

Estimación de los niveles de calidad del aire, mediante modelización de las fuentes fijas, en el corredor industrial comprendido entre el Palenque y el Café Madrid del Área Metropolitana de Bucaramanga

Silvia Paola Mancipe Rueda

Trabajo de Grado para Optar el título de Magister en Recursos Hídricos y Saneamiento Ambiental

Directora

Laura Andrea Rodríguez Villamizar

PhD Public Health Sciences-Epidemiology

Codirector

Henry Castro Ortiz

Magister en Ingeniería Ambiental

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Maestría en Recursos Hídricos y Saneamiento Ambiental

Bucaramanga

2019

Dedicatoria

*A **Dios** por su grandeza y misericordia, por ser mi guía y maestro,*

*A mis padres **Rafael** y **María** por su apoyo incondicional,*

*A mi hermano **Jonathan** por creer siempre en mí,*

*A mis amigas **Silvia** y **Karina**, sin ustedes esta experiencia no hubiese sido la misma,*

A mis docentes, compañeros y finalmente a la Universidad Industrial de Santander.

Para ti Con todo mi ♥

Uno solo puede ser vencido, pero dos pueden resistir.

¡La cuerda de tres hilos no se rompe fácilmente!

⁴*El **amor** es paciente, es bondadoso. El **amor** no es envidioso ni jactancioso ni orgulloso.*

⁵*No se comporta con rudeza, no es egoísta, no se enoja fácilmente, no guarda rencor.*

⁶*El **amor** no se deleita en la maldad, sino que se regocija con la verdad.*

⁷*Todo lo disculpa, todo lo cree, todo lo espera, todo lo soporta.*

1 Corintios 13:4-7

Agradecimientos

Mis más sinceros agradecimientos a la Doctora Laura Andrea Rodríguez Villamizar y al Ingeniero Henry Castro Ortiz por su compromiso, dirección y acompañamiento a lo largo del desarrollo de esta tesis de grado.

Agradezco de igual forma a K2 Ingeniería y a los Ingenieros Petter Millan y Cristian Pérez por cada una de sus contribuciones.

A la Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga (CDMB) por los datos suministrados, en especial al Ingeniero Mauricio Galván y al Ingeniero Humberto Sandoval por la atención especial prestada.

Al Ingeniero Carlos Andrés Jaimes Hernández por todos sus aportes y en especial por su paciencia.

A SIAM Ingeniería por toda su comprensión, apoyo y respaldo Johanna y Julio Gracias.

A mis compañeros de oficina por aguantar “la lora” de la tesis.

Por último, pero no menos importante a todas las personas que voluntaria e involuntariamente contribuyeron a que este sueño se hiciera realidad.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción.....	12
1. Objetivos.....	15
1.1 Objetivo General.....	15
1.2 Objetivos Específicos	15
2. Marco Referencial	16
2.1 Marco Conceptual.....	16
2.2 Estado del Arte	21
2.3 Marco Legal.....	28
Norma vigente de Calidad del Aire	31
3. Metodología.....	33
3.1 Fase 1. Identificación de las fuentes de emisión.	33
3.1.1 Selección del área de estudio.....	33
3.1.2 Visita a Campo	34
3.2 Fase 2. Estimación de las emisiones de contaminantes criterio.	35
3.2.1 Identificación de Contaminantes Atmosféricos.....	35
3.2.2 Estimación de las emisiones	35
3.3 Fase 3. Modelación de los contaminantes.	36
3.3.1 Información meteorológica.....	36
3.3.2 Información topográfica	39
3.3.3 Recopilación y procesamiento de información	40

4. Resultados y Discusión.....	43
4.1 Identificación de las fuentes de emisión.....	43
4.1.2 Visita a Campo	44
4.2 Estimación de las emisiones de contaminantes criterio.....	45
4.2.1 Identificación de los Contaminantes Atmosféricos	45
4.3 Modelación de los contaminantes.....	47
4.3.1 Análisis de la Información Meteorológica y Topográfica.....	47
4.3.2 limitaciones.....	50
Isopletras de Modelación PST	51
Isopletras de Modelación PM ₁₀	55
Isopletras de Modelación NO ₂	60
Isopletras de Modelación SO ₂	65
5. Conclusiones.....	70
6. Recomendaciones	71
Referencias Bibliográficas.....	72

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1. <i>Estudios internacionales con uso de modelos de dispersión AERMOD</i>	22
Tabla 2. <i>Marco Normativo</i>	28
Tabla 3. <i>Niveles máximos permisibles para contaminantes criterio</i>	31
Tabla 4. <i>Datos generales de la evaluación de carga contaminante</i>	34
Tabla 5. <i>Datos meteorológicos de entrada al modelo AERMOD.</i>	37
Tabla 6. <i>Configuración empleada en AERMET</i>	41
Tabla 7. <i>Datos primarios de las fuentes de emisión.</i>	43
Tabla 8. <i>Reconocimiento en campo de las industrias de la zona de interés</i>	44
Tabla 9. <i>Identificación de fuentes fijas del área de estudio</i>	45
Tabla 10. <i>Tasa de emisión de los contaminantes a modelar</i>	46
Tabla 11. <i>Promedios mensuales de los datos meteorológicos</i>	48
Tabla 12. <i>Valores promedio y máximos de concentración de PST durante los tres escenarios de modelación.</i>	51
Tabla 13. <i>Valores promedio máximos de concentración de PM₁₀ durante los tres escenarios de modelación.</i>	55
Tabla 14. <i>Valores promedio y máximos de concentración de NO₂ durante los tres escenarios de modelación</i>	60
Tabla 15. <i>Valores promedio y máximos de concentración de SO₂ durante los tres escenarios de modelación</i>	65

Lista de figuras

Figura 1. Esquema de modelización AERMOD	19
Figura 2. Ubicación del punto meteorológico sectorial WRF	37
<i>Figura 3.</i> Modelo Digital del Terreno para el área de estudio	39
Figura 4. Información general de entrada y salida AERMOD.	40
Figura 5. Porcentaje de Industrias presentes en el Área Metropolitana de Bucaramanga.....	43
Figura 6. Georreferenciación de las fuentes en el área de estudio	45
<i>Figura 7.</i> Rosa de Vientos	48
<i>Figura 8.</i> Distribución de Frecuencias de Velocidad del viento	48
Figura 9. Isopleta de PST horaria	52
Figura 10. Isopleta de PST diaria	53
Figura 11. Isopleta de PST anual.....	54
Figura 12. Isopleta de PM ₁₀ a una hora	57
Figura 13. Isopleta de PM ₁₀ diaria.....	58
Figura 14. Isopleta de PM ₁₀ anual	59
Figura 15. Isopleta de NO ₂ una hora	62
Figura 16. Isopleta de NO ₂ diaria	63
Figura 17. Isopleta de NO ₂ anual.....	64
Figura 18. Isopleta de SO ₂ una hora	67
Figura 19. Isopleta de SO ₂ diaria.....	68
Figura 20. Isopleta de SO ₂ anual.	69

Resumen

Título: Estimación de los niveles de calidad del aire, mediante modelización de las fuentes fijas, en el corredor industrial comprendido entre el Palenque y el Café Madrid del área metropolitana de Bucaramanga.*

Autor: Silvia Paola Mancipe Rueda**

Palabras Claves: Calidad del Aire, Modelos de Dispersión, Fuentes Fijas, AERMOD.

Descripción: En este estudio se llevó a cabo la modelización para el año 2017 de los contaminantes atmosféricos PST, PM₁₀, NO₂ y SO₂ emitidos por las fuentes fijas presentes en el corredor industrial Palenque – Café Madrid del área metropolitana de Bucaramanga. El proyecto se estructuró en tres fases, la primera identificó las fuentes de emisión de la industria presente en el área de estudio, a las cuales se le solicitó expediente a la autoridad ambiental y se les realizó visitas de campo. En la segunda fase se estimaron las emisiones de material particulado menor a 10 micras (PM₁₀) mediante la relación matemática con el material particulado total (PST), para los demás contaminantes se tomaron directamente los valores obtenidos de los más recientes monitoreos directos en cada fuente de combustión externa. Como resultado se obtuvo la tasa de emisión con la cual se ingresó el parámetro al modelo y finalmente en la tercera fase del proyecto se realizó la modelización de los contaminantes con el software AERMOD y en el cual se encontró que la dispersión de los contaminantes tenían direcciones predominantes del viento en las componentes SE y NE con velocidades entre 1.9 y 2.1 m/s, con una temperatura promedio de 22.24°C y una altura de capa de mezcla de más de 757 m condiciones características del área de estudio y que pueden facilitar la dispersión de los contaminantes hacia la zona céntrica de la ciudad de Bucaramanga. Con base en los resultados del modelo, se puede inferir que los aportes de las fuentes fijas de la zona evaluada podrían afectar la calidad del aire principalmente por PM₁₀ en un tiempo de exposición de 24 horas según lo establece la norma actualizada de calidad del aire, Resolución 2254 de 2017; para los demás contaminantes el aporte en contaminación atmosférica no es significativo.

*Trabajo de grado

**Facultad de Ingeniería Físico Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Maestría en Recursos Hídricos y Saneamiento Ambiental. Director: PhD. Laura Andrea Rodríguez Villamizar, Codirector: MSc. Henry Castro

Abstract

Título: Estimación de los niveles de calidad del aire, mediante modelización de las fuentes fijas, en el corredor industrial comprendido entre el Palenque y el Café Madrid del área metropolitana de Bucaramanga.*

Author: Silvia Paola Mancipe Rueda**

keywords: Air Quality, Scatter Models, Fixed Sources, AERMOD.

In this study, the modeling for the year 2017 of the PST, PM₁₀, NO₂ and SO₂ air pollutants emitted by the fixed sources present in the Palenque - Café Madrid industrial corridor of the Bucaramanga metropolitan area was carried out. The project was structured in three phases, the first identified the sources of emission of the industry present in the study area, to which the file was requested from the environmental authority and field visits were made. In the second phase, the emissions of particulate material less than 10 microns (PM₁₀) were estimated through the mathematical relationship with the total particulate material (PST), for the other contaminants the controlled values of the most recent direct monitoring at each source will be taken directly. External combustion As a result, the emission rate with which the parameter was entered into the model was obtained and finally, in the third phase of the project, the pollutants were modeled using the AERMOD software and in which the dispersion of the directly predominant pollutants was found. wind in the SE and NE components with speeds between 1.9 and 2.1 m / s, with an average temperature of 22.24 ° C and a mixing layer height of more than 757 m characteristic conditions of the study area and that can facilitate the dispersion of pollutants to the downtown area of the city of Bucaramanga. Based on the results of the model, it can be inferred that the contributions of fixed sources in the area can affect the air quality mainly by PM₁₀ in a 24-hour exposure time as established by the updated air quality standard, Resolution 2254 of 2017; For other pollutants, the report on air pollution is not significant.

*Degree Work

**Facultad de Ingeniería Físico Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Maestría en Recursos Hídricos y Saneamiento Ambiental. Adviser: PhD. Laura Andrea Rodríguez Villamizar, Coadvisor MSc. Henry Castro.

Introducción

Se considera que el aire limpio es un requisito básico de la salud y el bienestar de los seres humanos. Sin embargo, su contaminación sigue representando una amenaza importante para la salud mundial (Organización Mundial de la Salud, 2005).

En Colombia, la degradación de la calidad del aire puede estar relacionada con fuentes de origen natural, pero es la actividad antropogénica la que representa una importante contribución a esta problemática ya que es responsable de la emisión de contaminantes por actividades relacionadas principalmente con el transporte y la industria. (IDEAM, 2016).

En el área metropolitana de Bucaramanga como en otros centros urbanos, el crecimiento urbanístico e industrial generado durante las últimas décadas ha estado relacionado con la contaminación del aire, lo cual representa una amenaza para la salud de las personas en la región. En Bucaramanga existen cuatro principales zonas en las cuales se ubican las industrias del centro urbano; según reporta la Cámara de Comercio de Bucaramanga para el año 2017 de los cuatro corredores industriales, el corredor vial Palenque – Café Madrid, área de estudio, presentó el mayor número de industrias manufactureras, reportadas y con mediciones directas en todas sus fuentes fijas. Como resultado se encontraron 25 industrias de las cuales 7 llevan a cabo actividades ligadas a procesos de combustión externa o fuentes fijas; las 18 industrias restantes se dividen en servicios generales, oficinas y bodegas de almacenamiento. El área de estudio es de suma importancia para estudios de este tipo, ya que además de albergar industrias en general, también presentan receptores sensibles representados en proyectos de vivienda de interés social, de igual forma por su ubicación geográfica al occidente de Bucaramanga y por acciones de velocidad y dirección del viento los contaminantes podrían estar desplazándose hacia la zona centro del mismo municipio.

La autoridad ambiental, la Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga (CDMB), recopila información base, con el fin de realizar análisis completos del estado de la calidad del aire a nivel metropolitano, o hacer predicciones sobre la dispersión de contaminantes empleando herramientas como modelos de simulación.

El sistema de vigilancia de calidad del aire estuvo en funcionamiento durante once años desde el año 2000 a cargo de la CDMB y se conformó por siete estaciones cada una de ellas ubicadas estratégicamente en el área metropolitana de Bucaramanga (Castro Ortiz, 2010), incluyendo una estación en el corredor vial Palenque – Café Madrid. La CDMB después de expedida por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial la Resolución 909 de 2008 inició el registro de inventario de fuentes fijas con emisiones al aire en el que se relizan reportes anuales de las empresas de los tipos de emisiones, algunas de ellas mediante mediciones directas en la fuente. Este inventario de fuentes fijas es la información disponible más completa en el área metropolitana respecto a contaminación del aire por fuentes industriales (CDMB, 2011).

Para el año 2018 el Área Metropolitana de Bucaramanga (AMB), como nueva autoridad ambiental metropolitana pone en funcionamiento el nuevo sistema de vigilancia de calidad del aire integrado esta vez por cinco (5) estaciones de monitoreo en tiempo real, aunque ninguna en el corredor industrial Palenque – Café Madrid; hasta la fecha los datos obtenidos no se han utilizado para apoyar procesos de modelación, y por lo tanto se desconoce la concentración y dispersión estimadas de los contaminantes del aire provenientes del corredor vial Palenque- Café Madrid y de las zonas circundantes en las que reside población susceptible a los efectos de la contaminación del aire.

De acuerdo con el protocolo de vigilancia de la calidad del aire expedido por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, se define que las autoridades ambientales deben utilizar la

información de los inventarios y realizar modelaciones para estimar la calidad del aire en toda su área de influencia y se enfatiza que los modelos utilizados para dispersión de contaminantes deben estar avalados por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de América (EPA); entre los modelos de dispersión avalados por la EPA, el AERMOD es el modelo que se adecua a las condiciones topográficas, meteorológicas y a la información recolectada producto de las mediciones directas de los contaminantes.

