

**Implementación de un modelo de análisis de dispersión atmosférica de material
particulado (PM₁₀) a través de la herramienta AERMOD VIEW en el municipio de Yumbo
(Valle del Cauca).**

Marleni Marín Ocampo

Aymer Mauricio Otalvora Martínez

Universidad Nacional Abierta y a Distancia – UNAD

CEAD Palmira

Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y de Medio Ambiente

Programa de Ingeniería Ambiental

2020

**Implementación de un modelo de análisis de dispersión atmosférica de material
particulado (PM₁₀) a través de la herramienta AERMOD VIEW en el municipio de Yumbo
(Valle del Cauca).**

Marleni Marín Ocampo

Aymer Mauricio Otalvora Martínez

Proyecto de investigación para optar el título de ingenieros ambientales

Asesor

Milton Cesar Ararat Orozco

Ingeniero Agrónomo *Ph. D.*

Universidad Nacional Abierta y a Distancia – UNAD

CEAD Palmira

Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y de Medio Ambiente

Programa de Ingeniería Ambiental

2020

Nota de aceptación

Presidente del Jurado

Jurado

Jurado

Nota obtenida: _____

Marzo de 2020

Agradecimientos

Agradecimientos a Dios por mantenernos con salud y vida, igualmente a la CVC por permitirnos acceder a la información y a sus funcionarios que directa o indirectamente participaron en la construcción y resultados de este trabajo.

Agradecemos a la UNAD y sus tutores por estar presentes en todo el proceso de educación y direccionamiento durante la carrera.

Agradecemos a nuestras familias por la comprensión y apoyo incondicional durante el proceso de construcción del trabajo de grado.

Resumen

Colombia siendo un país en crecimiento económico, cuenta con siete zonas industriales y una de las más importantes se encuentra ubicada en el suroccidente del país, Zona Industrial del municipio de Yumbo, donde hay asentadas más de 400 empresas según información registrada en Cámara y Comercio del municipio. En dicha zona, la calidad del aire presenta niveles superiores al estándar normativo para el parámetro de Material Particulado menor de 10 micras (PM_{10}), de acuerdo al informe consolidado del año 2018 presentado por la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca – CVC, dicho resultado obedece a los reportes de la Estación de Calidad del Aire (ECA) ubicada en el sector Acopi – Yumbo, sin embargo, la información obtenida en el trabajo de modelación de dispersión de PM_{10} de las fuentes fijas y fuentes de área del sector, refleja que existen otros aportantes que incrementan los niveles de PM_{10} .

En la modelación se observó que la influencia de los vientos provenientes del Occidente-Nor-Occidente (WNW) tienen mayor incidencia, con vientos superiores a 8 m/s, permitiendo la dispersión de las emisiones de MP en el sector industrial. Igualmente, los resultados de la modelación indican que el mayor aportante de MP en el sector son las actividades de explotación, transformación y comercialización de materiales de construcción (Canteras).

De acuerdo a los resultados del modelo AERMOD VIEW, es necesario que las instituciones competentes en la problemática realicen las modelaciones correspondientes a otras fuentes generadoras de PM_{10} (fuentes móviles, re-suspensión, entre otras), para tomar las medidas que permitan disminuir los niveles de contaminación de PM_{10} en el sector industrial.

Este proyecto hace parte de las actividades del semillero de investigación en producción agropecuaria sostenible SIPAS perteneciente al grupo de investigación “Producción Sostenible” de la Escuela de Ciencias Agrícolas Pecuarias y del Medio Ambiente ECAPMA.

Palabras clave: Dispersión, contaminantes atmosféricos, material particulado, concentración, modelación.

Abstract

Colombia being a country in economic growth, it has seven industrial zones and one of the most important is located in the southwest of the country, Industrial Zone of the municipality of Yumbo, where there are more than 400 companies based according to information recorded in the Chamber of Commerce and Commerce municipality. In this area, the air quality has levels higher than the regulatory standard for the Particulate Material parameter of less than 10 microns (PM10), according to the consolidated report of the year 2018 presented by the Regional Autonomous Corporation of Valle del Cauca - CVC, said The result is due to the reports of the Air Quality Station (ECA) located in the Acopi - Yumbo sector, however, the information obtained in the PM10 dispersion modeling work of the fixed sources and area sources of the sector, reflects that there are other contributors that increase PM10 levels. In the modeling it was observed that the influence of winds from the West-North-West (WNW) have a higher incidence, with winds greater than 8 m / s, allowing the dispersion of MP emissions in the industrial sector. Likewise, the results of the modeling indicate that the main contributor of MP in the sector are the activities of exploitation, transformation and commercialization of construction materials (Quarries). According to the results of the AERMOD VIEW model, it is necessary that the institutions competent in the problem carry out the modeling corresponding to other sources generating PM10 (mobile sources), to take the measures that allow to reduce the levels of PM10 contamination in the sector industrial.

This project is part of the activities of the SIPAS sustainable agricultural production research seedbed belonging to the “Sustainable Production” research group of the ECAPMA School of Agricultural and Livestock Sciences.

Keywords: Dispersion, air pollutants, Particulate material, concentration, modeling.

Tabla de contenido

Resumen.....	5
1. Planteamiento del Problema	11
2. Justificación	13
3. Objetivos.....	15
3.1. Objetivo General	15
3.2. Objetivos específicos.....	15
4 Marco Conceptual y Teórico	16
4.1 Contaminación Atmosférica.....	16
4.2 Inventario de Fuentes Fijas	16
4.3 Tipos de Contaminantes	17
4.3.1 Monóxido de carbono.	17
4.3.2 Óxidos de nitrógeno.....	17
4.3.3 Óxidos de azufre	18
4.3.4 Partículas.....	18
4.4 Trazas Atmosféricas.....	19
4.5 Contaminantes Criterio	20
4.6 Dispersión de los Contaminantes	21
4.7 Fuentes de Emisión	22
4.7.1 Fuentes fijas puntuales.....	22
4.7.2 Las fuentes de área.....	22
4.8 Monitoreo y Evaluación de la Calidad del Aire.....	23
4.9 Modelos de Dispersión.....	23
4.10 Tipos de Modelación.....	24
4.10.1 Modelos Gaussianos	24
4.10.2 Modelos urbanos y regionales	25
4.10.3 Modelos Globales	25
4.11 Modelo Aermod View.	25
4.12 Estrategias de Prevención y Control de la Contaminación:	26
5 Marco Legal.....	28
6 Diseño Metodológico	30

6.1	Fase I.....	30
6.1.1	Descripción del área de estudio.	30
6.1.2	Actualización del inventario de fuentes fijas y fuentes de área.	34
6.2	Fase II.....	39
6.2.1	Selección del modelo de dispersión.	39
6.2.2	Recolección de información meteorológica.....	39
6.2.2.1	<i>Velocidad de viento.</i>	40
6.2.2.2	<i>Estabilidad Atmosférica.</i>	41
6.2.2.3	<i>Humedad Relativa y Brillo Solar.</i>	42
6.2.2.5	<i>Ocurrencia de Velocidad y Dirección de Vientos</i>	43
6.2.2.6	<i>Vector de Temperatura.</i>	45
6.2.2.7	<i>Altura de Mezcla.</i>	45
6.2.3	Información topográfica de la zona de estudio.	48
7	Resultados y Discusión	50
7.1	Inventario de fuentes fijas con emisión de material Particulado (PM10)	50
7.2	Procesamiento información y corrida del modelo Aermid View	53
7.3	Estrategias complementarias para la información del software de la Calidad del Aire en la zona industrial del municipio de Yumbo	61
8	Conclusiones.....	63
9	Recomendaciones	65
10	Referencias Bibliográficas	67
11	Anexos	70

LISTADO DE TABLAS

<i>Tabla 1. Niveles máximos permisibles de contaminantes criterio. Fuente: Resolución No. 2254 de 2017.....</i>	21
<i>Tabla 2. Normatividad ambiental colombiana en calidad del aire.</i>	28
<i>Tabla 3. Información requerida para el procesamiento de los datos por el modelo de dispersión.</i>	35
<i>Tabla 4 Clasificación de la Estabilidad de la Atmósfera Según Pasquill-Guifford.....</i>	42
<i>Tabla 5. Descripción de las categorías de dirección de vientos</i>	43
<i>Tabla 6. Distribución Conjunta de Probabilidades.....</i>	44
<i>Tabla 7. Coeficiente de Albedo, Bowen y Rugosidad.....</i>	46
<i>Tabla 8. Distribución porcentual por tipo de suelo.....</i>	47
<i>Tabla 9. Cálculos ponderados</i>	48
<i>Tabla 10. Listado de empresas estudiadas</i>	50
<i>Tabla 11. Frecuencia por rango de velocidad del viento.....</i>	54
<i>Tabla 12. Comparación concentración de PM_{10} con niveles máximos permisibles.....</i>	57
<i>Tabla 13. Comparación estándar anual vs. Concentración diaria de PM_{10}.....</i>	60
<i>Tabla 14. Descripción del tipo de suelo</i>	78
<i>Tabla 15. Rugosidad superficial del tipo de suelo.....</i>	78

LISTADO DE ILUSTRACIONES

<i>Ilustración 1. Diseño Metodológico del trabajo de modelación de la dispersión de material Particulado en la zona</i>	30
<i>Ilustración 2. Ubicación del Departamento del Valle del Cauca y el municipio de Yumbo. Fuente: Alcaldía Yumbo</i>	31
<i>Ilustración 3. Sectores de la zona de estudio – Zona Industrial de Yumbo.....</i>	33
<i>Ilustración 4. Análisis de la zona del Proyecto para determinar Albedo, Bowen y Rugosidad... 47</i>	47
<i>Ilustración 5. Pendiente del sector de estudio corregimiento Arroyohondo – Yumbo (Fuente: GeoCVC).....</i>	49
<i>Ilustración 7. Distribución porcentual de las empresas ubicadas en los sectores de estudio</i>	51
<i>Ilustración 8. Distribución porcentual de las fuentes fijas por sector de estudio</i>	52
<i>Ilustración 9. Rosa de vientos Zona Industrial del municipio de Yumbo</i>	53
<i>Ilustración 10 Frecuencia de distribución de velocidad de viento a partir del software: Aermod View 9.16.....</i>	55
<i>Ilustración 12. Perfil de elevación de la zona de estudio. Fuente: Google earth pro.....</i>	56
<i>Ilustración 13. Concentración de PM₁₀ en el área de estudio para un periodo de 24h. (Fuente: Aermod View).....</i>	56
<i>Ilustración 14. Modelación de MP en el sector Cantera (Fuente: Aermod View).....</i>	58
<i>Ilustración 15. Modelación de concentración de MP₁₀, 24h, sector Arroyohondo. (Fuente: Aermod View).....</i>	58
<i>Ilustración 16. Modelación de dispersión MP sector Acopi – Guabinas – Las Américas. (Fuente: Aermod View).....</i>	59
<i>Ilustración 17. Ubicación ECA´s Vs. Isoconcentraciones de PM₁₀. (Fuente: Aermod View).....</i>	60
<i>Ilustración 18. Esquema de procesamiento topográfico del modelo.....</i>	74

1. Planteamiento del Problema

El aire está compuesto por una mezcla de gases (78,09% de nitrógeno, 20,95% de oxígeno, 0,93% de argón, 0,04% de dióxido de carbono y pequeñas cantidades de otros gases), que constituyen la atmosfera terrestre. Este elemento es esencial para la vida en nuestro planeta, por ello cualquier variabilidad en su composición es perjudicial, especialmente aquellas provenientes de las actividades antrópicas que provocan un efecto negativo para la vida, dichas variaciones en los constituyentes del aire son conocidos como Contaminantes Atmosféricos. (IDEAM, 2007).

De acuerdo a la ¹Organización Mundial de la Salud – OMS, “*el aire limpio es un requisito básico de la salud y el bienestar humano. Sin embargo, su contaminación sigue representando una amenaza importante para la salud en todo el mundo*”.

Muchos de los contaminantes atmosféricos proceden de fuentes fijas, como el material particulado, los dióxidos de azufre y de carbono, procedentes principalmente de las calderas que utilizan carbón como combustible. Otros compuestos son formados por la acción de la luz solar sobre materiales reactivos que previamente fueron emitidos a la atmósfera, estos se conocen con el nombre de precursores; todos los anteriores forman parte de los denominados gases de efecto invernadero, causantes del calentamiento de la tierra y de otros procesos adversos; de igual manera compuestos como los clorofluorocarbonos (CFC), han sido causantes de la disminución en la capa de ozono protectora de los rayos directos del sol.

De acuerdo a lo anterior, la contaminación atmosférica en Colombia representa uno de los mayores problemas ambientales, debido a los efectos negativos que genera sobre la salud de las personas y el medio ambiente, además el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible indica

¹ Organización Mundial de la Salud – OMS2006. Guías de Calidad del Aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre

que es el tercer factor causante de costos sociales, siendo el uso de combustibles fósiles la principal causa de emisiones móviles o fijas. (Minambiente, 2019).

Por lo anterior, el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, hoy Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, expidió las Resoluciones 909 de 2008 y 2254 de 2017, donde establece los estándares para contaminantes criterio, Dióxido de Nitrógeno (NO_x), Dióxido de Azufre (SO_x), Material Particulado de 10 micras (PM_{10}) y 2.5 micras ($\text{PM}_{2.5}$), Monóxido de Carbono (CO), Ozono (O_3) y Plomo (Pb), tanto a nivel de emisión como de inmisión, respectivamente, sobre los cuales se ejerce un mayor control por parte de las autoridades ambientales.

Para nuestro caso de estudio se realizó una modelación de las emisiones de las fuentes fijas y fuentes de área (canteras) que emiten material particulado en la zona industrial del municipio de Yumbo, teniendo en cuenta, el interés por conocer la dispersión del contaminante hacia receptores susceptibles como es la comunidad del municipio de Cali y la zona urbana del municipio de Yumbo. Tomando como base los datos de calidad del aire reportados por la estación Acopi – El Pais, operada por la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca, se obtuvieron los siguientes resultados de PM_{10} para el año 2018, presentando un promedio de $71.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, tomando como referencia el estándar anual de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ establecido en la Resolución 2254 de 2017, se evidencia un incumplimiento normativo en el citado sector. (CVC, 2018).

Es de anotar, que las empresas ubicadas en los sectores estudiados presentan periódicamente los informes de emisiones atmosféricas por fuentes fijas puntuales (chimeneas), de acuerdo a la Unidad de Control Ambiental (UCA), que define la frecuencia de o periodicidad con la que se deben presentar los informes de emisiones para cada contaminante analizado.

2. Justificación

Una de las áreas de interés de la ingeniería ambiental en los estudios de calidad de aire se basa en el conocimiento del transporte de los contaminantes que son emitidos a la atmósfera por diversas fuentes, ya sea de origen natural o antrópico. La normatividad ambiental en este sentido es cada vez más estricta y exige la aplicación de modelos matemáticos para evaluar el impacto de las actividades industriales, equipos de combustión externa, instalaciones de incineración, parque automotor, entre otros; para entender el comportamiento de los contaminantes en la atmósfera, evaluar el impacto ambiental generado, establecer los mecanismos de prevención y control tanto de fuentes fijas como de fuentes móviles y dar cumplimiento a los estándares de emisión y descarga de los contaminantes.

Para la elección del modelo de dispersión atmosférica se requieren las variables meteorológicas, las cuales pueden presentar problemas, sin embargo, existen ecuaciones matemáticas donde se especifican los valores de las variables, los parámetros, el tipo de contaminante emitido, la complejidad de la fuente y el tipo de topografía que rodea la instalación. Por lo anterior, se seleccionó el modelo AERMOD VIEW, como uno de los modelos más reconocidos por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA USA).

Con el desarrollo del trabajo se determinó la dispersión del Material Particulado menor de 10 micras (PM_{10}) en la zona industrial de Yumbo, cuyo parámetro está contemplado como un contaminante criterio en la Resolución 2254 de 2017, el cual es monitoreado por la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca – CVC -, debido al impacto negativo que puede llegar a tener sobre la salud de la población, es decir, como precursor de enfermedades respiratorias, las cuales van directamente ligadas a mayores costos en la salud a nivel nacional y local.

En este sentido, la importancia en conocer la dispersión de los contaminantes emitidos por las fuentes fijas y algunas fuentes de área (canteras) de la zona industrial de Yumbo, con el fin de plantear programas de descontaminación a través de diferentes acciones y actores, lo cual se logró con la aplicación del modelo AERMOD VIEW, ya que este permite entender la dispersión de los contaminantes y conocer donde se presentan sus mayores concentraciones y el nivel de influencia de las diferentes fuentes. Este proyecto hace parte de las actividades del semillero de investigación en producción agropecuaria sostenible SIPAS perteneciente al grupo de investigación “Producción Sostenible” de la Escuela de Ciencias Agrícolas Pecuarias y del Medio Ambiente ECAPMA.

3. Objetivos

3.1. Objetivo General

- Implementar un modelo de análisis de dispersión atmosférica de material particulado menor de 10 micras (PM_{10}) en el sector Industrial del municipio de Yumbo (Valle del Cauca).

3.2 Objetivos específicos

- Actualizar el inventario de emisiones atmosféricas relacionado con el contaminante Material Particulado menor de 10 micras (PM_{10}) en la zona Industrial del municipio de Yumbo.
- Aplicar el software de modelación AERMOD VIEW para estimar la dispersión atmosférica del contaminante Material Particulado menor de 10 micras (PM_{10}) incluyendo las características meteorológicas y topográficas.
- Generar una propuesta de estrategias que complemente la información del software para las entidades encargadas de la gestión de la calidad del aire en la zona.

4 Marco Conceptual y Teórico

4.1 Contaminación Atmosférica

La contaminación atmosférica está definida como el *“fenómeno de acumulación o concentración de contaminantes en el aire”*, según la Resolución 0610 de 2010, derogada por la Resolución 2254 de 2017, expedida por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible – MADS, el cual altera la composición natural del aire y son causantes de efectos adversos sobre la salud de las personas y demás especies. Los contaminantes provienen de actividades antropogénicas, como son las actividades industriales y las fuentes móviles (vehículos) debido a la utilización de combustibles fósiles, también algunos aportantes son las fuentes naturales (actividades volcánicas, entre otras); tal como lo indica W. Strauss en el libro Contaminación del aire: causas, efectos y soluciones, *“la emisión antropogénica es considerablemente más importante que la emisión natural, y los efectos potenciales son más serios debido a las concentraciones del receptor de más vital interés... el hombre. Las emisiones naturales se concentran solo de modo ocasional en áreas limitadas, de esta manera, su naturaleza intermitente y localización dispersa hacen mínimos los efectos de sus emisiones de gas reactivo”*, (W. Straus, 1990); esto indica que las actividades industriales y el transporte son la causa de mayor perjuicio para la salud y calidad ambiental.

4.2 Inventario de Fuentes Fijas

Dentro de la Política de prevención y control de la contaminación del aire, emitida por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, se identificó como actividad principal la elaboración de inventarios de emisiones contaminantes a la atmosfera, desarrollando la *Guía para elaboración de inventarios de emisiones atmosféricas* en el año 2017, cuyo objetivo es la cuantificación de las emisiones generadas, para el caso de la zona industrial del municipio de

Yumbo, existe un inventario de fuentes fijas por parte de la CVC, con datos directos, provenientes del resultado de los informes presentados ante la autoridad ambiental, dicho inventario fue actualizado para el presente trabajo con la información reportada en la vigencia correspondiente a la Unidad de Contaminación Ambiental (UCA) para el contaminante PM_{10} , verificando el número de fuentes por industria y, con el fin de obtener un insumo para la modelación de la calidad del aire sector industrial del municipio de Yumbo, como un mecanismo para la reducción de las emisiones de contaminantes provenientes de las actividades productivas, es decir, fuentes fijas y fuentes de área. (Jaramillo, 2003).

