo el Valle de Aburrá (Lunes de ciudad, Piñeros Jimenez, Hoyos Ortiz, & VieiraCatherin, 2020)

Página **229** de **264**

f 🛩 😇 🛗

@areametropol

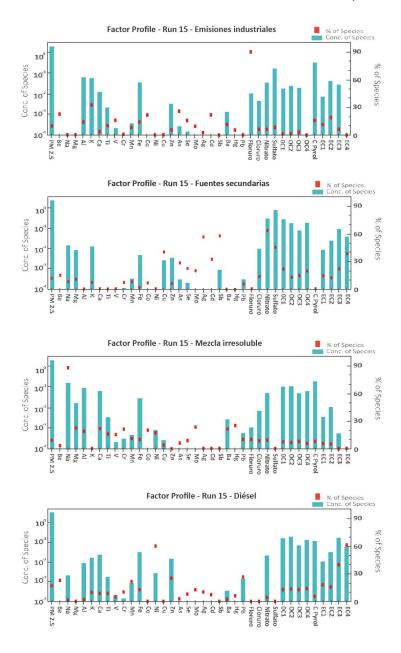
www.metropol.gov.co





Se logró identificar el aporte de polvo resuspendido como una mezcla de emisiones non exhaust, (no escape) originadas por el desgaste de pastas de frenos, neumáticos y llantas, partículas generadas por el manejo y transporte de materiales, componentes del suelo y transportados por el viento.

En esta fase preliminar se asignó la fuente Mezcla irresoluble, enriquecida en Ca, Al, Na, Mg, Fe, Mn, fluoruros, NO₃-1, cloruros, Pb, trazas de OC, EC con un aporte del 9.5 %.





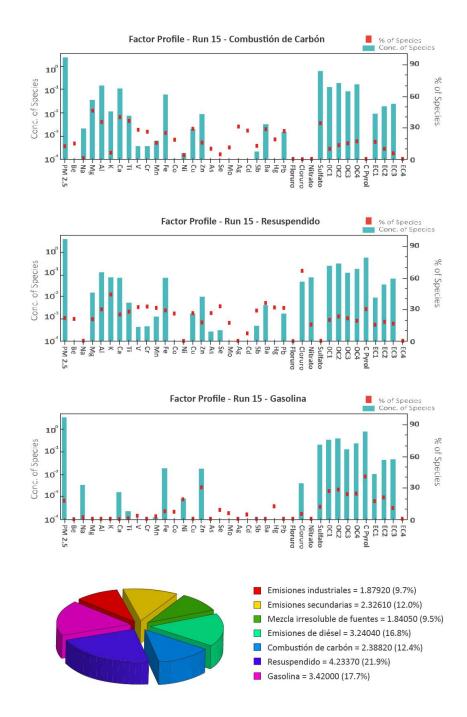


Figura 5-3. Perfiles químicos de fuentes PM2.5. Estación MED-BEME. Medellín-Colombia Fuente: Elaboración propia – Grupo GHYGAM 2020

Página 231 de 264







En la Figura 5-2 18, se observan las contribuciones o aportes de las fuentes al PM 2.5 arrojados por el Modelo PMF para la zona Belén, a partir de seis (6) perfiles de factores asignados a fuentes identificadas en la región, de los siete (7) modelados. Las fuentes aportantes identificadas fueron las siguientes en orden descendente: vehículos a gasolina, vehículos diésel, resuspendido, fuentes secundarias, Combustión de carbón y Emisiones industriales y Mezcla irresoluble.

Las fuentes vehiculares fueron discriminadas en el balance másico, siendo el aporte de los vehículos a gasolina del del 17.7 % y a Diesel del 16.8%, para un total del 34.5% para emisiones vehiculares. Esta evaluación preliminar y aproximada, se corresponde con las características de la zona de mediana influencia en tráfico y aunque es de mayor circulación los vehículos livianos, debe tenerse en cuenta la mayor emisión en PM2.5 de los vehículos pesados que transitan por la zona en su mayoría volquetas con transporte de materiales. Es notoria la diferencia con las zonas de tráfico cuyos aportes superan el 50%, (Area Metropolitana del Valle de Aburrá & Politecnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid, 2019a; Gómez Marín et al., 2015) según se ha detallado en la zona de la Estación MED-PJIC, en área de influencia zona Poblado. Así mismo, es coherente esta estimación con la especiación química del PM2.5 en la zona Belén, de menor contenido en materia carbonácea, EC y OC según se analizó en la sección 3.5.3.

En orden de magnitud es importante el aporte de polvo resuspendido (21.9%), estimado según su perfil, como emisiones mezcladas non exhaust(no escape) enriquecidas en Hierro (Fe), Zinc (Zn), Cobre (Cu), , Manganeso (Mn) y el Cromo (Cr) provienen de lubricantes; Zinc (Zn), Cobre(Cu), Plomo (Pb), Cadmio, Antimonio (Sb) y Molibdeno (Mo) están asociado al desgaste de neumáticos , pastas de frenos y llantas (Gómez D., Giné A., Sánchez P., 2005), partículas del suelo y resuspendido derivado del manejo y transporte de materiales de influencia en la zona, con contenidos de EC, OC, Al), Calcio (Ca), Hierro (Fe), Titanio (Ti), Potasio (K), alta correlación (Na/K), A estas emisiones se suma, partículas transportadas originadas por incendios y quema de biomasa con aportes importantes en OC1 y Potasio.

Las emisiones de calderas de carbón aportan un 12 % al PM2.5 en la zona, proveniente de la industria ladrillera en la cercanía a la estación MED-BEME y por el transporte propio de la circulación de los vientos desde el norte del valle y dominante hacia el oriente, con cambios ligeros desde el occidente en la noche (Song et al., 2001).

Para una zona habitacional sin alta influencia industrial ni de tráfico, es notable la cuantificación de un aporte (12%) de fuentes secundarias, formadas por la fotoquímica atmosférica, con contenidos de sulfatos apreciables y mayores concentraciones de OC1, OC2, OC3, OC4, OC4, EC1, EC2, EC3 EC4, SO⁴⁻², NO₃-1, K. Este aporte se corresponde con la especiación química del PM2.5 con mayor contenido en el PM2.5 de OC (35%) y como fracción del OC secundario, SOC (50%).

Es importante resaltar que según revisiones científicas de estudios a nivel mundial en zonas industrializadas, estas fuentes secundarias también incluyen extraemisiones por transformaciones físicas como condensación de gases, coagulación o precipitación

Página 232 de 264







húmeda de material particulado, eventos de contaminación locales y/ o regionales (Novakov, 1984; Zhu et al., 2010b), lo cual coherente con el contenido en el PM2.5 en la zona de, Sodio(Na $^+$), Calcio (Ca), NO $_x$, SO $_4^{-2}$, SOC, y una relación OC/EC = 8.0 en rango alto, explica su influencia en el perfil de la fuente secundaria que arrojó el modelo con un 98 % del balance de masa.

Una fuente tipo industrial con un aporte preliminar de 9.7%, fue identificada con un perfil compuesto principalmente por EC1, EC2, EC3, OC2, OC3, OC4, SO₄-2, Fe, Al, Mn, K, Fe, Zn, Ti, As, cloruros, NO₃-1, Sb, y Pb. Revisando los perfiles de fuentes reportadas por la Environmental Agency Protection EPA (Bray et al., 2019) estas emisiones especiadas son características de industrias ladrilleras, coincidiendo en la gran mayoría de los componentes del perfil arrojado por el Modelo PMF, con bajas concentraciones de Sb, y Pb, a excepción del Aluminio (Al) y el Potasio (K). Igualmente se encontraron perfiles de industrias metalúrgicas ferrosas y no ferrosas con componentes como Zn, Cu, As, Sb, Pb y Al, Zn, Cd, Sb, Mn, que si bien no se encuentran como grandes empresas en la región, existen Pymes y Mipymes, que puedan sumarse a estos aportes.

En el balance másico fue identificada una fuente tipo mezcla de otras según su perfil, denominada mezcla irresoluble, enriquecida en Ca, Al, Na, Mg, Fe, , Mn, fluoruros, NO₃-1, cloruros, Pb, trazas de OC, EC,con un aporte del 9.5 % al PM2.5 . En esta fase preliminar no logro diferenciarse esta fuente de otros perfiles industriales y por ello, será parte del trabajo pendiente en la Fase que continua, la delimitación y ajustes por incertidumbre y colinealidades de las fuentes, esto es, alcanzar que en la solución óptima, no coincidan perfiles similares que se enmascaren. Para resolver estas dualidades, en la continuidad de la modelación, se aplicarán otras condiciones de la algoritmia matemática de modelación.

Contribución Perfile:

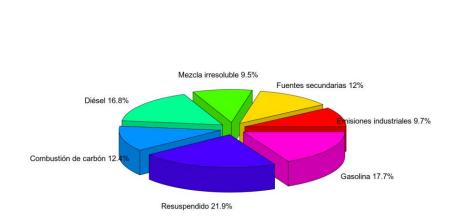


Figura 5-4. Aportes de fuentes de emisión PM2.5. Estación MED-BEME. Zona Habitacional Medellín-Colombia Fuente: Elaboración propia – Grupo GHYGAM 2020

Página 233 de 264







En síntesis, la fase de modelación PMF, la interpretación y el ajuste de los datos arrojados, permitieron correlacionar de manera muy aproximada, la correspondencia entre los datos estimados y los observados, determinándose, seis (6) perfiles definidos de fuentes del PM2.5, y sus correspondientes aportes. Los factores identificados fueron explicados por los balances de masa del PM2.5 existentes en la región y los reportes científicos, para su recomendación como indicadores de las medidas del PIGECA para el mejoramiento de la calidad del aire.

Esta solución preliminar será la base para continuar con la evaluación de la variabilidad del valor Q, predeterminado en 20 ejecuciones, considerado suficiente hasta llegar a la solución final. Aunque se excluyeron los datos de concentración que se encuentran por debajo de los límites de detección, en la Fases III siguiente, se incluirán especies con S/N (señal/ruido) mayores que 1 para obtener la solución optimizada.

Las siguientes pruebas serán definidas como los objetivos de los resultados esperados del PMF para la estimación de los aportes al PM2.5 en una zona habitacional representativa de Colombia de alta densidad de población, sin infuenco0a directa de fuentes y tráfico vehicular:

Prueba del punto de partida para cada iteración; Se probará en la Fase III 2020, si la solución es un mínimo local o global utilizando muchas semillas aleatorias y examinando si los valores Q (robustos) son estables y validando si el número de semilla específico elegido, reproduce los resultados de la especiación con mayor aproximación (OIEA-RLA7023, 2020).

Para la solución final, no desarrollada en esta Fase II del proyecto ARCAL 2073 2019, cofinanciado y apoyado por el Área Metropolitana del Valle de Aburrá bajo Convenio 734 de 2019, una vez que se haya validado el número de factores definitivo para el total de muestras caracterizadas, se continuará con la realización del número de corridas necesarias, hasta llegar a la solución final que explique con la menor incertidumbre, la reconstrucción de la masa del PM2.5 y sus aportantes.







6. RECOMENDACIONES PARA EL FORTALECIMIENTO DE LAS MEDIDAS DEL PLAN INTEGRAL DE GESTIÓN DE LA CALIDAD DEL AIRE DEL VALLE DE ABURRÁ A PARTIR DE LA CARACTERIZACIÓN QUÍMICA Y ESTIMACIÓN DE APORTES AL PM2.5

En asocio con los resultados del proyecto –Técnicas analíticas nucleares para el estudio de la emisión y la recepción de material particulado atmosférico por parte de los grandes centros urbanos de América Latina y el Caribe Fase II Convenio 734 AMVA de 2019, se consideró la importancia y filosofía del Plan Integral de Gestión de Calidad del Aire del Valle de Aburrá 2017-2030 –PIGECA, con el fin de articular las medidas y acciones que deben fortalecerse, tanto para la zona de estudio Estación Belén MED-BEME tipo habitacional, como para otras zonas caracterizadas desde el 2010 en la región, además, para las ZUAP reglamentadas por la autoridad ambiental, dada la condición de protección de este tipo de áreas urbanas.