Teniendo en cuenta que el corredor vial Palenque – Café Madrid es una de las principales zonas industriales del área metropolitana de Bucaramanga, que las emisiones por fuentes fijas industriales son un contribuyente importante de la contaminación del aire en sus área de influencia y que no existen estudios de modelación del aire en esta zona industrial del AMB, este trabajo se centra en la estimación de la calidad de aire en este corredor vial y aporta información útil a las autoridades ambientales locales para fines pertinentes.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Estimar los niveles de calidad del aire, mediante la modelización de las fuentes fijas, en el corredor industrial comprendido entre el Palenque y el Café Madrid del Área Metropolitana de Bucaramanga.

1.2 Objetivos Específicos

Identificar los principales puntos de emisiones atmosféricas de fuentes industriales fijas en el corredor vial Palenque- Café Madrid.

Estimar las emisiones de contaminantes criterio (PST, PM₁₀ NO₂ y SO₂) generados por las fuentes fijas en el corredor vial Palenque – Café Madrid.

Analizar la dispersión de contaminantes criterio (PST, PM₁₀ NO₂ y SO₂) en el corredor vial Palenque – Café Madrid, utilizando el modelo AERMOD.

2. Marco Referencial

2.1 Marco Conceptual

La calidad del aire se deteriora cuando una o más sustancias químicas en concentraciones suficientemente elevadas en el aire pueden hacer daño a los seres humanos, otros animales, a la vegetación o a los materiales (EPA, 2019). La Contaminación atmosférica se ha transformado en el problema ambiental que se extiende con mayor rapidez sobre el planeta, ya que las corrientes de aire viajan grandes distancias, transportando los contaminantes hasta las zonas más lejanas (PNUMA, 2003).

Los contaminantes atmosféricos se pueden definir de varias formas; una de estas es que son una serie de sustancias provenientes de las fuentes naturales y/o antropogénicas, también pueden ser producto de transformaciones fotoquímicas, que causan efectos negativos sobre el ser humano y su entorno (Parker, 1983).

La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de América (EPA) clasifica los contaminantes como criterio y los define como aquellos contaminantes que afectan la salud inmediatamente ante su inhalación, en carácter mundial se identifican 5 contaminantes criterios que son: monóxido de carbono (CO), dióxido de azufre (SO₂), dióxido de nitrógeno (NO₂), ozono troposférico (O₃) y material particulado con diámetro aerodinámico menor a 10µm (PM₁₀). Además de éstos, en varias ocasiones se incluye al dióxido de carbono (CO₂) por su aporte al efecto invernadero. Su comportamiento depende mucho de la meteorología, condiciones físicas y químicas. En Colombia el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible en la Resolución 2254 de 2017 establece los niveles máximos permisibles de concentración para cada uno de los contaminantes criterio dentro del territorio nacional (Ministerio de Salud y Protección Social, 2015).

Los contaminantes pueden ser gaseosos, material particulado o aerosoles, estos contaminantes esconden un origen natural, pero también incluyen emisiones resultado de actividades antropogénicas (Cárdenas, et al 2003). En general se habla de dos tipos de fuentes contaminantes atmosféricas según su localización, estas son: puntuales y zonales. Pero de igual forma se pueden distinguir dos grandes tipos que son: fuentes fijas y móviles (Carballera, et al 2003).

Las fuentes fijas consideran todas aquellas emisiones generadas por la quema de combustibles proveniente de actividades industriales y residenciales, ya sea para la generación de energía, calor o vapor y otros procesos industriales. También incluyen las emisiones generadas por la quema de otros combustibles como la biomasa, asociada a la calefacción de viviendas.

Las fuentes móviles corresponden a las emisiones provenientes de los gases de escape, desgaste de frenos y neumáticos, de distintos tipos de transporte: automóviles, camiones, buses y motocicletas (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2016).

Los inventarios de emisión contienen estimaciones para un año base seleccionado durante el cual se producen las emisiones a la atmósfera o las absorciones de ésta, cuando faltan los datos apropiados para desarrollar un inventario apropiado, es posible estimar las emisiones y las absorciones utilizando los datos de años anteriores y aplicando métodos tales como promedio, interpolación y extrapolación; la metodología más simple y común consiste en combinar la información sobre el alcance que tiene una actividad humana con los coeficientes que cuantifican las emisiones o absorciones por actividad mejor llamados factores de emisión (Rypdal & Paciorek, 2006). Se entiende por factor de emisión a la relación que existe entre la cantidad de contaminante que se emite a la atmósfera y una unidad de actividad. En general los

factores de emisión se los puede clasificar en dos tipos: los que se basan en los procesos y los segundos en censos. Generalmente los primeros, son utilizados para realizar una estimación de fuentes puntuales y muchas veces este tipo de factores son combinados con datos de actividades, que han sido recopilados mediante encuestas o mediante balances de materiales (INECC, 2006).

La fuente de consulta más extensa que se puede encontrar para los factores de emisión basados en procesos, está el documento AP-42 Compilation of Air Pollutant Emission Factors (U.S. EPA, 1995), en este documento se encuentran los factores de emisión determinados para diferentes actividades.

El modelo AERMOD es un modelo refinado de dispersión atmosférica que se puede utilizar para evaluar la concentración de contaminantes emitidos desde diferentes tipos de fuentes, este modelo simula el transporte y la dispersión atmosférica de contaminantes provenientes de fuentes puntuales, área y lineales. AERMOD utiliza datos meteorológicos horarios procesados secuencialmente con el objetivo de calcular los niveles de inmisión de contaminantes en aire para diferentes periodos de tiempo: promedio desde una hora hasta un año (EPA, 2015).

Es aplicable a zonas rurales y urbanas, terreno llano o irregular. Las fuentes de emisión pueden ser de tipo puntual, de superficie, de área y de volumen. Además, la formulación del modelo ha sido diseñada para evitar cualquier tipo de discontinuidad, de modo que pequeñas variaciones en los parámetros de entrada no puedan provocar grandes cambios en las concentraciones de salida calculadas con el modelo (Valdés, 2002).

AERMOD incorpora los conceptos de dispersión del aire en terreno complejo y hace la dispersión de la pluma impactando en el terreno y/o siguiendo la topografía. Esta aproximación se ha diseñado de forma tal que sea representativa de la realidad física, fácil de implementar y

además no resulte necesario clasificar el terreno como simple, intermedio o complejo, lo cual si ocurre en otros modelos de dispersión (Valdés, 2002).

La Figura 1 muestra el diagrama de flujo para el procesamiento de información en el modelo de dispersión AERMOD. Este consiste de un módulo principal (AERMOD) y dos preprocesadores (AERMET y AERMAP).

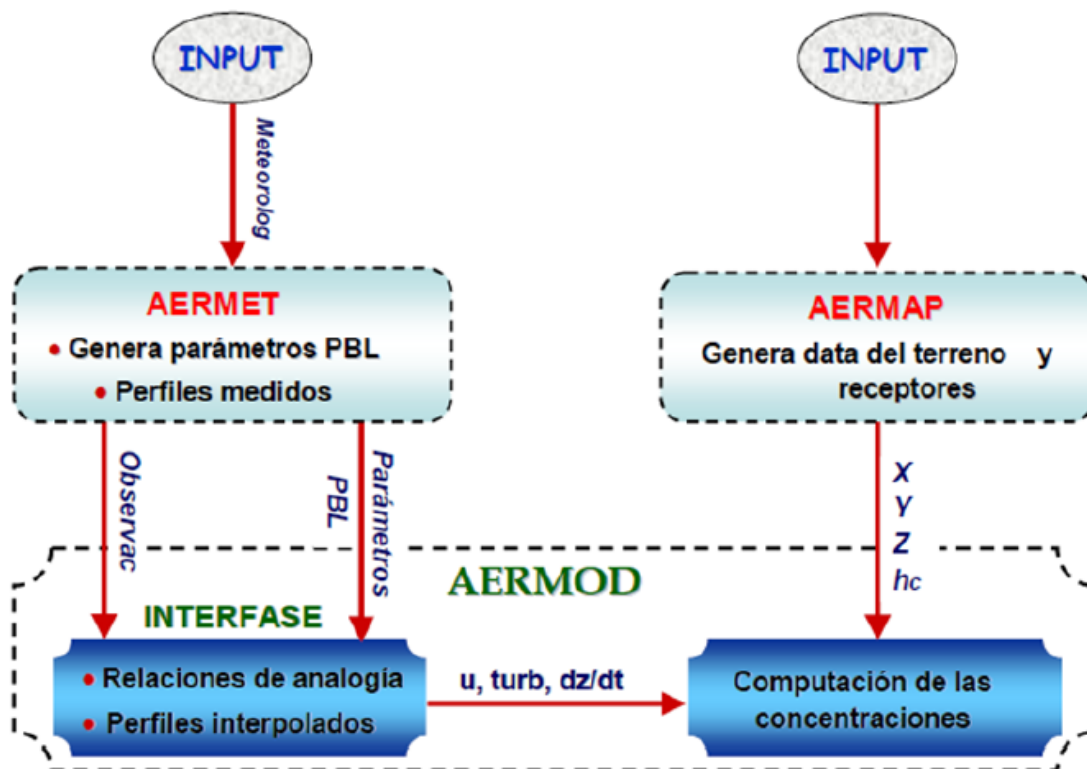


Figura 1. Esquema de modelización AERMOD. Contaminación del Aire: Origen y Control; Editorial Limusa S.A.: Distrito Federal, México, pp. 58-59.

AERMET usa mediciones meteorológicas representativas del dominio de modelación para calcular parámetros de la capa límite (Caputo et al, 2003). La INTERFASE interna de AERMOD usa estos parámetros calculados para generar perfiles de viento, temperatura y turbulencia (U.S. EPA, 1998). La profundidad de la capa límite y la dispersión de los contaminantes dentro de ésta, están influenciadas a escala local por las características

superficiales: rugosidad, albedo y radio de Bowen. Estas variables de superficie, junto con observaciones meteorológicas básicas (velocidad de viento, dirección de viento, temperatura y cobertura de nubes) son datos requeridos por AERMET para calcular los siguientes parámetros de la capa límite planetaria (PBL, por sus siglas en inglés) (U.S. EPA, 2004):

- 1) Velocidad de fricción, u^*
- 2) Longitud de Monin-Obukhov, L
- 3) Escala de velocidad convectiva, w^*
- 4) Escala de temperatura, θ^*
- 5) Altura de la capa de mezcla convectiva (zic) y mecánica (zim)
- 6) Flujo de calor superficial, H

La estabilidad de la PBL está dada por el signo de H (convectivo para $H > 0$ y estable para $H < 0$). El preprocesador de terreno AERMAP emplea la información topográfica para calcular la influencia del terreno en la dispersión, obteniendo una mejor valoración del escalamiento de altura del terreno en la concentración del material dispersado (Caputo et al., 2003). AERMAP también es usado para crear el mallado y las elevaciones de los receptores. Para cada receptor, el preprocesador AERMAP pasa la siguiente información hacia AERMOD: ubicación del receptor (x_r , y_r), altura sobre el nivel promedio del mar (z_r) y la escala de altura del terreno para un receptor específico (h_c) (U.S. EPA, 1998).

Para terreno complejo, AERMOD incorpora el concepto de la línea divisora de corriente para condiciones establemente estratificadas. Dependiendo del caso, la pluma es modelada combinando dos posibles casos: pluma de estado horizontal y/o pluma de estado topográfico. En terreno plano los dos estados son equivalentes, pero cuando se incorpora el concepto de la línea divisora de corriente en terreno elevado, la concentración total es calculada como la suma

ponderada de las concentraciones asociadas a estos dos estados de la pluma (U.S EPA, 1998). La ponderación de los dos estados depende de:

- a) El grado de estabilidad atmosférica
- b) La velocidad de viento
- c) La altura de la pluma con respecto al terreno.

AERMOD caracteriza la capa límite planetaria (PBL) por medio de un “escalamiento” de la capa de mezcla. Para ello, AERMOD construye perfiles verticales de velocidad de viento, dirección de viento, turbulencia y temperatura, basados en mediciones de campo y extrapolaciones. Sólo se requiere de una medición en superficie de la velocidad de viento (medido entre 7 z_0 y 100 m, donde z_0 es la rugosidad superficial). AERMOD también requiere de datos de cobertura de nubes, al igual que de un radiosondeo en la mañana para calcular la altura de mezcla convectiva a lo largo del día. Las características de superficie (rugosidad superficial, radio de Bowen y albedo) son también entradas requeridas para construir los perfiles de “analogía” de los parámetros de la PBL (U.S. EPA, 1998). Cabe mencionar también que, si no se cuenta con alguno de estos parámetros, el preprocesador AERMET los estima.

2.2 Estado del Arte

El tema de contaminación del aire empezó a ser un problema para los científicos al presentarse eventos como los de Meuse Valley en 1930, donde murieron más de 60 personas por emisiones de SO₂ y fluorocarbonados; el de Donora Pennsylvania en 1948, dando muerte a más de 20 personas por emisiones de material particulado, y el más importante, en Londres en 1952 con la muerte de más de 4,000 personas también por presencia de partículas en exceso en el ambiente. Este suceso dio la alerta para tomar medidas radicales a nivel mundial en términos políticos y científicos (De Nevers, 1998) acerca de la contaminación atmosférica.

Entre 1950 y 1960 los esfuerzos científicos relacionados con la modelización atmosférica se dedicaron al estudio, principalmente experimental, de cómo se producía la dispersión en la atmósfera de los contaminantes emitidos por fuentes puntuales, chimeneas, situadas a diferentes alturas (Smith, 1957).

Durante los años 60 la modelización de la calidad del aire se centra en el fenómeno de la dispersión local a partir de fuentes puntuales (Pasquill, 1962), siendo el SO₂ el principal contaminante estudiado. (Hogstrom & Tumer, 1964).

Desde mediados de la década del 2000 se han incorporado los modelos de dispersión de como una herramienta para evaluar el impacto de los contaminantes sobre territorios y estimar niveles de exposición de las poblaciones. La Tabla 1 presenta algunos de los estudios publicados internacionalmente que muestran el uso de modelización, y de manera específica el modelo AERMOD, en el análisis de contaminantes del aire.

Tabla 1.