4.3 Tipos de Contaminantes

Debido al desarrollo económico existe un aumento en las actividades industriales, por ende, el consumo de combustibles es mayor, situación que al pasar por procesos de combustión genera diversos contaminantes que en contacto con la atmósfera afectan negativamente la calidad del aire y la salud de las personas, de acuerdo a la OMS.

Los contaminantes de mayor incidencia sobre la calidad del aire y la salud son: monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO_x), óxidos de azufre (SO_x), partículas de diámetro aerodinámico inferior a 10 micrómetros (PM_{10}) y a 2.5 micrómetros ($PM_{2.5}$), plomo (Pb).

4.3.1 Monóxido de carbono. El monóxido de carbono (CO) es un gas incoloro, sin olor y tóxico producto de la combustión incompleta de carbono, proveniente de vehículos automotores y procesos industriales. Este es el único contaminante que produce un cambio en la fisiología humana de acuerdo a su exposición debido al aumento de la *carboxihemoglobina* en la sangre, causando efectos adversos en el sistema nervioso y cardiovascular, ya que el CO bloquea el transporte de oxígeno en la corriente sanguínea. (W. Strauss, 1990).

4.3.2 Óxidos de nitrógeno. Los óxidos de nitrógeno (NO_x) incluyen dentro de sus

formaciones: ácido nítrico (NO), dióxido de nitrógeno (NO₂) y otros óxidos de nitrógeno menos comunes. Estos compuestos son formados durante los procesos de combustión, siendo precursores del ozono, la lluvia ácida. No se considera que causen efectos adversos sobre la salud en concentraciones ambientales; sin embargo, la exposición al NO₂ puede afectar las vías respiratorias.

4.3.3 Óxidos de azufre. Los óxidos de azufre (SO_x) hacen referencia al dióxido de azufre (SO₂) y otros óxidos de este elemento; estos gases son incoloros y de olor fuerte que se forman en la combustión de combustibles fósiles que contienen azufre. Los óxidos de azufre son compuestos irritantes en el sistema respiratorio.

Este contaminante es el mayor contribuyente al problema de la deposición ácida o lluvia ácida, esta se refiere a la precipitación que tiene un pH inferior a 5.6. Los principales componentes de la lluvia ácida son los ácidos nítrico y sulfúrico que pueden formarse por la combinación de los óxidos de nitrógeno y los de azufre con el vapor de agua en la atmósfera. Además, las partículas de sulfatos también tienden a ser pequeñas (diámetro entre 0.2 μm y 0.9 μm). En consecuencia, pueden ser un componente significativo de las partículas finas y afectar negativamente la visibilidad.

4.3.4 Partículas. El término partículas se refiere a cualquier sustancia en fase sólida o líquida que se encuentre suspendida en el aire, estas se pueden identificar como hollín, polvos, aerosoles, humos o neblinas. La clasificación depende del tamaño de las partículas suspendidas totales (PST), es decir, partículas de diámetro aerodinámico inferior o igual a 10μm, (PM₁₀) y también las partículas de diámetro aerodinámico igual o inferior a 2.5 μm o (PM_{2.5}). Estas partículas contienen compuestos inorgánicos y orgánicos, y su composición química está profundamente relacionada con diferentes factores como su fuente de emisión, los mecanismos

de formación y su tamaño (Borras E., 2013).

Este contaminante es el de mayor preocupación para las autoridades ambientales y de salud, debido a que por su pequeño tamaño les permite el ingreso al sistema respiratorio y al torrente sanguíneo, por ello es de gran preocupación para las entidades ambientales y de salud debido a que según reportes del Documento CONPES 3943 de 2018 *“Los vehículos son la fuente principal de generación de contaminantes del aire, en Colombia son responsables de la emisión del 78% de las partículas. Los vehículos pesados con motores diésel son la mayor fuente de emisión de material Particulado y genera mayor exposición de las personas a estas emisiones debido a la altura del tubo de escape, entre las fuentes móviles, estos vehículos son responsables del 80% de las emisiones de material Particulado. Las actividades industriales también contribuyen a la contaminación del aire al generar emisiones determinadas por la tecnología de los hornos y calderas empleados en el proceso productivo y al consumo de combustibles derivados del petróleo, carbón, gas natural, biomasa y residuos (Agencia Internacional de Energía, 2017).”*

4.4 Trazas Atmosféricas

El envoltorio mayoritariamente gaseoso que rodea nuestro planeta tiene un espesor 1.5% máximo de los 6,200 km del radio de la Tierra aproximado. La masa de la atmosfera tiene alrededor de 5×10^{21} gr y está constituida por nitrógeno (N_2) y oxígeno (O_2) en proporciones de alrededor de 78% y 21% en volumen, respectivamente (Seinfeld y Pandis, 1998). El resto está contenido por argón (Ar), dióxido de carbono (CO_2) y otras especies en diversos estados de agregación que por sus mínimas cantidades se denominan trazas atmosféricas.

Estas trazas atmosféricas, junto al O_2 y CO_2 , son las que definen las propiedades químicas y radioactivas de la atmósfera y las que interconectan los sistemas bióticos y abióticos,

estableciendo las condiciones para la vida. Esta composición se altera por las actividades antrópicas afectando directamente la calidad de vida de los seres humanos (Bustos, 2004).

Las trazas atmosféricas interactúan en un sin número de procesos, especialmente en la formación de material Particulado, cuya ubicación está en la troposfera, esta capa tiene contacto con la superficie de la tierra, y por lo general son más visibles en los cascos urbanos, trayendo consigo no solo efectos negativos al medio ambiente, sino a la salud.

De acuerdo a ello, se ha determinado por parte de las autoridades internacionales y nacionales determinar los contaminantes de mayor emisión y realizar los monitores correspondientes, con el fin de mantenerlos regulados a través de la determinación de concentraciones máximas permisibles.

4.5 Contaminantes Criterio

Los contaminantes atmosféricos criterios son aquellos cuyas concentraciones máximas están reguladas. Para Colombia los niveles máximos permisibles están regulados por la Resolución No. 2254 de 2017 expedida por el MADS, donde están comprendidos los siguientes contaminantes criterio: material particulado (PM_{10} y $PM_{2.5}$), Dióxido de Azufre (SO_2), Dióxido de Nitrógeno (NO_2), Ozono (O_3) y monóxido de carbono (CO), cuyas características al entrar en contacto con la atmósfera generan efectos adversos sobre la calidad del aire y la salud de las personas, además la afectación de la naturaleza (flora, fauna, suelo, agua, etc.). (MADS, 2017).

También se encuentra dentro de los contaminantes de la calidad del aire, los compuestos Orgánicos Volátiles (COV), aunque no tienen un límite permisible como en otros países, en Colombia se exige medirlo anualmente y presentar los resultados a la Autoridad Ambiental, debido a que este contaminante es precursor en la generación de ozono troposférico.

Dentro de la normatividad ambiental se han establecido como niveles máximos permisibles

de contaminantes criterio, los siguientes:

Tabla 1. Niveles máximos permisibles de contaminantes criterio. Fuente: Resolución No. 2254 de 2017

Contaminante	Nivel máximo Permissible ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Tiempo de exposición
PM ₁₀	50	Anual
	100	24 horas
PM _{2.5}	25	Anual
	50	24 horas
SO ₂	50	24 horas
	100	1 hora
NO ₂	60	Anual
	200	1 hora
O ₃	100	8 horas
CO	5.000	8 horas
	35.000	1 hora

Vale la pena anotar que estos valores son modificados a partir del 1 de julio de 2018 para el contaminante material Particulado (PM₁₀ y PM_{2.5}), cuyo nivel máximo permisible para un tiempo de exposición de 24 horas y Anual será de $75\mu\text{g}/\text{m}^3$ y $37\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente, según la resolución No. 2254 de 2017.

4.6 Dispersión de los Contaminantes.

La dispersión de contaminantes en la atmósfera obedece al proceso de transporte y mezcla de los contaminantes en el aire, permitiendo la dilución de los mismos. Esta dispersión depende de variables ambientales como el viento, la elevación de la pluma y la turbulencia del aire.

Es importante señalar que siendo el viento una de las variables más importantes, también influye la topografía de la zona de estudio, teniendo en cuenta que es una región plana donde el

desplazamiento del aire es horizontal. Igualmente se revisó la variabilidad de la dirección del viento, porque si ésta es constante, la misma zona estará continuamente expuesta a niveles relativamente altos de contaminación, pero cuando la dirección del viento es cambiante, los contaminantes son dispersados sobre un área mayor y las concentraciones resultarán relativamente menores. Otro parámetro importante es la velocidad del viento, ya que esta afecta el tiempo de recorrido de los contaminantes entre la fuente y los receptores, por eso se puede inferir que cuanto mayor es la intensidad del viento, menor será la concentración de contaminantes en el aire. (Velázquez, 2003).

4.7 Fuentes de Emisión

Existen diferentes tipos de fuentes generadoras de emisiones atmosféricas, estas pueden ser fijas, de área y móviles, estas últimas corresponden a las generadas por el tráfico vehicular, pero para este trabajo solo se tuvieron en cuenta las fuentes fijas y de área en la jurisdicción del municipio de Yumbo (sector Acopi), las cuales se van a describir a continuación:

4.7.1 Fuentes fijas puntuales. Son lugares o sitios en los cuales se originan los contaminantes, donde existen chimeneas y ductos por los cuales se emiten diferentes tipos y cantidades de contaminantes dependiendo de las características de las operaciones y procesos que se realicen en las diferentes actividades industriales, así como del tipo de combustible que utilizan.

4.7.2 Las fuentes de área. Este tipo de emisiones son generadas por actividades como canteras, consumo de solventes, limpieza de superficies y equipos, artes gráficas, entre otras, las cuales están distribuidas en un área particular, cuyas actividades tienen varios focos de generación de emisiones, pueden tener un efecto significativo en la calidad del aire del sector donde estén ubicadas.

4.8 Monitoreo y Evaluación de la Calidad del Aire

Para tener un control efectivo de la calidad del aire es necesario realizar las mediciones de las concentraciones de los contaminantes en la atmósfera, las cuales proporcionan los datos necesarios sobre los cuales se determinará la relación de los efectos con los niveles de los contaminantes (Índice de Calidad del Aire -ICA) y se verificará si el emisor está logrando el estándar establecido en la normatividad vigente, los cuales son confirmados y regulados por las autoridades ambientales y el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Los estudios de Calidad del Aire deben cumplir con lo establecido en el Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire, tal como lo establece la Resolución No. 2254 de 2017.

Dichos estudios, proporcionan los datos necesarios para determinar el destino de los contaminantes y junto con la información meteorológica son los insumos para realizar las respectivas modelaciones y así generar los diferentes programas de reducción de la contaminación del aire, donde se deben identificar acciones y medidas que permitan reducir los niveles de concentración conforme a lo definido en el artículo 15 de la Resolución No. 2254 de 2017.

4.9 Modelos de Dispersión

La modelación se ha convertido en una herramienta de diversas disciplinas, porque permite recrear diferentes situaciones en un contexto de tiempo y espacio determinado a través de ecuaciones matemáticas, (Bustos, 2004). Para nuestro caso, el trabajo es la modelación de dispersión de Material Particulado, reconocido como uno de los contaminantes de mayor afectación sobre la salud y calidad del aire donde este se genera.

Los estimados de dispersión se determinan mediante ecuaciones de distribución y son válidos para la capa de la atmosfera más cercana al suelo, donde se producen los mayores cambios

meteorológicos respecto a las variables de temperatura y viento, estos tienen un efecto importante en la forma de dispersión de los contaminantes, permitiendo predecir y analizar la calidad del aire y así definir los planes de acción y descontaminación de las áreas con mayor problemática en el tema analizado.

4.10 Tipos de Modelación

Siendo la calidad del aire un tema de importancia internacional y cuyo liderazgo ha provenido desde actores internacionales a través de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de América (US-EPA). Han desarrollado una variedad de modelos de dispersión atmosféricos con los estándares más altos de tecnología y ciencia, por eso, son los utilizados por las instituciones gubernamentales a nivel mundial.

Los más reconocidos son:

4.10.1 Modelos Gaussianos. El modelo gaussiano es el más común ya que su ecuación de distribución emplea cálculos simples que solo requieren dos parámetros de dispersión (σ_y y σ_z) para identificar la concentración de contaminantes que se encuentren debajo del centro de la pluma, según lo definido por Turner en 1970. Este considera que la propagación de los contaminantes tiene una distribución de campana en ambos planos (horizontal y vertical), con desviaciones estándar de la distribución de concentración.

Estos son utilizados para evaluar la concentración de contaminantes producida por una fuente puntual (chimenea) ya que este abarca un radio menor a 10 kilómetros y se aplica en localidades con relieves complejos, además de ser aplicados para contaminantes no reactivos, su grado de precisión es exacto. (Bustos, 2004).

La ecuación que se utiliza para calcular la concentración de contaminantes en este modelo es la siguiente:

$$C(x, y, z, t) = \left(\left(Q(2\pi) - \frac{3}{2(GxGyGz)} \right) \right) \text{Exp} \left\{ -\frac{1}{2} \right\}$$

Donde:

T: Tiempo de difusión

Q: Concentración de la fuente emisora (g/s)

Gx, Gy, Gz: Coeficientes de dispersión (m)

C (x, y, z, t): Concentración instantánea después de un tiempo (t), en los puntos x, y, z (g/m³)

4.10.2 Modelos urbanos y regionales. Para este modelo se utiliza información de fuentes de contaminación primaria y secundaria, también requiere de información meteorológica, pronóstico local y regional, requiere de datos de viento de superficie y altura que se determinan por interpolación y extrapolación, el modelo calcula los parámetros meteorológicos a partir de las ecuaciones que escriben las relaciones físicas fundamentales del movimiento y la energía en el aire.

4.10.3 Modelos Globales. Estos son de mayor cobertura, ya que resuelven con mayor determinación la ecuación de continuidad para toda la atmosfera, son más complejos y poseen más variables y trazas con tiempos de recambios más cortos ((Bustos, 2004).

4.11 Modelo Aermod View. Este modelo estima la dispersión de contaminantes atmosféricos, según (Suarez, 2012) este “predice la concentración de los contaminantes desde el punto continuo, llamarada, área, línea, volumen y fuentes a cielo abierto”, este modelo fue desarrollado para la EPA por Lakes Environmental Software, cuyas bases están definidas en el AP42 de la EPA, quinta edición, Volumen I.).

Los resultados de la modelación generan Isopletas de concentración de PM₁₀ expresadas en valores de carga contaminante (µg/ m³) y estos se pueden observar en forma de gráficas de

contornos coloreados de isoconcentraciones, las cuales pueden ser sobrepuestas a mapas abstractos o a imágenes de google earth en una determinada área, permitiendo estimar el comportamiento del contaminante respecto a la topografía de la zona de estudio. Este modelo está compuesto por tres componentes separados:

- AERMOD (modelo de dispersión de AERMIC),
- AERMAP (preprocesador topográfico) y
- AERMET (preprocesador meteorológico).

De acuerdo a lo anterior el modelo AERMOD representa una técnica de dispersión que incorpora las técnicas más avanzadas de parametrización de la capa límite planetaria, dispersión convectiva, formulación de la elevación de la pluma e interacciones complejas del terreno con la pluma, donde se tienen los siguientes resultados:

- Dispersión tanto en la capa límite estable como en la convectiva.
- Flotabilidad y elevación de la pluma.
- Penetración de la pluma dentro de la inversión elevada
- Tratamiento de fuentes elevadas y bajas.
- Perfiles verticales de viento, temperatura y turbulencia
- Tratamiento de receptores en todo tipo de terrenos.

Las características de la corrida del modelo AERMOD WIEW versión 9.6.1 se encuentran en el anexo No. 2, en las cuales se especifica cada una de las variables referentes a los datos meteorológicos y topográficos requeridos.

4.12 Estrategias de Prevención y Control de la Contaminación:

En el marco de la Política para el mejoramiento de la calidad del aire – CONPES 3943, el cual reúne las estrategias de prevención, reducción y control de la contaminación del aire, cuya

base es la identificación de los contaminantes y su comportamiento en el aire, es decir, la dispersión de los mismos, la cual se realizará en el presente trabajo, y será la base para que las Autoridades Ambientales y entes territoriales generen los respectivos programas de reducción de la contaminación del aire en los sectores donde existan mayores receptores, es decir, población sensible, la cual se encontrará acorde con lo establecido por la normatividad ambiental. (CONPES 3943. 2018).

5 Marco Legal

El marco legal que se tendrá como referencia para el desarrollo de este proyecto será el relacionado con la parte de calidad del aire, las cuales se mencionan a continuación:

Tabla 2. Normatividad ambiental colombiana en calidad del aire.

NORMA	DESCRIPCIÓN
Constitución Política de Colombia de 1991	Derecho a la vida, a gozar de un ambiente sano, por lo cual el Estado debe proteger la integridad del ambiente, además debe prevenir y controlar los factores de deterioro ambiental (interés colectivo), imponer sanciones legales y exigir la reparación de los daños causados. Todas las personas deben proteger los recursos naturales del país.
Ley 99 de 1993	Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA y se dictan otras disposiciones.
Decreto 948 de 1995	Por el cual se reglamentan, parcialmente la Ley 23 de 1973, los artículos 33, 73, 74, 75 y 76 del Decreto-ley 2811 de 1974; los artículos 41, 42, 43, 44, 45, 48 y 49 de la Ley 9ª de 1979; y la Ley 99 de 1993, en relación con la prevención y control de la contaminación atmosférica y la protección de la calidad del aire.
Decreto 2107 de 1995	Por medio del cual se modifica parcialmente el Decreto 948 de 1995 que contiene el Reglamento de Protección y Control de la Calidad del Aire. Art 75 (Solicitud del permiso de emisiones atmosféricas) Art 76 (Tramite del permiso de emisiones atmosféricas) Art 86 (Vigencia, alcance y renovación del permiso).
Resolución 619 de 1997	Por la cual se establecen parcialmente los factores a partir de los cuales se requiere permiso de emisión atmosférica

	para fuentes fijas.
Decreto 1530 de 2002	Por el cual se modifica el artículo 40 del Decreto 948 de 1995, modificado por el artículo 2° del Decreto 1697 de 1997 y por el Decreto 2622 de 2000
Resolución 601 de 2006	Por la cual se establece la Norma de Calidad del Aire o Nivel de Inmisión, para todo el territorio nacional en condiciones de referencia.
Decreto 979 de 2006	Por el cual se modifican los artículos 7°, 10, 93, 94 y 108 del Decreto 948 de 1995
Resolución 909 de 2008	Por la cual se establecen las normas y estándares de emisión admisibles de contaminantes a la atmósfera por fuentes fijas y se dictan otras disposiciones.
Resolución 910 de 2008	Por la cual se reglamentan los niveles permisibles de emisión de contaminantes que deberán cumplir las fuentes móviles terrestres, se reglamenta el artículo 91 del Decreto 948 de 1995 y se adoptan otras disposiciones.
Resolución 2153 de 2010	Por la cual se ajusta el Protocolo para el Control y Vigilancia de la Contaminación Atmosférica Generada por Fuentes Fijas, adoptado a través de la Resolución 760 de 2010 y se adoptan otras disposiciones
Resolución 1309 de 2010	Por la cual se modifica la Resolución 909 del 5 de junio de 2008
Resolución 610 de 2010	Por la cual se modifica la Resolución 601 del 4 de abril de 2006
Decreto 1076 de 2015	Decreto Único del sector Ambiental
Resolución 2254 de 2017	Por la cual se adopta la norma de calidad del aire ambiente y se dictan otras disposiciones
Resolución 2267 de 2018	Por la cual se modifica la Resolución 909 de 2008 y se adoptan otras disposiciones.