El PIGECA, está conformado por 5 ejes transversales, 10 ejes temáticos con sus respectivas líneas de acción, 58 medidas temáticas y un conjunto de acciones denominadas prioritarias para disminuir emisiones. Algunas medidas contempladas en este instrumento que vale la pena fortalecer de acuerdo con los resultados del presente estudio son: Control a las normas de emisiones de fuentes fijas y móviles, la adopción e implementación de Planes de movilidad Sostenible -Plan MES, establecimiento de lineamientos de zonificación con criterios de calidad del aire, gestión integral de logística de transporte de carga y volquetas y políticas para reducir el impacto de sus emisiones, introducción acelerada de vehículos de ultra bajas emisiones o emisiones cero, fomento a la renovación del parque vehicular, optimización de sistemas de control de emisiones, estándares más estrictos de emisión para fuentes fijas, mejora del desempeño ambiental y energético de la industria, expansión, fortalecimiento, fomento y modernización del transporte público, instalación de sistemas de recuperación de vapores de gasolina, control de emisiones en procesos de no combustión, entre otras (AMVA y Clean Air Institute, 2017).

Este capítulo relaciona los principales resultados obtenidos en el estudio, discutidos anteriormente, con un análisis de las medidas PIGECA que vale la pena fortalecer para la zona de estudio y otras zonas caracterizadas en años anteriores en el Valle de Aburrá.

6.1 MAYORES CONCENTRACIONES DE PM2,5 Y MEDIDAS ASOCIADAS

Uno de los resultados del estudio, muestra concentraciones claramente diferenciadas de PM2,5 durante los días de semana en comparación con domingos, evidenciándose las mayores emisiones de este contaminante durante los jueves y viernes y las menores para los domingos. Las medidas que se deben fortalecer son:

> B1 establecimiento de lineamientos de zonificación con criterios de calidad del aire:

Página 235 de 264







Justificación: En esta medida perteneciente al eje temático 2 (planeación y ordenamiento territorial), una de las acciones se enfoca en establecer requerimientos para que las empresas y las flotas vehiculares cumplan con las condiciones para reducir las emisiones como parte del permiso para operar.

Estos requerimientos podrán incluir restricciones en horarios de operación, normas y códigos, construcción, restricciones de ralentí de vehículos o desvío de tráfico, etc. En el fortalecimiento de estas acciones resulta pertinente considerar sin falta, los días críticos jueves y viernes, evaluados en mayor concentración en PM2.5.

Para los días domingos se debe potenciar el comportamiento de bajas concentraciones a nivel de fondo rural (Estación MED-SELE en el corregimiento de Santa Elena), propiciando mayores condiciones de caminabilidad y ejercicio al aire libre mediante la ampliación de horarios y de ciclo vías y de la extensión de las rutas existentes. Considerando que los estudios que se han realizado desde el proyecto SIATA (estrategia para la gestión del riesgo, del Area Metropolitana del Valle de Aburrá y la Alcaldía de Medellín), desde donde se opera la red de monitoreo de calidad del aire del valle de Aburrá, han mostrado que la contaminación que se registra en este corregimiento no proviene del interior del valle, sino que por el contrario, es un aporte para la región, resulta fundamental la caracterización química del PM2.5 en esa zona, para una mayor aproximación de los aportes de las fuentes locales y medidas de control asociadas.

➤ C6 políticas para reducir el impacto en emisiones del transporte de carga y volquetas.

Justificación: El estudio de actualización inventario de emisiones atmosféricas del valle de aburrá – año 2018 (contrato 1179 de 2018, AMVA-UPB) indica que el transporte de carga representa el 67% de las emisiones primarias de PM2,5 y que en los camiones y volquetas se observa una proporción importante de vehículos de más de 25 años de antigüedad que se asocia a tecnologías más antiguas sin sistemas de control de emisiones., es necesario establecer un programa de renovación que propicie la introducción de vehículos nuevos que reemplacen la flota más antigua.

El impacto de esta flota pesada es generalizado, evidenciándose con mayor intensidad, en zonas de trafico (MED-PJIC) y suburbanas industriales (Girardota GIR-SOSN).

C16 Gestión integral de logística de transporte de carga y volquetas en el Valle de Aburrá

Justificación: Es necesario reducir emisiones de camiones y volquetas y su modelo promedio. Mejorando las intervenciones logísticas del sector se podrán reducir las emisiones y la eficiencia energética.

La composición química del material re suspendido evidencia la presencia de emisiones de manejo y beneficio de materiales, producto de la cadena de suministro y transporte de carga y volquetas.

Página 236 de 264







Resulta pertinente fortalecer la acción enfocada en la creación de una norma metropolitana para la gestión de logística de carga y volquetas para optimizar distancias, reducir consumos de combustibles, congestión y emisiones. Se incluyen aquí la regulación de horarios de carga y descarga, zonas de parqueo, horarios de cruce, establecer vías preferenciales y zonas restringidas, entre otras acciones.

Para facilitar la implementación de estas acciones resulta fundamental evaluar las propuestas presentadas en el estudio de transporte de carga en el Área Metropolitana del valle de aburrá (contrato 0762 de 2017 AMVA-UNAL) C11 introducción acelerada de vehículos de ultra bajas emisiones o emisiones cero.

Justificación: Es necesario incrementar el porcentaje de vehículos híbridos y eléctricos en circulación para disminuir la tasa de contaminación por kilómetro recorrido. Con línea base 2015, El Plan Integral de Gestión de la calidad del aire PIGECA, plantea al 2030 una reducción de 726 ton de PM2,5, emitidas de forma primaria por el sector transporte. Una de las acciones proyectadas se enfoca en establecer una norma metropolitana para fomentar la modernización de la flota con híbridos y eléctricos. Además, la constitución de una mesa de trabajo intersectorial con participación de diversos actores públicos y privados, para favorecer el despliegue de estas tecnologías hibridas.

El estudio evidencia el impacto de las emisiones vehiculares en todas las zonas habitacionales, de tráfico, sub-urbana industrial, de fondo urbano y en especial, la de fondo rural. Se deben establecer estímulos en zonas habitacionales para el uso de esta tecnología híibridas, eléctricas u otras alternativas limpias.

C15 Política de gestión de la demanda de viajes

Justificación: Es necesario reducir la generación de viajes para una movilidad más sostenible, a través de la implementación de instrumentos de gestión de la demanda de viajes, además de la Resolución Metropolitana 1379 de 2017.

Un aumento en el número de viajes se refleja en incrementos de las emisiones vehiculares, condición que se exacerba considerando que el déficit de celdas de parqueo para la comuna de Belén era de 2166 al año 2016 (Area Metropolitana del Valle de Aburrá & Universidad Nacional de Colombia, 2018).

La formulación de la política de gestión de la demanda que se propone para reducir los viajes o redistribuirlos más eficientemente incluyen entre otros elementos, gestión de estacionamientos, restricciones de acceso vehicular en zonas de bajas emisiones, limitaciones a la circulación vehicular incluyendo horarios y coberturas de pico y placa, peajes urbanos y programas de movilidad escolar sostenible, campañas enfocadas a públicos específicos poblacionales, como colegios, visitas a centros comerciales y actividades que caracterizan la cotidianidad de la población para la zona en estudio.

Resulta fundamental ampliar el horario del programa pico y placa en el rango mínimo de 6 a 10 am y de 5 a 9 pm., toda vez que son las horas con los picos de mayores concentraciones de PM2.5 y black carbón en la región.

Página 237 de 264







> E9 implementación de planes empresariales de movilidad sostenible- planes MES

Justificación: Es necesario el apoyo empresarial a la movilidad para reducir emisiones relacionadas con transporte desde y hacia el lugar de trabajo, para lo cual la Resolución Metropolitana 1379 de 2017 (modifica la Resolución 2381 de 2015), es el instrumento de gestión con que cuenta el AMVA. La resolución se enfoca en la promoción de una movilidad empresarial sostenible en instalaciones con mas de 200 trabajadores directos o indirectos, donde se deben implementar acciones como el teletrabajo, horarios flexibles y escalonados, promover la movilidad activa y el uso de transporte público, compartir el vehículo particular, la capacitación a empresarios y promotores y hacer seguimiento de avances y resultados de implementación de estrategias y a su impacto.

Asimismo, la autoridad ambiental ha avanzado en la gestión de los Panes Mes a través de instrumentos tecnológicos para facilitar su implementación y reporte de resultados.

Cobra gran importancia la necesidad de ampliar la población objeto de estos planes, no solamente a los colaboradores de las organizaciones, sino también al transporte de materias primas e insumos, incluyendo al sector educativo que ha venido cumpliendo un papel de apoyo a la autoridad ambiental en este tema de gestión de la calidad del aire y la movilidad sostenible.

C14 Fomento a la renovación del parque vehicular mediante el pico y placa ambiental y las restricciones derivadas de la implementación del POECA.

Justificación: Las acciones de restricción a la circulación vehicular, son uno de los instrumentos que motivan la renovación del parque automotor. Durante los períodos de Gestión de episodios de contaminación del aire, que regularmente se dan en la región durante los meses de febrero-abril y octubre-noviembre, se toman medidas de restricción vehicular aplicados en horarios de alta circulación y baja estabilidad atmosférica.

Las restricciones de circulación deben hacerse a vehículos con mayores emisiones para lo cual es necesario avanzar en pruebas y procedimientos de medición mas confiables, y en la implementación de distintivos, que posibiliten la identificación de los vehículos de acuerdo con sus emisiones.

6.2 CALDERAS Y HORNOS DE CARBÓN Y MEDIDAS ASOCIADAS

Del estudio de inventario de emisiones atmosféricas con año base 2018, se estima que el susector industrial de mayor aporte a la contaminación del aire en la zona urbana del valle de Aburrá, es el Textil para la mayoría de los contaminantes criterio evaluados. En el caso de emisiones de material particulado, el subsector de Cerámicos y vítreos aporta el 28%, el subsector Textil emite en promedio el 40% de las emisiones de material particulado.

Página 238 de 264







El sector industrial es el principal responsable de las emisiones de PM10 (76%) y en relación con el PM2.5 este sector se estima que aporta el 9% (las fuentes móviles tienen un aporte estimado, del 91% del PM2.5 emitido en forma primaria).

Los procesos de combustión de carbón estudiados en el área metropolitana (AMVA, 2008) contienen importantes cantidades de SO^{-4} (39.6% \pm 13,8%), similar a algunas emisiones reportadas en las publicaciones científicas, SO^{-4} (28,7 \pm 22,6%), OC (55,7 \pm 11,9%), EC (2,4 \pm 4,08%), (CHOW 2004b). Igualmente, el Selenio (Se) con frecuencia es un trazador de combustión de carbón, (Thurston and Spengler, 1985; Malm et al., 1990).

Las medidas y acciones que deben fortalecerse son:

> E2 Optimización de sistemas de control de emisiones

Justificación: Debido a los impactos que estas emisiones generan, es necesario fortalecer la optimización de la operación de los sistemas de control en las fuentes fijas y orientar acciones hacia la reducción de emisiones, teniendo en cuenta todo el proceso de uso de la energía.

La medida busca incluir acciones como la identificación de buenas prácticas y tecnologías para el control de emisiones y mejorar eficiencia de los sistemas. Para el manejo integral del proceso de combustión, y su mejoramiento continuo, el Área Metropolitana del Valle de Aburrá mediante Resolución Metropolitana 912 de 2017, obliga a las industrias, a implementar buenas prácticas de producción y de tecnologías para la prevención y control de las emisiones, evaluación periódica de eficiencias, mantenimiento preventivo y correctivo, implementación de medidas para seguimiento y mejora permanente de los procesos. Sin embargo, es necesario implementar un sistema integrado robusto y confiable de control desde la autoridad ambiental, con base en los datos suministrados por cada fuente fija en la Bitácora de Operación y Mantenimiento que se exige en esta norma.