Estudios internacionales con uso de modelos de dispersión AERMOD

Año	Autores	País	Uso
2007	Hanna et al. (2007)	USA	Incertidumbres en los contaminantes NO _x , CO, SO _x , VOC y PM ₁₀ del aire calculados por los modelos de dispersión AERMOD e ISCST3 en el área de Houston.
2010	Amarildo Barbon, Júlio Gomes	Brasil	Simulación de las emisiones atmosféricas de NO _x , CO, SO _x , VOC y PM ₁₀ sobre el municipio de Araucária con el uso del modelo AERMOD

Año	Autores	País	Uso
2013	Ma, Jieyun Yi, Honghong Tang, Xiaolong Zhang, Xiang, Ying Pu, Li	China	Aplicación de AERMOD en simulación de calidad del aire en el futuro próximo bajo la última política nacional de control de emisiones de NO _x , CO, SO _x , VOC y PM ₁₀ en China.
2016	Simonetti, I; Maltagliati, S; Manfrida, G.	Italia	Modelo AERMOD para medir el impacto en la calidad del aire de un aeropuerto simulando y evaluando las concentraciones de las emisiones anuales totales de NO _x , CO, SO _x , VOC y PM ₁₀
2018	Katika, K.; Karuchit, S.	Tailandia	AERMOD para estimar los niveles de contaminantes atmosféricos de una ciudad seleccionada: el municipio de Nakhon Ratchasima, Tailandia. Se estudiaron cuatro contaminantes: PM ₁₀ , CO, SO ₂ y NO _x .

La Tabla 1 relaciona cinco estudios llevados a cabo con AERMOD en diferentes países del mundo, el criterio de selección de los artículos fue la cantidad de contaminantes modelados y aplicación del mismo en ciudades o centros poblados estudiando la modelación y el comportamiento de los contaminantes con receptores presentes.

A continuación, se describen diversos artículos en los cuales AERMOD ha sido utilizado para realizar estimaciones de calidad del aire, resuspensión de contaminantes en vías, comparaciones de modelos de dispersión e integración del modelo con software epidemiológico.

En el año 2016 se realizó la integración de LUR / AERMOD con el fin de obtener un modelo híbrido que combinara 36 sitios seleccionados para representar diferentes fuente y perfiles de elevación, durante el verano y el invierno, en Pittsburgh, Pennsylvania. En el estudio se modelaron las emisiones de PM_{2.5} de 207 fuentes estacionarias locales, utilizando mediciones, ubicaciones, receptores e información de instalación industrial. Como resultado el modelo híbrido mejoró la precisión de predicción fuera de muestra, aunque el rendimiento difería según la temporada, en parte debido a la variabilidad temporal dentro de la temporada. El desarrollo de marcos de modelado espacio-temporal para la evaluación de la exposición a la contaminación del aire para epidemiología son instrumentos que buscan unir la salud ambiental de la población.(Michanowicz et al., 2016)

El modelo AERMOD se ha utilizado a nivel mundial para estimar niveles de calidad de aire en diversas ciudades, tal es el ejemplo de la ciudad de Muscat, Sultanato de Omán en el año 2017. Donde se empleó el modelado de dispersión para la predicción de las emisiones de sulfuro de hidrógeno (H₂S), provenientes del tratamiento de aguas residuales. Del estudio se observó que, en base a análisis máximo de 24 h, la concentración a nivel del suelo fuera del H₂S excedió el límite de concentración que corresponde a 40 µg/m³, valor que excede lo recomendado por la agencia reguladora local en Oman. (Baawain, Al-Mamun, Omidvarborna, & Al-Jabri, 2017).

AERMOD también fue utilizado en el año 2017 para la simular las emisiones de los vehículos en cercanía de las vías, por medio de áreas o volúmenes de fuente de representación de emisiones. Como resultado se obtuvo que para los receptores de viento ascendente, el uso de una fuente de área conduce a predicciones significativas debido a la falta de tratamiento de AERMOD, pero usando el volumen se observa un cambio en la representación de la fuente y conduce a predicciones excesivas de las concentraciones de viento arriba independientemente de

las opciones de viento para el meandro de penacho. El ajuste opcional de la velocidad de fricción superficial en el preprocesador meteorológico AERMET y esta no conduce a mejoras en las concentraciones pronosticadas cerca de la vía para esta modelación (Askariyeh, Kota, Vallamsundar, Zietsman, & Ying, 2017).

En el 2019 se utilizó AERMOD en la operación de las centrales termoeléctricas, en las cuales se queman combustibles fósiles, generando contaminantes del aire como el monóxido de carbono (CO), óxido de nitrógeno (NO_x), partículas (PM), dióxido de azufre (SO₂) y compuestos orgánicos volátiles (VOC). El objetivo del caso de estudio fue simular la dispersión de contaminantes atmosféricos de la central térmica de Borborema S.A. en Brasil. Se utilizó el modelo AERMOD como herramienta para evaluar las concentraciones resultantes de la simulación y realizar comparaciones con niveles permitidos según la ley vigente. La simulación arrojó que los índices para las concentraciones de PM, SO_x, NO_x y CO, son bajos al compararse con los límites máximos permisibles, excepto NO₂ a la 1 h. Como conclusión se observó que estos contaminantes pueden afectar la salud de la población local, la fauna y la flora, en vista del proceso de bioacumulación, que es inherente a los organismos, que absorben directa o indirectamente sustancias o compuestos químicos. (Dos Santos Cerqueira, de Albuquerque, & de Assis Salviano de Sousa, 2019).

En este mismo año se realizó la comparación entre el modelo danés de fondo urbano (UBM) y el USEPA AERMOD aplicados para calcular las concentraciones de NO_x y de Material Particulado (MP) para la ciudad de Mumbai en la India, para los años 2007 y 2012. Para realizar la comparación los resultados de los dos modelos, se corrieron dos conjuntos de simulaciones utilizando los mismos datos de entrada para condiciones de frontera, emisiones y meteorología. Los resultados mostraron que el los cálculos de NO_x del modelo UBM coincidieron mejor con

los datos observados en comparación con resultados similares del Modelo AERMOD. Sin embargo, lo contrario fue el caso de MP para el cual los resultados del modelo AERMOD fueron mejores acuerdo con los datos observados en comparación con los resultados de la UBM.

Al comparar el modelo obtenido los resultados con las mediciones, debe tenerse en cuenta, que los inventarios de emisiones tienen varias deficiencias. Una de las principales deficiencias de los inventarios de emisiones MP es que no se contabilizan todas las fuentes. Además, para ambos MP y NO_x, los límites de los cálculos del modelo del dominio del modelo UBM y AERMOD están subestimando la concentración debido a la resolución relativamente gruesa de la malla de modelación. Cuando los cálculos del modelo UBM se escalan para ajustarse al nivel de concentraciones observadas, es evidente que la variación espacial y temporal reprodujo mejores resultados en comparación con los resultados obtenidos de AERMOD (Kummar et al, 2019).

Colombia ha mostrado su interés por conocer la calidad del aire dentro de su territorio; inicialmente en 1967 se instalaron las primeras redes para el monitoreo de la calidad del aire en el país (Larsen et al, 2004). En marzo de 2005, el Consejo Nacional de Política Económica y Social aprobó el documento Conpes 3344 que contiene los lineamientos para la formulación de la Política de Prevención y Control de la Contaminación del Aire (CONPES, 2005).

El diagnóstico de la calidad del aire del país incluyó la determinación del estado de las redes de calidad del aire, principales instrumentos para determinar el grado de contaminación; la identificación y origen de los contaminantes críticos en los centros urbanos con mayor contaminación atmosférica; la evaluación del efecto de dichos contaminantes en la salud de la población; y el aporte de cada tipo de fuente contaminante en la contaminación del aire (Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Sostenible, 2010).

Durante 2007 se llevó a cabo el diagnóstico de ocho redes de calidad del aire ubicadas en los centros urbanos de Bogotá, Sabana de Bogotá, Barranquilla, Cali, Medellín y su área metropolitana, Bucaramanga, Pereira y el corredor industrial del Valle del Sogamoso. (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2012). El estudio concluyó la importancia del ambiente físico como determinante de la salud individual y poblacional en Colombia, relacionando las condiciones ambientales y las problemáticas sociales, convirtiendo al país en un claro ejemplo de cómo el ambiente físico y social se interrelacionan afectando la salud humana (Donohoe, 2003).

Colombia se encuentra en el proceso de avance para la consolidación de un inventario nacional de emisiones de contaminantes que integre la Resolución 2254 de 2017 y la 909 de 2008 las cuales definen los niveles de contaminantes criterio emitidos a la atmosfera producto de actividades industriales.

En el año 2011 el Área Metropolitana del Valle de Aburrá llevó acabo Inventario de Emisiones Atmosféricas del Valle de Aburrá (Área Metropolitana del Valle de Aburrá & Universidad Pontificia Bolivariana, 2011). Pero no incluyó la modelización de las fuentes. En el año 2014 se estimaron las emisiones atmosféricas de fuentes móviles en el Valle de Aburrá usando el modelo LEAP (Quiceno, 2014) modelo que permite el desarrollo de estudios de planeamiento energético integral y de mitigación de gases de efecto invernadero y otros contaminantes del aire. (Heaps, 2012). En el año 2015 la Corporación Autónoma Regional de las Cuencas de los Ríos Negro y Nare (CORNARE) modeló con AERMOD la dispersión de los contaminantes atmosféricos en el Valle de San Nicolás (Área Metropolitana del Valle de Aburrá & Universidad Pontificia Bolivariana, 2015). La modelización concluyó que las fuentes fijas

emitieron 2,743 toneladas de CO, 2,093 toneladas de NOx, 4,482 toneladas de SOx, 1,993 toneladas de COV y 3,304 toneladas de PST.

Durante el año 2017 se realizó el monitoreo y seguimiento de los siete contaminantes criterio contemplados por la Resolución 610 de 2010 del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Cada sistema de vigilancia en su respectiva ciudad es responsable de reportar al SISAIRE los datos producto de las mediciones, en su totalidad los 26 sistemas de vigilancia cumplieron con una representatividad igual o superior al 75%, correspondiente al periodo 2016 – 2017, los resultados fueron ligados con el Departamento Nacional de Planeación (DNP) el cual calculó que cerca de 8.052 muertes al año están relacionadas con la mala calidad del aire en Colombia, invirtiendo 12,2 billones de pesos por costos de morbilidad y mortalidad valor que corresponde al 1,5% del Producto Interno Bruto del país (DNP, 2017)

Durante el 2017 el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible se emitió la Resolución 2254 de 2017 la cual excluye algunos contaminantes y fija nuevos límites máximos permisibles, siendo estos más restrictivos en comparación con la anterior Resolución.

El CONPES 3943 corresponde a la Política para el mejoramiento de la calidad del aire en el cual se propone como objetivo general Reducir la concentración de contaminantes en el aire que afectan la salud y el ambiente teniendo como fecha 2018- 2022.

2.3 Marco Legal

En la Tabla 2 se presentan las principales normas relacionadas con la regulación de la calidad del aire y los estándares de emisión admisibles de contaminantes a la atmósfera por diversas fuentes en Colombia.

Tabla 2.

Marco Normativo

Norma	Año	Entidad	Tema	Descripción	Artículos Relacionados
Ley 23	1973	Congreso de la República	Aire	Se reconoce la contaminación del aire como un factor que deteriora el ambiente.	-
Ley 9°	1979	Congreso de la República	Ambiental	Código sanitario, se entiende la contaminación atmosférica como un problema sanitario, de delega al Ministerio de Salud la fijación de normas sobre la calidad del aire.	-
Ley 99	1993	Congreso de la República	Ambiental	Se crea el Ministerio de Ambiente y se reordena el sistema nacional ambiental y se otorga a la autoridad ambiental urbana las mismas funciones atribuidas a las CAR.	5, Numerales 2, 10, 11, 14 y 25
Artículo 66 de la Ley 99	1993	Congreso de la República	Aire	Se le otorga a la autoridad ambiental urbana el control sobre los programas de evaluación y mitigación de la contaminación atmosférica.	9
Resolución 898	1995	Ministerio del Medio Ambiente	Combustibles	Se regulan los criterios ambientales de calidad de los combustibles líquidos y sólidos utilizados en hornos y caldera de uso comercial e industrial y en motores de combustión interna de vehículos automotores.	9, 11
Decreto 061	2003	Alcaldía Mayor de Bogotá	Aire	Se establecen los objetivos de calidad ambiental, los cuales implican tanto el control de emisiones de las fuentes móviles y fijas, como el de la calidad del aire resultante de la interacción de estos factores con los procesos meteorológicos y químicos en la atmósfera.	9, 13
Resolución 1565	2004	Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial	Combustibles	Se modifica la Resolución 898 con respecto a la calidad de los combustibles empleados en la ciudad, se pone especial atención a la calidad de la mezcla de alcohol utilizado como combustible y a la calidad de los combustibles convencionales empleados en el parque automotor.	9, 11
Resolución	2006	Ministerio	Aire	Se establece la norma de calidad del	9, 11

Norma	Año	Entidad	Tema	Descripción	Artículos Relacionados
601		de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial	(Inmisión)	aire, los procedimientos para su medición y los programas de reducción, control y mitigación de la contaminación del aire. Se prevé que las autoridades ambientales deben realizar las mediciones de los contaminantes criterio de acuerdo con los procedimientos, frecuencias y metodología establecidas en el Protocolo de Monitoreo y Seguimiento de Calidad del Aire, elaborado por el IDEAM	
Resolución 1180	2006	Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial	Combustibles	Se establecen los criterios mínimos de calidad de las gasolinas convencionales, etanol anhidro combustible, diésel, diésel extra y las mezclas de estos con biocombustibles.	9, 11
Ley 1205	2008	Congreso de la República	Combustibles	Ley de diésel. Delega a los Ministerios de Minas y Energía y de Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial expedir la reglamentación que conduzca a mejorar la calidad del diésel, mediante la disminución progresiva de los niveles de azufre presentes en dicho combustible hasta alcanzar los estándares internacionales (<50 ppm).	10
Resolución 910	2008	Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial	Aire (Emisiones)	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.	-
Resolución 909	2008	Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial	Aire (Emisiones)	Se establecen las normas y estándares de emisión admisibles de contaminantes a la atmósfera por fuentes fijas.	-

Norma	Año	Entidad	Tema	Descripción	Artículos Relacionados
Resolución 610	2010	Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial	Aire (Inmisión)	Se revaloran de los niveles máximos permisibles para contaminantes criterio, contaminantes no convencionales con efectos carcinogénicos y los umbrales para las principales sustancias generadoras de olores ofensivos.	9, 11
Resolución 1541	2013	Ministerio de Ambiente y desarrollo Sostenible	Aire (Olores)	Se establecen los niveles permisibles de calidad de aire o de inmisión, el procedimiento para la evaluación de actividades que genera olores ofensivos y se dictan otras disposiciones.	5
Resolución 2254	2017	Ministerio de Ambiente y desarrollo Sostenible	Aire	Por la cual se adopta la norma de calidad del aire ambiente y se dictan otras disposiciones	2,19

Normatividad ambiental aplicable para la matriz aire del Congreso de la República y el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Sostenible

Norma vigente de Calidad del Aire

La Resolución 2254 de 2017 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible establece la norma de calidad del aire o nivel de inmisión para todo el territorio nacional en condiciones de referencia.