6 Diseño Metodológico

La metodología planteada para el desarrollo de aplicación del modelo de dispersión de contaminantes atmosféricos (aplicado a PM_{10}) en la zona industrial del municipio de Yumbo, se realizó por etapas de acuerdo al siguiente esquema metodológico:

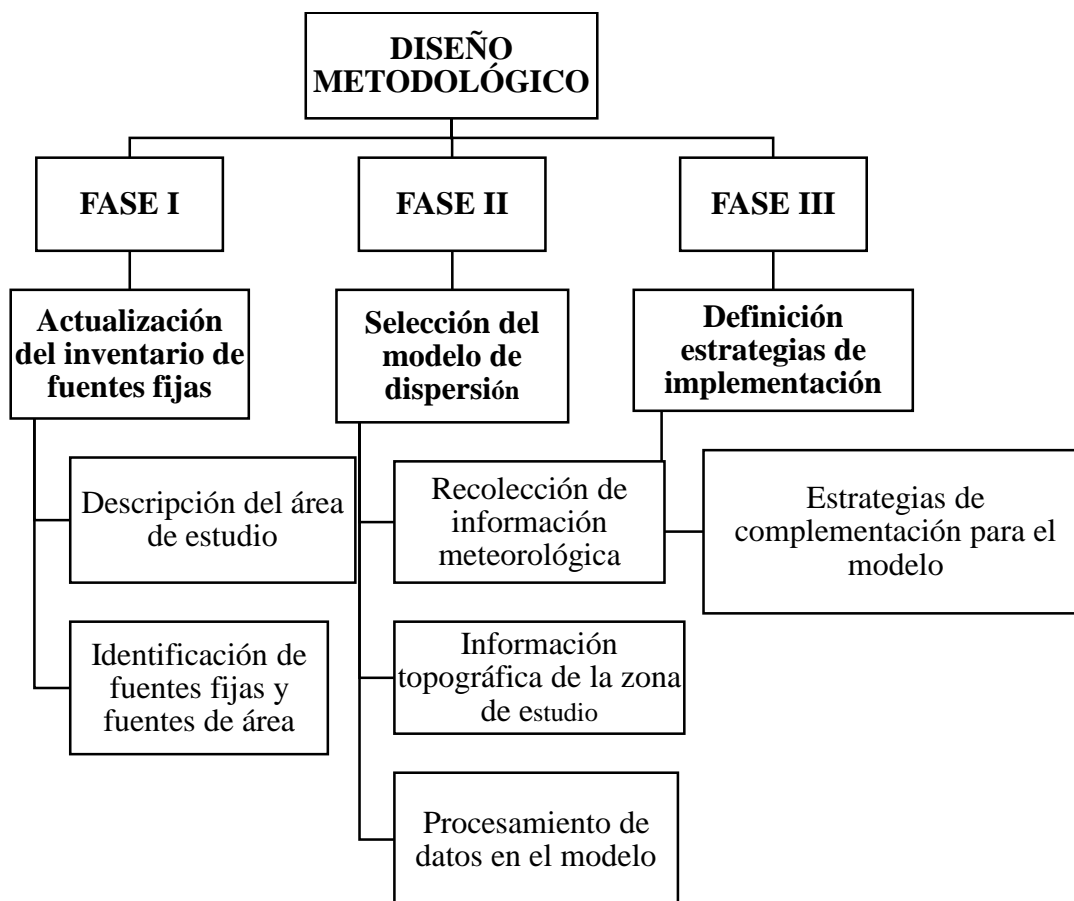


Ilustración 1. Diseño Metodológico del trabajo de modelación de la dispersión de material Particulado en la zona

A continuación, se detallan las actividades de cada una de las fases:

6.1 Fase I

6.1.1 Descripción del área de estudio. El municipio de Yumbo limita al sur con el municipio de Santiago de Cali y al norte con el municipio de Vijes, por el oriente con el Municipio de Palmira, al occidente con el Municipio de La Cumbre y la cordillera Occidental.

Este municipio comprende la zona industrial del departamento del Valle del Cauca, es por eso que está reconocido como “la Capital Industrial de Colombia”, según el registro del municipio de Yumbo están asentadas aproximadamente 461 grandes empresas, debido a su ubicación estratégica por su cercanía al Aeropuerto Internacional Alfonso Bonilla Aragón y al Puerto de Buenaventura, además de una excelente infraestructura vial hacia el interior del País. (Municipio de Yumbo).



Ilustración 2. Ubicación del Departamento del Valle del Cauca y el municipio de Yumbo. Fuente: Alcaldía Yumbo

Teniendo en cuenta lo anterior, se estableció agrupar la zona industrial en 5 sectores los cuales están conformados por el tipo de actividad económica representativa de cada uno, teniendo en cuenta que en la zona industrial de Yumbo existen diversos tipos de actividades, los cuales están distribuidos según el Plan Básico de Ordenamiento Territorial del municipio, Acuerdo 028 de 2001, donde en su Capítulo II – Usos Rurales, se establecen las áreas de actividad minera y áreas de actividad industrial, estas últimas clasificadas por el grado de impacto ambiental y la demanda de agua. (PBOT – Yumbo. 2001), la cual tiene la siguiente

distribución.

- *Sector Acopi*: Este sector comprende las carreras 40 hasta la 37 entre calle 9 y 16, donde se tiene como fuentes emisoras más representativas las metalúrgicas, donde actualmente solo existe SIDOC.
- *Sector Arroyohondo*: Esta zona es la más amplia debido a que abarca todas las empresas o industria que se encuentra asentada en dirección al río Arroyohondo, es decir, en este sector está la mayor diversidad de industrias, porque encontramos las productoras de alimentos, incineradoras, fabricación de pallets, entre otras actividades.
- *Sector canteras*: Las canteras o áreas de explotación minera fueron definidas en el PBOT de Yumbo y ubicadas sobre el piedemonte de la cordillera occidental, cuya actividad es la extracción de material de construcción como roca muerta y roca azul, para producción de asfalto y triturados.
- *Sector Guabinas*: Este sector está comprendido por la industria papelera y actividades de algunas canteras, ubicada sobre el piedemonte de la cordillera occidental y con influencias de la Quebrada La Sorpresa, tributaria del río Arroyohondo.
- *Sector Las Américas*: este sector fue denominado así por la ubicación de las empresas más grandes de la zona industrial de Yumbo, ubicado en el límite con la zona urbana del municipio de Yumbo, cuya mayor concentración se tienen en la Glorieta Las Américas donde existen los barrios San Jorge, Las Américas y Lleras.

6.1.2 Actualización del inventario de fuentes fijas y fuentes de área. La Corporación Autónoma del Valle del Cauca – CVC, dentro de sus competencias referentes a la administración, protección y conservación de los recursos naturales definidas en el Artículo 31 de la Ley 99 de 1993, cuenta con un inventario de empresas o establecimientos cuyas actividades son generadores de emisiones contaminantes a la atmosfera, las cuales deben cumplir con lo establecido por la normatividad ambiental Colombiana, como es el Decreto 1076 de 2015, Resolución 909 de 2006, Resolución 1309 de 2010, Resolución 2267 de 2018 (por la cual se modifica la Resolución 909 de 2008), la Resolución 619 de 1997 (Por la cual se establecen parcialmente los factores a partir de los cuales se requiere permiso de emisión atmosférica para fuentes fijas) y el protocolo para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire (con piso jurídico en la Resolución 2153 de 2010) , emitido por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, hoy Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible – MADS. Es así como se cuenta con un inventario inicial de empresas generadoras de contaminantes criterio, las cuales deben realizar los respectivos estudios de emisiones, acorde con su actividad productiva. Dentro de esta fase, se actualizó la información de las empresas generadoras de Material Particulado que actualmente se ubican en los diferentes sectores, depurando la información existente.

La actualización de la base de datos de las empresas con fuentes fijas en el sector industrial del municipio de Yumbo, se realizó con los estudios de emisiones atmosféricas entregados a la CVC, en ciclos semestrales, anuales o según el número de Unidades de Contaminación Atmosféricas (UCA), establecidas en el Protocolo para el control y vigilancia de la contaminación atmosférica generada por fuentes fijas, esto correspondiente al periodo 2016-2019. Es importante, resaltar que los estudios base de este trabajo fueron realizados por empresas

especializadas en mediciones isocinéticas en chimeneas, cuyos procedimientos y cálculos empleados para la estimación de las emisiones contaminantes, están ajustados a lo establecido por la Agencia de Protección del medio Ambiente de los Estados Unidos (EPA), el Instituto de Hidrológica, Meteorológica y Estudios Ambientales (IDEAM), y el Protocolo para el Control y Vigilancia de la contaminación Atmosférica generada por fuentes fijas.

Los datos actualizados y registrados en el modelo fueron los siguientes:

Tabla 3. Información requerida para el procesamiento de los datos por el modelo de dispersión.

Datos a ingresar
Sector
Nombre de la empresa
Nit.
Dirección
Actividad económica
Ubicación
Coordenadas por fuente
Nombre de la fuente
Diámetro (m)
Altura de la fuente (m)
Temperatura (Ts), en °C
Velocidad de salida de los gases (Vs), en m/s
Caudal de salida de los gases (Qs), en m ³ /min
Factor (Fc), en g/s
Tipo de combustible

Igualmente se tomaron los registros de los estudios de calidad del aire de las empresas cuya generación de Material Particulado proviene de fuentes de área, es decir, las canteras que se ubican en el sector y para las cuales se realizaron los cálculos con el fin de conocer la tasa de emisión a través de los factores de emisión establecidos en el AP 42 de la EPA (US-EPA, 1995),

los cuales están expresados en la siguiente ecuación general:

$$E = A * EF \left(1 - \frac{ER}{100} \right)$$

Donde;

E: Emisiones

A: Tasa de actividad

EF: Factor de emisión

ER: Eficiencia global de reducción de emisiones (%)

Los datos de entrada solicitados por el AP 42 de la EPA, quinta edición, Volumen I, utilizados en los estudios realizados que fueron soporte para el desarrollo de dichas fuentes de área son:

- Tasa o cantidad de emisión [g/(s-m²)]
- Altura de la fuente de liberación (m)
- Longitud del lado más largo del área rectangular (m)
- Longitud del lado más corto del área rectangular (m)
- Altura del receptor sobre el suelo (m)
- Opción urbana/rural (U = urbana, R = rural)
- Opción de búsqueda de dirección del viento

De acuerdo a los estudios presentados a la CVC, fueron consideradas las siguientes fuentes por factores de emisión de las actividades de explotación reportadas:

- ✓ Voladuras
- ✓ Perforación húmeda de Roca.
- ✓ Manejo de Material en frente de explotación (Almacenamiento, Carga y Descarga de Material Apilado).

- ✓ Retiro de Rocamuerta usando Buldozer (empuje).
- ✓ Transito Interno de Vehículos Sobre Vías Industriales Sin Pavimentar.
- ✓ Descargue de Volquetas en Trituradora Primaria.
- ✓ Trituración Primaria de roca (pasar a diámetro menor a 5”).
- ✓ Clasificación Primaria de Roca (Tamizado).
- ✓ Trituración Secundaria de Roca (en un Cono).
- ✓ Clasificación Secundaria (Tamizado).
- ✓ Trituración de Finos.
- ✓ Tamizado de Finos.
- ✓ Transporte de material en bandas transportadoras
- ✓ Almacenamiento de Agregados en pilas
- ✓ Cargue de material beneficiado de pilas a volquetas

²Como ejemplo de cálculo de las emisiones generadas en las canteras, se tomó el aparte del cálculo de emisiones debidas a Voladuras para la explotación del material en crudo, del estudio presentado a la CVC. (Lomas del Caney. 2018), conforme con lo establecido en el AP 42 de la EPA, quinta edición, Volumen I, Capitulo 11 – Mineral Products Industrial, Numeral 11.9 Western Surface Coal Mining, Tabla 11.9.2, Operación: Blasting (Voladura); Material: Coal or overburden (se usa este factor pues es el que más se acerca a las necesidades del cálculo). Para el cálculo se asumen que:

1. En cada voladura se obtienen de 4000 m³ en banco.
2. La profundidad de la voladura es en promedio de 6.0 m.

² Texto y cálculos tomados del Estudio de Modelación de Lomas del Caney – Contrato de Concesión No. 16674 entregado a la CVC.

3. Cada voladura genera un cubo perfecto.
4. El tiempo que dura en dispersarse la nube de polvo es de 30 min (considerando la velocidad predominante de los vientos que es de 1.98 m/s).

Entonces:

$$A = \frac{4000m^3}{6m} = 666.7 m^2$$

Donde

A= Área horizontal

Para calcular el factor de emisión se tiene:

$$FE - TSP = 0.00022 * 666.7^{1.5} = 3.7872$$

$$FE1 - TSP = 3,7872 \frac{kg}{vol} * \frac{1 vol}{30 min} * \frac{1 min}{60 seg} * \frac{100 g}{1 kg}$$

$$FE1 - TSP = 2.10 \frac{g}{seg}$$

$$FE PM_{10} = 2.10 \frac{g}{s} * 0.52 = 1.09 \frac{g}{s}$$

Es de aclarar que, por seguridad y confidencialidad de la información reportada a la Autoridad Ambiental, los datos de nombres de empresas y nombres de las fuentes fueron reemplazados por un distintivo genérico otorgado por los participantes de este proyecto. (Anexo No. 3).

6.2 Fase II

6.2.1 Selección del modelo de dispersión. Para escoger el modelo a implementar para generar la dispersión de Material Particulado en la zona industrial del municipio de Yumbo, se tuvo en cuenta las siguientes variables y la obtención de la información:

- ✓ La complejidad meteorológica y topográfica del área a estudiar.
- ✓ La cantidad y la precisión de los datos disponibles de fuentes de emisión, datos meteorológicos y de calidad del aire.

De acuerdo a lo anterior, y teniendo en cuenta el objetivo del presente trabajo se decidió trabajar con el modelo AERMOD View versión 9.6.1 desarrollado por la empresa *Lakes Environmental*, el cual está debidamente aprobado por la *Environmental Protection Agency de Estados Unidos - EPA*, para evaluaciones ambientales de proyectos desde el año 2005, este modelo contiene tres módulos originales, el primero denominado AERMET para pre-procesar la información meteorológica, el segundo módulo denominado AERMAP para procesar la información del terreno y el modelo AERMOD, el cual es el modelo de dispersión.

6.2.2 Recolección de información meteorológica. Al trabajar un modelo de dispersión, uno de los datos más importantes y necesarios es conocer los datos meteorológicos de la zona de estudio, ya que estos influyen directamente en la movilidad de los contaminantes, para nuestro caso se utilizaron los datos de información meteorológica satelital comprados a la empresa Meteo-Colombia para los años 2012, 2013 y 2014, para un total de 17568 datos horarios, donde se encuentran factores como Precipitación, flujo de calor sensible, velocidad de fricción superficial, gradiente de temperatura, altura de la capa límite, velocidad del viento, dirección del viento, Temperatura, Humedad relativa aplicados específicamente a la zona del proyecto. Es de resaltar que antes de cargar la información al Modelo AERMOD VIEW 9.6.1, es

necesario hacerle un Pre-procesamiento utilizando el Modelo AERMET VIEW 9.6.1.

Para la ejecución de los datos meteorológicos se tomó como punto de referencia el siguiente: E: 331371,81 y N: 3864117,58 del sistema de coordenadas Universal Transversal de Mercator (UTM), correspondiente a la Glorieta Sameco, obteniendo una rosa de vientos con las direcciones y velocidades predominantes de vientos en el sector en la mencionada temporalidad del viento.

Los datos meteorológicos requeridos por el modelo son:

- Número de categorías de velocidad de viento.
- Número de categorías de estabilidad Pasquill – Guifford.
- Número de categorías de dirección de vientos.
- Vector de frecuencia acumulada de ocurrencia de velocidad y dirección de vientos para cada categoría de estabilidad.
- Vector de temperatura ambiental como función de la categoría de estabilidad.
- Vector de alturas de mezclas como función de la categoría de estabilidad dirección de vientos y estación.
- Vector del valor medio de cada categoría de velocidad.

A continuación, se describen las características de cada uno de los datos meteorológicos:

6.2.2.1 Velocidad de viento. El viento es el aire en movimiento y se presenta por las diferencias de presión, densidad y demás características atmosféricas. La medida que se hace del viento es la componente horizontal del movimiento del aire, este vector tiene dos componentes: dirección y velocidad. Colombia se destaca en una zona conocida como calmas intertropicales, con

vientos de baja velocidad, para el municipio de Yumbo existen vientos entre 3 y 4 m/s según lo reportado en el Promedio Anual Multianual del IDEAM.

Tanto en las mediciones de velocidad como en la de dirección de vientos es importante considerar los factores locales, tales como la presencia de mar, montañas, barreras urbanísticas que influyen en los detalles del movimiento del aire.

6.2.2.2 Estabilidad Atmosférica. La atmósfera es un sistema continuo y dinámico en donde la estabilidad cambia constantemente de acuerdo a la hora del día, la presencia de nubes, el tipo de vientos, la temperatura de superficie y la concentración y tipo de contaminantes. En la práctica se pueden presentar infinitas situaciones atmosféricas; a fin de darles un tratamiento operativo se establece una serie de clases o categorías de acuerdo al tratamiento operativo propuesto por Pasquill - Guifford (1961) de la Oficina de Meteorología de la Gran Bretaña.

Las estabilidades se denominan así:

A=1=Extremadamente inestable.

B=2=Inestable.

C=3=Ligeramente inestable.

D=4=Neutra.

E=5=Ligeramente estable.

F=6=Moderadamente estable.

Tabla 4 Clasificación de la Estabilidad de la Atmósfera Según Pasquill-Guifford

Velocidad de viento m/s	Día (insolación)			Noche Nubosidad	
	Fuerte	Moderado	Suave	> 4/8	< 4/8
<2	A	A-B	B		
2-3	A-B	B	C	E	F
3-5	B	B-C	C	D	E
5-6	C	C-D	D	D	D
>6	C	D	D	D	D

6.2.2.3 Humedad Relativa y Brillo Solar. La humedad relativa es la relación existente entre la cantidad de vapor de agua del aire no saturado y la cantidad de vapor del agua que el aire admitiría si estuviese saturado para una temperatura dada, la humedad relativa es función de la temperatura del aire.

Las mediciones de brillo solar se efectúan a través del heliógrafo instrumento que registra las horas de insolación.