Esta acción tiene un alto peso, toda vez que los efectos de las emisiones de carbón se identifican en todas las zonas, y con mayor influencia en zonas más cercanas a ladrilleras e industrias con calderas a carbón.

> E3 estándares más estrictos de emisión para fuentes fijas

Justificación: Teniendo en cuenta que el carbón cubre el 31.2% de la demanda energética de la industria (inventario de emisiones año base 2018), aportando un 76.5% de las emisiones de PM2,5 del sector industrial en la región, resulta importante mejorar el desempeño ambiental de la actividad industrial para la reducción de emisiones.

La medida contempla estándares más estrictos, lineamientos para la mejora de procesos, evaluaciones de eficiencia y desarrollo de un instrumento normativo en buenas prácticas y tecnologías para la reducción de emisiones por el uso del carbón que permitan no sólo abordar la problemática de emisiones desde el cumplimiento de una norma con estándares o limites, sino también, aportar a la mejora de los procesos industriales que desde el seguimiento a las variables establecidas en la Bitácora de Operación y Mantenimiento

Página 239 de 264







puedan contribuir a disminuir las emisiones gracias a la optimización y eficacia en el uso del combustible.

La autoridad ambiental ha avanzado en esta medida, a través de instrumentos como la Resolución Metropolitana N° 002381 del 30 diciembre de2015, modificada por la Resolución Metropolitana 912 de 2017, la cual aplica a las instalaciones cuyos procesos industriales generen emisiones atmosféricas, en función de su tamaño

Cabe resaltar que desde el sector industrial la autoridad ambiental urbana le dio una mirada diferente a la normativa nacional, enfocándose en las variables que incidían en las altas emisiones, y no solo al cumplimiento de estándares de emisión. La norma local ya adoptó la resolución ministerial 2254 de 2017 (Ver Acuerdo 04 de 2018 que adopta el POECA)

Se le suma a lo anterior, la recomendación de una evaluación periódica y seguimiento en el tiempo, de modo que la sistematización y retroalimentación de la información integrada, permita medir la eficacia de las acciones implementadas.

E4 mejora del desempeño ambiental y energético de la industria

Justificación: La medida se justifica en la necesidad de mejorar el desempeño ambiental y energético de la industria acorde con las disposiciones de la Resolución Metropolitana 912 de 2017 para propiciar un desarrollo bajo en emisiones.

La implementación de la resolución por parte del sector industrial incluyer la capacitación de operadores de equipos de combustión para que se certifiquen en competencias técnicas, instalación de sistemas automáticos de alimentación de combustibles sólidos, operación, mantenimiento y monitoreo de parámetros de combustión manejados en bitácoras que permitan el seguimiento y evaluación en el tiempo enmarcado en procesos de mejora continua.

La autoridad ambiental deberá generar los mecanismos que le permitan no solo hacer seguimiento al cumplimiento de la Resolución Metropolitana 912 de 2017, sino la evaluación del impacto de las acciones y propender porque esta mirada integral dada al sector industrial no solo con esta resolución, sino también con la Resolución Metropolitana 1379 de 2017, sea tenida en cuenta por todo el territorio local (rural y urbano) y nacional

Las zonas habitacionales también tendrán este beneficio, dado el efecto de la circulación de vientos desde su origen hasta zonas receptoras, evidenciado en la composición de PM2.5 por el contenido de Sulfatos, Selenio y fracciones de materia carbonácea, especialmente el EC1, indicadores típicos de calderas de carbón, según fuentes citadas anteriormente.

> A4 mejora continua del inventario de emisiones

Página 240 de 264







Justificación: Los estudios de inventario de emisiones deben ser actualizados periódicamente, toda vez que se basan en información que varía mucho en el tiempo. Los estudios se realizan con la mejor información disponible, por lo que es necesario el compromiso de los diferentes actores para aportar datos que posibiliten el ajuste cada vez mejor del inventario de emisiones, y que puedan ampliarse a un territorio mayor, ya que actualmente solo se realizan para la zona urbana del valle de Aburrá, donde el Área Metropolitana tiene jurisdicción como autoridad ambiental. En este sentido es fundamental la articulación con Corantioquia, para la ampliación de los estudios a todo el territorio del valle de Aburrá.

Cabe resaltar que la autoridad ambiental viene actualizando el inventario de emisiones cada dos años, obteniendo el último con datos del año base 2018, el cual se encuentra publicado el siquiente link: https://www.metropol.gov.co/ambiental/calidad-delaire/Documents/Inventario-de-emisiones/Informe final inventario a%C3%B1o base 2018.pdf. Este instrumento se fortalece si se incluye entre otros factores, el mejoramiento de las caracterizaciones de COVs del transporte e industria, los servicios y fuentes dispersas. A pesar de que los estudios de inventario de emisiones son una estimación al aporte a la contaminación del aire en la zona urbana del valle de Aburrá, sus resultados han contribuido en el tiempo a direccionar la gestión hacia las principales fuentes de contaminación. Los estudios mas aproximados a la realidad requieren factores de emisión como resultado de estudios locales, pero estos estudios son de alto costo. La mejor información la podremos obtener con el monitoreo continuo de emisiones, para lo cual ya el AMVA, se ha venido acercando a ese conocimiento y ha hecho requerimientos particulares en las zonas urbanas de aire protegido (ZUAP) declaradas mediante Resolución Metropolitana 2257 de 2019 (modificada parcialmente por la Resolución Metropolitana 3770 de 2019)

En asocio con los resultados de la determinación de materia carbonácea se recomienda la verificación del inventario a partir de los perfiles de fuentes arrojados por el modelo PMF, que incluya estas fracciones de la partícula.

> E1. Establecimiento de una política integral de desarrollo de bajas emisiones.

Esta medida, articulada al eje Temático 5 (Industria y servicios competitiva y de bajas emisiones) busca mejorar el desempeño ambiental industrial y de servicios por medio de una política que promocione un desarrollo bajo en emisiones.

Dicha política debe incluir lineamientos para optimizar la cadena de suministro y distribución, mejora operacional, sustitución de materiales y combustibles incluyendo el carbón por gas natural. Esto se presenta en coherencia con los resultados obtenidos en el presente estudio.

6.3 EMISIONES DE DIÉSEL Y GASOLINA Y MEDIDAS ASOCIADAS

El PIGECA reconoce que un 80% de la polución de la región se atribuye a las fuentes móviles, y en consecuencia a los impactos generalizados en todo el territorio por el uso de Página 241 de 264







combustibles diésel y gasolina, en el cual las zonas de alto y mediano tráfico como la zona habitacional se ven fuertemente influenciadas. Las medidas que resultan fundamentales a fortalecer son:

C1 mejoras a la calidad del diésel y la gasolina

Según (ECOPETROL, 2019) las últimas mejoras programadas a la calidad de los combustibles buscan acercarse a los límites establecidos en el PIGECA. En la última mejora para la región estuvo entregando una mejor calidad de diésel de las estaciones de servicio con un promedio de 8.8 partes por millón (ppm) de azufre y de 72.4 ppm en promedio en la gasolina (El Espectador, 2019).

El modelo PMF aplicado en el estudio arrojó para la zona habitacional, perfiles de diésel con aportes de (16.8%) y de gasolina (17.7%) locales, valores razonables de acuerdo con la distribución de la flota vehicular dominantes para vehículos a gasolina con las fracciones (OC2, OC3), y EC2 típico del diésel, adicional a las fracciones de Selenio, Níquel Zinc y Sodio cuantificados en la zona.

En este contexto, es fundamental asegurar la introducción de vehículos con sistemas avanzados de control de emisiones que cumplen estándares Euro 6, V y VI de acuerdo a la calidad del combustible diésel lograda (10 ppm de azufre). Quedando el reto de mejorar la calidad la gasolina al mismo nivel.

Dentro de las acciones PIGECA, que vale la pena fortalecer está la creación e implementación de una resolución metropolitana que establezca el suministro de gasolina y diésel vehicular a proveedores con ultra bajo contenido en azufre. Además, diseñar e implementar un programa para el control y seguimiento a las condiciones de suministro, verificado en un sistema de información robusto y confiable.

C3/C4 Expansión, fortalecimiento, fomento y modernización del transporte público

Justificación: Resulta fundamental mejorar el transporte público mediante el ingreso de vehículos que funcionan con diésel y gasolina con bajos niveles de azufre para que se satisfaga la demanda y propicie cambios hacia modos de transporte amigables. Además de modernizar el parque automotor de las empresas de transporte público colectivo, es necesario sensibilizar a los usuarios, mediante una asertiva comunicación pública e incentivar empresas y empleados, toda vez, que en la zona habitacional se evidencia que el flujo vehicular presente en la zona, se debe a una alta cobertura en servicio público, tanto a diésel como a gasolina y gas. Esta acción es complementaria para la reducción de contaminantes primarios que repercuten en al aumento de las concentraciones de compuestos secundarios en la zona, parcialmente atribuibles a las emisiones vehiculares.

➤ E5B instalación de sistemas de recuperación de vapores de gasolina a lo largo del proceso de almacenamiento, transporte y suministro

Justificación: Se requieren mayores controles a las emisiones evaporativas de gasolina, que reduzcan los COVs generados en la cadena de transporte y suministro de combustibles. Estas emisiones son el 13% del total de emisiones con 2,011 ton/año

Página 242 de 264







La zona habitacional estudiada por sus fenómenos de transporte y recepción de contaminantes evidencia alta formación de PM2,5 por reacciones secundarias (17.6% en SOC) en las cuales los COVs son precursores de alta formación y su distribución corresponde a fuentes de área.

Una de las acciones propuestas en el PIGECA que se requiere fortalecer es la creación e implementación de una norma de Rigor subsidiario que establezca limites a vapores de gasolina a lo largo del proceso, lo cual resulta de alto impacto, dada la evidencia de una formación de PM2.5 secundario cada vez en mayor proporción. Mediante Convenio de 583 de 2017 con la UPB, se diseñó un programa para el control integral de emisiones de compuestos orgánicos volátiles COV, en la cadena de distribución de combustibles líquidos en el valle de Aburrá (https://www.metropol.gov.co/ambiental/calidad-del-aire/Biblioteca-aire/Estudios-calidad-del-aire/Programa-COV-Final.pdf). Es necesario que se busquen los mecanismos para que este programa sea implementado en la region.

> C2 estándares de emisión más estrictos

Justificación: Es fundamental asegurar sólo la integración de vehículos nuevos al parque vehicular con estándares de emisión estrictos para lograr la reducción de emisiones. Establecer un calendario para la aplicación de estándares de emisión para vehículos nuevos comercializados en el país a gasolina y a diésel equivalentes a Euro 6/VI acorde con las normas de Estados Unidos. El impacto de esta medida tiene un impacto generalizado, pero se requiere abordar una transferencia tecnológica en laboratorios de medición que permita la validación in-situ en Colombia.

Una de las acciones PIGECA a fortalecer se enfoca en elaborar e implementar proyectos de norma nacional con aportes técnicos y financieros del Ministerio de MA, del AMVA y otros. El objetivo es la actualización de los límites de emisión planteados en la Resolución 910 de 2008.

6.4 MATERIAL RE SUSPENDIDO Y MEDIDAS ASOCIADAS

Este material re-suspendido se constituye en una fuente compleja y proviene del desprendimiento gradual de los diversos estratos que conforman las vías, partículas erosionadas del suelo y las denominadas emisiones vehicle non exhaust (no escape) que contienen partículas desprendidas por el desgaste de pastas de frenos, neumáticos y llantas, los cuales son de alta toxicidad, además, se incluyen estas emisiones, mezcladas con extra-emisiones del beneficio, transporte y manejo de materiales. De acuerdo con los últimos eventos de contaminación, las partículas generadas en incendios, quemas de biomasa y biocombustibles igualmente aportan componentes típicos de esta fuente de mezcla de contaminación.