En la Tabla 3 se detallan los límites máximos permisibles de los contaminantes modelados y sus respectivos tiempos de exposición.

Tabla 3.

Niveles máximos permisibles para contaminantes criterio

Contaminante	Nivel máximo permisible	
	($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Tiempo de exposición

Contaminante	Nivel máximo permisible	Tiempo de exposición
	($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	
PM ₁₀	50	Anual
	75	24 horas
PM _{2.5}	25	Anual
	37	24 horas
SO ₂	50	24 horas
	100	1 hora
NO ₂	60	Anual
	200	1 horas
O ₃	100	8 horas
CO	5.000	8 horas
	35.000	1 horas
Resolución 2254 de 1 de noviembre de 2017.		

3. Metodología

La metodología comprendió tres fases, en la primera se llevó acabo la identificación las fuentes de emisión; durante la segunda se realizaron las estimaciones de contaminantes criterio para finalizar con la modelación de cada uno de los contaminantes y determinar el aporte de las fuentes evaluadas a la calidad del aire; a continuación, se detalla cada una de las fases del proceso.

3.1 Fase 1. Identificación de las fuentes de emisión.

3.1.1 Selección del área de estudio. Para la selección del lugar de interés, se obtuvo información del registro de industrias presentes en el AMB suministrada por Cámara de Comercio, desagregada por tipo de sector para al año 2017. El total de empresas reportada es de 50 para toda el área metropolitana y en la zona de estudio se encuentran instaladas 25, dentro de este grupo de registros, el corredor Palenque – Café Madrid, presentó el mayor número de industrias, en este caso siete (7), las cuales cuentan con fuente de combustión externa para sus procesos industriales, razón por la cual fue seleccionada con la zona de interés para el presente trabajo.

Posteriormente se procedió a solicitar a la Corporación para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga (CDMB) la evaluación de carga contaminante para el año 2017 de las 25 industrias con fuente fija del área de estudio, de las cuales siete (7) contaban con expediente de emisiones atmosféricas; las 18 restantes no emiten contaminantes a la atmósfera ya que se dedican a distribución de productos, oficinas y bodegas en general, por lo tanto, no son de interés para la autoridad ambiental.

El expediente de las industrias fue tomado como requisito mínimo para que esta se incluyera dentro de la modelación ya que el reporte contiene la información necesaria para llevar a cabo las dos siguientes fases del proyecto que se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4.

Datos generales de la evaluación de carga contaminante

Datos	Unidades
Coordenadas planas	m
Elevación	msnm
Tasa de Emisión	g/s
Altura Ducto	m
Temperatura de los gases	K
Velocidad de Salida de los gases	m/s
Diámetro del Ducto	cm

3.1.2 Visita a Campo. Después de obtenerse los reportes con los datos mencionados en la Tabla 4 se procedió a realizar la visita de reconocimiento al corredor vial, esta se llevó a cabo los días 10, 11 y 12 de enero del 2019 y tuvo como finalidad reconocer la actividad industrial de las empresas, tomando información base el nombre, tipo de industria, tipo de fuente y localización geográfica.

Como resultado de este reconocimiento se encontraron aún activas las siete (7) industrias identificadas en el registro de la CDMB, de las cuales cinco utilizan horno y dos utilizan calderas para llevar a cabo sus procesos.

Cabe resaltar que a los datos suministrados por la autoridad ambiental no se les realizó ningún tipo de tratamiento, debido a que son reportados en las unidades necesarias para ser ingresados al modelo.

3.2 Fase 2. Estimación de las emisiones de contaminantes criterio.

3.2.1 Identificación de Contaminantes Atmosféricos. Para realizar la estimación de emisiones originadas de las fuentes fijas, se hace necesario realizar la identificación de los contaminantes atmosféricos a modelar, para esto se organizó una tabla en la cual se discrimina la actividad, el tipo de fuente, combustible y contaminantes evaluados. Para ello se examinaron los expedientes del año 2017 de cada una de las industrias de interés y se cruzó con la información obtenida de la visita a campo.

Los expedientes reportaban partículas suspendidas totales (PST), Óxidos de Nitrógeno (NO_2) y Dióxido de Azufre (SO_2). Los óxidos de nitrógeno son expresados de esta forma en las mediciones directas de las fuentes fijas, con el fin de generar comparación con la Resolución 909 de 2008, para ser ingresados al modelo los NO_x son tomados como NO_2 tal como lo expresa el método de referencia con el que se realiza la medición directa a la fuente fija.

3.2.2 Estimación de las emisiones

Las industrias relacionadas dentro del inventario, contaban con la tasa de emisión para los contaminantes: PST, NO_x y SO_2 , ya que estos son exigidos por la Resolución 909 de 2009 emitida por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, por ende, no fue necesario estimar las emisiones de los mismos, ya que estas se encontraban reportadas a la autoridad ambiental. Contrario ocurrió con el material Particulado fino expresado como PM_{10} , el cual no contaba con tasa de emisión producto de medición directa de las fuentes fijas, por ende, se estimó a partir de la relación de las partículas suspendidas totales (PST).

Para llevar a cabo la estimación se utilizó el compilado de factores de emisión de la agencia de protección ambiental de los Estados Unidos de América (EPA) llamado AP-42, la categoría utilizada para la estimación de PM_{10} se encuentra en el capítulo uno llamado fuentes de combustión externa tabla 1.1-4, este dato fue seleccionado ya que todas las fuentes se alimentan con carbón bituminoso, la relación se aplicó de la siguiente forma:

$$(MP_{10\text{Filtrable}} / MP_{\text{Filtrable}}) * \text{Emisión de PST (g/s)}$$

De esta manera se realizó la estimación de PM_{10} para las siete fuentes, ya que todas contaban con la tasa de emisión de PST reportada, de esta forma se obtuvieron las tasas de emisión para realizar la modelación de los contaminantes PST, PM_{10} , NO_2 y SO_2 .

Al momento de realizar la estimación se tuvo en cuenta que las fuentes funcionan 24 horas al día, 365 días del año y de forma continua, emitiendo de manera constante, según lo reportado en el expediente a la autoridad ambiental.

3.3 Fase 3. Modelación de los contaminantes.

3.3.1 Información meteorológica. La meteorología utilizada fue obtenida modelo WRF (Weather Research and Forecasting) información necesaria para realizar la modelación; los datos corresponden al periodo del 1 de enero al 31 de diciembre de 2017, con el fin de garantizar el año de registros necesarios para ingresar a AERMOD, la elección de WRF también se llevó a cabo dado que este tipo de proyectos en la zona de estudio no cuenta con estaciones meteorológicas que cumplan con los requisitos exigidos para realizar el modelo de dispersión.

Los archivos meteorológicos de entrada al modelo corresponden a los formatos “.sam”, “.ua” “pfl” y “sfc” los cuales son suministrados directamente por la empresa consultora K2 Ingeniería. En la Figura 2 se ubica geográficamente el punto meteorológico WRF utilizado para el modelo.

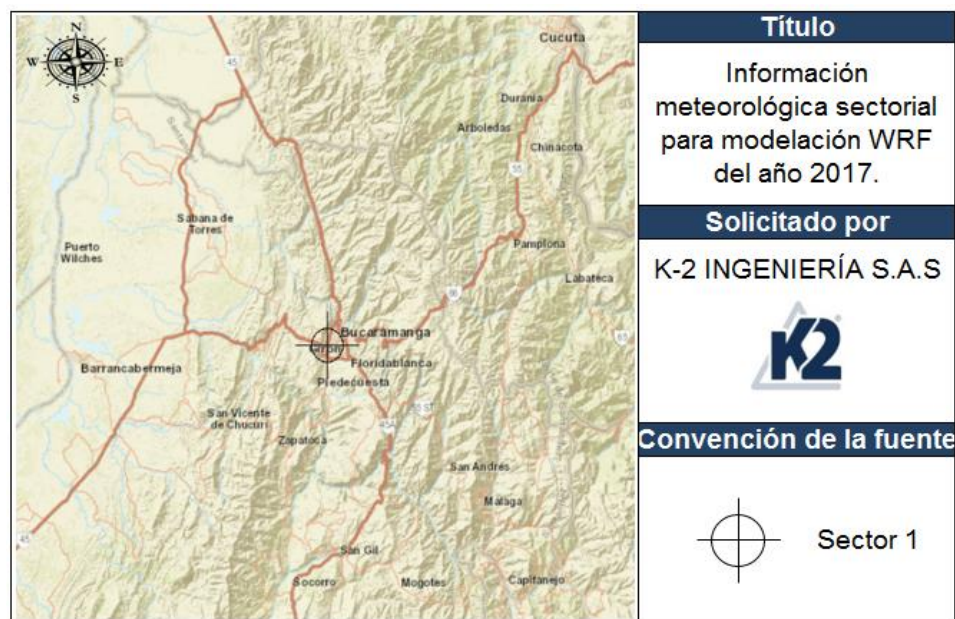


Figura 2. Ubicación del punto meteorológico sectorial WRF

Las variables meteorológicas de los formatos “.sam” y “.ua” listos para ingresar al modelo son los relacionados en la Tabla 5 como parámetros primarios. Los parámetros secundarios son calculados por el modelo luego de correr AERMET.

Tabla 5.

Datos meteorológicos de entrada al modelo AERMOD.

Tipo		Descripción	AERMOD
Meteorología	Parámetros primarios	Velocidad del viento	√
		Precipitación	√
		Temperatura ambiente	√
		Dirección del viento	√
		Radiación solar	√
		Presión atmosférica	√

		Tipo	Descripción	AERMOD
Meteorología	parámetros secundarios		Humedad Relativa	√
			Estabilidad Atmosférica	√
			Altura de capa de mezcla urbana	√
			Velocidad de fricción	√
			Longitud de Monin Obhukov	√
			Rugosidad superficial	√
			Flujo de Calor Sensible	√
			Escala de velocidad convectiva	√
			Parámetro de Bowen	√
			Albedo de medio día	√
			Nubosidad (Octas)	√

Luego de ingresar los archivos “.sam” y “.ua” al procesador AERMET, la información salida se obtuvo en formatos “plf” y “sfc” extensiones indicadas para ingresar al modelo AERMOD.

En cuanto a los cálculos que se implementan de variables especializadas dentro del modelo WRF, Meteosim cuenta con las siguientes especificaciones:

- Resolución espacial de 3 km (distancia horizontal entre puntos de grilla) para todo el territorio nacional incluido San Andrés y Providencia.
- 28 niveles desde superficie hasta 50mb con una densidad máxima en superficie.
- Simulación explícita de las nubes con 5 tipos de hidrometeoros (vapor, agua líquida, nieve, hielo y granizo suave).

- Simulación de la radiación de onda corta y larga separada por once y dieciséis bandas respectivamente.
- Capa limite según teoría de similitud.
- Cálculo del balance hídrico en superficie, suelo y canopy

3.3.2 Información topográfica. Para la información topográfica, se tuvo en cuenta el relieve de la zona que comprende el corredor industrial, las elevaciones tanto para los receptores como para las fuentes simuladas, reproduciendo de esta manera las condiciones topográficas en el dominio de interés.

El modelo digital de elevación fue construido a partir de información topográfica obtenida del sensor radar ALOS 1 PALSAR cuyos datos se encuentran en el portal de la Universidad de Alaska (Alask satellite facility); estos sensores tienen una Resolución temporal desde el año 2006 hasta el 2011 y cuentan con una capacidad de detalle entre 5 a 12 metros. En la Figura 3 se observa la topografía utilizada para el escenario de estudio.

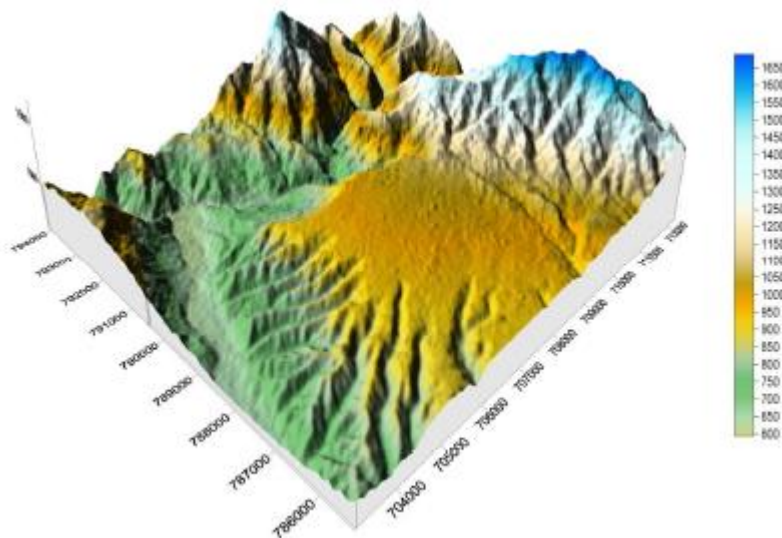


Figura 3. Modelo Digital del Terreno para el área de estudio

Elaboración con base en modelo digital PALSAR – 16/03/2011.

Tras obtenerse los archivos “DEM” y “Raster” producto del sensor radar ALOS 1 PALSAR, se procedió a ingresar los archivos en el procesador AERMAP. Para efectos de la implementación del sistema de modelación con el modelo AERMOD, se consideró una grilla de 6.0 x 6.0 km con cuadrículas de 100 x 100 m cada una con el fin de abarcar en su totalidad la zona de estudio.

3.3.3 Recopilación y procesamiento de información. AERMOD fue configurado para realizar la modelación de los cuatro contaminantes PST, PM₁₀, NO₂ y SO₂ para el año 2017. Luego de seleccionarse el área de estudio, realizar el inventario de emisiones, estimar la concentración de PM₁₀ para las fuentes, ordenar las tasas de emisión a incluir en el modelo y procesar la meteorología en AERMET y la topografía en AERMAP, se procedió a ingresar los archivos al modelo AERMOD. La Figura 4 describe los datos de entrada y salida empelados en el proyecto para llevar a cabo la modelación en AERMOD.