6.2.2.4 Categorías de Dirección de Vientos. Este parámetro indica el número de direcciones de vientos que considera la rosa multianual, estas categorías pueden ser cuatro, ocho o dieciséis, la simbología adoptada para establecer la dirección de vientos es la siguiente:

Tabla 5. Descripción de las categorías de dirección de vientos

SIMBOLOGÍA	DESCRIPCIÓN
N	Norte
NNE	Norte-Noreste
EN	Noreste
ENE	Este-Noreste
E	Este
ESE	Este-Sureste
SE	Sureste
SSE	Sur-Sureste
S	Sur
SSW	Sur-Suroeste
SW	Suroeste
WSW	Este-Suroeste
W	Oeste
WNW	Oeste-Noroeste
NW	Noroeste
NNW	Norte-Noroeste

6.2.2.5 Ocurrencia de Velocidad y Dirección de Vientos. Es la llamada distribución conjunto de probabilidades, que contiene el reporte de la frecuencia de ocurrencia de dirección y velocidad de vientos para cada una de las estabildades.

La distribución conjunta de probabilidades aplicada se presenta a continuación:

Tabla 6. Distribución Conjunta de Probabilidades

Estabilidad Atmosférica A					
1	2	3	4	5	6
0-1.5 m/s	1.6-3.3 m/s	3.4-5.4 m/s	5.5-7.9 m/s	8.0-10.7 m/s	>10.8 m/s
0,01	0,12	0,29	0,11	0,22	0,2
0,0011493	0,0137910	0,0123791	0,0043343	0,0242000	0,0006567
Estabilidad Atmosférica B					
1	2	3	4	5	6
0-1.5 m/s	1.6-3.3 m/s	3.4-5.4 m/s	5.5-7.9 m/s	8.0-10.7 m/s	>10.8 m/s
0,02	0,15	0,3	0,45	0,28	0,2
Estabilidad Atmosférica C					
1	2	3	4	5	6
0-1.5 m/s	1.6-3.3 m/s	3.4-5.4 m/s	5.5-7.9 m/s	8.0-10.7 m/s	>10.8 m/s
0,13	0,23	0,29	0,4	0,4	0,6
Estabilidad Atmosférica D					
1	2	3	4	5	6
0-1.5 m/s	1.6-3.3 m/s	3.4-5.4 m/s	5.5-7.9 m/s	8.0-10.7 m/s	>10.8 m/s
0,49	0,44	0,11	0,04	0,1	0
Estabilidad Atmosférica E					
1	2	3	4	5	6
0-1.5 m/s	1.6-3.3 m/s	3.4-5.4 m/s	5.5-7.9 m/s	8.0-10.7 m/s	>10.8 m/s
0,07	0,06	0,01	0	0	0
Estabilidad Atmosférica F					
1	2	3	4	5	6
0-1.5 m/s	1.6-3.3 m/s	3.4-5.4 m/s	5.5-7.9 m/s	8.0-10.7 m/s	>10.8 m/s
0,28	0	0	0	0	0

6.2.2.6 Vector de Temperatura. Este es un vector que contiene las temperaturas promedio en cada uno de los grupos de las estabildades que existan en la distribución conjunto de probabilidades.

6.2.2.7 Altura de Mezcla. Es la altura media de la capa de mezcla teniendo en cuenta la velocidad, la estabilidad y la característica estacional o anual de los datos. La altura de mezcla se calcula con la siguiente expresión:

$$H = 8000 \ln\left(\frac{P}{P_{atm}}\right)$$

Donde:

H = altura de mezcla (m.)

P = Presión atmosférica (mm Hg)

Patm = Presión atmosférica a nivel del mar (760 mm Hg).

Respecto a los datos de superficie, es importante suministrar características de superficie que son las siguientes: (albedo del medio día (r_0); cociente de Bowen (B0); rugosidad (z_0), los cuales determinan lo siguiente:

- El albedo (r_0), es la relación que existe entre energía-luminosidad difundida por una superficie a través de la reflexión y la energía incidente, es decir, el porcentaje de radiación que cualquier superficie refleja respecto a la radiación que incide sobre ella.
- Cociente de Bowen (b_0), es el cociente del flujo de calor sensible y el flujo de calor de evaporación; se aplica a la razón entre la transferencia de calor sensible y latente, el cual resulta de la evaporación de la superficie, se infiere como el calor latente de evaporación y de la condensación de la atmosfera. El coeficiente de Bowen se usa para estimar la intensidad de la evapotranspiración.

- Rugosidad (z_0) es la altura por encima del nivel del suelo en la cual la velocidad horizontal es usualmente cero. La rugosidad tiene en cuenta el efecto sobre el coeficiente de dispersión vertical de la vegetación exuberante, cultivos, edificios, etc., cuando más rugosa es la superficie mayor es la mezcla turbulenta. La mezcla no depende de la velocidad del viento sino del gradiente vertical de la velocidad del mismo sobre una superficie rugosa.

Para establecer los datos de las características de superficie, se tomaron los registros de la guía del usuario de AERMET, los cuales cuentan con valores según variaciones estacionales y tipos de uso del suelo, tal como se puede observar en la siguiente tabla:

Tabla 7. Coeficiente de Albedo, Bowen y Rugosidad

TIPO	ALBEODO	BOWEN	RUGOSIDAD
Water (fres and sea)	0,1400	0,4500	0,0001
Deciduous Forest	0,2150	0,8750	0,9000
Coniferous Forest	0,1775	0,8250	1,3000
Swamp	0,1800	0,4500	0,1625
Cultivated Land	0,2800	0,7500	0,0725
Grassland	0,2900	0,9250	0,0403
Urban	0,2075	1,6250	1,0000
Desert Shrubland	0,3275	4,7500	0,2625

Para nuestro caso se determinaron 8 secciones predominantes en un radio de 20km con los siguientes tipos de cobertura característica en la zona de estudio: Water (fres and sea), Coniferous Forest, Cultivated land, Urban y Desert Shrubland, tal como se detalla en la siguiente imagen:

Para el cálculo de los coeficientes a utilizar se ponderó cada uno de los tipos de terreno y se utilizaron los valores promedio anuales, arrojando los siguientes resultados:

Tabla 9. Cálculos ponderados

Sección:	0-45	45-90	90-135	135-180	180-225	225-270	270-315	315-360
	1	2	3	4	5	6	7	8
Albedo	0,2611	0,2698	0,2689	0,2257	0,2159	0,1910	0,1866	0,2008
Bowen	1,1745	0,8753	0,8520	1,3850	1,5723	1,1025	0,9600	1,3853
Rugosidad	0,3393	0,1956	0,2000	0,7535	0,8885	1,1699	1,1978	1,1112

6.2.3 Información topográfica de la zona de estudio. Para la obtención de la información topográfica se inició especificando variables en el modelo, estableciendo un dominio (grilla) de 20 Km, distribuidos en 11 puntos con distancias de 2000 metros cada uno, por otra parte, para el levantamiento del perfil del dominio (grilla) fue necesario utilizar el software *Google Earth*.

Dentro del estudio se trabajó con características de terreno quebrado para los procesos meteorológicos, teniendo en cuenta que la mayor concentración y densidad de las empresas se ubican en la parte más plana del municipio con pendientes menores a 3%, tal como se puede observar en la ilustración No. 5, cuyos estudios fueron realizados en el año 2009-2010 según información topográfica reportada por el GeoCVC, capa de suelos.

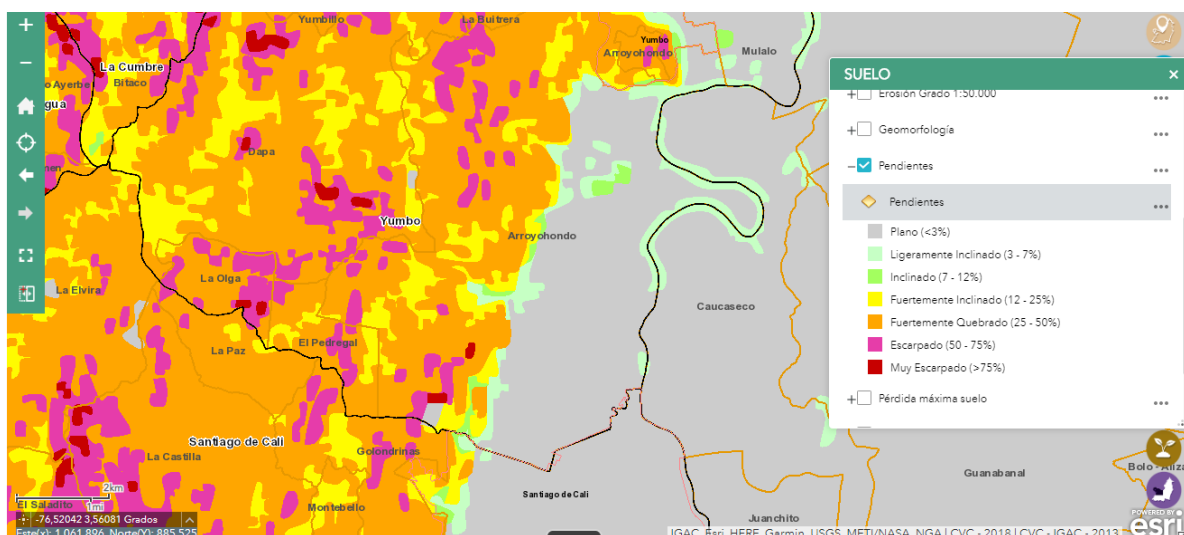


Ilustración 5. Pendiente del sector de estudio corregimiento Arroyohondo – Yumbo (Fuente: GeoCVC)

7 Resultados y Discusión

7.1 Inventario de fuentes fijas con emisión de material Particulado (PM10)

Para el desarrollo de este trabajo fueron analizadas 105 fuentes fijas correspondiente a 25 empresas del sector y 3 canteras de explotación de material de construcción, las cuales fueron agrupadas por sectores definidos conforme a su característica principal de producción, es preciso aclarar que solo fueron incluidas las fuentes fijas que aportan material Particulado a la atmósfera y que presentan los respectivos estudios de emisiones a la CVC. En la tabla 9 se muestra la clasificación de las industrias:

Tabla 10. Listado de empresas estudiadas

SECTOR	NOMBRE DE LA EMPRESA
Acopi	Empresa 1
	Empresa 2
	Empresa 3
	Empresa 4
	Empresa 5
	Empresa 6
Canteras	Empresa 7
	Empresa 8
	Empresa 9
	Empresa 10
	Empresa 11
	Empresa 12
Arroyohondo	Empresa 13
	Empresa 14
	Empresa 15
	Empresa 16
	Empresa 17
Guabinas	Empresa 18
	Empresa 19

Las Americas	Empresa 20
	Empresa 21
	Empresa 22
	Empresa 23
	Empresa 24
	Empresa 25

De acuerdo a la ubicación que se dio a las empresas por sectores, según anexo 3, se puede observar que el sector con mayor densidad es Arroyohondo, el cual cuenta con 10 empresas generadoras de MP, correspondiente al 40% del total de las empresas evaluadas y solo el 8% corresponde al sector Las Américas con 2 establecimientos. Los sectores Acopi y Guabinas representan el 20% cada uno, con diez empresas en total y finalmente se ubica el sector Canteras con tres firmas y frentes de explotación, correspondiente al 12% del total de las empresas objeto de estudio.

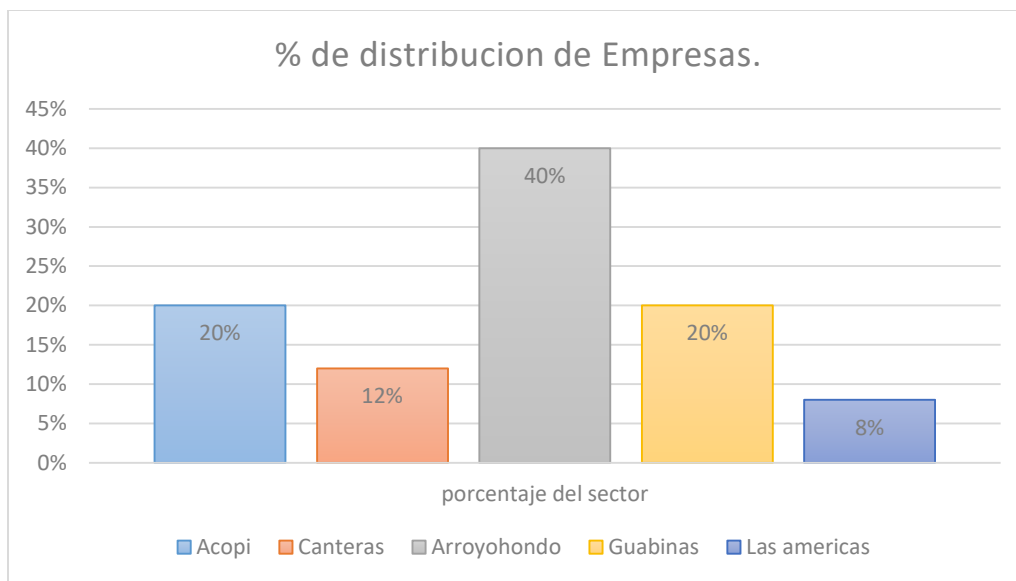


Ilustración 6. Distribución porcentual de las empresas ubicadas en los sectores de estudio

El número de fuentes de emisión de MP no está directamente relacionado con el número de empresas, ya que esto depende de los procesos productivos de dichas empresas, tal como se

puede observar en la ilustración No. 8, donde el sector CANTERAS cuenta con el mayor porcentaje de fuentes de emisión, correspondiente al 30,61%, debido a que la actividad tiene fuentes dispersas en su proceso, clasificándolas en 15 fuentes de emisión por establecimiento, las cuales son las más representativas de acuerdo a los estudios de calidad del aire aportados a la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca, seguido de los sectores Arroyohondo con un 29,93%, Las Américas con 24,49% correspondiente a dos empresas del sector; Guabinas tiene el cuarto lugar con el 10,20% y por último el sector Acopi con el 4,76% de fuentes de emisión

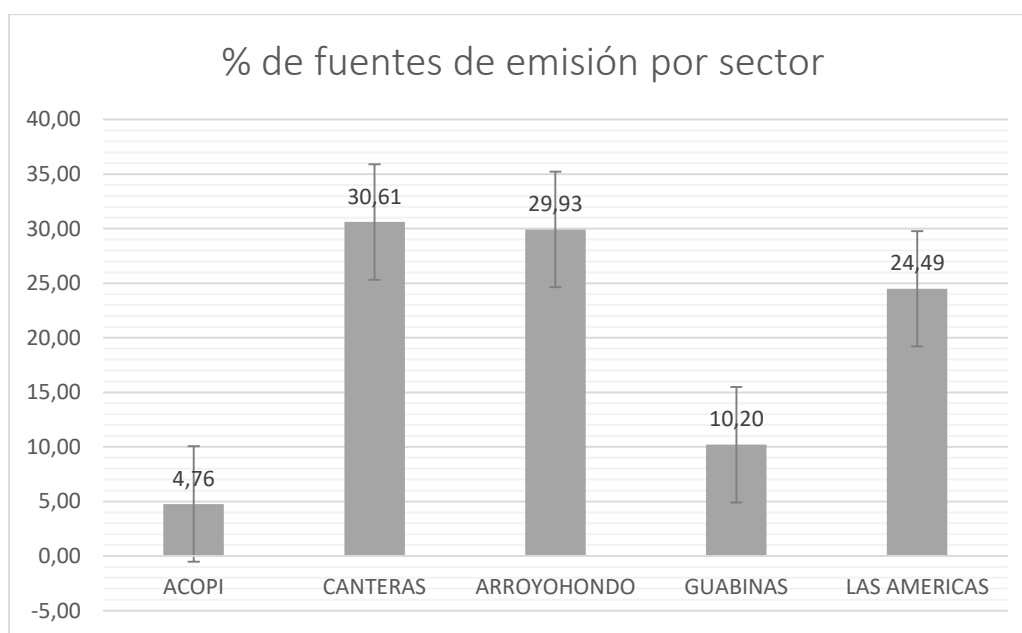


Ilustración 7. Distribución porcentual de las fuentes fijas por sector de estudio

Para esta modelación se consideró presuntivamente que la emisión de PM_{10} es continua, es decir, el funcionamiento de las fuentes fijas y de área fue de 24 horas, adicionalmente, las consideraciones y criterios técnicos para evaluar la emisión de PM_{10} fue exclusivo para actividades con fuentes fijas (chimeneas) y algunas fuentes de área, como ya se indicó al inicio, esto fue exclusivo para las actividades de las canteras ubicadas en el área de estudio y que han presentado los respectivos estudios ante la autoridad ambiental.

7.2 Procesamiento información y corrida del modelo Aermod View

Respecto a los resultados obtenidos después del procesamiento de la información ingresada al modelo AERMOD VIEW 9.6.1, y que fueron generados por el procesador AERMET VIEW 9.6.1, se obtuvo la respectiva Rosa de Vientos que nos define la velocidad y dirección del viento y que a continuación se presenta:

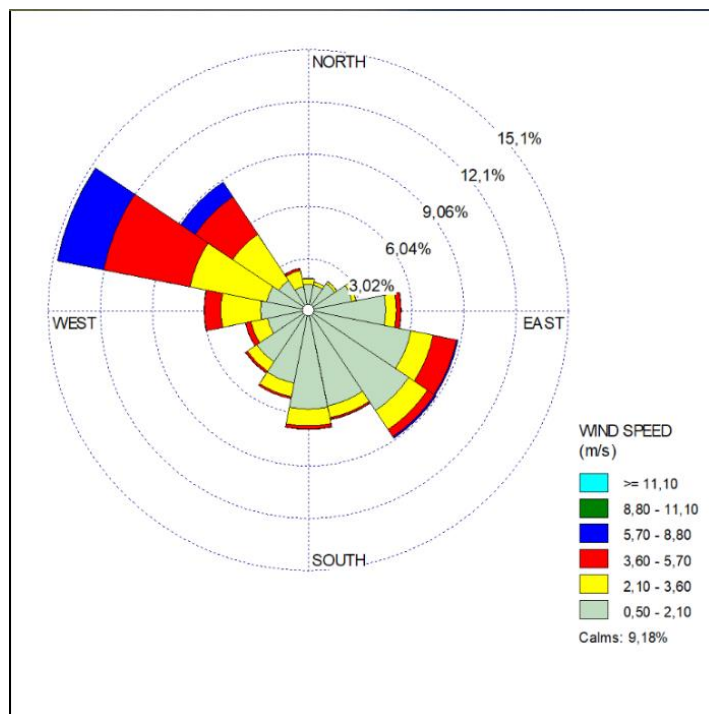


Ilustración 8. Rosa de vientos Zona Industrial del municipio de Yumbo

Teniendo en cuenta que se tomó como punto de referencia la Glorieta de Sameco, incluyendo parte de la zona Nororiental del municipio de Cali, los vientos predominantes; corresponden a los provenientes del Occidente-Nor-Occidente (WNW) con una frecuencia del 14.81%. La segunda dirección predominante corresponde a vientos provenientes del Nor-Occidente (NW) con una frecuencia de 8.94%. La tercera dirección predominante corresponde a vientos provenientes del Sur-Este (SE) con una frecuencia de 8.91%. La cuarta dirección predominante corresponde a vientos provenientes del Este-Sur-Este (ESE) con una frecuencia del 8.86%. La siguiente tabla muestra la frecuencia por rango de velocidad.