En la zona habitacional esta fuente contribuyó con el 11% de la composición del PM2,5, mostrando la presencia de los contaminantes típicos que demandan aplicación de acciones de control. Acorde con la caracterización de las demás zonas desde el año 2010, esta fuente ha estado evidenciada, aunque sólo se ha cuantificado en el presente estudio. Es de

Página 243 de 264







resaltar el aporte parcial de las fuentes de incendios y quemas que será abordado en otro ítem.

Las medidas que resulta menester fortalecer son:

> E7 mejorar proceso de legalización y control de actividades de extracción, manejo y disposición de materiales de construcción

Justificación: Existe la necesidad de mejorar el desempeño ambiental de las actividades de extracción, manejo y disposición de materiales de construcción.

Resulta fundamental implementar acciones de acompañamiento, seguimiento y control de las operaciones para la reducción de emisiones por polvos re suspendidos en los sectores implicados en la demanda del beneficio, transporte y manejo de materiales, como es el caso de la actividad de la construcción, canteras, industria ladrillera y otras actividades demandantes.

6.5 FUENTES O EMISIONES SECUNDARIAS Y MEDIDAS ASOCIADAS

Los contaminantes primarios repercuten en el aumento de las concentraciones de compuestos secundarios en la zona, esto es parcialmente atribuible a las emisiones vehiculares.

El PIGECA no contempla medidas específicas y directas para este tipo de emisiones, estas se proponen haciendo un análisis de las medidas asociadas con los contaminantes precursores, ozono troposférico, como gas y su potencial interacción con el material particulado y consecuentes mecanismos de transformación química.

Para disminuir los niveles de O₃ troposférico, es fundamental mencionar que este se forma por la interacción de diversos precursores (COV, CO, NOx, etc.) y que presenta excedencias de la norma diaria que conllevan a la declaración de periodos de "Gestión de Episodios Críticos". Los ejes temáticos y acciones asociadas que se deben fortalecer son los enfocados en la reducción de COV, de NOx y de CO, los cuales provienen de fuentes primarias de origen industrial y vehicular.

Dada la alta reactividad atmosférica creciente desde el año 2010, demostrada en los estudios de caracterización atmosférica en diversas zonas de la región metropolitana (AMVA, 2010), (AMVA, 2014), (AMVA, 2015), (AMVA, 2019), estos compuestos son altamente formadores de compuestos secundarios, con indicadores típicos de zona de tráfico con un 13% en SOC en 2019 y para la zona habitacional MED – BEME un 17.6%.

En relación con los COV, la medida E5a. que debe fortalecerse, se enfoca en control de emisiones en procesos de no combustión. Se busca mejorar el desempeño ambiental y energético de procesos de no combustión donde se disminuyan las emisiones valorativas de COV. Esta acción requiere de un seguimiento y control asociado a un sistema robusto y

Página 244 de 264







confiable de información. Estos COVs son sustancias precursoras de formación de PM2.5 secundario de alto impacto para la salud de la población.

Además, la medida E5a "instalación de sistemas de recuperación de vapores de gasolina a lo largo del proceso de almacenamiento transporte y suministro" plantea la necesidad de controlar los vapores de gasolina que con una alta reactividad propician la formación de ozono por medio de limites más estrictos y adecuación de estaciones de servicio. Acción altamente pertinente de acuerdo con los resultados del estudio y específicamente a la presencia de fracciones de OC2 y OC3 en el PM2.5

En relación con los NOx la medida E6. "Restringir la instalación de nuevas fuentes fijas en zonas sensibles", busca impactar con la disminución de 64 toneladas anuales de NOx estableciendo zonas protegidas e instituyendo limites más estrictos en lugares de mayor sensibilidad a las emisiones, frente a la línea base 2030. Esta acción resulta pertinente fortalecerla, teniendo en cuenta la alta reactividad del NO_X y consecuente formación de compuestos secundarios inorgánicos.

Las Partículas secundarias antropogénicas, también son compuestos secundarios importantes que al igual que las partículas naturales, los principales componentes son sulfatos (generados por reacciones del SO₂), nitratos (generados por emisiones de NOx) y aerosoles orgánicos.

Para sulfatos y Nitratos la medida que es menester fortalecer es la B1 "Establecimiento de lineamientos de zonificación con criterios de calidad del aire", la cual, frente a la línea base 2030 el impacto esperado en la reducción de emisiones del sector industrial de NOx es de 64 ton/año y 122 ton/año de SO₂, por medio de acciones como implementación de códigos y requerimientos en el sector industrial y transporte que busquen disminuir el impacto ambiental por requisitos e incentivos fiscales.

Este lineamiento resulta de gran soporte en la reducción especialmente de sulfatos identificados en el PM2.5 desde el año 2010. Pese a que se ha presentado una reducción en los últimos años, sigue siendo necesario continuar con acciones de disminución, dada la agresividad de sus características.

Los nitratos por su parte se presentan en menor proporción (3%), no obstante, dadas sus características químicas y tóxicas y el nivel deseable "No Detectable", es recomendable continuar con las acciones de control vehicular e industrial.

6.6 BIOMASA LOCAL Y REGIONAL Y MEDIDAS ASOCIADAS

En el PIGECA no se identificaron medidas asociadas o que aborden directamente la problemática. Tampoco existe una política nacional integral y unificada sobre el manejo de las conflagraciones forestales en el país. En materia de incendios, además del reglamento Colombiano de Construcción sismo-resistente Ley 400 de 100 de 1997 y norma NSR 10, lo Página 245 de 264







que existen son acciones atomizadas, sin una ruta de atención clara, sin un mecanismo uniforme, ni organismos con responsabilidades específicas, acciones coordinadas para la detección temprana y atención de incendios. Del mismo, modo, tampoco existe una articulación que permita definir cómo y quienes realizarán la prevención, las estrategias y protocolos de atención. Colombia no tiene un sistema de alertas tempranas y eficientes para atender incendios, ni un sistema unificado que permita no solo detectarlos a tiempo, sino tratarlos (SEMANA, 2019).

Mediante Acuerdo Metropolitano N° 4 de 2019, se adoptó el Plan de Acción ante el Cambio y la Variabilidad Climática 2019-2030". El cual contiene el Programa Integral de Gestión del Riesgo Componente: Incendios de la Cobertura Vegetal. Los resultados de este estudio, los reportes del proyecto SIATA y de otros expertos, han permitido evidenciar el impacto de las quemas de biomasa en la calidad del aire a nivel de país incluyendo el Valle de Aburrá, por lo tanto, , resulta fundamental implementar acciones de control de estas fuentes difusas. https://www.metropol.gov.co/ambiental/Documents/Libro PAC&VC 2019-2030.pdf

En el presente estudio se resalta la influencia de incendios en el PM2.5, lo cual fue validado en la especiación por el contenido de la fracción de Carbono Orgánico OC1 y Potasio (K) (Allen et al., 1995; Echalar et al., 1995; Watson et al., 1994; Chow et al., 2004). En la modelación, aunque no se identificó claramente la fuente quema de biomasa, si se hallaron trazadores de éstas, en parte de los perfiles resuspendido, secundarias y extraemisiones y en la fuente denominada, mezcla irresoluble: Nitratos, Calcio (Ca), Potasio (K), Magnesio (Mg) y Sodio (Na) (Singhai et al., 2017; Diapouli, 2016; Almeida, 2016; Song X. et al., 2001). La presencia de emisiones de los incendios, quemas de biomasa y biocombustibles, también se validó por la relación de OC/EC de 8.5 en el PM2.5 en la zona Belén, valor cercano a 7.7, indicador de este tipo de fuentes (Chow et al., 2004b)

Con base en la revisión bibliográfica de medidas llevadas a cabo en algunos lugares donde se presentan estos eventos, surgen recomendaciones como las siguientes:

- ➤ Es preciso trabajar con anticipación ante los escenarios que puedan provocar un clima cambiante, siendo propicio contar con nuevos desarrollos de conocimiento y tecnología (OSBODIGITAL, 2020). Del mismo modo, incorporar acciones preventivas coordinadas e intergubernamentales que propendan por evitar este tipo de eventos que agravan la calidad del aire y que se constituyen hoy en un contribuyente importante a las emisiones de fondo.
- Desde lo normativo: Generar un paquete integral de manejo legislativo, unificado administrativo, económico, científico y técnico, para la prevención integral y mitigación de los incendios que permita además la detección temprana, mejorar los estándares relativos a los equipos para el control de incendios e incluir responsabilidades de todos los actores involucrados en la prevención y control de incendios (Dong, 2019).

Página 246 de 264







- ➤ La fundación de gas natural Fenosa, plantea en su diagnóstico en el 2018, la importancia de establecer estrategias de control en actividades agrícolas, como la prohibición de quemas forestales para siembras que enseñen a las personas sobre las consecuencias a la salud de estos sucesos.
- Desde la Gestión interinstitucional: Teniendo en cuenta el carácter regional de las quemas de biomasa evidenciadas, la organización para el control de incendios debe emprenderse a partir del gobierno nacional hasta los gobiernos locales, extendiéndose por todo el país, incluyendo a todas las autoridades ambientales, organismos de apoyo y la academia. Este será el medio básico para que todos los sectores participen en la prevención y el control de los incendios o quemas de biomasa. Así mismo, resulta importante definir las funciones de coordinación entre los organismos gubernamentales a todos los niveles, no sólo en cuanto a la responsabilidad de supresión de los incendios, sino también en la prevención.
- ➤ Desde las soluciones tecnológicas: Se ha demostrado que la teledetección, a través de sensores remotos activos y pasivos, constituye una herramienta muy útil para el desarrollo de sistemas de prevención, seguimiento y evaluación a diferentes escalas espaciales y temporales de incendios y otros eventos naturales. (Di Bella, Posse, Beget, & Fischer, 2008). Con la tecnología actual es posible saber la potencialidad de los incendios en zonas geográficas específicas, detectarlos, prevenirlos y atenderlos (SEMANA, 2019).
- ➤ Desde la educación comunitaria: La prevención de incendios exige modificar el comportamiento humano causante de gran parte de este tipo de eventos, para ello es necesario impartir una formación frente a sus efectos y modos de prevención a cargo de autoridades de control, utilizando los últimos avances en materia de formación y normativa, así como otros materiales pedagógicos. Resulta fundamental en este tema de generación de una cultura de buenas prácticas, incluir el trabajo conducente a lograr la implementación, control y seguimiento de buenas prácticas agrícolas en las quemas de suelo y materiales asociados a la preparación del mismo.
- Vigilancia, control y seguimiento: Fortalecer el control y seguimiento, como funciones de las autoridades ambientales nacionales, especialmente para zonas rurales (Caso del Valle de Aburrá, compete a Corantioquia) resulta fundamental en la prevención de incendios. Acorde con los artículos aún vigentes del decreto 948 de 2005 integrados al decreto único reglamentario sector ambiente 1076 de 2015, algunos aspectos que vale la pena destacar en este control y seguimiento son:
- Vigilar las prácticas de quemas abiertas en zonas rurales que están prohibidas y por nuestra legislación (artículos 2.2.5.1.3.14, 2.2.6.2.2.1 y 2.2.7.2.1.2, y otros del Decreto 1076 de 2015) tales como, las quemas de desechos peligrosos, plaguicidas en desuso entre otras. Además, las quemas controladas en actividades agrícolas y mineras y las que se realicen para la preparación del suelo y el control de efectos de heladas, en busca siempre de su disminución. Es fundamental la verificación del

Página 247 de 264







cumplimiento de los requisitos, términos, y obligaciones que se deben cumplir para efectuar las quemas agrícolas controladas, todo ello soportado en un sistema de información robusto y confiable que permita su seguimiento y la toma de decisiones.