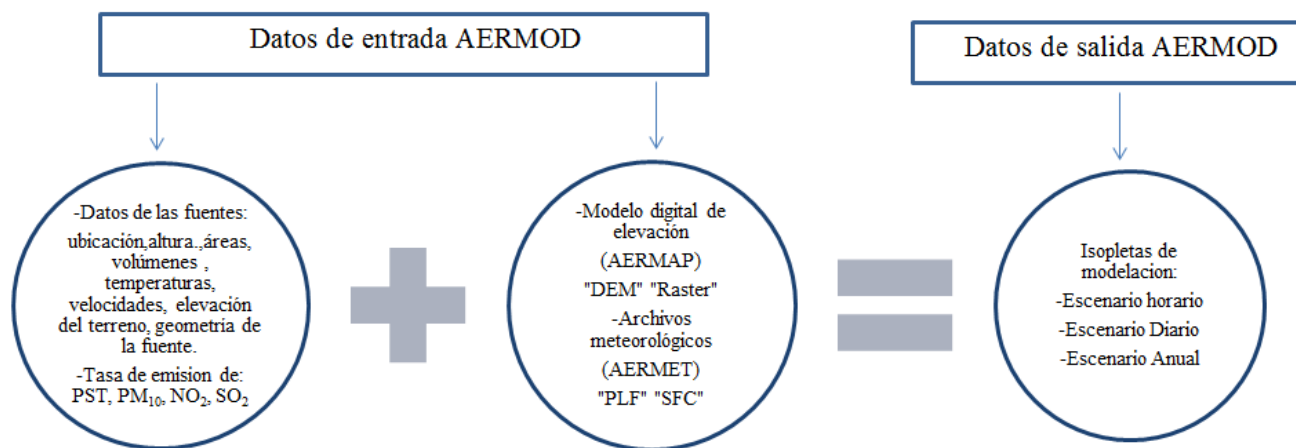


Figura 4. Información general de entrada y salida AERMOD.

Aunque AERMOD se complementa con los pre-procesadores AERMET y AERMAP en la Tabla 6 se describe la configuración de entrada para AERMET.

Tabla 6.

Configuración empleada en AERMET

ETAPA 1: Extracción	
Upper Air:	
Intervalo de tiempo (yy/mm/dd):	01/01/17 a 31/12/17
Ubicación de la estación (Grados decimales):	5.7676N -73.1483W
Ajuste de Tiempo a la hora local	5
Surface:	
Intervalo de tiempo (yy/mm/dd):	01/01/17 a 31/12/17
Ubicación de la estación (Grados decimales):	5.7676N -73.1483W
Ajuste de Tiempo a la hora local	0
ETAPA 2: Compilación	
Merge:	
Intervalo de tiempo (yy/mm/dd):	01/01/17 a 31/12/17
ETAPA 3: Preparación de Datos para AERMOD	
Sectores:	Según uso de suelo a 5 km a la redonda de datos de superficie
Número de sectores	1
Sector 1	276° a 354°; Uso de suelo predominante Residencial de baja densidad
Periodo de sectores	Mensual

Como datos de entrada para el modelo, se tuvieron en cuenta los siguientes:

- Área de modelización: 5 km de radio alrededor de la fuente fija para cubrir los asentamientos poblacionales.
- Características de la fuente, información meteorológica y elevaciones del terreno: se emplearon datos recopilados y analizados previamente en la primera etapa.
- Tiempo de modelización: se realizó un modelo de dispersión en frecuencia horaria, diaria y anual.

Finalmente, los promedios máximos generados por AERMOD para cada escenario y contaminante modelado (PM₁₀, NO₂ y SO₂) serán comparados con la Resolución del 2254 de

2017 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. El PST se comparará con la derogada Resolución 601 de 2010.

4. Resultados y Discusión

4.1 Identificación de las fuentes de emisión.

4.1.1 **Selección del área de estudio.** Después de obtener la información sobre industria consultada a la Cámara de Comercio de Bucaramanga y definir que el corredor Palenque – Café Madrid contaba para el año 2017 con el total de sus industrias manufactureras reportadas a la autoridad ambiental, se determinó el área de estudio como representativa. En la Figura 5 se observa el porcentaje de industrias manufactureras reportadas a la CDMB durante el año 2017.

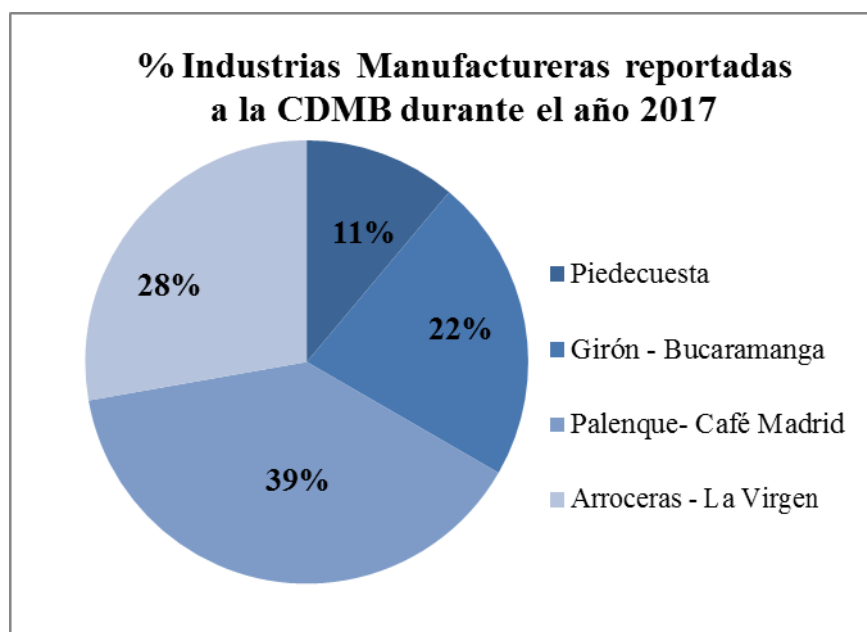


Figura 5. Porcentaje de Industrias presentes en el Área Metropolitana de Bucaramanga.

Posterior a la selección del corredor industrial de interés, en la Tabla 7 se evidencia cada una de las fuentes reportadas con medición directa para el año 2017 ante la autoridad ambiental. En ella se discrimina la información de la fuente necesaria para ingresar de entrada al modelo AERMOD.

Tabla 7.

Datos primarios de las fuentes de emisión.

Descripción	Tipo de fuente	Altura Ducto (m)	Temperatura de los gases (K)	Velocidad de Salida (m/s)	Diámetro del ducto (m)
Fuente 1	Horno	15	533,15	10,86	0,76
Fuente 2	Caldera	15,23	472,26	2,53	0,5
Fuente 3	Horno	20	417,15	1,1	0,29
Fuente 4	Caldera	19,54	445,1	8,59	0,49
Fuente 5	Horno	20	416,15	7,77	0,8
Fuente 6	Horno	14	322,3	1,36	0,38
Fuente 7	Horno	19,8	440	10,59	0,49

4.1.2 Visita a Campo. De la visita a campo se obtuvo la Tabla 8, en la cual se discrimina la georreferenciación de las industrias, su altura en metros sobre el nivel del mar y se corroboró si dicha industria a tiempo de la visita aún mantenía su actividad con normalidad en la zona.

Tabla 8.

Reconocimiento en campo de las industrias de la zona de interés

Descripción	Coordenada X	Coordenada Y	Altura (msnm)	Activa
Fuente 1	1°102.346	1°281.126	749	Si
Fuente 2	1°103.258	1°283.435	664	Si
Fuente 3	1°100.894	1°278.312	816	Si
Fuente 4	1°100.330	1°275.893	1.073	Si
Fuente 5	1°100.330	1°276.043	1.073	Si
Fuente 6	1°100.651	1°276.235	816	Si
Fuente 7	1°100.449	1°276.369	1.073	Si

De igual forma se utilizó Google Earth, con el fin de ubicar las fuentes de emisión a lo largo del corredor industrial y poder apreciar su distribución sobre el área de interés, tal como se

observa en la Figura 6 la fuente 1, fuente 2 y fuente 3 son más lejanas entre sí a comparación con las demás fuentes. De igual forma la fuente 2 colinda con barrios de la comuna norte de la ciudad de Bucaramanga. A lo largo del tramo vial se observó proyectos de viviendas de interés social habitados y otros en desarrollo.



Figura 6. Georreferenciación de las fuentes en el área de estudio

4.2 Estimación de las emisiones de contaminantes criterio.

4.2.1 Identificación de los Contaminantes Atmosféricos. Tras obtenerse la revisión de los expedientes la información fue organizada en la Tabla 9 donde se especifica la actividad de la industria, el tipo de fuente, el combustible utilizado y los contaminantes que evalúan mediante medición directa, el inventario es útil dado que da las características de las fuentes que se están evaluando y permite deducir que tanto puede estar o no aportando a los niveles de calidad del aire de la zona de estudio.

Tabla 9.

Identificación de fuentes fijas del área de estudio

Descripción	Actividad	Tipo de fuente	Tipo de combustible	Contaminantes evaluados mediante muestreo directo	Parámetros no muestreados según Res. 909 de 2008
Fuente 1	Producción de alimentos concentrados para animales	Horno	Carbón Bituminoso	PST-NO _x *	SO ₂
Fuente 2	Tratamiento y disposición final de residuos líquidos	Caldera	Carbón Bituminoso	PST	NO _x - SO ₂
Fuente 3	Tratamiento y disposición final de residuos sólidos	Horno	Carbón Bituminoso	PST -NO _x -SO ₂	OK
Fuente 4	Producción de alimentos concentrados para animales	Caldera	Carbón Bituminoso	PST - NO _x *	SO ₂
Fuente 5	Procesamiento de aceites comestibles	Horno	Carbón Bituminoso	PST - NO _x *	SO ₂
Fuente 6	Producción de alimentos concentrados para animales	Horno	Carbón Bituminoso	PST - NO _x *-SO ₂	OK
Fuente 7	Producción de alimentos concentrados para animales	Horno	Carbón Bituminoso	PST	NO _x - SO ₂

Nota: *NO_x de expresados como NO₂

La última columna de la Tabla 9 describe los parámetros que debían ser monitoreados según la Resolución 909 de 2008, la cual establece los contaminantes que deben ser medidos en las fuentes fijas dentro del territorio. Allí se puede apreciar cómo solo las fuentes 3 y 6 realizan adecuadamente las mediciones a sus fuentes industriales según la aplicabilidad de la norma.

4.2.2 Estimación de las emisiones. Las emisiones de los contaminantes de interés están relacionadas en la Tabla 10, la tasa de emisión del PM₁₀ fue determinada a partir de la relación MP₁₀/PM del AP-42, las demás emisiones se obtuvieron de las mediciones directas reportadas a la autoridad ambiental.

Tabla 10.

Tasa de emisión de los contaminantes a modelar

Descripción	Tasa de emisión PST (g/s)	Tasa de emisión PM ₁₀ (g/s)	Tasa de emisión NO ₂ (g/s)	Tasa de emisión SO ₂ (g/s)
-------------	---------------------------------	--	---	---

Descripción	Tasa de emisión PST (g/s)	Tasa de emisión PM ₁₀ (g/s)	Tasa de emisión NO ₂ (g/s)	Tasa de emisión SO ₂ (g/s)
Fuente 1	10,6	2,438	2,00	-
Fuente 2	3,5	0,805	-	-
Fuente 3	0,02	0,005	0,06	0,006
Fuente 4	7,3	1,679	6,00	-
Fuente 5	26,3	6,049	2,50	-
Fuente 6	0,61	0,014	0,33	0,33
Fuente 7	10,3	2,369	-	-

4.3 Modelación de los contaminantes.

4.3.1 Análisis de la Información Meteorológica y Topográfica. En el área de estudio, tal como se observa en la Tabla 11 predominaron los vientos en direcciones Noroeste y Sureste, con velocidades entre 1,9-2,1 m/s con una frecuencia anual de aparición mayor al 42 %, como se observa en la rosa de vientos y la distribución de frecuencia de velocidades del viento obtenidas con el procesador AERMET (Figura 7, Figura 8). El modelo representa una velocidad y dirección media a partir de datos de velocidad y dirección de un año, teniendo en cuenta que la velocidad y dirección de los vientos influyen considerablemente en la dispersión o dilución de los contaminantes emitidos (Gopalaswami et al, 2015).

Respecto a las velocidades de viento, predominaron valores entre 1,9-2,1 m/s con un 42% promedio anual, seguido de velocidades entre 4,0 -5,0 m/s con una frecuencia del 17,9 %. Las calmas presentaron un bajo porcentaje del 18,2%, condición poco favorable para la zona de estudio, puesto que este tipo de vientos de calma, combinados con el crecimiento urbano, uso de combustibles fósiles, topografía de la zona y presencia de otras fuentes de emisión, pueden comprometer la calidad del aire generando un ambiente nocivo para la población al no favorecer la dispersión de los contaminantes (C. Ubilla et al, 2017)

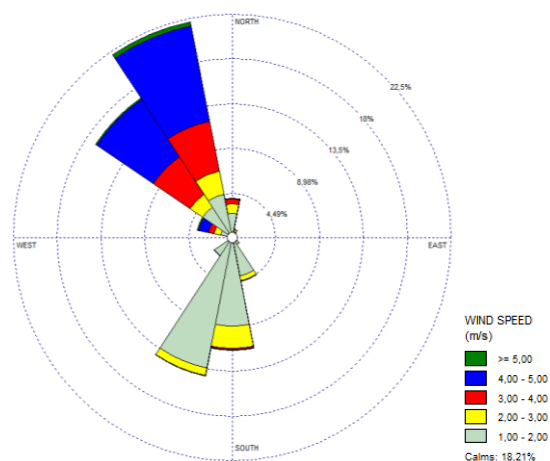


Figura 7. Rosa de Vientos

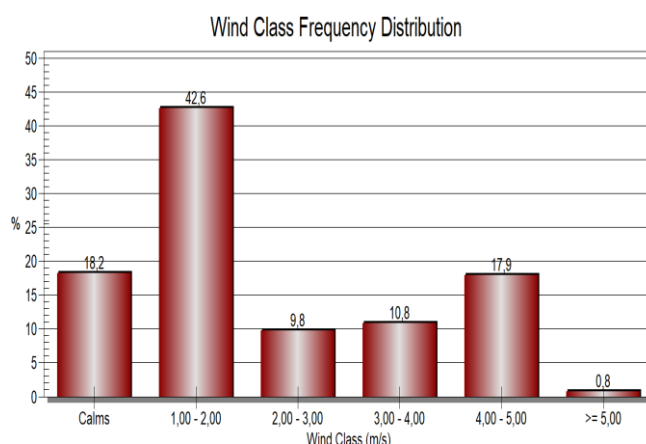


Figura 8. Distribución de Frecuencias de Velocidad del viento

Tabla 11.