Tabla 11. Frecuencia por rango de velocidad del viento

Dirección	Velocidades Viento (m/s)						Total
	0,50 - 2,10	2,10 - 3,60	3,60 - 5,70	5,70 - 8,80	8,80 - 11,10	>= 11,10	
N	1,52	0,33	0,03	0,00	0,00	0,00	1,89
NNE	1,52	0,17	0,00	0,00	0,00	0,00	1,69
NE	1,88	0,14	0,02	0,00	0,00	0,00	2,04
ENE	2,60	0,25	0,01	0,00	0,00	0,00	2,86
E	4,51	0,61	0,27	0,02	0,00	0,00	5,40
ESE	6,09	1,30	1,38	0,08	0,00	0,00	8,86
SE	7,02	1,32	0,49	0,10	0,01	0,00	8,94
SSE	5,67	0,70	0,10	0,02	0,00	0,00	6,49
S	5,75	0,97	0,19	0,01	0,00	0,00	6,92
SSW	4,35	0,79	0,12	0,00	0,00	0,00	5,25
SW	3,63	0,65	0,13	0,02	0,00	0,00	4,43
WSW	2,44	0,99	0,32	0,01	0,00	0,00	3,75
W	2,79	2,30	0,95	0,02	0,00	0,00	6,06
WNW	2,49	4,51	5,09	2,72	0,01	0,00	14,81
NW	2,09	3,21	2,59	1,03	0,00	0,00	8,91
NNW	1,44	0,94	0,13	0,01	0,00	0,00	2,52
Sub-Total	55,78	19,17	11,84	4,03	0,02	0,00	90,82
			CALMAS				9,18
			Missing/Incomplete				0,00
			Total				100,00

Las velocidades predominantes se encuentran en el rango entre 0.5 y 2.1 m/s con una frecuencia del 55.8%, seguido por el rango entre 2.1 a 3.6 m/s con una frecuencia del 19.2%. El tercer rango con una frecuencia del 11.8% es el comprendido entre 3.6 a 5.7 m/s. Los vientos en calma (menores de 0.5 m/s) tienen una frecuencia de 9.2%.

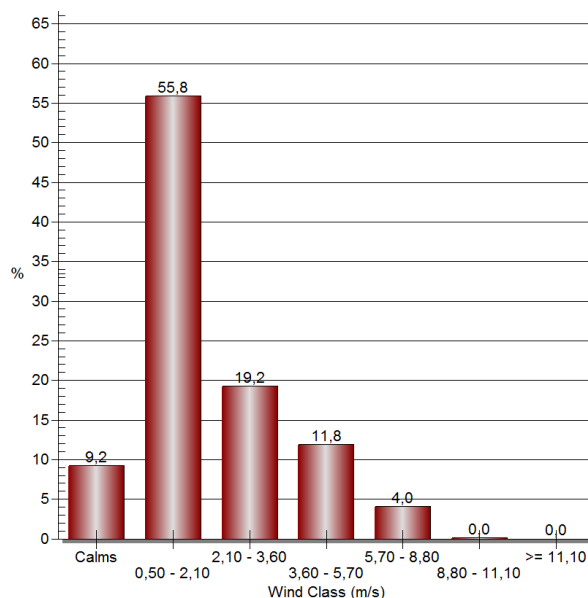


Ilustración 9 Frecuencia de distribución de velocidad de viento a partir del software: Aermod View 9.16

Los siguientes datos son analizados a partir de los registros arrojados en el procesamiento meteorológico utilizando AERMET View 9.6.1, para los años 2012 a diciembre de 2014.

- *Temperatura:* La temperatura promedio fue de: 21.4 °C durante el día 21,8 °C y durante la noche 20°C.
- *Presión Barométrica:* El promedio de las lecturas es de 882,06 mm Hg, con un máximo de 904 mm Hg y un mínimo de 862 mm de Hg.
- *Humedad relativa:* El promedio de las lecturas es de 75.9%; con un máximo de 100% y un mínimo de 28%.

Por otra parte, se puede ver en la siguiente grafica que el perfil de elevación del área de estudio presenta cotas mínimas en los 948m y más altas en 1965m, la primera corresponde a la dirección Este-Oeste, la cual termina en la Cordillera Occidental en una longitud de 20km; esta topografía influencia la dispersión de contaminantes a través del aire, debido a las condiciones meteorológicas referentes a la dirección y velocidad del viento, porque las zonas planas

consiguen un flujo libre en la dirección predominante del viento y un flujo turbulento en la zona compleja. (Arrieta-Fuentes. 2016).

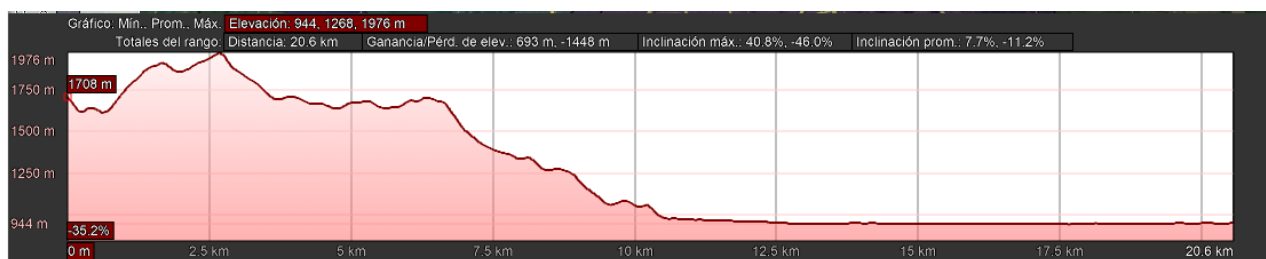


Ilustración 10. Perfil de elevación de la zona de estudio. Fuente: Google earth pro

Como se ha mencionado a lo largo de todo el trabajo el área de dominio de la modelación fue una grilla de 10 x 10 km, con el fin de cubrir la mayor cantidad de empresas y receptores sensibles como son las comunidades residenciales del municipio de Cali y Yumbo, donde se obtuvieron los siguientes resultados de las isopletas o curvas de concentración del contaminante PM_{10} para un periodo de 24 horas.

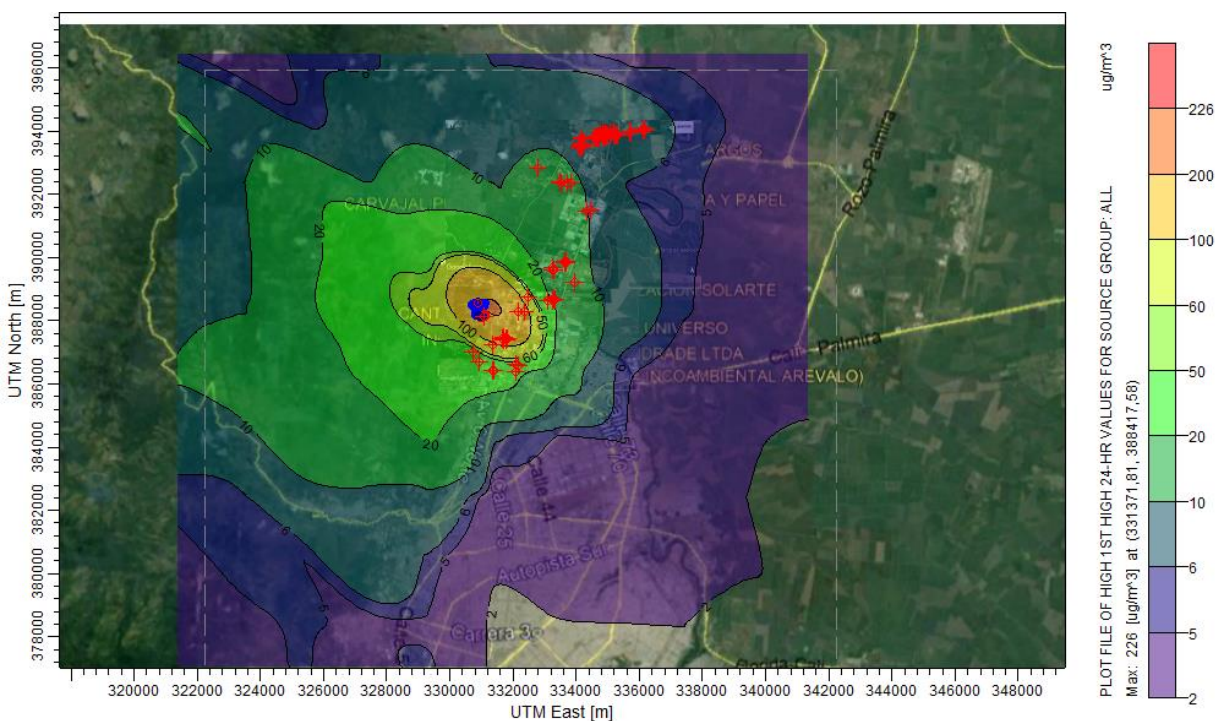


Ilustración 11. Concentración de PM_{10} en el área de estudio para un periodo de 24h. (Fuente: Aermod View)

Una vez conocidos los resultados de la modelación de dispersión de PM_{10} con el modelo Aermod View en la zona industrial del municipio de Yumbo y de acuerdo a la tendencia de la concentración en los cinco sectores se comparan con el estándar máximo permisible estipulado en la Resolución No. 2254 de 2017, para un tiempo de exposición diaria de 24 horas, verificando la excedencia de algunos sectores.

Tabla 12. Comparación concentración de PM_{10} con niveles máximos permisibles

Comparación de los resultados de la modelación con la norma diaria					
<i>Contaminante</i>	<i>Sector de estudio</i>	<i>Tiempo de exposición</i>	<i>Nivel máximo Permisible ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)</i>	<i>Isopletas de concentración según modelo ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)</i>	<i>Excedencia de la norma</i>
PM_{10}	Acopi	24 horas	75	20-60	No excede
	Arroyohondo			10-200	Excede
	Canteras			50-226	Excede
	Guabinas			10-20	No excede
	Las Américas			6-10	No excede

La modelación de PM_{10} en la zona de estudio indica que la mayor concentración se ubica en el sector Canteras, con concentraciones por el orden de $200\mu\text{g}/\text{m}^3$, en coordenadas UTM: 331351,65N y 388439,04E, dichas concentraciones de PM_{10} tienen una tendencia a no cumplir con la norma diaria establecida en la Resolución 2254 de 2017, la cual establece una concentración de $75\mu\text{g}/\text{m}^3$, tal como se puede observar en la ilustración No. 14:

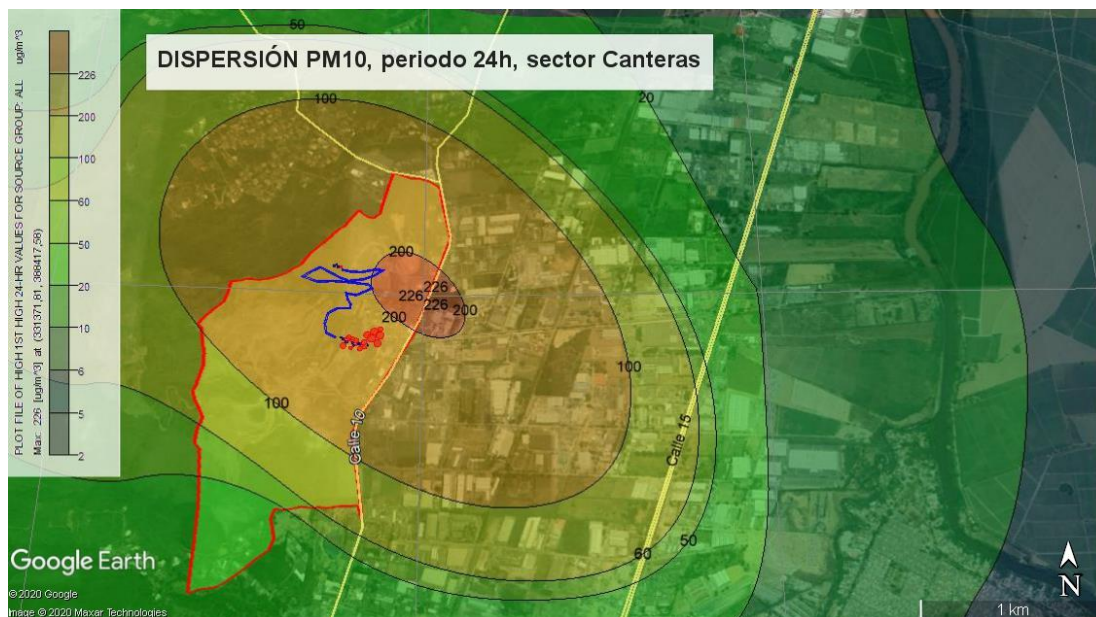


Ilustración 12. Modelación de MP en el sector Cantera (Fuente: Aermod View)

En el sector definido como Arroyohondo se encuentran concentraciones entre $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ y $60\mu\text{g}/\text{m}^3$, sin embargo, existe una tendencia de incumplimiento en el área contigua al sector Canteras, específicamente en la calle 10 entre carreras 35 y 32, donde las concentraciones de MP están superiores a $200\mu\text{g}/\text{m}^3$

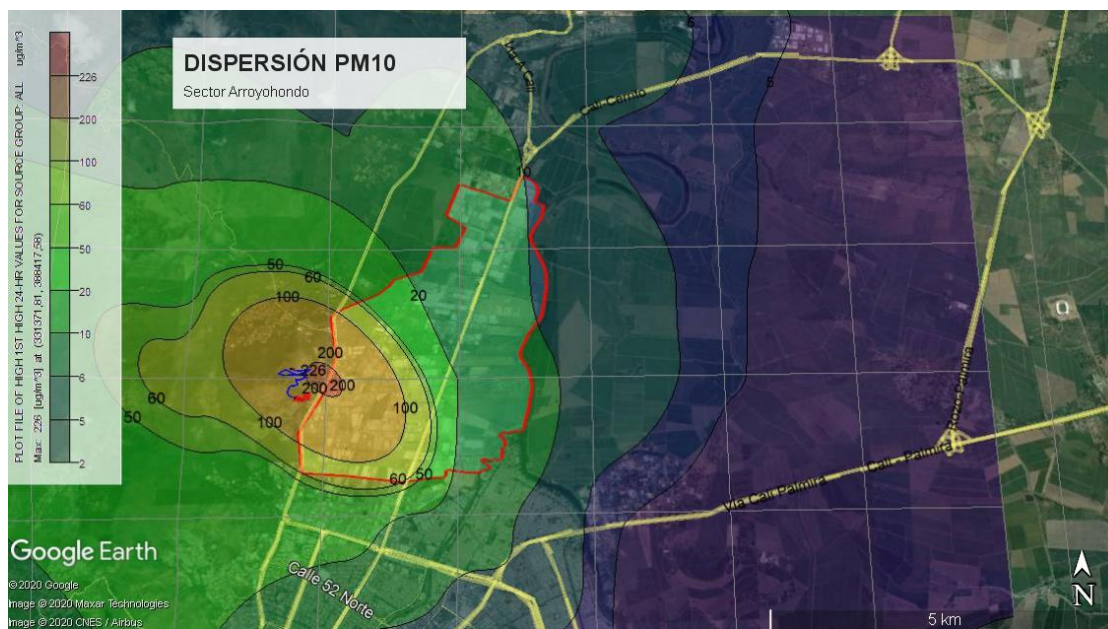


Ilustración 13. Modelación de concentración de MP₁₀, 24h, sector Arroyohondo. (Fuente: Aermod View)

Las concentraciones de PM_{10} disminuyen en sectores más alejados como son Acopi, debido a los efectos de dilución de la concentración de contaminantes. Con estos resultados se verifica que la dispersión del contaminante obedece a los resultados predominantes del viento, es decir, la dirección que para nuestro estudio indica que hay mayor predominancia en sentido Oeste-NorOeste (W-N-W).

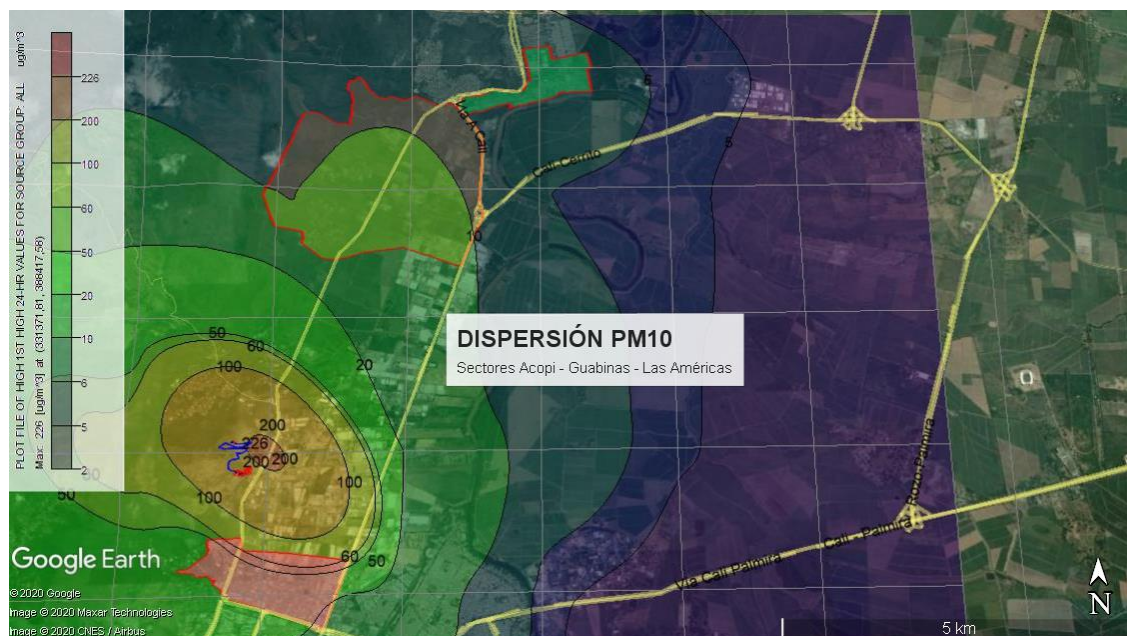


Ilustración 14. Modelación de dispersión MP sector Acopi – Guabinas – Las Américas. (Fuente: Aermod View)

Igualmente, se observa que para los sectores sensibles como son el casco urbano del municipio de Yumbo y la zona norte del municipio de Cali, existen concentraciones entre (50 y 20) $\mu\text{g}/\text{m}^3$, confirmando los resultados consolidados que se tienen en las estaciones de calidad del aire ubicada en la escuela Alberto Mendoza (antes Juan B. Palomino), jurisdicción del municipio de Yumbo y la ECA del Éxito, en el municipio de Cali, cuyos valores para el año 2018 se encuentran cumpliendo con la norma de calidad del Aire, Resolución 2254 de 2017, expedida por el MADS, tal como se observa en la siguiente tabla:

Tabla 13. Comparación estándar anual vs. Concentración diaria de PM10

Comparación de los resultados de la modelación con la tendencia anual de las ECA					
Contaminante	Nivel máximo permisible anual ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Estación de calidad del aire	Promedio anual ($(\mu\text{g}/\text{m}^3)$)	Sector de estudio	Isopletras de concentración según modelo ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
PM ₁₀	50	Yumbo	34.4	Las Américas	6-10
		Las Américas	57.7	Guabinas	6-20
		El País	71.5	Acopi	20-60
		La Flora	38.9	Acopi	20-60

Con lo anterior, se puede inferir que existen otros aportantes de material particulado en los sectores mencionados en la tabla No. 13, tales como fuentes móviles, re-suspensión de PM en las vías y otras actividades cercanas al casco urbano de Yumbo como es la producción de carbón vegetal en el sector Piles –Yumbo.