- Seguimiento a las quemas abiertas en áreas rurales de sustancias estupefacientes, sicotrópicas o drogas sintéticas conforme a las disposiciones del Convenio de Naciones Unidas sobre Sustancias sicotrópicas y normas nacionales que lo respaldan.
- Las condiciones de operación de las actividades, obras o servicios, públicos o privados con permisos de emisiones vigentes o no, que estén autorizados para las quemas controladas en zonas rurales, las quemas de combustibles en operación ordinaria, campos de explotación de petróleo y gas (artículo 2.2.5.1.7.2). También debe incluirse el seguimiento a las actividades que cuentan con permisos de emisiones colectivos para actividades permanentes o no de quemas abiertas controladas en el sector productivo agrario o de pequeña minería a cielo abierto. Así mismo, el estado de los permisos de emisión que autorizan las quemas controladas en actividades agroindustriales y plantas termoeléctricas. En ese contexto debe verificarse la existencia de sistemas de monitoreo de los efectos de la contaminación del aire que como lo plantea el artículo mencionado.
- Hacer seguimiento a los planes de contingencia que forman parte de los estudios de impacto ambiental donde se verifique la existencia de los instrumentos y capacidades de actuación para la prevención, atención y cese de la contingencias o eventos por fugas e incendios.
- Durante periodos declarados de gestión de episodios críticos, restringir, de manera coordinada con otras autoridades ambientales, todo tipo de quemas controladas independiente de los horarios en los cuales se efectúen, máxime cuando se declaren en las fases de alerta y emergencia.
- Componente técnico y científico: Avanzar en la obtención de nuevo conocimiento científico sobre el impacto de las quemas y la calidad del aire y su incidencia en periodos de estabilidad atmosférica. Para ello, el papel de la academia y organismos de apoyo a la gestión ambiental municipal, resulta fundamental.

6.7 ZONAS URBANAS DE AIRE PROTEGIDO - ZUAP

Con base en los resultados obtenidos en una zona de tipo habitacional, con alta densidad de población y características de mediano flujo vehicular, influencia cercana de industrias ladrilleras, y actividades de manejo y transporte de materiales, emisiones non exhaust (no escape), polvo re suspendido e impactos por quemas de biomasa por transporte regional, se destaca la importancia de la implementación de las siguientes acciones relevantes declaradas para las ZUAP según las resoluciones 2231 de 2018 y 912 de 2017.

Página 248 de 264







La continuidad del programa de mediciones con base en la especiación de la partícula, especialmente en las fracciones de carbono OC1, OC2, OC3, EC1, EC2 indicadores de combustión tanto a vehicular como industrial para la evaluación de la eficacia de las medidas y toma de decisiones en la gestión de la calidad del aire.

Considerando que el estudio evidenció una vez más, el impacto de emisiones de combustión industrial derivadas de la dispersión de contaminantes afectando no sólo las zonas de influencia sino también las de mayor lejanía, resulta pertinente implementar la medida de optimización de sistemas de control de emisiones y seguimiento integrado a un sistema de información.

Dada la importancia de las zonas de aire protegido y las acciones propuestas en las normas reglamentarias, resulta fundamental el fortalecimiento de la implementación de las Buenas Prácticas Ambientales (artículo 18 de la Resolución Metropolitana N°912 de 2017) en las fuentes fijas, que incluyan la capacitación en programas de eficiencia energética, la reconversión tecnológica, la promoción de distritos térmicos zonales y demás temas orientados al mejorar la calidad del aire.

Teniendo en cuenta el impacto de las emisiones vehiculares y el comportamiento de la concentración PM2,5 máxima en los horarios de 6-10 am, 5 a 9 pm, se hace necesario establecer horarios más ampliados para la restricción a la circulación de vehículos, facilitando una mejor dispersión de los contaminantes y mejoras en la calidad del aire, de acuerdo con el comportamiento del PM2,5 estudiado en la región.







CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- La evaluación de la calidad del aire en el área de influencia de la Estación MED-BEME, sector Belén Las Mercedes, registró entre abril y diciembre del 2019, una concentración media PM2.5 de 19.95 ± 0.3 μg/m3, calidad aceptable, solo superándose la norma de calidad de aire diaria, en un 2.2% del periodo de monitoreo
- El análisis estadístico del comportamiento del PM2.5 durante el estudio, demostró una amplia diferencia en la distribución de densidad de probabilidad para la concentración de PM2.5 para los días laborables en relación con los no laborables, representados por valores de la mediana, de 21.04 μg/m3 y 14.74 μg/m3 respectivamente.
- ➤ En este caso de estudio para la zona Belén Las Mercedes, se halló una mayor concentración de SO4-2, explicables tanto por emisiones enriquecidas de combustión y procesos industriales tráfico vehicular, como también asociadas a quemas de biomasa transportadas por las corrientes de vientos propias de la zona en la dirección dominante oriente.
- ➤ La medición de Black Carbon equivalente (BCe) determinó un aumento de este parámetro consecuente al incremento del PM2.5, asociado a estados de prevención y alerta ambiental en el área metropolitana, y el mes de agosto, por entradas de plumas de quema de biomasa provenientes de la amazon
- ➤ La evaluación de la calidad del aire en el área de influencia evidenció que los picos de BCe para cada día de la semana, se presentaron en las franjas horarias 6:00 9:00 y 17:00-21:00 consecuentes con la dinámica de transporte en la ciudad de Medellín a causa de la medida de pico y placa, además, de los picos en la franja horaria 12:00-16:00, atribuible al flujo vehicular al interior del Instituto Salesiano Pedro Justo Berrio causado por el servicio de transporte escolar.
- La caracterización de materia carbonácea en términos de Carbono Elemental (EC), se encontró en 4.1% de PM2.5 equivalente a 0.8 μg/m³, cuyo origen primario está asociado directamente a emisiones de combustión industrial, tráfico vehicular y quema de biomasa, encontrándose en menor cantidad en comparación con la evaluación en zonas de tráfico de la región.
- > Se evidencia un enriquecimiento por extraemisiones secundarias derivadas de la fotoquímica atmosférica y quema de biomasa locales y regionales.
- ➤ En el presente estudio se aprovecharon los avances científicos sobre la interpretación de las fracciones de materia carbonácea determinadas por el método TOT, como soporte para la interpretación de las características de emisión y transformación de las especies emitidas por las diversas fuentes en la región

Página 250 de 264







metropolitana y para la identificación independiente de los perfiles preliminares de vehículos a gasolina, vehículos diésel y quemas de biomasa.

- ➤ El impacto de emisiones de combustión de calderas a carbón es evidenciado de manera general en los estudios de caracterización del PM2.5, con base en y en la identificación de los trazadores OC2 y EC1 y Selenio (Se).
- Fue posible inferir y cuantificar el impacto de emisiones de combustión carbón a partir de las fracciones OC2 y EC1 de 1.5 y 0.06 ug/m³ en PM2.5.
- ➤ La identificación de trazadores de quemas de biomasa OC1, K, y cuantificación de su presencia en el PM2.5 transportado por corrientes regionales de alto impacto en el Valle de Aburrá, es un avance para el conocimiento sobre la calidad del aire de los eventos asociados con el transporte de contaminantes por incendios forestales y quemas de biomasa, de acuerdo con el levantamiento de información satelital y una alta correlación entre los valores OC1 y el PM2.5
- ➤ Entre 16 y el 22 de agosto de 2019, se evidenció la entrada de plumas contaminantes al Valle de Aburrá a causa de incendios forestales al norte y centro de Brasil ocasionando un incremento en el PM2.5 en varias estaciones de la red de monitoreo del AMVA, además se evaluaron mayores concentraciones del OC1 coincidentes con picos del PM2.5, aunque sin exceder la norma diaria de calidad del aire y coherentes con picos de las fracciones EC1 y EC2 asociadas a emisiones de combustión.
- ➤ El comparativo realizado de trazadores típicos Potasio (K) (1.8%) y Sodio (Na) (4.7%) (Singhai et al., 2017 (Chow et al., 2004b) en la estación de fondo rural Santa Elena (MDE-SELE) (AMVA,2015) y otras estaciones del Valle de Aburrá (AMVA,2015) (AMVA,2019), permitió observar la influencia de la quema de biomasa y biocombustibles concordante con las prácticas de quemas de biomasa en procesos de producción agrícola en las áreas rurales.
- ➤ El alto contenido de sulfatos, predominante en los aniones (67 a 93%), presentes en el PM2.5, muestra la influencia generalizada de los procesos de combustión industriales (AMVA, 2008), vehiculares y de biocombustibles identificados por el uso de carbón, diésel y gasolina, como también asociadas a quemas de biomasa (Chow et al., 2004).
- En la caracterización del PM2.5 es apreciable la mayor presencia de indicadores de emisiones de combustión a carbón (Almeida, 2016), EC y Selenio (Se), Cobalto (Co), Arsénico (As) y Antimonio (Sb) y de actividades de explotación y transporte de materiales, además del mayor impacto de las emisiones vehicle non exhaust,

Página 251 de 264







(desgaste de pastillas de frenos y neumáticos) asociado al mayor flujo vehicular pesado.

- ➤ Se observó un aumento en el contenido de OC entre el 2010 y 2019 en la Estación de tráfico MED-PJIC, demostrando el aumento en la formación de PM2.5 secundario derivado de un aumento de los contaminantes primarios NO_x, O₃ y VOC
- ➤ En la zona de fondo rural Santa Elena (2015) se evidenció PM2.5 con contenidos de sulfatos propios de quemas y prácticas agrícolas y emisiones de tráfico, asociado a un menor contenido de OC dada la menor influencia urbana y consecuente menor reactividad atmosférica con relación a zonas urbanas habitacionales, esto es, menor concentración de compuestos orgánicos secundaros.
- ➤ El PM2.5 en las estaciones de tráfico y sub-urbana industrial MED-PJIC y GIR-SOSN, tienen perfiles similares en cuanto a materia carbonácea, dada la influencia de fuentes comunes de tipo vehicular e industrial incluyendo combustión de carbón.
- La caracterización del PM2.5 en una zona tipo habitacional y en una de fondo urbano, con diferencias de tráfico vehicular y pendientes en las vías, validan emisiones vehicle non exhaust originadas por los patrones de conducción en vías con pendientes que obligan al mayor uso del freno y cambios de velocidad.
- ➤ Se presenta un aumento de la formación de contaminantes secundarios que se infiere a partir del aumento en el tiempo de indicadores como OC, SOC, sumado a extraemisiones por eventos de contaminación locales y/ o regionales evidenciado por altas relación OC/EC (Zhu et al, 2010), (Novakov, 1984).
- Los elementos característicos del material resuspendido del suelo como son Aluminio (Al), Calcio (Ca), Hierro (Fe) y Potasio (K), fueron elementos mayoritarios en el Estación MED-BEME comparados con las demás zonas caracterizadas.
- ➤ Entre las zonas urbanas más influenciadas por las fuentes vehiculares se encuentran el área de influencia de la Estación MED-PJIC, dado las mayores concentraciones de trazadores non exhaust (no escape), Zinc (Zn), Manganeso (Mn), Cobre (Cu) y Cromo (Cr) (Singhai et al., 2017).
- Se realizó una diferenciación entre los perfiles de emisiones de vehículos a diésel y gasolina a partir del análisis del EC2, como indicador de impacto de las emisiones diésel en la zona de influencia de la Estación PJIC y de la cuantificación de OC2 y OC3 en la Estación MED-BEME, indicador de emisiones de vehículos a gasolina, ambos hallazgos en coherencia con la flota vehicular característica de cada zona (Cao et al., 2006; Liu et al., 2006).