Promedios mensuales de los datos meteorológicos

Mes	Velocidad del viento m/s	Temperatura °C	Precipitación acumulada mm/mes	Humedad relativa %	Altura de capa de mezcla m
Enero	1,92	21,67	16,72	75,09	659,54
Febrero	2,12	22,71	9,89	67,89	738,83
Marzo	2,10	23,35	157,69	73,23	757,49
Abril	1,97	22,33	340,57	81,24	704,60
Mayo	1,93	22,17	93,95	82,50	694,24

Mes	Velocidad del viento m/s	Temperatura °C	Precipitación acumulada mm/mes	Humedad relativa %	Altura de capa de mezcla m
Junio	1,97	22,14	25,39	77,96	723,05
Julio	1,96	22,38	30,96	74,05	713,64
Agosto	2,00	22,65	37,85	71,38	737,73
Septiembre	2,07	22,62	114,55	78,05	743,59
Octubre	1,93	21,73	95,19	85,88	652,19
Noviembre	1,89	21,77	45,70	84,28	626,96
Diciembre	1,94	21,36	0,75	72,79	674,72
Promedio	1,98	22,24	969,21*	77,03	----

Nota: *Precipitación acumulada del año

En la zona de estudio, la temperatura presentó un valor medio anual de 24,24°C con un rango de variación entre 21°C y 23°C y se clasificó como una zona cálida de acuerdo con Unesco-FAO (Almorox, 2015) por presentar temperaturas mayores a 15°C en el mes más frío (diciembre). Cabe anotar que la temperatura influye en la densidad de los gases, la combinación de aire y gas denso puede generar turbulencias que afectan la altura de mezcla y definen la estabilidad atmosférica del lugar, afectando a su vez afecta la dispersión de los contaminantes (Gopalaswami et al, 2015).

Con relación a la precipitación, en Colombia existen dos tipos de régimen: monomodal y bimodal. El primero se caracteriza por presentar una temporada seca y una lluviosa durante el transcurso del año y en el segundo se registra dos temporadas secas alternadas con dos lluviosas (IDEAM, 2014). La zona de estudio presentó un régimen bimodal con dos periodos lluviosos entre los meses de enero y abril y septiembre y noviembre, siendo probable que en este periodo

los mecanismos naturales de remoción de material particulado y NO_x se vean favorecidos por efecto de arrastre y deposición húmeda (Seangkiatiyuth et al. 2011).

Respecto a las características topográficas del área de estudio, se observó que existen dos zonas diferenciadas por la altura sobre el nivel del mar, la primera con una altura de 664 msnm a los 816 msnm y la segunda situada sobre los 1.073 msnm, condiciones de terreno que pueden influenciar la dispersión y arrastre de elementos contaminantes a través del aire (Ortega et al. 2017). La topografía, unida a la dirección y velocidad del viento, condiciona la dispersión de los contaminantes, así para zonas de topografía simple se consigue un flujo libre en la dirección predominante del viento y un flujo turbulento en la zona compleja (Arrieta-fuentes, 2016).

A continuación, se presentan los resultados sobre la calidad de aire industrial obtenidos con el modelo AERMOD para el tramo vial Palenque – Café Madrid. El enfoque de las isopleas pretende mostrar las diferencias existentes en la distribución espaciotemporal de los contaminantes.

4.3.2 limitaciones. La principal limitación del modelo AERMOD es en entorno a la modelización de contaminantes gaseosos como NO₂ y SO₂ por no incorporar el módulo de reacción, lo que impide modelar las posibles transformaciones químicas en la atmósfera, limitando su predicción (Seangkiatiyuth et al. 2011).

Es necesario mencionar que dentro del área de influencia no se cuenta con equipos de medición de calidad del aire ni con estudios disponibles dentro del mismo, por ende no se contó con datos para constatar con los resultados arrojados por la simulación y así poder calibrar el modelo y reducir la incertidumbre del estudio.

Es necesario aclarar que los resultados anuales son los promedios arrojados por el modelo, los datos diarios y los horarios corresponden a los máximos dentro de la modelación.

Isopletras de Modelación PST

Las Partículas Suspendidas Totales expresadas como PST no posee límite máximo permisible en la Resolución 2254 de 2017, sin embargo, con el fin de generar comparación se utilizó la derogada Resolución 610 de 2010, al realizar la comparación del PST diario se observa que este se encuentra en el límite máximo, caso contrario ocurre con la comparación anual, la cual se encuentra por debajo del límite máximo permisible, esta comparación puede ser observada en la Tabla 12.

Tabla 12.

Valores promedio y máximos de concentración de PST durante los tres escenarios *de modelación*.

Tiempo	Valor Modelización $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Res. 610 /2010* $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Cumplimiento
Horario	900 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	--	--
Diario	300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	300	No cumple
Anual	80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	100	No cumple

Nota: *La comparación del parámetro PST se realizó con la derogada Resolución 610/2010

Al observar los mapas de isopletras, Figura 9, Figura 10 y Figura 11, se aprecia que las mayores concentraciones se encuentran en cercanías a las fuentes de emisión, esto con la estabilidad atmosférica puede generar que el material particulado viaje a lo largo del tramo vial y genere resuspensión en los meses escasos de lluvia.

Aunque el PST puede generar problemas a la salud e inclusive la muerte prematura en las personas con problemas cardíacos o pulmonares, ataques al corazón, arritmia cardíaca, asma, aumento en problemas respiratorios como irritación de las vías respiratorias, tos y dificultad para respirar (EPA, 2013) es necesario que se realicen más estudios epidemiológicos que abarquen

espectros inferiores de partículas como el $PM_{2.5}$ y que de igual forma a futuro se incluyan las fuentes móviles.

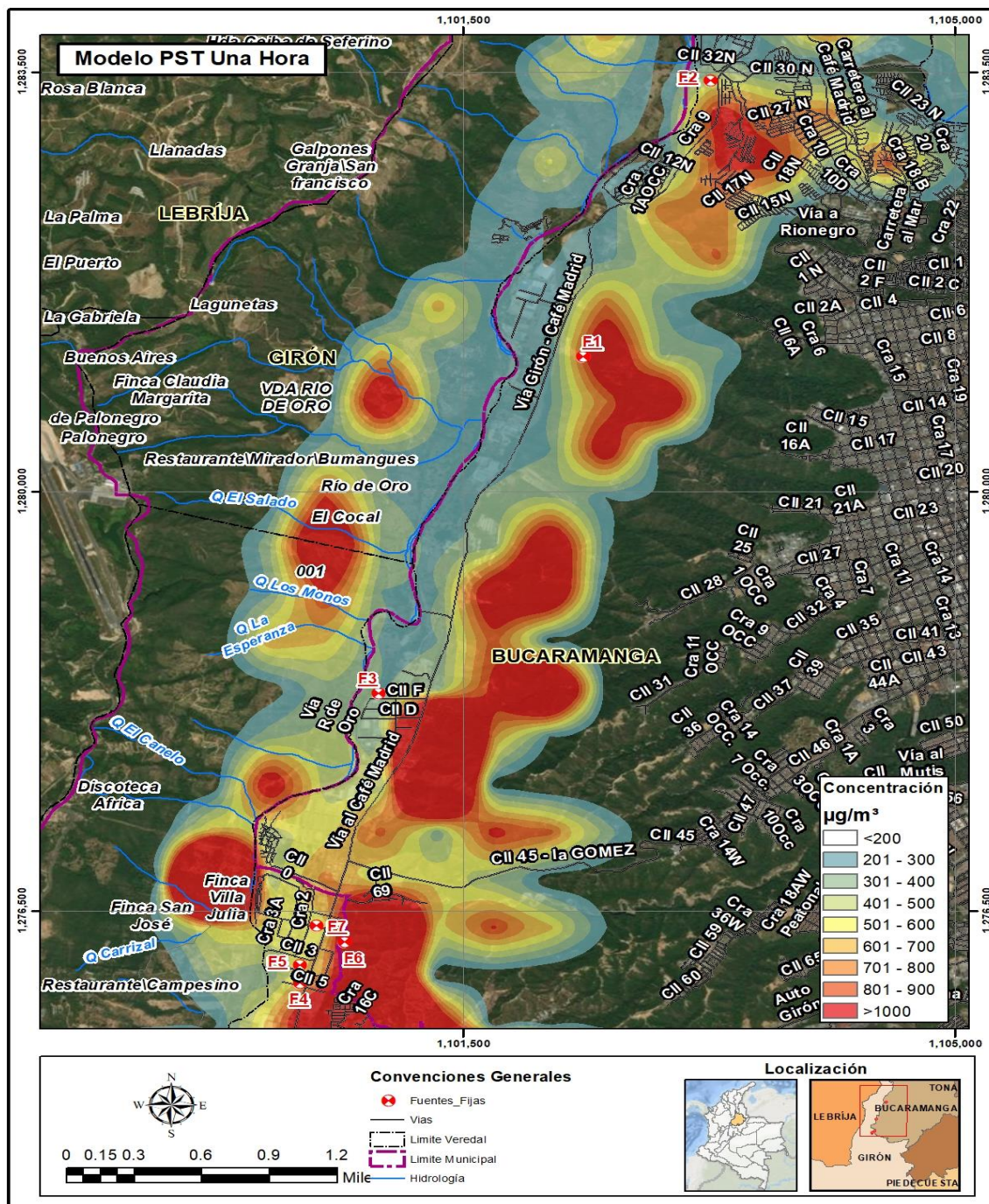


Figura 9. Isopleta de PST horaria

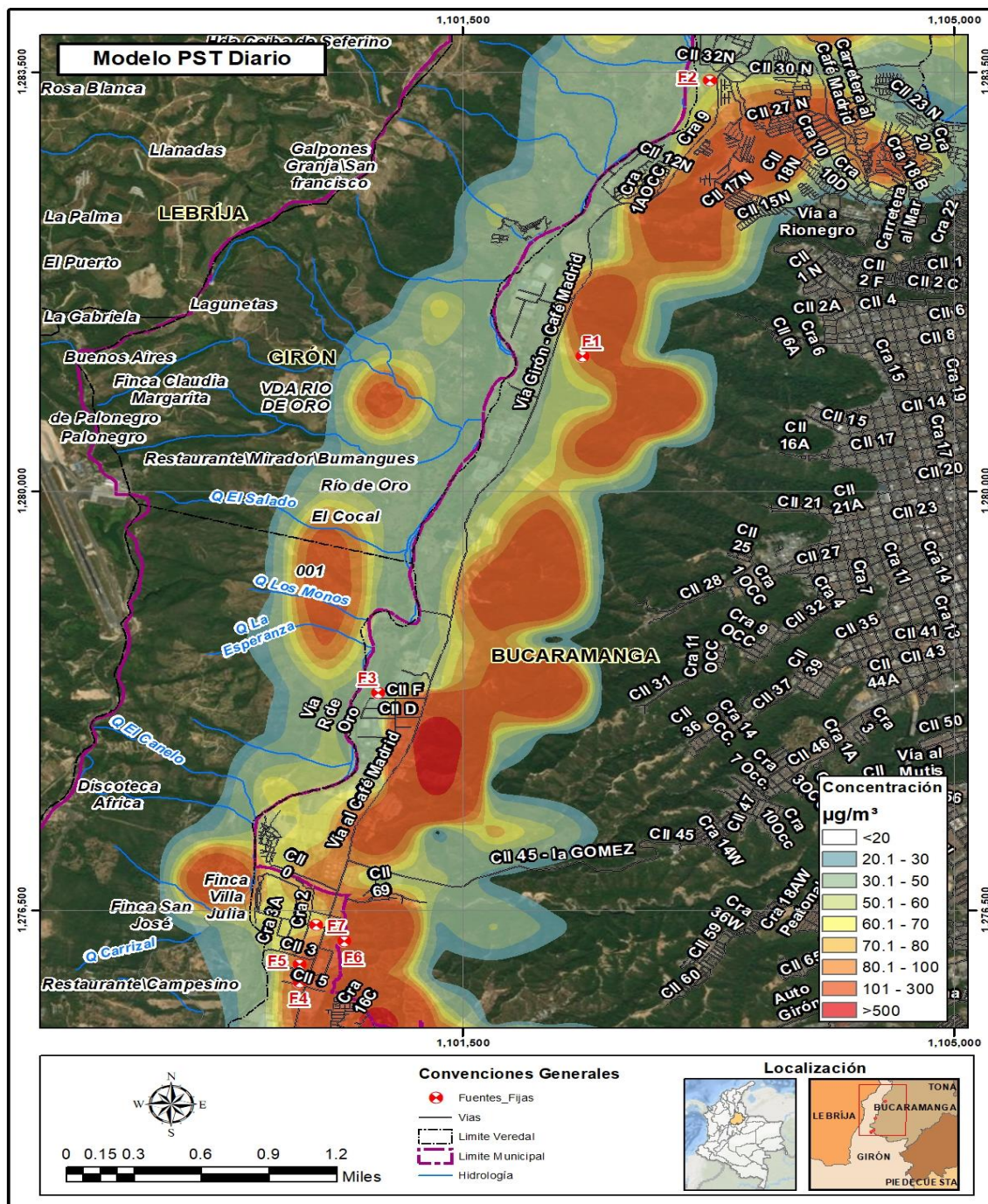


Figura 10. Isopleta de PST diaria

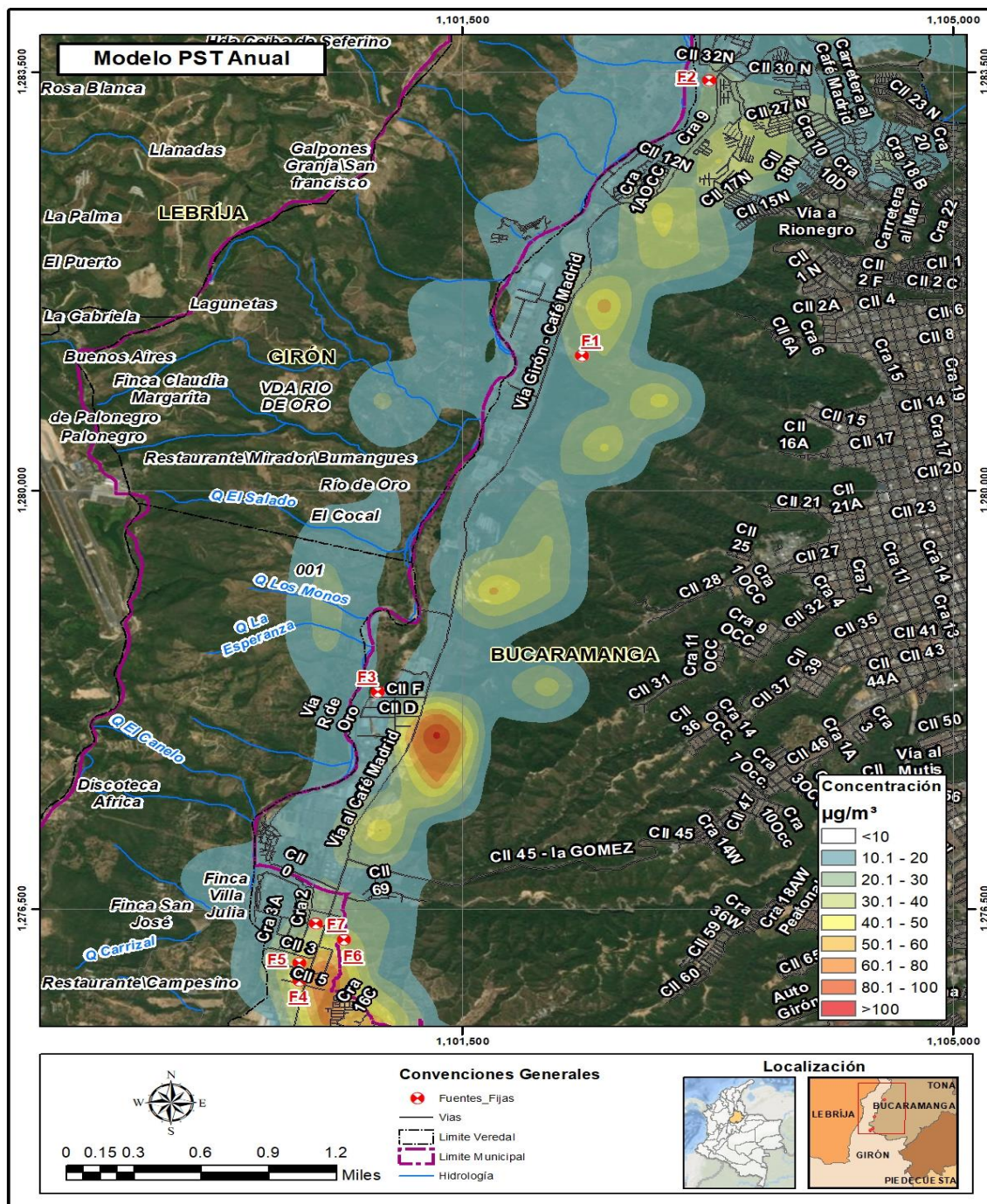


Figura 11. Isopleta de PST anual

Isopletras de Modelación PM₁₀

El PM₁₀ fue modelado para las siete industrias del área de estudio, en la Tabla 13 se plasma la comparación de los valores de concentración obtenidos con los límites de la Resolución 2254 de 2017.