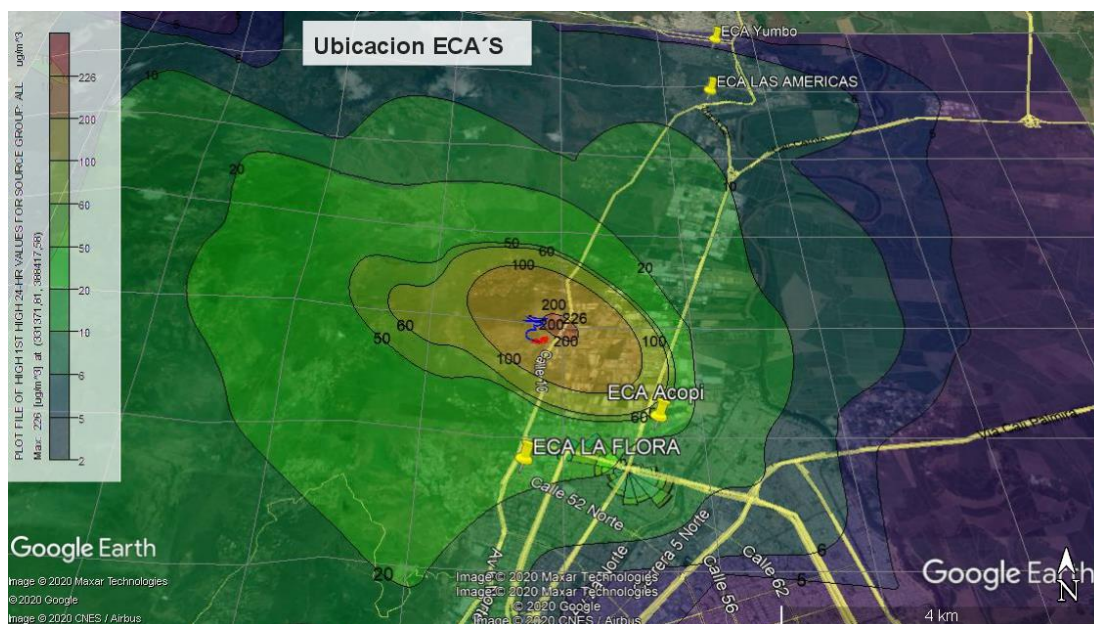


Ilustración 15. Ubicación ECA's Vs. Isoconcentraciones de PM₁₀. (Fuente: Aermod View)

Respecto a los valores de concentración en la zona de la cordillera occidental, donde actualmente no existe ningún tipo de actividad industrial y no se registraron datos de emisiones, se plantea una hipótesis donde el relieve y el viento tienen efecto sobre esta tendencia, es decir que dichas concentraciones se ven afectadas por situaciones eólicas y la presencia de la zona montañosa, lo que genera en el movimiento del viento, situación que influye en la deposición del contaminante PM_{10} .

Los datos de la modelación fueron validados con estudios de calidad del aire desarrollados en la zona de estudio, municipio de Yumbo, realizados por consultores y presentados a la Autoridad Ambiental – CVC y resultados de monitoreos calidad del aire Estaciones La Flora –DAGMA- y Alberto Mendoza de CVC.

De acuerdo a los resultados obtenidos en la modelación de dispersión de Material Particulado (PM_{10}) en la zona industrial del municipio de Yumbo y teniendo en cuenta la calidad del aire como un factor fundamental para la salud de las personas permanentes o no en el sector, así como la población sensible del casco urbano de los municipios de Yumbo y Cali, se proponen las siguientes estrategias para obtener una calidad del aire óptima.

7.3 Estrategias complementarias para la información del software de la Calidad del Aire en la zona industrial del municipio de Yumbo.

La CVC debe contar con un software que permita guardar toda la información histórica de calidad del aire, inventarios de emisiones, meteorología y modelaciones de calidad del aire disponibles para la zona de estudio (Sector Acopi) y su vez poder crear herramientas para la comunicación de dicha información al público a través de la página Web institucional. Esto le permitirá a la Corporación evaluar continuamente, y con diferentes perspectivas, las metas del Plan de Acción y la descontaminación Atmosférica para el sector industrial. En particular, es

importante contar con un soporte continuo de la información en tiempo real, necesario para apoyar las decisiones asociadas a episodios de contaminación por PM_{10} en el municipio de Yumbo.

Las estaciones de calidad del aire de Yumbo deben ser implementadas como estaciones con representatividad poblacional, es decir, que sirvan de instrumento a la Secretaria de Salud municipal, para hacer una correlación entre los datos consignados y los reportes de Enfermedades Respiratorias Agudas (ERA) con el fin de que se convierta en una gestión transparente hacia la comunidad y la autoridad ambiental.

Es importante que se cree un canal de comunicación entre la Academia y La CVC, para que se generen proyectos universitarios con los datos almacenados en el software, claro está, restringiendo el acceso a la información de acuerdo a lo estipulado por la Autoridad Ambiental.

8 Conclusiones

Con los resultados obtenidos en la modelación de MP menor a 10 micras en el sector Industrial del municipio de Yumbo, se puede concluir lo siguiente:

Con la actualización del inventario de emisiones atmosféricas para la zona industrial del municipio de Yumbo se verificó la existencia de 25 establecimientos con actividades productivas y de explotación minera, las cuales cuentan con 105 fuentes fijas y 45 fuentes de área. Para el estudio no fueron incluidos los aportes de los vehículos que transitan por la vía pública, los cuales generan un aporte importante en PM_{10} según estudios reportados por la Organización Mundial de la Salud – OMS y el documento CONPES 3930, datos que deben tenerse en cuenta para establecer la realidad de las concentraciones en la zona, esto en razón a que la mayor movilidad se desarrolla en vehículos de carga cuyo combustible es Diesel.

La modelación realizada con AERMOD WIEW, indica que las concentraciones de PM_{10} en el sector canteras presenta incumplimiento para el periodo de 24h, con concentraciones superiores a $200\mu g/m^3$, situación que obedece a las múltiples actividades de emisión generadas por las canteras, en especial los aportes por la re-suspensión de las vías de tránsito al interior de las canteras, el almacenamiento del material y voladuras, entre otros, las cuales tienen efecto en otros sectores cuyas actividades productivas no se clasifican en las actividades nombradas, pero si se ubican dentro de la isopleta de la concentración que supera la norma.

La favorabilidad de las condiciones meteorológicas y topografía de la zona de estudio permite la dispersión del contaminante PM_{10} , cuya velocidad de los vientos es superior a 8m/s y con mayor influencia Oeste-Noroeste (WNW), evitando mayores concentraciones sobre receptores sensibles como son las comunidades de los municipios de Yumbo y Cali.

Los resultados de la modelación muestran que para el mejoramiento de la calidad del aire del sector objeto de estudio, se requieren acciones articuladas y coordinadas entre la Autoridad Ambiental, Secretaria de Salud Municipal, Transporte, Infraestructura, bajo un enfoque de coordinación y cooperación para la gestión en temas como seguimiento y control, vigilancia epidemiológica, aplicación de carpeta asfáltica en algunas vías y bermas del sector, renovación del parque automotor, mejora en la calidad del combustible diésel principalmente, producción más limpia en cuanto a sustitución de combustibles fósiles por gas natural, mejores tecnologías disponibles en sistemas de control, responsabilidad social empresarial, ordenamiento territorial y gestión de proyectos compartidos.

9 Recomendaciones

Dentro de las acciones a seguir por parte de la Autoridad Ambiental es necesario que se implemente la transmisión de los datos de la red de vigilancia de la calidad del aire en tiempo real, en el municipio de Yumbo, como una medida de prevención y control de la contaminación.

Elaborar el inventario de fuentes móviles, para diagnosticar, evaluar y promover soluciones eficientes en relación con la contaminación que generan, además de las fuentes dispersas como es la re-suspensión de MP por los vehículos que transitan en el sector.

La Autoridad Ambiental debe adelantar un proyecto para realizar la desagregación de los filtros de calidad del aire en la estación el Pais, con el fin de conocer los porcentajes de contribución de dicho material por parte de cada uno de los actores.

Mantener actualizado el Inventario de fuentes fijas con la información aportada por cada uno de los usuarios que reportan sus emisiones a la Autoridad Ambiental, las cuales deben ser complementadas por las visitas de seguimiento y control que realice la CVC.

Igualmente, es necesario que las Autoridades Ambientales, específicamente la CVC, como máxima autoridad ambiental en el municipio de Yumbo, revise las licencias ambientales para la operación de las explotaciones en el sector, las cuales deben contar con los controles de emisiones de PM en cada una de sus actividades generadoras, además de verificar los horarios de voladuras y el área de explotación de los títulos, que deben realizarse en los horarios cuyas condiciones meteorológicas sean favorables para dicha actividad.

Es importante que se promueva la participación comunitaria en actividades y programas de protección ambiental, desarrollo sostenible y manejo adecuado de los recursos naturales renovables por parte de la CVC, la Administración Municipal y los actores sociales claves, en los

procesos de formulación de los planes estratégicos de las entidades los cuales deben contribuir a prevenir y controlar la contaminación del aire en el Municipio.

Promover un reordenamiento del territorio evitando que se mezclen sectores residenciales con sectores industriales o viceversa.

10 Referencias

- Alcaldía de Yumbo. (2016). *Alcaldía de Yumbo*. Alcaldía de Yumbo. Retrieved January 1, 2020, Recuperado de <http://www.yumbo.gov.co/Paginas/default.aspx>
- Aroca, J. (2018). *Informe de Modelación Matemática e Isopletas Cálculo de la Dispersión de Material Particulado (TSP y PM10) Aplicando Aermod View 8.9*. Explotación de un Yacimiento de Materiales de Construcción (Diabasas)-Contrato de Concesión No. 16674 e Instalación y Operación de una Planta Trituradora. Santiago de Cali.
- Arrieta-Fuentes, A. (2016). *Dispersión de material particulado (PM10), con interrelación de factores meteorológicos y topográficos*. *Ingeniería Investigación Y Desarrollo*, 16(2), 43-54. Recuperado de <https://doi.org/10.19053/1900771X.v16.n2.2016.5445>
- Bustos, C. (2004). *Aplicación de Modelos de Dispersión Atmosférica en la Evaluación de Impacto Ambiental: Análisis del Proceso*. (Tesis Magister). Universidad de Chile. Recuperado de <http://mgpa.forestaluchile.cl/Tesis/Bustos,%20Cristian.pdf>
- Borras, E. (2013). *Caracterización de Material Particulado Atmosférico Generado en Reactores Fotoquímicos y Procedentes de Muestras*. (Tesis doctoral). Universidad Politécnica de Valencia. Recuperado de https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/31645/TD%20E.Borr%C3%A1s_V3.pdf?sequence=1
- CONPES, D. (2018). *Declaración de Importancia Estratégica del Proyecto Construcción, Adquisición, Adecuación y Mantenimiento de las Sedes de la Escuela Superior de Administración Pública Nacional*. CONPES 3930. Recuperado de <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/3930.pdf>
- CONPES, D. (2018). *Política para el mejoramiento de la calidad del aire*. CONPES 3943. Recuperado de <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/3943.pdf>
- CVC. (2018). Informe de la Calidad del Aire. Recuperado de https://docs.google.com/viewer?a=v&pid=sites&srcid=ZGVmYXVsdGRvbWVpbnxjdmNjYWxpZGFkYWlyZXxneDozODlmMGRjMDEyMmQzNWZh&urp=gmail_link
- EPA. (2020). *Aire*. Recuperado de <https://espanol.epa.gov/espanol/aire>
- IDEAM. Subdirección de Meteorología. (2007). *Información técnica sobre gases de efecto invernadero y el cambio climático*. Recuperado

de <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21138/Gases+de+Efecto+Invernadero+y+e1+Cambio+Climatico.pdf>

Jaramillo, M., Núñez, M., Ocampo, W., Pérez, D. y Portilla, G. (2003). *Inventario de emisiones de contaminantes atmosféricos convencionales en la zona de Cali – Yumbo*. Revista facultad de Ingeniería. Universidad de Antioquía. Volumen 31. Páginas 38 – 48.

Recuperado de: <https://www.redalyc.org/pdf/430/43003103.pdf>

Ministerio del medio ambiente de Chile. (2012). *Guía para uso de modelos de calidad del aire en el SEIA. Servicio de evaluación ambiental*. Chile. Recuperado de:

http://www.sea.gob.cl/sites/default/files/migration_files/guias/Guia_uso_modelo_calidad_del_aire_seia.pdf

Ministerio de medio ambiente y desarrollo sostenible. 2019. *Contaminación atmosférica*.

Recuperado de:

<http://www.minambiente.gov.co/index.php/component/content/article/1801-plantilla->

Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible (2017). *Resolución 2254 “Por la cual se adopta la norma de calidad del aire ambiente y se dictan otras disposiciones”*. Recuperado

de <http://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/resoluciones/96-res%202254%20de%202017.pdf>

Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible (2019). *Contaminación Atmosférica*. Recuperado

de <http://www.minambiente.gov.co/index.php/component/content/article/1801-plantilla->

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2017). *Guía para la Elaboración de Inventarios de Emisiones Atmosféricas*. Recuperado

de http://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/pdf/emisiones_atmosfericas_contaminantes/documentos_relacionados/GUIA_PARA_LA_ELABORACION_DE_INVENTARIOS_DE_EMISIONES_ATMOSFERICAS.pdf

Municipio de Yumbo. (2018). Acuerdo “*Por medio del cual se adopta el Plan Básico de Ordenamiento Territorial del Municipio de Yumbo (Valle), y se dictan otras disposiciones*”. Recuperado

de <http://www.yumbo.gov.co/NuestraAlcaldia/SalaDePrensa/Paginas/Administracion->

Municipal-Trabaja-en-la-Formulacion-del-Plan-Basico-de-Ordenamiento-Territorial---
PBOT.aspx

- OMS. (2006). *Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre*. Recuperado de https://www.who.int/publications/list/who_sde_phe_oeh_06_02/es/
- Santa, A. (2000). *Difusión de Contaminantes Gaseosos en la Atmosfera*. Faculta Regional del Rosario. Recuperado de https://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/quimica/5_anio/orientadora2/apuntes_catedra/Estabilidad%20Atmosfrica.pdf
- Seinfeld, J., & Pandis, S. (1998). *Science and Education. Assessment of Total Suspended Particulates (TSP) in Ikot Abasi L. G. A., Nigeria*. Recuperado de <http://www.sciepub.com/reference/132850>
- Silva, A., & Arcos, D. (2011). Aplicación del programa AERMOD para modelar dispersión de PM10 emitido por equipos de calefacción a leña en la ciudad de Constitución. Centro Regional de Estudios Ambientales CREA. Recuperado de https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?pid=S0718-28132011000100001&script=sci_arttext&tlng=e
- Toro, M.V., González. M.I., Aristizabal, G.A. y Molina, J.P. (2016). *Estudio de la dispersión de contaminantes atmosféricos, en la jurisdicción de CORNARE: Informe General*. Universidad Pontificia Bolivariana – Grupo de investigaciones ambientales. Recuperado de: <https://www.upb.edu.co/es/investigacion/nuestro-sistema/grupos/grupo-investigaciones-territorio-medellin>
- Turner, D.B. (1970). *Workbook of atmospheric dispersion estimates*. Revised sixth printing, Office of Air Programs Publications, N°. AP-26
- Velázquez (2003). *Modelación del transporte y difusión del SO₂ a partir de una fuente fija puntual en la ciudad de San Luis Potosí*. (Tesis de Maestría). Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de San Luis Potosí. México
- W. Strauss, S. J. Mainwaring. 1990. *Contaminación del aire: causas, efectos y soluciones*. Editorial Trillas

11 Anexos

Anexo 1. Glosario

El siguiente glosario utilizado hace parte de las definiciones de los Decretos No. 909 de 2008 y Decreto 1076 de 2015, expedidos por el MADS.

Atmósfera: Capa gaseosa que rodea la Tierra.

Aire: Es el fluido que forma la atmósfera de la Tierra, constituido por una mezcla gaseosa cuya composición es, cuando menos, de veinte por ciento (20%) de oxígeno, setenta y siete por ciento (77%) de nitrógeno y proporciones variables de gases inertes y vapor de agua, en relación volumétrica.

Área fuente: Es una determinada zona o región, urbana suburbana o rural, que por albergar múltiples fuentes fijas de emisión, es considerada como un área especialmente generadora de sustancias contaminantes del aire.

Biomasa: Materia orgánica originada en un proceso biológico, espontáneo o provocado, utilizable como fuente de energía.

Combustibles Gaseosos: Se denominan combustibles gaseosos a los hidrocarburos naturales y a los fabricados exclusivamente para su empleo como combustibles, y a aquellos que se obtienen como subproducto en ciertos procesos industriales y que se pueden aprovechar como combustibles. Por ejemplo: gas natural, metano, etano, propano, butano, gas de refinería, gas de alto horno, biogas o mezclas de éstos.

Combustibles Líquidos: Se consideran combustibles líquidos Diesel, Fuel Oil No. 2 o ACPM, Fuel Oil N° 6, crudo o bunker.

Combustibles Sólidos: Se consideran combustibles sólidos los siguientes: carbón mineral, coque, carbón vegetal, antracita, hullas, lignitos, leña, turbas, madera, biomasa, fibras vegetales, asfalto y brea.

Concentración de una Sustancia en el Aire: Es la relación que existe entre el peso o el volumen de una sustancia y la unidad de volumen de aire en la cual está contenida.

Condiciones de Referencia: Son los valores de temperatura y presión con base en los cuales se fijan las normas de calidad del aire y de las emisiones, que respectivamente equivalen a 25 °C y 760 mm de mercurio.

Contaminantes: Son fenómenos físicos o sustancias o elementos en estado sólido, líquido o gaseoso, causantes de efectos adversos en el medio ambiente, los recursos naturales renovables y la salud humana que solos, o en combinación, o como productos de reacción, se emiten al aire como resultado de actividades humanas, de causas naturales, o de una combinación de estas.

Contaminación atmosférica: Es el fenómeno de acumulación o de concentración de contaminantes en el aire.

Controles al final del proceso: Son las tecnologías, métodos o técnicas que se emplean para tratar, antes de ser transmitidas al aire, las emisiones o descargas contaminantes generadas por un proceso de producción, combustión o extracción, o por cualquier otra actividad capaz de emitir contaminantes al aire, con el fin de mitigar, contrarrestar o anular sus efectos sobre el medio ambiente, los recursos naturales renovables y la salud humana.

Emisión: Es la descarga de una sustancia o elemento al aire, en estado sólido, líquido o gaseoso, o en alguna combinación de éstos, proveniente de una fuente fija o móvil.

Emisión fugitiva: Es la emisión ocasional de material contaminante.

Emisión Molesta: Es aquella generada por sustancias o actividades industriales, comerciales o de servicio, que produce fastidio, aunque no cause daño a la salud humana.