Página 252 de 264







- Las 30 especies caracterizadas incluyendo las ocho (8) fracciones de materia carbonácea, fueron claves para la identificación independiente de los perfiles preliminares de vehículos diésel, gasolina y fuentes secundarias. Además es una experiencia exitosa en la identificación de los trazadores de quemas de biomasa OC1, K, y su presencia en el PM2.5 transportado por corrientes regionales, de alto impacto en la calidad del aire del Valle de Aburrá
- Se obtuvo una reconstrucción de la masa RM del 98 % a partir del balance másico de la masa PM2.5 para el 80% de las muestras según avance de la Fase II, cerrando altamente el balance masico dando confiabilidad a los aportes de las fuentes que arroja el Modelo PMF en la fase preliminar y bases sólidas para la continuidad de las caracterizaciones.
- ➤ El mayor aporte al PM2.5 en la zona habitacional Belén Las Mercedes fue debiro al polvo resuspendido (21.9%), según su perfil, emisiones mezcladas non exhaust, sumado a trazadores de partículas originadas por incendios y quema de biomasas.Las emisiones de calderas de carbón aportaronn un 12 % al PM2.5, proveniente de la industria ladrillera cercana. Y fue notable la cuantificación de un 12% en el aporte de fuentes secundarias, formadas por la fotoquímica atmosférica y por la adición de extraemisiones por eventos de contaminación locales y/ o regionales.
- Las fuentes vehiculares fueron discriminadas en el balance másico, siendo el aporte de los vehículos a gasolina del 17.7 % y a Diésel del 16.8%, para un total del 34.5% para emisiones vehiculares, en coherencia con una mayor circulación los vehículos livianos en la zona y la mayor emisión en PM2.5 de los vehículos pesados como volquetas con transporte de materiales.
- No logro diferenciarse una fuente mezcla de otros perfiles industriales, denominada mezcla irresoluble y por ello, será parte del trabajo pendiente del proyecto en su Fase III.
- La fase de modelación PMF, la interpretación y el ajuste de los datos arrojados, permitieron correlacionar de manera muy aproximada, la correspondencia entre los datos estimados y los observados, determinándose, seis (6) perfiles definidos de fuentes del PM2.5, y sus correspondientes aportes. Los factores identificados fueron explicados por los balances de masa del PM2.5 existentes en la región y los reportes científicos, para su recomendación como indicadores de las medidas del PIGECA para el mejoramiento de la calidad del aire.
- Según los análisis de retrotrayectorias, para varios episodios de contaminación atmosférica al interior del Valle de Aburrá (7 a 10 9 de abril, agosto 7 y 16), se identificó transporte de aerosoles provenientes de incendios en la región del

Página 253 de 264







Casanare, Arauca y Cesar (abril) y desde la Selva Amazónica en territorio brasilero (agosto), reconociéndose la influencia de eventos regionales de aerosoles sobre la calidad del aire al interior del valle en diferentes periodos y aportando al mayor conocimiento de las fuentes externas de emisiones atmosféricas para el Valle de Aburrá.

- A partir del análisis satelital de imágenes se visualizaron capas de aerosoles desde diferentes escalas útiles para la identificación de masas de aire transportadas hacia Colombia principalmente y con limitantes de observación de ingreso al Valle debido a la alta nubosidad.
- Fue posible identificar diferentes plumas de humo en la mayoría de regiones de América del Sur y de África durante días de monitoreo, siendo posible el análisis, forma, dirección del viento y niveles de AOD.
- ➤ De acuerdo con los resultados del SOC con un 17.6% generado por reacciones secundarias en la zona de estudio, puede concluirse que una de las acciones a fortalecer propuestas en el PIGECA es la creación e implementación de una norma de Rigor subsidiario que establezca límites a vapores de gasolina a lo largo del proceso, lo cual resulta de alto impacto, dada la evidencia de una formación de PM2.5 secundario cada vez en mayor proporción.

RECOMENDACIONES

- Con base en el comportamiento del PM2.5 en la zona tipo habitacional se soporta técnicamente la ampliación del horario del programa pico y placa en el rango mínimo de 6 a 10 am y de 4 a 8 pm.
- Darle continuidad a la implementación de planes empresariales de movilidad sostenible- planes MES y ampliar su población objeto toda vez que las zonas de tráfico y suburbanas industriales y urbanas presentan mayor impacto del tráfico, en los cuales estos planes tienen un efecto importante sobre la reducción de la movilidad, siendo menester, el seguimiento periódico a los resultados de las estrategias implementadas y articularlas a un sistema de información robusto y confiable.
- Fortalecer la optimización de la operación de los sistemas de control de emisiones de fuentes fijas orientado a la reducción de emisiones, tiene un alto peso, toda vez que los efectos de las emisiones de carbón se identifican en todas las zonas, con mayor influencia en zonas de mayor cercanía a ladrilleras y plantas térmicas de carbón.

Página 254 de 264







- ➤ Continuar con el trabajo de generación e implementación de una norma metropolitana que establezca el suministro de gasolina y diésel vehicular a proveedores con ultra bajo contenido en azufre. Sumado al diseño e implementación de un programa para el control y seguimiento a las condiciones de suministro, verificado en un sistema de información robusto y confiable.
- Una acción altamente pertinente de acuerdo con los resultados del estudio y específicamente a la presencia de fracciones de OC2 y OC3 en el PM2,5. se refiere a fortalecer la instalación de sistemas de recuperación de vapores de gasolina a lo largo del proceso de almacenamiento, transporte y suministro, dado que la zona habitacional por sus fenómenos de transporte y recepción de contaminantes evidencia alta formación de PM2,5 por reacciones secundarias en las cuales los COVs son precursores de alto impacto.
- Intensificar los esfuerzos para la creación e implementación de una norma de Rigor subsidiario que establezca limites a vapores de gasolina a lo largo del proceso, resulta también de alto impacto, dada la evidencia de una formación de PM2.5 secundario cada vez en mayor proporción.
- ➤ En el componente de la prevención de las quemas de biomasa, desde la Gestión interinstitucional, y teniendo en cuenta el carácter regional evidenciado, una organización para la prevención y el control de incendios debe emprenderse a partir del gobierno nacional hasta los gobiernos locales, extendiéndose por todo el país, incluyendo a todas las autoridades ambientales, organismos de apoyo y la academia. Siendo fundamental la definición de las funciones de coordinación entre los organismos gubernamentales a todos los niveles.
- ➤ El problema de la quema de biomasa evidenciada demanda soluciones desde diversos ángulos: lo normativo, el nuevo conocimiento técnico y científico integrado a la generación, control y seguimiento de sistemas de información robustos y confiables y a las herramientas tecnológicas disponibles, donde la integración de la academia y organismos de apoyo a la gestión ambiental municipal, resultan fundamentales; desde la educación comunitaria y cultura en buenas practicas rurales y agrícolas, y desde la vigilancia, control y seguimiento que debe fortalecerse en las autoridades ambientales, todo ello soportado en un sistema de información robusto y confiable que permita su seguimiento en el tiempo, y la toma de decisiones.
- En cuanto a las ZUAP, dada la importancia e impacto de las emisiones vehiculares y el comportamiento de la concentración PM2,5 máxima en los horarios de 6-10 am, 5 a 9 pm, se hace necesario establecer horarios más ampliados para la restricción a la circulación de vehículos. El estudio evidenció una vez más, el impacto de emisiones de combustión industrial derivadas de la dispersión de contaminantes que

Página 255 de 264







afectan no sólo las zonas de influencia, sino también las de mayor lejanía, por lo que resulta pertinente para las ZUAP reglamentadas, implementar la medida de optimización de sistemas de control de emisiones y seguimiento integrado a un sistema de información.

Considerando el impacto de las quemas de biomasa en la calidad del aire a nivel de país incluyendo el Valle de Aburrá, evidenciado por este estudio y por diversos expertos, y dada la condición de protección de las ZUAP, resulta fundamental implementar acciones de control de estas fuentes difusas.







7. BIBLIOGRAFÍA

- Allen, A. G., & Miguel, A. H. (1995). Biomass Banting in the Amazon: Characterization of the Ionic Component of Aerosols Generated from Flaming and Smouldering Rainforest and Savannah. *Environmental Science and Technology*, 29, 486–493. https://doi.org/10.1021/es00002a026
- Allen, J. O., Mayo, P. R., Hughes, L. S., Salmon, L. G., & Cass, G. R. (2001). Emissions of size-segregated aerosols from on-road vehicles in the Caldecott Tunnel. *Environmental Science and Technology*, *35*, 4189–4197. https://doi.org/10.1021/es0015545
- APHA, AWWA, & WEF. (2012a). 3030 A y B: "Preliminary Treatment of Samples", Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (22nd ed.). Washington, DC 20001-3710.
- APHA, AWWA, & WEF. (2012b). 3125 A y B: "Metals Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry", Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (22nd ed.). Washington, DC 20001-3710.
- APHA, AWWA, & WEF. (2012c). 4110 B: "Cromatografía de aniones con supresión química de la conductividad del disolvente", Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. Washington, DC 20001-3710.
- Area Metropolitana del Valle de Aburrá, & Politecnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid. (2008). Convenio 543 de 2008: Caracterización PM2.5 en tres zonas del Valle de Aburrá.
- Area Metropolitana del Valle de Aburrá, & Politecnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid. (2010). Campaña de caracterización 2010. Medellín - Colombia.
- Area Metropolitana del Valle de Aburrá, & Politecnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid. (2019a). Campaña Caracterización 2019. Medellín - Colombia.
- Area Metropolitana del Valle de Aburrá, & Politecnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid. (2019b). Convenio interadministrativo 1215 de 2018 (p. 225). p. 225.
- Area Metropolitana del Valle de Aburrá, & Universidad Nacional de Colombia. (2018). Encuesta de Origen Destino Análisis de Viajes. Retrieved from https://www.metropol.gov.co/encuesta_od2017_v2/index.html#/
- Asociación Colombiana de vehículos automotores. (2018). *Informe Vehículos Diciembre Colombia*, 2018.
- Asociación Colombiana de vehículos Automotores. (2016). *Informe de vehículos Colombia diciembre 2016.* (p. 20). p. 20.
- Banerjee, T., Murari, V., Kumar, M., & Raju, M. P. (2015). Source apportionment of airborne particulates through receptor modeling: Indian scenario. *Atmospheric Research*, *164*, 167–187. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2015.04.017
- Begam, G. R., Vachaspati, C. V., Ahammed, Y. N., Kumar, K. R., Babu, S. S., & Reddy, R. R. (2016). Measurement and analysis of black carbon aerosols over a tropical semi-arid station in Kadapa, India. *Atmospheric Research*. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2015.12.014
- Behrentz, E., Sánchez, N., Fandiño, M., & Rodriguez, P. (2009). *Elementos técnicos del plan decenal de descontaminación de Bogotá*. Bogotá.
- Bray, C. D., Strum, M., Simon, H., Riddick, L., Kosusko, M., Menetrez, M., ... Rao, V. (2019). An assessment of important SPECIATE profiles in the EPA emissions modeling platform and current data gaps. *Atmospheric Environment*, 207, 93–104. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.03.013
- Brook, J. R., Dann, T. F., & Burnett, R. T. (1997). The relationship among TSP, PM10, PM2.5, and inorganic constituents of atmospheric particulate matter at multiple Canadian locations. *Journal of the Air and Waste Management Association*, *47*, 2–19. https://doi.org/10.1080/10473289.1997.10464407
- Brown, S. G., Eberly, S., Paatero, P., & Norris, G. A. (2015). Methods for estimating uncertainty in PMF solutions: Examples with ambient air and water quality data and guidance on reporting