Tabla 13.

Valores promedio máximos de concentración de PM₁₀ durante los tres escenarios de modelación.

Tiempo	Resultado Modelización µg/m ³	Res. 2254 /2018 µg/m ³	Cumplimiento
Horario	600 µg/m ³	--	--
Diario	80 µg/m ³	75	No cumple
Anual	20 µg/m ³	50	Cumple

Para los tres escenarios de modelación el PM₁₀ evidenció valores elevados tal como se evidencia en la Tabla 13, inclusive el aporte de las fuentes fijas de la zona podría superar el umbral de 75µg/m³ para el tiempo de exposición diario. Las bajas velocidades del viento presentes en el área de estudio acompañadas de las direcciones predominantes NE y SE y el tiempo seco reportado en el análisis meteorológico contribuyen a la resuspensión del material particulado fino, generando que el contaminante recircule dentro del área de estudio y este genere posibles afectaciones a la población presente en el corredor industrial, tal como se observa en la Figura 12, Figura 13 y Figura 14.

Es necesario tener en cuenta que la zona de estudio presenta viviendas de interés social en cercanías a las fuentes: F4, F5, F6 y F7 y la F2 se encuentra en los alrededores de la comuna norte de Bucaramanga, dichas viviendas representan población vulnerable ante el PM₁₀ y sus

efectos. Con respecto a los tiempos de exposición modelados para el proyecto, según estudios realizados y reportados por la OMS en sus guías del 2005, en Europa (29 ciudades) y en los Estados Unidos (20 ciudades) diversas investigaciones han evidenciado efectos de mortalidad a corto plazo en cuanto a la exposición al material particulado fino PM_{10} , con porcentajes entre el 0,62% y el 0,46% de casos mortales por exposición en concentraciones de $10\mu g/m^3$, valor por debajo de los límites máximos permisibles que fija la OMS (Katsouyanni et al. 2001; Samet et al. 2000).

Por otra parte, dentro del área de influencia no se cuenta con estudios epidemiológicos, los datos arrojados por el modelo pueden ser un indicador de la exposición, a la que la población en cercanías al área de estudio podría estar expuesta ya que esta fracción representa la masa de las partículas que entran en el sistema respiratorio, que se considera contribuyen a los efectos nocivos en la salud.

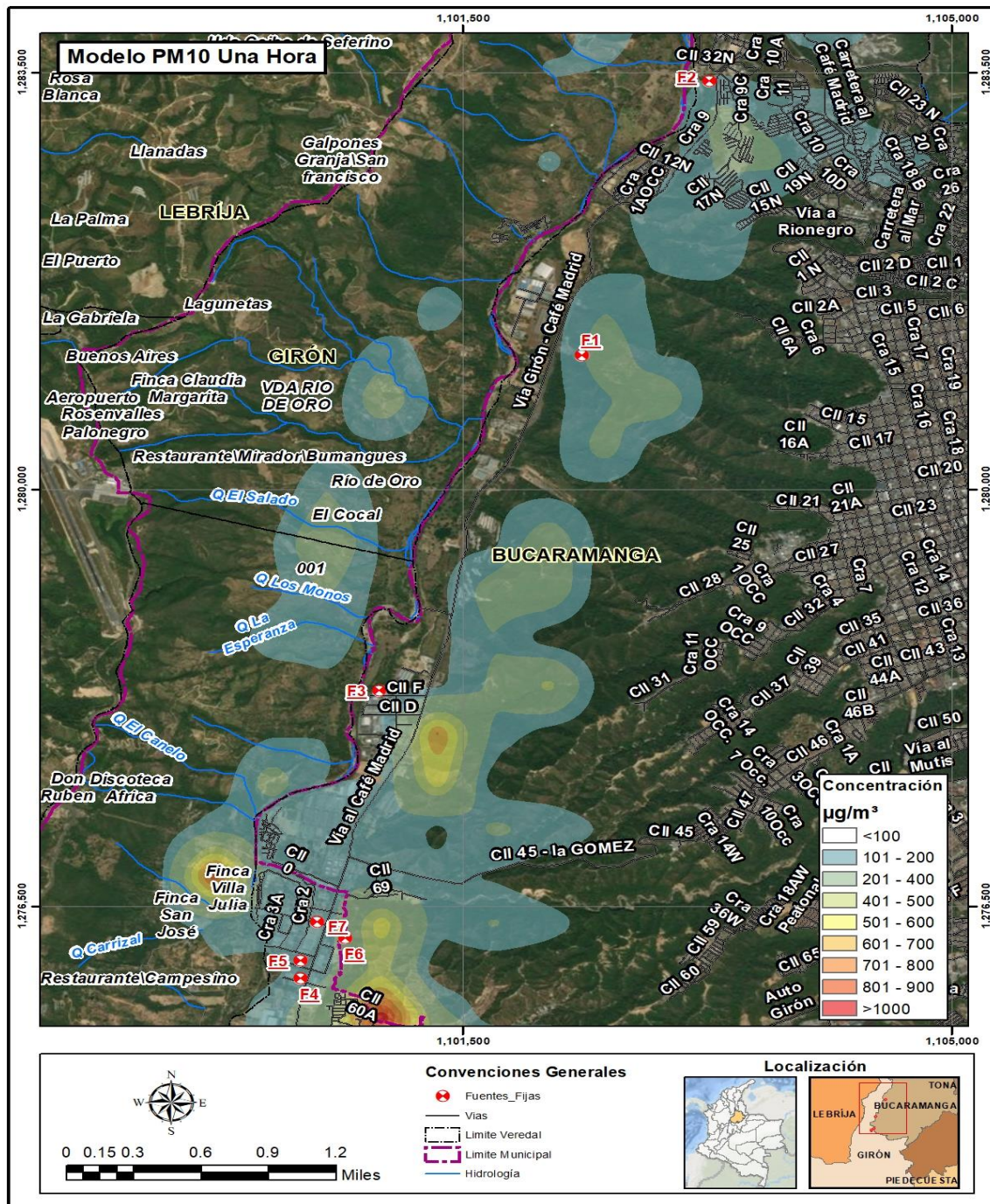


Figura 12. Isopleta de PM₁₀ a una hora

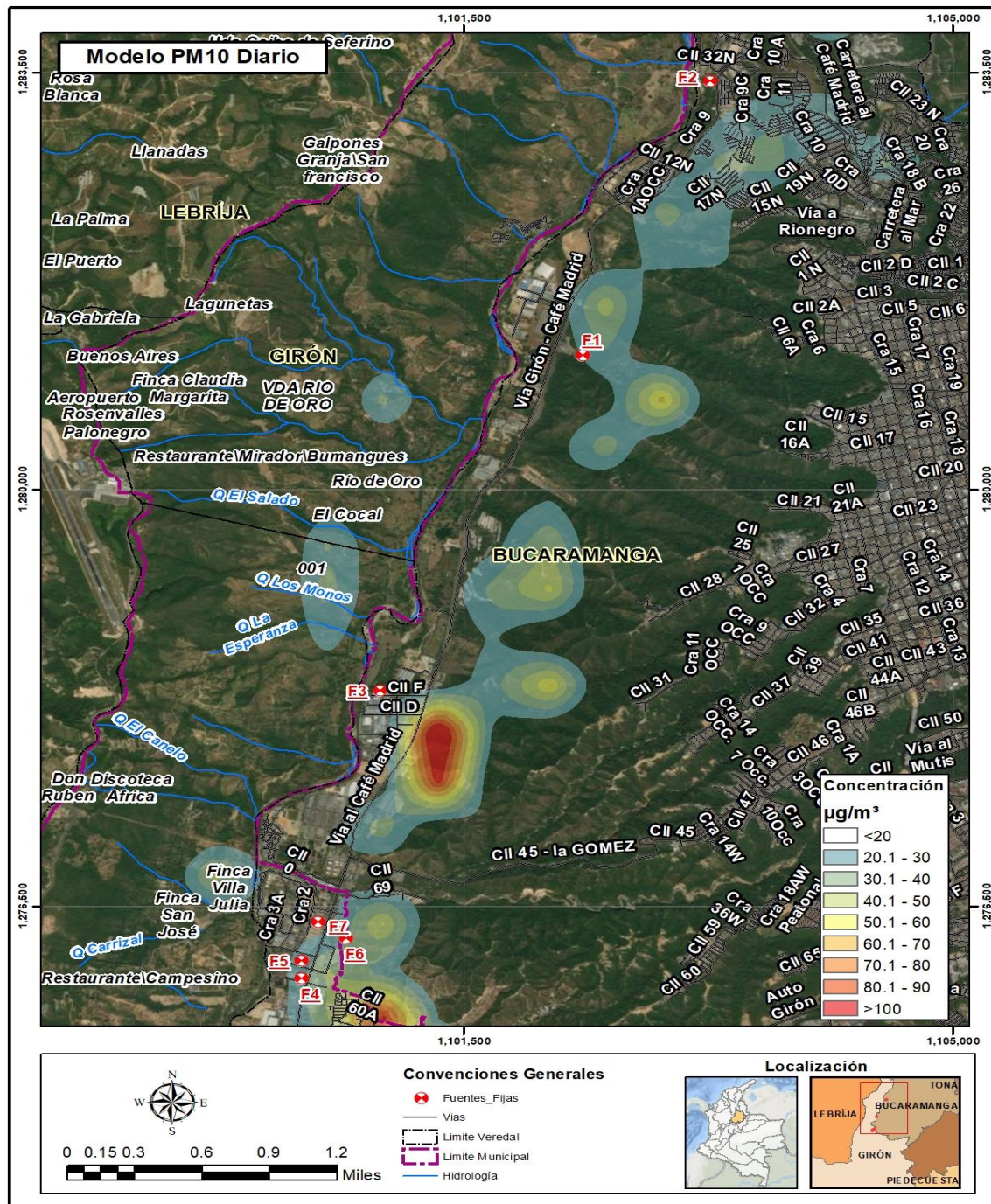


Figura 13. Isopleta de PM₁₀ diaria

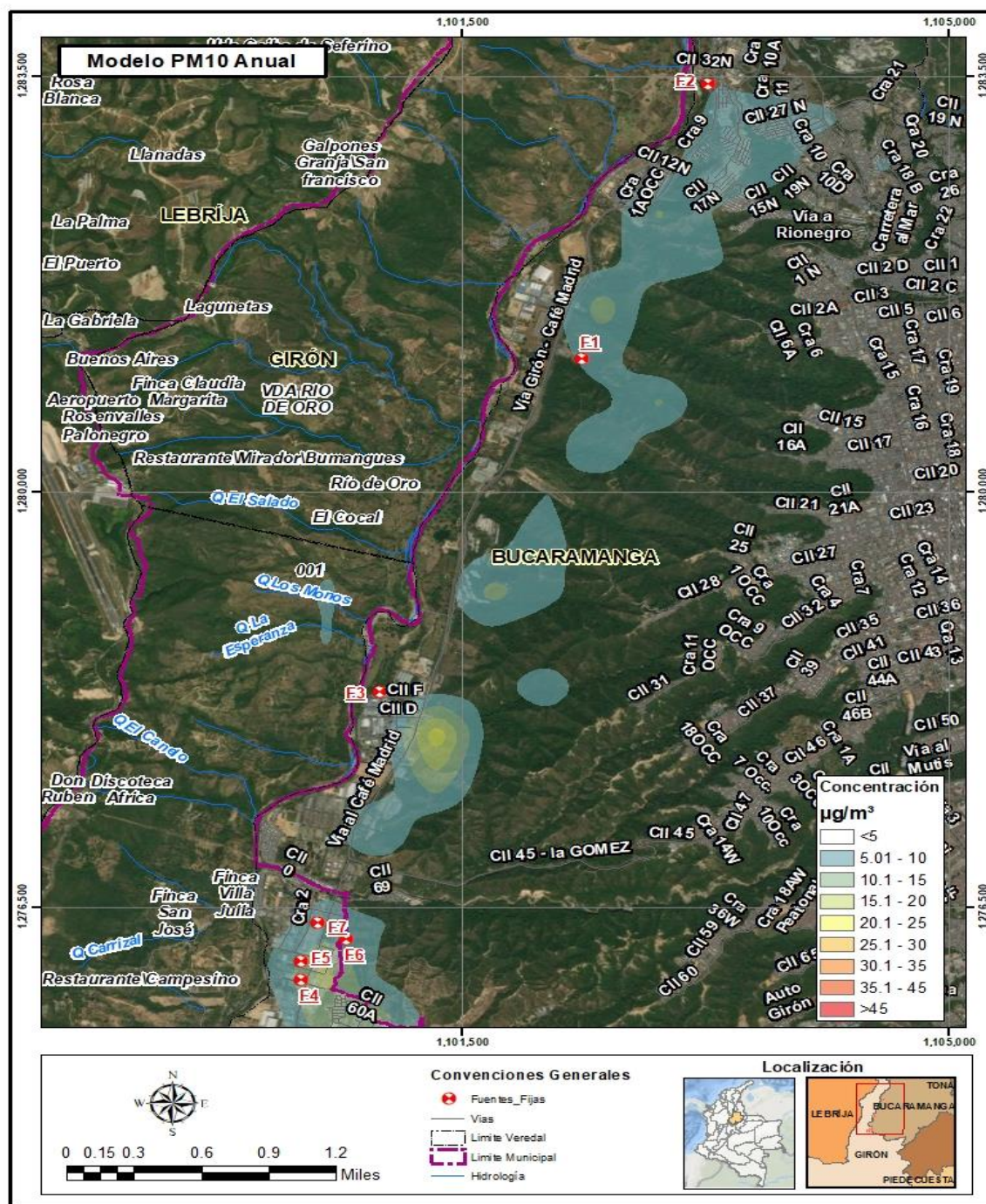


Figura 14. Isopleta de PM_{10} anual

Isopletas de Modelación NO₂

El Dióxido de Nitrógeno (NO₂) fue modelado para cinco de las siete fuentes del área de estudio, al compararse los resultados con la actual Resolución tal como se observa en la Tabla 14, estos presentan valores inferiores a los límites máximos permisibles.