Episodio o evento: Es la ocurrencia o acaecimiento de un estado tal de concentración de contaminantes en el aire que dados sus valores y tiempo de duración o exposición, impone la declaratoria por la autoridad ambiental competente, de alguno de los niveles de contaminación, distinto del normal.

Fuente de emisión: Es toda actividad, proceso u operación, realizado por los seres humanos, o con su intervención, susceptible de emitir contaminantes al aire.

Fuente fija: Es la fuente de emisión situada en un lugar determinado e *inamovible*, aun cuando la descarga de contaminantes se produzca en forma dispersa.

Fuente fija puntual: Es la fuente fija que emite contaminantes al aire por ductos o chimeneas.

Fuente fija dispersa o difusa: Es aquella en que los focos de emisión de una fuente fija se dispersan en un área, por razón del desplazamiento de la acción causante de la emisión, como en el caso de las quemas abiertas controladas en zonas rurales.

Fuente móvil: Es la fuente de emisión que por razón de su uso o propósito, es susceptible de desplazarse, como los automotores o vehículos de transporte a motor de cualquier naturaleza.

Inmisión: Transferencia de contaminantes de la atmósfera a un receptor. Se entiende por inmisión la acción opuesta a la emisión. Aire inmisibles es el aire respirable al nivel de la tropósfera.

Método Alternativo: Es el procedimiento de medición y análisis señalado en la presente resolución, el cual puede producir resultados similares a los del “Método de Referencia” en la determinación de la concentración de una sustancia contaminante, que puede reemplazar al “Método de Referencia”.

Método de Referencia: Es el procedimiento de medición y análisis probado exhaustivamente, señalado en la presente resolución, que debe utilizarse para determinar la concentración de una sustancia contaminante y debe realizarse bajo estrictos parámetros técnicos.

Norma de Emisión: Es el valor de descarga permisible de sustancias contaminantes, establecido por la Autoridad ambiental competente, con el objeto de cumplir la norma de calidad del aire.

Norma de calidad del aire o nivel de inmisión: Es el nivel de concentración legalmente permisible de sustancias o fenómenos contaminantes presentes en el aire, establecido por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, con el fin de preservar la buena calidad del medio ambiente, los recursos naturales renovables y la salud humana.

Norma de emisión: Es el valor de descarga permisible de sustancias contaminantes, establecido por la autoridad ambiental competente, con el objeto de cumplir la norma de calidad del aire.

Punto de descarga: Es el ducto, chimenea, dispositivo o sitio por donde se emiten los contaminantes a la atmósfera.

Sistema de Control de Emisiones: Conjunto ordenado de equipos, elementos o maquinaria que se utilizan para el desarrollo de acciones destinadas al logro de resultados medibles y verificables de reducción o mejoramiento de las emisiones atmosféricas generadas en un proceso productivo.

Sustancia: Todo elemento químico y sus compuestos, según se presentan en estado natural o producidos por la industria, ya sea en forma sólida, líquida o gaseosa.

Tiempo de exposición: Es el lapso de duración de un episodio o evento.

Anexo 2. Características para la corrida del modelo Aermod View

Aspectos relacionados con la topografía: En relación con la topografía del modelo de dispersión, existen básicamente dos posibilidades para su corrida:

- Terreno plano (flat): Supone que el área a modelar es plana y tiene la misma altura que la de la base de la fuente empleada. Para el caso de fuentes puntuales considera que la base de la chimenea es el nivel 0 de referencia.
- Terreno elevado: En esta modalidad de terreno se admiten elevaciones de cualquier tipo teniendo presente que el nivel 0 es el de la base de la chimenea de menor cota que se emplea en la simulación, tal como se puede observar en la siguiente imagen:

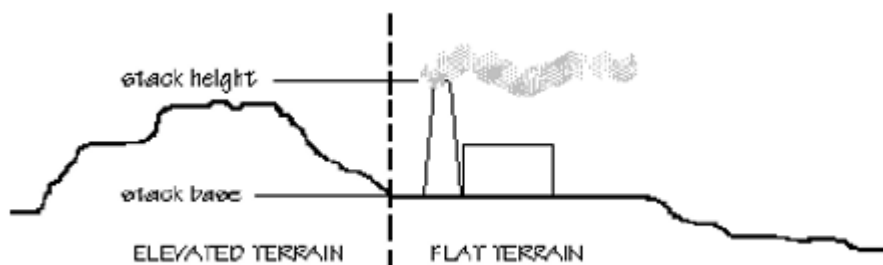


Ilustración 16. Esquema de procesamiento topográfico del modelo

Aspectos relacionados con la rosa de vientos: Para efectos de simulación, se asume además que el comportamiento de vientos es uniforme a lo largo de la zona a modelar, es decir, que el comportamiento de vientos es el mismo de acuerdo con el área abarcada según la escala de análisis empleada. En el caso de que existiesen fenómenos topográficos importantes que afectaran radicalmente el comportamiento de vientos, es necesario segmentar la zona de análisis y correr modelos diferentes dependiendo de la preponderancia de vientos en cada sector.

Algoritmo de sedimentación: (anexo) En un modelo de dispersión de material Particulado las condiciones de sedimentación del material son relevantes e implican una remoción del material de la pluma, para ello los modelos de dispersión disponen, dentro del módulo de control, un algoritmo de remoción de material a lo largo de la pluma.

- Para el caso de la sedimentación de partículas gruesas ($\varphi > 50 \mu\text{m}$) se aplica la ley de Stockes en asocio con el número de Reynolds, cuya ecuación es la siguiente:

$$C_d = \frac{24}{\Re_p} (1 + 0.14 \Re_p^{0.7})$$

- Para el caso de partículas pequeñas ($\varphi < 7.5 \mu\text{m}$) se aplican los factores de retardo de Cunningham:

$$F_d = \frac{F_{d-\text{Stokes}}}{1 + A\lambda/D}$$

Procesamiento meteorológico: La información meteorológica para modelos de dispersión se efectúa por medio del paquete AERMET de la EPA. Este software posee algoritmos de cálculo de capa límite como los propuestos por Holstlang y van Ulden (1985) y que, en el IDEAM, propuestos por Sozzi y Ruiz, se han empleado para parametrizaciones típicas de capa límite, las cuales son:

- Cálculo del ángulo de declinación solar

$$\delta = \phi_i \cos \left[\frac{2\pi (d - d_r)}{d_y} \right]$$

Donde;

Φ : latitud del Trópico del Cáncer (23.45°),

d : día juliano,

d_r : es el día 173 y

d_y : es el número de día en un año (365).

- Cálculo del ángulo de elevación solar

$$\text{sen } \Psi = \text{sen } \phi \text{ sen } \delta - \cos \phi \cos \delta \cos \left[\left(\frac{\pi t_{UTC}}{12} \right) - \lambda_e \right]$$

Donde;

Φ : latitud (en radian)

λ_e : longitud (en radian)

t_{UTC} es $t_L - t_F$ donde t_L es la hora local y t_F es la “time zone”

- Cálculo de la Radiación Solar Global: cuando el ángulo de elevación solar es positivo (es decir en las horas diurnas) R_g se calcula como (Kasten y Czeplak, 1980)

$$R_g = (a_1 \text{ sen } \Psi + a_2)(1 + b_1 N^{b_2})$$

Donde;

N : nubosidad y

las constantes a_1 , a_2 , b_1 , b_2 toman los valores 990, -30, -0.75 y 3.4 respectivamente.

Cuando la elevación solar es negativa, R_g es igual a cero.

- Cálculo de la Radiación Neta:

$$R_n = \frac{(1 - \alpha)R_1 + c_1 T^6 + c_2 N - \sigma T^4}{1 + c_3}$$

T : temperatura (K),

α : coeficiente de “albedo” y

$$C_1 = 531 \cdot 10^{-31} \quad C_2 = 60 \quad C_3 = 0.12 \quad \sigma = 5.67 \cdot 10^{-8}$$

Para estimar:

- El flujo de calor en el suelo G
- El flujo turbulento de calor sensible H_g
- El flujo turbulento de calor latente H_E

En las horas diurnas el modelo determina los parámetros del Balance Energético Superficial, estimando los términos que lo componen, en particular:

- Flujo de calor sensible:

$$H_0 = 0.3R_g + A$$

Donde;

$$A = 2.4N - 25.5$$

- Flujo de calor en el suelo:

$$G = aR_n \quad (a \text{ igual a } 0.1)$$

- Flujo de Calor latente:

$$H_E = (R_n - G) - H_0$$

- La velocidad de fricción: Este parámetro se calcula a través del conocimiento de H_0 y de la relación de la similaridad que describe el perfil vertical del viento en la capa superficial, bajo la siguiente metodología:

$$u_n = u_0 [1 + \alpha \ln(1 + b \rho_0 / \rho_n)]$$

Con:

$$u_0 = \frac{k u}{\ln\left(\frac{z_m}{z_0}\right)} \quad z_m = z_r - 4z_0$$

$$Q_0 = H_0 / \rho C_p \quad Q_n = (T u_0^3) / (\text{kg} Z_m)$$

$$\alpha = \begin{cases} 0.128 + 0.005 \ln\left(\frac{z_0}{z_m}\right) & \text{si } \frac{z_0}{z_m} \leq 0,01 \\ 0.107 & \text{si } \frac{z_0}{z_m} > 0.01 \end{cases}$$

En estas relaciones, k es la constante de Von Karman (0.41), g es la gravedad, z es la altura donde se hace la medición del viento, Z_0 es la rugosidad superficial, p es la densidad del aire y C_p es el calor específico a presión constante. Dado que frecuentemente no se conoce la relación de Z_0 , se puede utilizar la forma aproximada que se fundamenta sobre una clasificación del tipo de suelo y un valor estándar para cada tipo de cobertura.

Tabla 14. Descripción del tipo de suelo

Land Use type	Descripción
1	Water
2	Deciduous forest
3	Coniferous forest
4	Swamp
5	Cultivated land
6	Grassland
7	Urban
8	Desert shrubland

Tabla 15. Rugosidad superficial del tipo de suelo

Land Use type	Rugosidad superficial (m)
1	0.0001
2	1
3	1.3
4	0.2
5	0.03
6	0.05
7	1

8	0.3
---	-----

- La temperatura de escala:

$$T_n = -\frac{H_0}{\rho c_p u_n}$$

- La longitud de *Monin Obukhov* (L)

$$1/L = \frac{kg T_n}{T u_n^2}$$

En las horas nocturnas se utiliza un procedimiento desarrollado por Venkatram (1980), que se resume en las siguientes ecuaciones:

- La velocidad de fricción:

$$u_n = \frac{C_{DN} u}{2} (1 + N^{0.5})$$

Con;

$$C_{DN} = \frac{k}{\ln\left(\frac{z_m}{z_0}\right)} \quad C = 1 - \frac{4u_0^2}{C_{DN} u^2}$$

$$u_0^2 = \frac{\gamma z_m}{kA} \quad A=1100 \quad \gamma=4.7$$

- La longitud de Monin Obukhov:

$$L = Au_n^2$$

- La temperatura de escala:

$$T_n = \frac{T}{kgA}$$

- El flujo de calor sensible:

$$H_0 = -\rho C_p u_n T_n$$

- El flujo de calor en el suelo:

$$G = \alpha R_n \quad (\alpha \text{ igual a } 0.5) \quad (15)$$

- El flujo de calor latente:

$$H_E = (R_n - G) - H_0$$

La estimación de la altura de mezcla se hace teniendo en cuenta tanto la contribución de tipo mecánico (siempre presente) representada por la velocidad de fricción como la contribución convectiva (presente sólo en las horas con flujo sensible de calor positivo) representada por H_g .

En particular:

- En cada hora (del día o de la noche) se puede definir una altura de mezcla de tipo mecánico que se obtiene de la relación

$$h_{mec} = 1330 u_n$$

- En las horas convectivas se puede definir una altura de mezcla de tipo convectivo que se obtienen al tiempo t_2 como solución de la siguiente ecuación, a partir del conocimiento de H_0 , del gradiente de temperatura potencial en la parte alta de la Capa Límite Planetaria (γ) y del valor de la altura de mezcla al tiempo anterior t_1

$$(h_{conv})_{t_2} = \sqrt{(h_{conv})_{t_1}^2 + \frac{2 \cdot A H_0}{\rho C_p \gamma} (t_2 - t_1)}$$

- Se define altura de mezcla:

En las horas estables (noche)

$$h_{mix} = h_{mec}$$

En las horas convectivas (día)

$$h_{mix} = MAX(h_{mec}, h_{conv})$$

Con todas las anteriores ecuaciones matemáticas el modelo AERMOD VIEW ejecuta los datos de entrada del contaminante y las condiciones meteorológicas y topográficas para determinar la dispersión del contaminante, Material Particulado, en la zona industrial del municipio de Yumbo.

Anexo 3. Inventario actualizado de fuentes y empresas del sector industrial del municipio de Yumbo

SECTOR	EMPRESA	COORDENADAS		FUENTE	DIAMETRO (m)	ALTURA DE LA FUENTE (m)	Ts (°C)	Vs (m/s)	
		X	Y						
SECTOR 1	ACOPI	EMPRESA 1	1.061.949	878.140	Horno 1	0,61	15,5	92,6	79,30
			1.061.949	878.140	Horno 2	0,45	14	47,43	12,65
	ACOPI	EMPRESA 2	1.062.602	878.344	Chimenea 1	1,1	20	68,2	13,00
			1.062.676	878.306	Chimenea 3	1,1	17,82	49,1	14,50
	ACOPI	EMPRESA 3	1.061.299	878.628	Caldera 1	0,63	18	126	5,90
	ACOPI	EMPRESA 4	1.062.614	878.128	Caldera 2	0,617	19,9	172,7	6,20
	ACOPI	EMPRESA 5	1.061.842	878.877	Caldera 3	0,37	18	155,3	5,06
SECTOR 2	CANTERAS	EMPRESA 6	1.061.026	879.976	Cantera	0,95	12	79,4	35,20
	CANTERAS	EMPRESA 7	1.061.505	879.473	Cantera				
	CANTERAS	EMPRESA 8	1.061.958	880.287	Cantera				
SECTOR 3	ARROYOHONDO	EMPRESA 9	1.062.160	879.026	Ducto del Filtro Línea 1,2 y 3	1,07	19,2	39,4	12,56
			1.062.163	879.045	Ducto del Filtro de la Línea 4	0,57	18	43,63	23,04
			1.062.257	879.072	Ducto Sistema de Control Refinación	1,59	21,77	57,5	7,25
			1.062.258	879.062	Ducto Sistema de Control Fundición	2,11	29,2	75,6	8,26
			1.062.242	879.036	Ducto de la Planta de Oxido No. 1	0,45	15,2	71,7	6,37
			1.062.242	879.036	Ducto de la Planta de Oxido No. 2	0,45	15	69,5	6,95
			1.062.224	879.132	Ducto de la Planta de Oxido No. 3	0,45	15,2	64,3	5,36
			1.062.194	879.140	Ducto de la Planta de Oxido No. 4	0,45	15	62,13	13,56
			1.062.174	879.097	Ducto Filtros de Líneas de Empaste	1,43	25	50,53	11,49
	ARROYOHONDO	EMPRESA 10	1.062.740	879.891	Horno de Inducción Eléctrica	0,6	14,2	47,4	19,90
	ARROYOHONDO	EMPRESA 11	1.064.158	881.158	Caldera	0,77	20,6	139	8,90
1.064.270			881.560	Sistema de sasores A	0,63	32,65	35,6	5,40	

		1.064.263	881.532	Sistema de aspiración de impurezas - A	0,63	33,25	31	4,00
		1.064.266	881.532	Sistema de aspiración de limpieza A	0,81	34,25	34	8,20
		1.064.266	881.548	Sistema neumático	0,62	33,05	51	18,40
		1.064.279	881.539	Sistema de empaque	0,5	36,95	43	1,90
		1.064.254	881.554	Sistema neumático	0,98	31,95	45	16,10
		1.064.257	881.563	Sistema de sasores B	0,84	32,75	38	8,90
		1.064.242	881.557	Sistema impurezas de mogolla - B	0,5	34,05	35	1,90
		1.064.257	881.548	Sistema aspiración de limpieza - B	0,55	34,05	34	5,30
		1.064.242	881.557	Sistema neumático - C	1,2	41,8	33	6,70
		1.064.242	881.560	Sistema de sasores - C	0,94	33,5	32	7,80
		1.064.242	881.560	Sistema de limpia - C	1,1	43,5	34	7,50
		1.064.245	881.554	Sistema de harina - C	0,44	32,65	34	6,20
		1.064.245	881.557	Sistema impurezas de la mogolla - C	0,34	32,4	38	1,90
		1.064.260	881.579	Sistema de aspiración Salvado (Ducto1) húmedo	0,62	32,75	34	12,30
		1.064.260	881.569	Sistema de aspiración salvado (Ducto 2) seco	0,63	32,65	30	11,20
		1.064.232	881.579	Sistema neumático - Molino	0,41	32,75	32	20,20
		1.064.260	881.588	Sistema de limpieza - Molino	0,65	24,65	37	7,00
ARROYOHONDO	EMPRESA 12	1.064.369	881.133	Caldera Pirotibular	1,2	22,3	213,6	4,35
ARROYOHONDO	EMPRESA 13	1.062.585	879.897	Horno incinerador	0,38	15	86	8,40
ARROYOHONDO	EMPRESA 14	1.062.863	880.321	Horno de Pintura en Polvo Salida	0,24	13	123,03	12,34
ARROYOHONDO	EMPRESA 15	1.063.778	881.341	Secador No. 1	0,75	20,84	74,14	4,92
		1.063.777	881.332	Secador No. 2	0,75	20,84	70,5	5,22
		1.063.765	881.322	Caldera	0,62	20,36	168,39	9,84
ARROYOHONDO	EMPRESA 16	1.063.725	880.316	Recolector de polvo	0,55	8	25	8,94
		1.063.725	880.316	Recolector 1	0,48	8	25	11,74
		1.063.725	880.316	Recolector 2	0,55	8	25	8,94

		1.063.725	880.316	Recolector 3	0,56	8	25	8,62		
		1.063.725	880.316	Recolector 4	0,56	8	25	8,62		
		1.063.725	880.316	Recolector 5	0,55	8	25	8,94		
		1.063.725	880.316	Recolector talco	0,35	4,5	25	17,17		
	ARROYOHONDO	EMPRESA 17	1.063.310	880.294	Tuberia galvanizado	0,17	9	43,8	6,51	
	ARROYOHONDO	EMPRESA 18	1.061.515	878.370	Horno	0,35	19	43	29,40	
	SECTOR 4	GUABINAS	EMPRESA 19	1.063.801	883.966	Caldera No. 5	2,63	50	200,033	12,21
				1.063.792	883.941	Caldera No. 6	2,05	28,7	168,8	15,11
				1.064.152	883.893	Horno	1	20	60,7	5,50
				1.064.127	883.891	Caldera de recuperación	1,69	43	156,9	25,20
GUABINAS		EMPRESA 20	1.064.527	885.176	Colector de polvos No. 1	0,66	15	39,23	15,51	
			1.064.502	885.148	Colector de polvos No. 2	0,8	17	38,07	13,38	
			1.064.545	885.167	Extractor de vapores No. 1	1	22,5	39,2	8,26	
			1.064.502	885.139	Extractor de vapores No. 2	1,03	21	39,37	4,63	
			1.064.582	885.280	Extractores de polvos - auto	0,2	8,2	29,8	53,95	
			1.064.576	885.197	Extractores de polvos - camión	0,2	7,2	29,8	53,95	
			1.064.579	885.259	Extractor de polvo cortadora	0,125	15	29,8	199,64	
			1.064.600	885.452	Extractor polvo pulidora	0,2	10	29,8	77,87	
GUABINAS		EMPRESA 21	1.063.172	884.352	Horno	0,46	18	153,46	3,54	
GUABINAS	EMPRESA 22	1.064.877	883.050	Horno	0,9	25,2	86,37	3,08		
GUABINAS	EMPRESA 23	1.064.759	883.023	Caldera	0,49	16,2	107,2	3,50		
SECTOR 5	LAS AMERICAS	EMPRESA 24	1.065.229	885.699	Horno 5	3,7	40	132	8,98	
			1.065.230	885.714	Horno 6	3,8	43,5	120	8,50	
			1.065.236	885.686	Horno 7	3,36	55	165	10,50	
			1.065.319	885.650	Enfriador Horno 5,6 y 7	2,08	30	139	15,70	
			1.065.402	885.655	Molino 6	1,26	15	95	12,75	
			1.065.402	885.655	Jet Pulse Molino 8	0,97	24,6	73	10,09	
			1.065.402	885.655	Plenum Molino 8	1,39	34,2	63	26,58	
			1.065.402	885.655	Jet Pulse Molino 9	0,73	23,9	83	17,65	