Página 257 de 264







- PMF results. *Science of the Total Environment*, *518–519*, 626–635. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.01.022
- Cao, J. J., Lee, S. C., Ho, K. F., Fung, K., Chow, J. C., & Watson, J. G. (2006). Characterization of Roadside Fine Particulate Carbon and its Eight Fractions in Hong Kong. *Aerosol and Air Quality Research*, *6*, 106–122. https://doi.org/10.4209/aaqr.2006.06.0001
- Cao, J. J., Wu, F., Chow, J. C., Lee, S. C., Li, Y., Chen, S. W., ... Liu, S. X. (2005). Characterization and source apportionment of atmospheric organic and elemental carbon during fall and winter of 2003 in Xi'an, China. *Atmospheric Chemistry and Physics*, *5*, 3127–3137. https://doi.org/10.5194/acp-5-3127-2005
- Chebbi, A., & Carlier, P. (1996). Carboxylic acids in the troposphere, occurrence, sources, and sinks: A review. *Atmospheric Environment*, 30(24), 4233–4249. https://doi.org/10.1016/1352-2310(96)00102-1
- Chemistry, A., & Andreae, M. O. (2006). and Physics Black carbon or brown carbon? The nature of light-absorbing carbonaceous aerosols. (July). https://doi.org/10.5194/acp-6-3131-2006
- Chen, L. A., Chow, J. C., Wang, X. L., Robles, J. A., Sumlin, B. J., Lowenthal, D. H., & Zimmermann, R. (2015). *Multi-wavelength optical measurement to enhance thermal / optical analysis for carbonaceous aerosol.* 451–461. https://doi.org/10.5194/amt-8-451-2015
- Chow, J. C. (1985). A composite modeling approach to assess air pollution source/receptor relationships. Harvard University.
- Chow, J. C., Watson, J. G., Pritchett, L. C., Pierson, W. R., Frazier, C. A., & Purcell, R. G. (1993). The DRI Thermal/Optical Re• ectance Carbon AnalysisSystem:Description, Evaluation and Applications in U.S.Air Quality Studies. *Atmospheric Environment*, 27A, 1185–1201.
- Chow, Judith C., Lowenthal, D. H., Chen, L. W. A., Wang, X., & Watson, J. G. (2015). Mass reconstruction methods for PM2.5: a review. *Air Quality, Atmosphere and Health*, 8(3), 243–263. https://doi.org/10.1007/s11869-015-0338-3
- Chow, Judith C., Watson, J. G., Chen, L. W. A., Arnott, W. P., Moosmüller, H., & Fung, K. (2004). Equivalence of elemental carbon by thermal/optical reflectance and transmittance with different temperature protocols. *Environmental Science and Technology*, 38(16), 4414–4422. https://doi.org/10.1021/es034936u
- Chow, Judith C., Watson, J. G., Crow, D., Lowenthal, D. H., & Merrifield, T. (2001). Comparison of IMPROVE and NIOSH Carbon Measurements. *Aerosol Science and Technology*, 34(1), 23–34. https://doi.org/10.1080/02786820119073
- Chow, Judith C., Watson, J. G., Kuhns, H., Etyemezian, V., Lowenthal, D. H., Crow, D., ... Green, M. C. (2004). Source profiles for industrial, mobile, and area sources in the Big Bend Regional Aerosol Visibility and Observational study. *Chemosphere*, *54*, 185–208. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2003.07.004
- Chow, Judith C., Watson, J. G., Lowenthal, D. H., Solomon, P. A., Magliano, K. L., Ziman, S. D., & Willard Richards, L. (1992). PM10 source apportionment in California's San Joaquin valley. *Atmospheric Environment Part A, General Topics*. https://doi.org/10.1016/0960-1686(92)90350-T
- Chow, Judith C, Wang, X., Green, M. C., & Watson, J. G. (2019). Obtaining More Information from Existing Filter Samples in PM Speciation Networks. *The Magazine for Environmental Managers*, 15–19.
- Clarke, A., McNaughton, C., Kapustin, V., Shinozuka, Y., Howell, S., Dibb, J., ... Pinkerton, M. (2007). Biomass burning and pollution aerosol over North America: Organic components and their influence on spectral optical properties and humidification response. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 112. https://doi.org/10.1029/2006JD007777
- DeBell, L., Gebhart, K., Hand, J., Malm, W., Pitchford, M., & Schichtel, B. (2006). Spatial and seasonal patterns and temporal variability of haze and its constituents in the United States. Fort Collins, CO.
- Environmental Protection Agency (EPA). (1999). Compendium Method IO-3.5 Determination of Página 258 de 264





INTEGRADOS



- metals in ambient particulate Matter Using Inductively Coupled Plasma/ Mass Spectrometry (ICP/MS). Determination of Metals in Ambient Particulate Matter Using Atomic Absorption (Aa) Spectroscopy, (June), 1-35.
- Feng, J., Chan, C. K., Fang, M., Hu, M., He, L., & Tang, X. (2006). Characteristics of organic matter Shanghai. Chemosphere, 1393-1400. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2005.12.026
- Friedrich, M. (2016). Air Pollution Highest in World's Poorest Cities. JAMA2, 3(7), 259.
- Gaviria Garcés, C., Muñoz M., J., & González, G. (2012). Contaminación del aire y vulnerabilidad de individuos expuestos: un caso de estudio para el centro de Medellín. Facultad Nacional de Salud Pública: El Escenario Para La Salud Pública Desde La Ciencia, 30(3), 316-327.
- Genga, A., Ielpo, P., Siciliano, T., & Siciliano, M. (2017a). Carbonaceous particles and aerosol mass closure in PM2.5 collected in a port city. Atmospheric Research, 183, 245-254. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2016.08.022
- Genga, A., Ielpo, P., Siciliano, T., & Siciliano, M. (2017b). Carbonaceous particles and aerosol mass closure in PM2.5 collected in a port city. Atmospheric Research, 183, 245-254. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2016.08.022
- Genga, A., Ielpo, P., Siciliano, T., & Siciliano, M. (2017c). Carbonaceous particles and aerosol mass closure in PM2 . 5 collected in a port city. Atmospheric Research, 183, 245-254. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2016.08.022
- Gómez D., Dawidowski L., Giné M.F., Sánchez Bellato A., R. J. . (2004). Monitoring trace metals in urban aerosols from Buenos Aires city. Environmental Monitoring, 6, 286–294.
- Gómez D., Giné A., Sánchez P., S. J. (2005). Antimony: A traffic-related element in the atmosphere of Buenos Aires. Environmental Monitoring, 7, 1162-1168.
- Gómez Marín, M., Benitez Rojas, D., Marín Angel, J., Ramirez Arredondo, E., Dawidowski, L., & Posada Restrepo, E. (2015). Campaña de caracterización PM2.5 en el Valle de Aburrá 2014-2015. Convenio de asociación No. CA 315 de 2014 Subdirección Ambiental (p. 116). p. 116.
- Gu, J., Bai, Z., Liu, A., Wu, L., Xie, Y., Li, W., & Dong, H. (2010). Characterization of Atmospheric Organic Carbon and Element Carbon of PM 2 . 5 and PM 10 at Tianjin , China. 167-176. https://doi.org/10.4209/aaqr.2009.12.0080
- Guo, H., Zhang, Q. yu, SHI, Y., & Wang, D. hui. (2007). Evaluation of the International Vehicle Emission (IVE) model with on-road remote sensing measurements. Journal of Environmental Sciences, 19(7), 818–826. https://doi.org/10.1016/S1001-0742(07)60137-5
- Han, Y. M., Lee, S. C., Cao, J. J., Ho, K. F., & An, Z. S. (2009). Spatial distribution and seasonal variation of char-EC and soot-EC in the atmosphere over China. Atmospheric Environment, 43, 6066-6073. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.08.018
- Hansen, A. D. A., Rosen, H., & Novakov, T. (1984). The aethalometer An instrument for the realtime measurement of optical absorption by aerosol particles. Science of the Total Environment, The. https://doi.org/10.1016/0048-9697(84)90265-1
- Hansen, J., Sato, M., Ruedy, R., Nazarenko, L., Lacis, A., Schmidt, G. A., ... Zhang, S. (2005). Efficacy of climate forcings. Journal of Geophysical Research D: Atmospheres, 110. https://doi.org/10.1029/2005JD005776
- He, L. Y., Hu, M., Huang, X. F., Zhang, Y. H., Yu, B. De, & Liu, D. Q. (2006). Chemical characterization of fine particles from on-road vehicles in the Wutong tunnel in Shenzhen, China. Chemosphere, 62(10), 1565–1573. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2005.06.051
- Hei, & IHME. (2019). A SPECIAL REPORT ON GLOBAL EXPOSURE TO AIR POLLUTION AND ITS DISEASE BURDEN. In Boston, MA: Health Effects Institute.
- Hitzenberger, R., Jennings, S. G., Larson, S. M., Dillner, A., Cachier, H., Galambos, Z., ... Spain, T. G. (1999). Intercomparison of measurement methods for black carbon aerosols. Atmospheric Environment, 33, 2823–2833. https://doi.org/10.1016/S1352-2310(98)00360-4
- Javitz, H. ., & Watson, J. G. (1988). Feasibdity Study of Receptor Modeling for Apportion~ng Utility Contributions to Air Constituents, Deposztlon Quality and Light Extinction. CA.

Página 259 de 264







- Krecl, P., Targino, A. C., Wiese, L., Ketzel, M., & de Paula Corrêa, M. (2016). Screening of short-lived climate pollutants in a street canyon in a mid-sized city in Brazil. *Atmospheric Pollution Research*, 7(6), 1022–1036. https://doi.org/10.1016/j.apr.2016.06.004
- Lewis, C. W., Norris, G. A., Conner, T. L., & Henry, R. C. (2003). Source Apportionment of Phoenix PM2.5 aerosol with the unmix receptor model. *Journal of the Air and Waste Management Association*, *53*(3), 325–338. https://doi.org/10.1080/10473289.2003.10466155
- Li, H., Feng, J., Sheng, G., Lü, S., Fu, J., Peng, P., & Man, R. (2008). The PCDD/F and PBDD/F pollution in the ambient atmosphere of Shanghai, China. *Chemosphere*, *70*, 576–583. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2007.07.001
- Liang, C. S., Duan, F. K., He, K. Bin, & Ma, Y. L. (2016). Review on recent progress in observations, source identifications and countermeasures of PM 2.5. *Environment International*, 86, 150–170. https://doi.org/10.1016/j.envint.2015.10.016
- Liu, W., Wang, Y., Russell, A., & Edgerton, E. S. (2006). Enhanced source identification of southeast aerosols using temperature-resolved carbon fractions and gas phase components. *Atmospheric Environment*, 40, 445–466. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.11.079
- Lopes, F. (2011). Validação dos dados do satélite CALIPSO utilizando um sistema lidar de retroespalhamento elástico e o fotômetro solar da rede AERONET. Sao Paulo: Universidade de São Paulo.
- Lunes de ciudad, Piñeros Jimenez, J. G., Hoyos Ortiz, C. D., & VieiraCatherin. (2020). ¿Por qué no mejora el aire? Medellín Colombia: Facebook Live.
- Maenhaut, W., Raes, N., Chi, X., Cafmeyer, J., & Wang, W. (2008). Chemical composition and mass closure for PM2.5 and PM 10 aerosols at K-puszta, Hungary, in summer 2006. *X-Ray Spectrometry*, 37, 193–197. https://doi.org/10.1002/xrs.1062
- Malm, W.C, Iyer, H. ., & Gebhart, K. . (1990). Application of tracer mass balance regression to WHITEX data. In *Transactions, Visibility and Fine Particles. Air Waste Management Association*. Pittsburgh.
- Malm, William C., & Day, D. E. (2000). Optical properties of aerosols at Grand Canyon National Park. *Atmospheric Environment*, *34*, 3373–3391. https://doi.org/10.1016/S1352-2310(00)00108-4
- Mantas, E., Remoundaki, E., Halari, I., Kassomenos, P., Theodosi, C., Hatzikioseyian, A., & Mihalopoulos, N. (2014). Mass closure and source apportionment of PM2.5 by Positive Matrix Factorization analysis in urban Mediterranean environment. *Atmospheric Environment*, *94*, 154–163. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.05.002
- Marmot, M., & Bell, R. (2019). Social determinants and non-communicable diseases: time for integrated action. *BJM.* https://doi.org/10.1136/bmj.l251
- Martins Pereira, G., Teinilä, K., Custódio, D., Gomes Santos, A., Xian, H., Hillamo, R., ... Vasconcellos, P. D. C. (2017). Particulate pollutants in the Brazilian city of Saõ Paulo: 1-year investigation for the chemical composition and source apportionment. *Atmospheric Chemistry and Physics*, *17*(19), 11943–11969. https://doi.org/10.5194/acp-17-11943-2017
- Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo territorial. (2008). *Protocolo para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire* (p. 287). p. 287.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo sostenible. (2017). Resolución 2254 (p. 11). p. 11.
- Neira, M., & Prüss-Ustün, A. (2016). Preventing disease through healthy environments: A global assessment of the environmental burden of disease. *Toxicology Letters*, p. 176. https://doi.org/10.1016/j.toxlet.2016.07.028
- NIOSH. (1999). NIOSH. (1999). Elemental Carbon (Diesel Particulate): Method 5040. Manual of Analytical Methods, 1–9. Elemental Carbon (Diesel Particulate): Method 5040. Manual of Analytical Methods, 1–9.
- Nisperuza Toledo, D. J. (2015). Propiedades ópticas de los aerosoles atmosféricos en la Región Andina Colombiana mediante análisis de mediciones remotas: LIDAR, fotométricas y satelitales. Universidad Nacional de Colombia-Sede Medellín.
- Novakov, T. (1984). The role of soot and primary oxidants in atmospheric chemistry. 36.

Página 260 de 264







- OCDE. (2012). Perspectivas ambientales de la OCDE hacia 2050.
- OIEA-RLA7023. (2020). Regional Training Course on Advanced Source Apportionment Techniques. Montevideo - Uruguay.
- Paatero, P., & Tapper, U. (1994). Positive matrix factorization: a non-negative factor model with optimal utilization of error estimates of data values. *Environmetrics*, *5*, 111–126.
- Pandis, S. N., Harley, R. A., Cass, G. R., & Seinfeld, J. H. (1992). Secondary organic aerosol formation and transport. *Atmospheric Environment Part A, General Topics*, *26*, 2269–2282. https://doi.org/10.1016/0960-1686(92)90358-R
- Pindado, O., R., P., & García, S. (2013). Desarrollo del Modelo de Factorización de la Matriz Positiva (PMF) al Estudio Anual de la Composición Orgánica del PM2.5 en Chapinería. *Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas*, 64.
- Pio, C., Cerqueira, M., Harrison, R. M., Nunes, T., Mirante, F., Alves, C., ... Matos, M. (2011). OC/EC ratio observations in Europe: Re-thinking the approach for apportionment between primary and secondary organic carbon. *Atmospheric Environment*, *45*, 6121–6132. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.08.045
- Placeres, M. R., Olite, F. D., & Toste, M. Á. (2006). La contaminación del aire: Su repercusión como problema de salud. *Revista Cubana de Higiene y Epidemiologia*, *44*(2).
- Polichetti, G., Cocco, S., Spinali, A., Trimarco, V., & Nunziata, A. (2009). Effects of particulate matter (PM10, PM2.5 and PM1) on the cardiovascular system. *Toxicology*, *261*(1–2), 1–8. https://doi.org/10.1016/j.tox.2009.04.035
- Politecnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid, Ecopetrol, Area Metropolitana del Valle de Aburrá, & Universidad Pontificia Bolivariana. (2020). Taller de expertos Modelos Receptores Valle de Aburrá. Taller de Expertos Valle de Aburrá, Medellín Febrero 27 de 2020. Medellín Colombia.
- Querol, X., Alastuey, A., Viana, M., Moreno, T., Reche, C., Minguillón, M. C., ... Fernández Patier, R. (2013). Variability of carbonaceous aerosols in remote, rural, urban and industrial environments in Spain: Implications for air quality policy. *Atmospheric Chemistry and Physics*, *13*, 6185–6206. https://doi.org/10.5194/acp-13-6185-2013
- Rojas, J. C., Duque, J. A. C., & Hernández, F. (2017). Metodología para medir las concentraciones de aerosoles atmosféricos usando técnicas de teledetección. *Puente*, *9*(2), 61–77.
- Santanna, F. B., De Almeida Filho, E. O., Vourlitis, G. L., De Arruda, P. H. Z., Da Silva Palácios, R., & De Souza Nogueira, J. (2016). Elemental composition of PM10 and PM2.5 for A savanna (cerrado) region of Southern Amazonia. *Quimica Nova*, 39(10), 1170–1176. https://doi.org/10.21577/0100-4042.20160154
- Schauer, J. J., Fraser, M. P., Cass, G. R., & Simoneit, B. R. T. (2002). Source reconciliation of atmospheric gas-phase and particle-phase pollutants during a severe photochemical smog episode. *Environmental Science and Technology*, *36*, 3806–3814. https://doi.org/10.1021/es011458j
- Schauer, J. J., Kleeman, M. J., Cass, G. R., & Simoneit, B. R. T. (1999). Measurement of emissions from air pollution sources. 1. C1 through C29 organic compounds from meat charbroiling. *Environmental Science and Technology*, 33, 1578–1587. https://doi.org/10.1021/es980076j
- Sillanpää, M., Hillamo, R., Saarikoski, S., Frey, A., Pennanen, A., Makkonen, U., ... Salonen, R. O. (2006). Chemical composition and mass closure of particulate matter at six urban sites in Europe. *Atmospheric Environment*, 40(SUPPL. 2), 212–223. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.01.063
- Sobrino, J. A., Raissouni, N., Kerr, Y., Olioso, A., Lopez Garcia, M., Belaid, A., & Cuenca, J. (2001). *Teledetección* (J. A. Sobrino, Ed.). Valencia, España: Universitat de Valencia.
- Song, X., Polissar, A. V, & Hopke, P. K. (2001). Sources of fine particle composition in the northeastern US. 35(January), 5277–5286.
- Sonibare, J. A., Akeredolu, F. A., Osibanjo, O., & Latinwo, I. (2005). ED-XRF Analysis of Total Suspended Particulates from Enamelware Manufacturing Industry. *American Journal of Applied Sciences*, 2(2), 573–578. https://doi.org/10.3844/ajassp.2005.573.578

Página 261 de 264







- Srinivas, B., & Sarin, M. M. (2014). PM2.5, EC and OC in atmospheric outflow from the Indo-Gangetic Plain: Temporal variability and aerosol organic carbon-to-organic mass conversion factor. Science of the Total Environment, 487, 196–205. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.04.002
- Suarez Moreno, D. S., & Piñeros Jimenez, J. G. (2019). Sistematización de experiencias sobre sistemas de vigilancia de calidad del aire y salud en distintas ciudades de Latinoamérica y el Caribe. VII Congreso Colombiano y Conferencia Internacional de Calidad Del Aire y Salud Pública, 1–14.
- Tegen, I., Hollrig, P., Chin, M., Fung, I., Jacob, D., & Penner, J. (1997). Contribution of different aerosol species to the global aerosol extinction optical thickness: Estimates from model results. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 102, 23895–23915. https://doi.org/10.1029/97jd01864
- Thurston, G. D., & Spengler, J. D. (1985). A quantitative assessment of source contributions to inhalable particulate matter pollution in metropolitan Boston. *Atmospheric Environment* (1967), 19(1), 9–25. https://doi.org/10.1016/0004-6981(85)90132-5
- Turpin, B. J., & Huntzicker, J. J. (1995). Identification of secondary organic aerosol episodes and quantitation of primary and secondary organic aerosol concentrations during SCAQS. *Atmospheric Environment*, 29, 3527–3544. https://doi.org/10.1016/1352-2310(94)00276-Q
- US-EPA. (2014). *EPA Positive M atrix Factorization (PM F) 5 . 0 Fundamentals and.* 136. Retrieved from https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-02/documents/pmf_5.0_user_guide.pdf
- USEPA. (1999). Compendium of Methods for the Determination of Toxic Organic Compounds in Ambient Air, Compendium Method TO-13A: Determination of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Ambient Air Using Gas Chromatography/Mass Spectrometry (GC/MS). Center for Environmental Research Information Office of Research and Development U.S. Environmental Protection Agency Cincinnati, OH 45268, II(EPA/625/R-96/010b), 78.
- Valavanidis, A., Fiotakis, K., Vlahogianni, T., Bakeas, E. B., Triantafillaki, S., Paraskevopoulou, V., & Dassenakis, M. (2006). Characterization of atmospheric particulates, particle-bound transition metals and polycyclic aromatic hydrocarbons of urban air in the centre of Athens (Greece). *Chemosphere*, 65, 760–768. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2006.03.052
- Valencia Hernandez, G. M., Gomez Marín, M., Maya, G. J., & Toro Gómez, M. V. (2019). Evidencias de porque el Valle de Aburrá hay permanencia de las altas concentraciones de material particulado PM2.5 durante el periodo de Aislamiento Social ocasionado por el COVD19 (p. 16). p. 16. Medellín Colombia.
- Vargas, F. A., & Rojas, N. Y. (2010). Chemical composition and mass closure for airborne particulate matter in Bogotá. *Ingenieria e Investigacion*, *30*(2), 105–115.
- Viana, M., Pandolfi, M., Minguillón, M. C., Querol, X., Alastuey, A., Monfort, E., & Celades, I. (2008). Inter-comparison of receptor models for PM source apportionment: Case study in an industrial area. *Atmospheric Environment*. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.12.056
- Wang, D., Hu, J., Xu, Y., Lv, D., Xie, X., Kleeman, M., ... Ying, Q. (2014). Source contributions to primary and secondary inorganic particulate matter during a severe wintertime PM2.5 pollution episode in Xi'an, China. *Atmospheric Environment*, 97, 182–194. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.08.020
- Wang, Y., Zhuang, G., Xu, C., & An, Z. (2007). The air pollution caused by the burning of fireworks during the lantern festival in Beijing. *Atmospheric Environment*, 41(2), 417–431. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.07.043
- Watson, J. G. (1979). *Dissertation*. University Microfilms.
- Watson, John G. (2004). Protocol for Applying and Validating the CMB Model for PM 2.5 and VOC. *US. Environmental Protection Agency*.
- Zhang, M., Han, Z., & Zhu, L. (2007). Simulation of atmospheric aerosols in East Asia using modeling system RAMS-CMAQ: Model evaluation. *China Particuology*, *5*, 321–327. https://doi.org/10.1016/j.cpart.2007.07.002

Página 262 de 264







- Zhang, X., Lin, Y. H., Surratt, J. D., Zotter, P., Prévôt, A. S. H., & Weber, R. J. (2011). Light-absorbing soluble organic aerosol in Los Angeles and Atlanta: A contrast in secondary organic aerosol. *Geophysical Research Letters*, 38. https://doi.org/10.1029/2011GL049385
- Zhou, K., Ye, Y. hua, Liu, Q., Liu, A. jun, & Peng, S. lin. (2007). Evaluation of ambient air quality in Guangzhou, China. *Journal of Environmental Sciences*, 19(4), 432–437. https://doi.org/10.1016/S1001-0742(07)60072-2
- Zhu, C. S., Chen, C. C., Cao, J. J., Tsai, C. J., Chou, C. C. K., Liu, S. C., & Roam, G. D. (2010a). Characterization of carbon fractions for atmospheric fine particles and nanoparticles in a highway tunnel. *Atmospheric Environment*, 44, 2668–2673. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.04.042
- Zhu, C. S., Chen, C. C., Cao, J. J., Tsai, C. J., Chou, C. C. K., Liu, S. C., & Roam, G. D. (2010b). Characterization of carbon fractions for atmospheric fine particles and nanoparticles in a highway tunnel. *Atmospheric Environment*, *44*(23), 2668–2673. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.04.042







ANEXOS

- Anexo 2.1. Instructivo descarga de imágenes MODIS e imágenes clasificadas por AOD
- Anexo 2.2. Instructivo QUICK-LOOK
- Anexo 2.3. Instructivo para descarga y visualización imágenes CALIPSO
- Anexo 2.4. Instructivo para descarga y visualización SENTINEL 5P
- Anexo 2.5 Instructivo para el manejo del HYSPLIT
- Anexo 2.6. Procedimiento para descarga y caracterización de datos
- Anexo 3.1 FD-MEA200 Trazabilidad del dato
- **Anexo 3.2** Registro fotográfico muestras enviadas al Laboratorio de Análisis Ambiental de la Universidad de Costa Rica
- **Anexo 3.3** Soportes de envío muestras enviadas al Laboratorio de Análisis Ambiental de la Universidad de Costa Rica
- Anexo 4.1 Análisis visual imágenes satelitales MODIS 2019