		1.065.402	885.655	Plenum Molino 9	1,23	27,6	74	22,42
		1.065.384	885.719	Empacadora 3	0,59	30,4	35	9,65
		1.065.384	885.719	Empacadora 4	0,5	30,6	36	16,82
		1.065.384	885.719	Empacadora 5	0,57	33,5	38,7	13,20
		1.065.389	885.644	Silo 4	0,395	23,29	30	12,24
		1.065.389	885.644	Silo 5	0,512	35,14	30	14,17
		1.065.389	885.644	Silo 6	0,516	35,15	30	19,93
		1.065.389	885.644	Silo 7	0,61	44,1	30	14,26
		1.065.389	885.644	Silo 8	0,42	27,84	30	14,68
		1.065.389	885.644	Silo 9	0,28	27,43	30	16,24
		1.065.389	885.644	Silo 10	0,5	25	30	0,00
		1.065.366	885.644	Filtro 1	0,69	15,43	30	17,650 0
		1.065.366	885.644	Filtro 2	0,47	7,02	30	14,22
		1.065.366	885.644	Filtro 3	0,38	9,74	30	21,75
		1.065.366	885.644	Filtro 4	0,62	17,21	30	14,79
		1.065.366	885.644	Filtro 5	0,38	23,93	30	24,25
		1.065.366	885.644	Filtro 6	0,465	21,7	30	14,52
		1.065.369	885.660	Sistema de insuflación horno 5 y 6	0,27	19,55	30	29,11
		1.065.369	885.660	Sistema de insuflación horno 7	0,36	19,93	30	16,37
		1.065.358	885.656	Colector silo 5	0,36	19,55	30	16,36
		1.065.358	885.656	Colector silo 7	0,36	19,93	30	16,36
		1.065.706	885.725	Colector planta de autogeneración	2,48	30,12	149	8,60
LAS AMERICAS	EMPRESA 25	1.066.773	885.902	Dissolving Tank	1,67	65	57,7	9,85
		1.066.597	885.905	Gases No Condensables	0,91	65	59,4	11,02
		1.066.279	885.791	Caldera	2,2	38,5	228,2	9,05
		1.066.764	885.905	Caldera de recuperación	2,5	67	177,6	16,98
		1.066.801	885.890	Horno de Cal	1,48	65	213,8	9,14
		1.066.282	885.800	Caldera 5 camara B	2,2	38,5	247,8	12,04

RESUMEN ANÁLITICO EDUCATIVO

RAE

Título del texto	Implementación de un modelo de análisis de dispersión atmosférica de material particulado (PM ₁₀) a través de la herramienta AERMOD VIEW en el municipio de Yumbo (Valle del Cauca).
Nombres y Apellidos del Autor	Marleni Marín Ocampo Aymer Mauricio Otalvora Martínez
Año de la publicación	2020
Resumen del texto:	
<p>Colombia siendo un país en crecimiento económico, cuenta con siete zonas industriales y una de las más importantes se encuentra ubicada en el suroccidente del país, Zona Industrial del municipio de Yumbo. En dicha zona, la calidad del aire presenta niveles superiores al estándar normativo para el parámetro de Material Particulado menor de 10 micras (PM₁₀), de acuerdo al informe consolidado del año 2018 presentado por la CVC, dicho resultado obedece a los reportes de la Estación de Calidad del Aire (ECA) ubicada en el sector Acopi – Yumbo, sin embargo, la información obtenida en el trabajo de modelación de dispersión de PM₁₀ de las fuentes fijas y fuentes de área del sector, refleja que existen otros aportantes que incrementan los niveles de PM₁₀.</p> <p>En la modelación se observó que la influencia de los vientos provenientes del WNW tienen mayor incidencia, con vientos superiores a 8 m/s, permitiendo la dispersión de las emisiones de MP en el sector industrial. Igualmente, los resultados de la modelación indican que el mayor aportante de MP en el sector son las actividades de explotación, transformación y comercialización de materiales de construcción (Canteras).</p> <p>De acuerdo a los resultados del modelo AERMOD VIEW, es necesario que las instituciones competentes en la problemática realicen las modelaciones correspondientes a otras fuentes generadoras de PM₁₀ (fuentes móviles, re-suspensión, entre otras), para tomar las medidas que permitan disminuir los niveles de contaminación de PM₁₀ en el sector industrial.</p>	
Palabras Claves	Dispersión

	Contaminantes atmosféricos Material Particulado Concentración Modelación.
<p>Problema que aborda el texto:</p> <p>La contaminación atmosférica en Colombia representa uno de los mayores problemas ambientales, debido a los efectos negativos que genera sobre la salud de las personas y el medio ambiente, además el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible indica que es el tercer factor causante de costos sociales, siendo el uso de combustibles fósiles la principal causa de emisiones móviles o fijas. (Min-ambiente, 2019).</p>	
<p>Objetivos del texto:</p> <p>Implementar un modelo de análisis de dispersión atmosférica de material particulado menor de 10 micras (PM₁₀) en el sector Industrial del municipio de Yumbo (Valle del Cauca).</p>	
<p>Hipótesis planteada por el autor:</p> <p>Por medio de la modelación se permite conocer, identificar e interpretar los resultados para ayudarnos a describir los actores aportantes de MP en la zona industrial del municipio de Yumbo.</p>	
<p>Tesis principal del autor:</p> <p>Conocer los aportes inherentes a las actividades de explotación en las canteras y en las fuentes fijas y su impacto en el sector industria de Yumbo.</p>	
<p>Argumentos expuestos por el autor:</p> <p>Generar una propuesta que permita el control sobre el MP presente en las diferentes zonas de estudio, su interacción con el sector salud y mejorar las alternativas de futuros proyectos acerca del mejoramiento de la calidad del aire en la zona industria del municipio de Yumbo.</p>	
<p>Conclusiones del texto:</p> <p>Con la actualización del inventario de emisiones atmosféricas para la zona industrial del municipio de Yumbo se verificó la existencia de 25 establecimientos con actividades productivas y de explotación minera, las cuales cuentan con 105 fuentes fijas y 45 fuentes de área. Para el estudio no fueron incluidos los aportes de los vehículos que transitan por la vía pública, los cuales generan un aporte importante en PM₁₀ según estudios reportados por la Organización Mundial de la Salud – OMS y el documento CONPES 3930, datos que deben</p>	

tenerse en cuenta para establecer la realidad de las concentraciones en la zona, esto en razón a que la mayor movilidad se desarrolla en vehículos de carga cuyo combustible es Diesel.

La modelación realizada con AERMOD WIEW, indica que las concentraciones de PM₁₀ en el sector canteras presenta incumplimiento para el periodo de 24h, con concentraciones superiores a 200µg/m³, situación que obedece a las múltiples actividades de emisión generadas por las canteras, en especial los aportes por la re-suspensión de las vías de tránsito al interior de las canteras, el almacenamiento del material y voladuras, entre otros, las cuales tienen efecto en otros sectores cuyas actividades productivas no se clasifican en las actividades nombradas, pero si se ubican dentro de la isopleta de la concentración que supera la norma.

La favorabilidad de las condiciones meteorológicas y topografía de la zona de estudio permite la dispersión del contaminante PM₁₀, cuya velocidad de los vientos es superior a 8m/s y con mayor influencia Oeste-Noroeste (WNW), evitando mayores concentraciones sobre receptores sensibles como son las comunidades de los municipios de Yumbo y Cali.

Los resultados de la modelación muestran que para el mejoramiento de la calidad del aire del sector objeto de estudio, se requieren acciones articuladas y coordinadas entre la Autoridad Ambiental, Secretaria de Salud Municipal, Transporte, Infraestructura, bajo un enfoque de coordinación y cooperación para la gestión en temas como seguimiento y control, vigilancia epidemiológica, aplicación de carpeta asfáltica en algunas vías y bermas del sector, renovación del parque automotor, mejora en la calidad del combustible diésel principalmente, producción más limpia en cuanto a sustitución de combustibles fósiles por gas natural, mejores tecnologías disponibles en sistemas de control, responsabilidad social empresarial, ordenamiento territorial y gestión de proyectos compartidos.

Bibliografía citada por el autor:

Alcaldía de Yumbo. (2016). *Alcaldía de Yumbo*. Alcaldía de Yumbo. Retrieved January 1, 2020, Recuperado de <http://www.yumbo.gov.co/Paginas/default.aspx>

Aroca, J. (2018). *Informe de Modelación Matemática e Isopletas Cálculo de la Dispersión de Material Particulado (TSP y PM10) Aplicando Aermod View 8.9*. Explotación de un Yacimiento de Materiales de Construcción (Diabasas)-Contrato de Concesión No. 16674 e Instalación y Operación de una Planta Trituradora. Santiago de Cali.

- Arrieta-Fuentes, A. (2016). *Dispersión de material particulado (PM10), con interrelación de factores meteorológicos y topográficos*. *Ingeniería Investigación Y Desarrollo*, 16(2), 43-54. Recuperado de <https://doi.org/10.19053/1900771X.v16.n2.2016.5445>
- Bustos, C. (2004). *Aplicación de Modelos de Dispersión Atmosférica en la Evaluación de Impacto Ambiental: Análisis del Proceso*. (Tesis Magister). Universidad de Chile. Recuperado de <http://mgpa.forestaluchile.cl/Tesis/Bustos,%20Cristian.pdf>
- Borras, E. (2013). *Caracterización de Material Particulado Atmosférico Generado en Reactores Fotoquímicos y Procedentes de Muestras*. (Tesis doctoral). Universidad Politécnica de Valencia. Recuperado de https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/31645/TD%20E.Borr%C3%A1s_V3.pdf?sequence=1
- CONPES, D. (2018). *Declaración de Importancia Estratégica del Proyecto Construcción, Adquisición, Adecuación y Mantenimiento de las Sedes de la Escuela Superior de Administración Pública Nacional*. CONPES 3930. Recuperado de <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/3930.pdf>
- CONPES, D. (2018). *Política para el mejoramiento de la calidad del aire*. CONPES 3943. Recuperado de <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/3943.pdf>
- CVC. (2018). Informe de la Calidad del Aire. Recuperado de https://docs.google.com/viewer?a=v&pid=sites&srcid=ZGVmYXVsdGRvbWFpbXJmNjYwXpZGFkYWlyZXxneDozODlmMGRjMDEyMmQzNWFh&urp=gmail_link
- EPA. (2020). *Aire*. Recuperado de <https://espanol.epa.gov/espanol/aire>
- IDEAM. Subdirección de Meteorología. (2007). *Información técnica sobre gases de efecto invernadero y el cambio climático*. Recuperado de <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21138/Gases+de+Efecto+Invernadero+y+el+Cambio+Climatico.pdf>
- Jaramillo, M., Núñez, M., Ocampo, W., Pérez, D. y Portilla, G. (2003). *Inventario de emisiones de contaminantes atmosféricos convencionales en la zona de Cali – Yumbo*. Revista facultad de Ingeniería. Universidad de Antioquía. Volumen 31. Páginas 38 – 48. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/pdf/430/43003103.pdf>

Ministerio del medio ambiente de Chile. (2012). *Guía para uso de modelos de calidad del aire en el SEIA. Servicio de evaluación ambiental*. Chile. Recuperado de:
http://www.sea.gob.cl/sites/default/files/migration_files/guias/Guia_uso_modelo_calidad_del_aire_seia.pdf

Ministerio de medio ambiente y desarrollo sostenible. 2019. *Contaminación atmosférica*. Recuperado de:

<http://www.minambiente.gov.co/index.php/component/content/article/1801-plantilla->

Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible (2017). *Resolución 2254 “Por la cual se adopta la norma de calidad del aire ambiente y se dictan otras disposiciones”*. Recuperado de <http://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/resoluciones/96-res%202254%20de%202017.pdf>

Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible (2019). *Contaminación Atmosférica*. Recuperado

de <http://www.minambiente.gov.co/index.php/component/content/article/1801-plantilla->

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2017). *Guía para la Elaboración de Inventarios de Emisiones Atmosféricas*. Recuperado de http://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/pdf/emisiones_atmosfericas_contaminantes/documentos_relacionados/GUIA_PARA_LA_ELABORACION_DE_INVENTARIOS_DE_EMISIONES_ATMOSFERICAS.pdf

Municipio de Yumbo. (2018). Acuerdo “*Por medio del cual se adopta el Plan Básico de Ordenamiento Territorial del Municipio de Yumbo (Valle), y se dictan otras disposiciones*”. Recuperado

de <http://www.yumbo.gov.co/NuestraAlcaldia/SalaDePrensa/Paginas/Administracion-Municipal-Trabaja-en-la-Formulacion-del-Plan-Basico-de-Ordenamiento-Territorial---PBOT.aspx>

OMS. (2006). *Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre*. Recuperado

de https://www.who.int/publications/list/who_sde_phe_oeh_06_02/es/

Santa, A. (2000). *Difusión de Contaminantes Gaseosos en la Atmosfera*. Faculta Regional del Rosario. Recuperado

de https://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/quimica/5_anio/orientadora2/apuntes_catedra/Estabilidad%20Atmosfrica.pdf

Seinfeld, J., & Pandis, S. (1998). *Science and Education. Assessment of Total Suspended Particulates (TSP) in Ikot Abasi L. G. A., Nigeria*. Recuperado de <http://www.sci epub.com/reference/132850>

Silva, A., & Arcos, D. (2011). Aplicación del programa AERMOD para modelar dispersión de PM10 emitido por equipos de calefacción a leña en la ciudad de Constitución. Centro Regional de Estudios Ambientales CREA. Recuperado de https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?pid=S0718-28132011000100001&script=sci_arttext&tlng=e

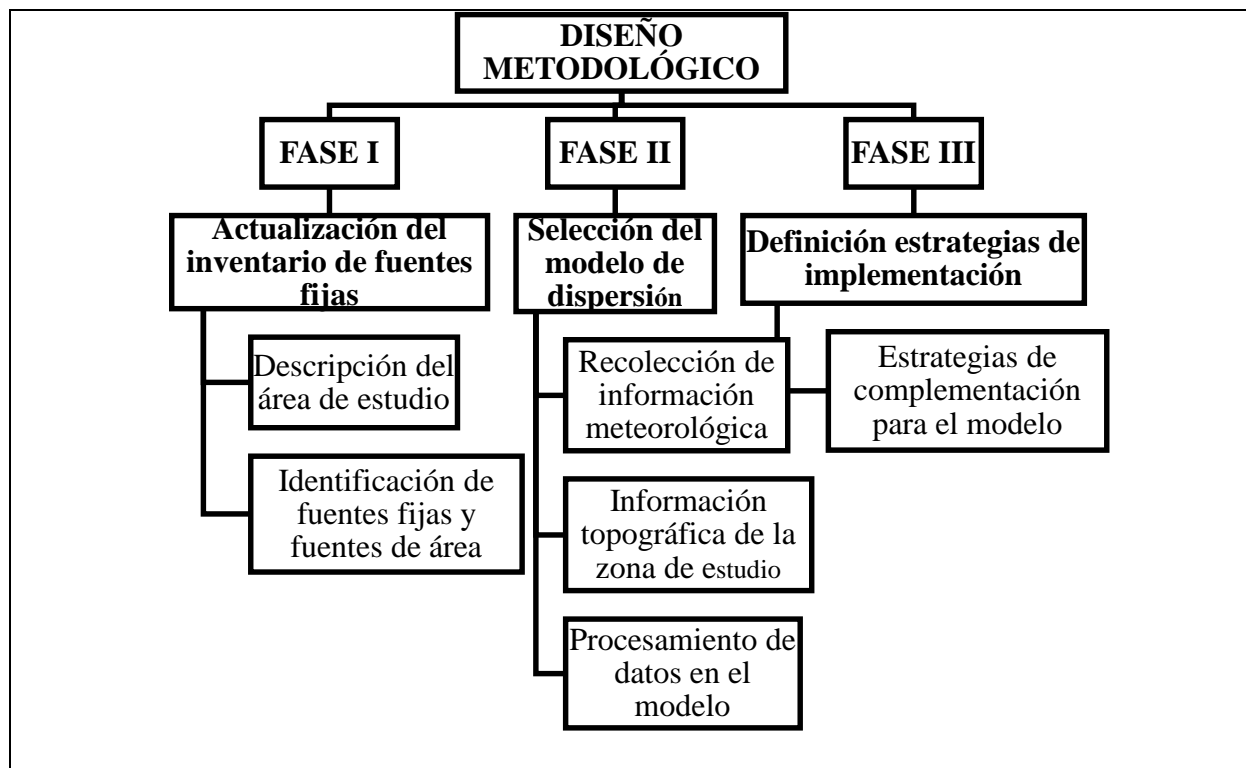
Toro, M.V., González. M.I., Aristizabal, G.A. y Molina, J.P. (2016). *Estudio de la dispersión de contaminantes atmosféricos, en la jurisdicción de CORNARE: Informe General*. Universidad Pontificia Bolivariana – Grupo de investigaciones ambientales. Recuperado de: <https://www.upb.edu.co/es/investigacion/nuestro-sistema/grupos/grupo-investigaciones-territorio-medellin>

Turner, D.B. (1970). *Workbook of atmospheric dispersion estimates*. Revised sixth printing, Office of Air Programs Publications, N°. AP-26

Velázquez (2003). *Modelación del transporte y difusión del SO₂ a partir de una fuente fija puntual en la ciudad de San Luis Potosí*. (Tesis de Maestría). Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de San Luis Potosí. México

W. Strauss, S. J. Mainwaring. 1990. *Contaminación del aire: causas, efectos y soluciones*. Editorial Trillas.

Nombre y apellidos de quien elaboró este RAE	Marleni Marín Ocampo Aymer Mauricio Otalvora Martínez
Fecha en que se elaboró este RAE	Marzo 8 del 2020
Imagen (mapa conceptual) que resume e interconecta los principales conceptos encontrados en el texto:	



Comentarios finales:

Generar acciones encaminadas al mejoramiento de la calidad del aire, aunando esfuerzos con diferentes sectores, entre los que se encuentran salud, tránsito y academia.