Tabla 14.

Valores promedio y máximos de concentración de NO₂ durante los tres escenarios de modelación

Tiempo	Resultado Modelización	Res. 2254 /2018	Cumplimiento
Horario	150 µg/m ³	200	Cumple
Diario	50 µg/m ³	--	--
Anual	30 µg/m ³	60	Cumple

Los valores obtenidos producto del modelo se encuentran cumpliendo con la Resolución mencionada anteriormente, sin embargo, es necesario que dichos valores a futuro tiendan a disminuir tal como lo menciona el CONPES 3943 el cual propone como referente la norma de la OMS de 40 µg/m³ para un periodo de exposición anual. En cuanto a la dispersión de la pluma contaminante se observa en la Figura 15 que la modelización para el tiempo horario no es de manera continua si no puntual, caso contrario ocurre con las isopleta diaria Figura 16 y anual Figura 17 las cuales evidencian una continuidad en cuanto a la dispersión del contaminante, las mayores concentraciones del contaminante se dan a cierta distancia de las fuentes, por ende, puede deducirse que la acción del viento y el relieve de la zona generan un arrastre del contaminante creando focos de mayores concentraciones en cercanías a receptores sensibles

tales como la comuna norte, el municipio de Girón y las viviendas situadas en el área de influencia.

Es necesario destacar que los óxidos de nitrógeno, y especialmente el NO_2 , son promotores de otros contaminantes como el smog, la lluvia ácida, y el O_3 troposférico (Banco Mundial, 1997), contaminantes secundarios que sumado a las condiciones topográficas y climatológicas de la zona de estudio pueden llegar a generar afectaciones a la salud de la población circundante y a deteriorar la poca vegetación existente en el área de estudio.

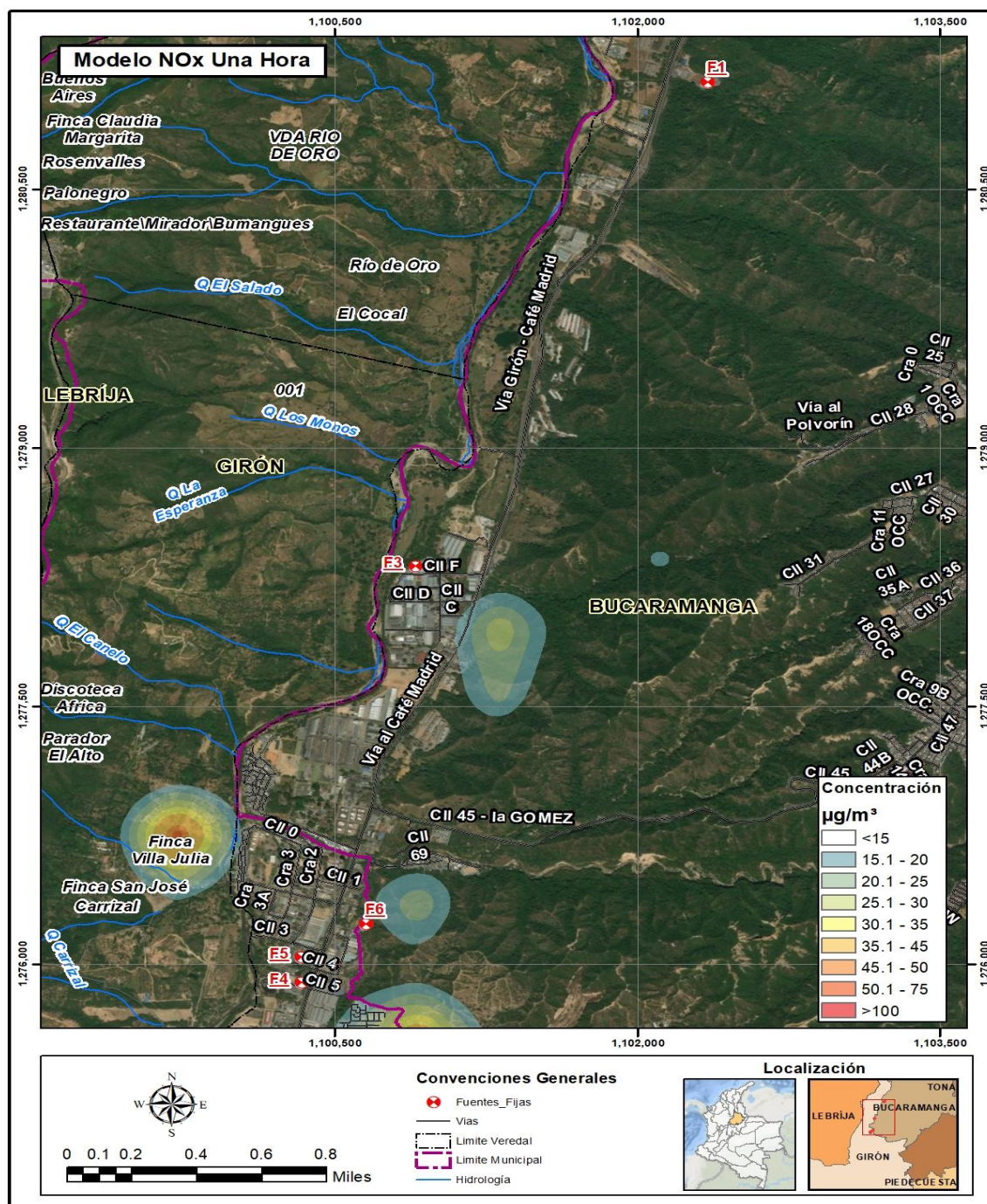


Figura 15. Isopleta de NO_2 una hora

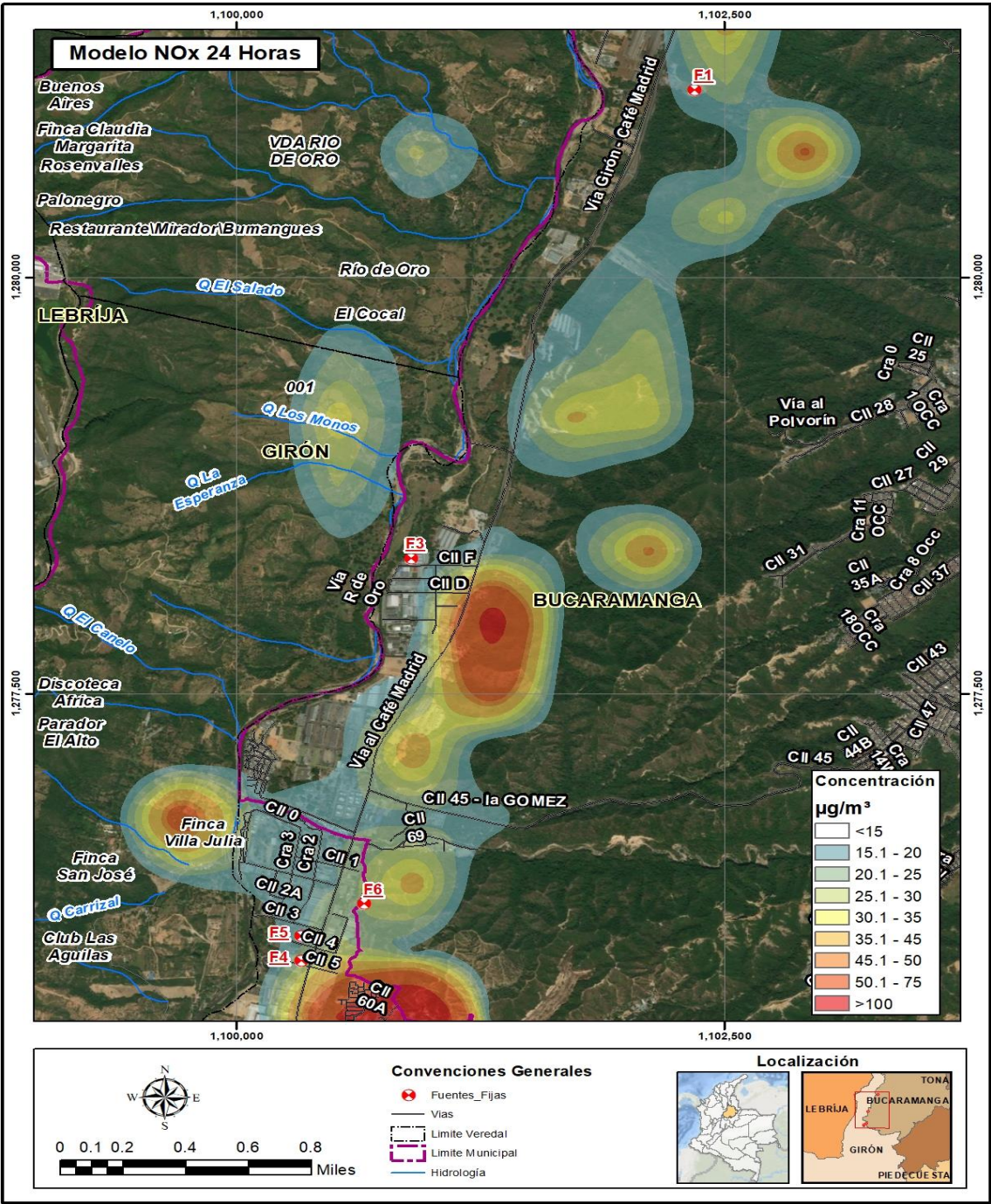


Figura 16. Isopleta de NO_2 diaria

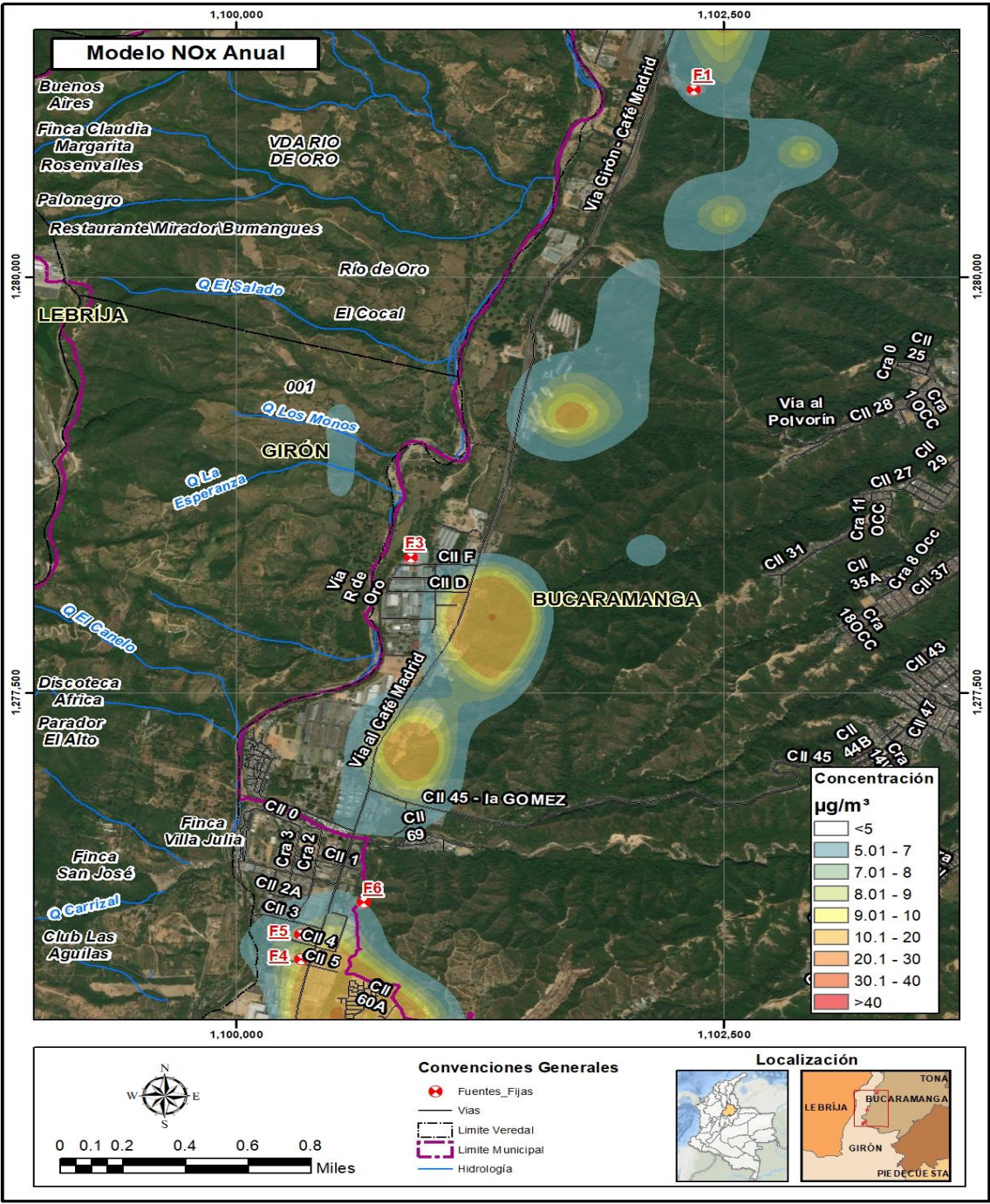


Figura 17. Isopleta de NO₂ anual

Isopletas de Modelación SO₂

La Tabla 15 evidencia los valores promedios y máximos de concentración de SO₂ durante los escenarios de modelación, de igual forma también se realiza la comparación con los límites máximos permisibles de la Resolución 2254 de 2017.

Tabla 15.

Valores promedio y máximos de concentración de SO₂ durante los tres escenarios de modelación

Tiempo	Resultado Modelización	Res. 2254 /2018	Cumplimiento
Horario	70 µg/m ³	100	Cumple
Diario	45 µg/m ³	50	Cumple
Anual	20 µg/m ³	--	--

El SO₂ es un gas que, a comparación del material particulado, en el ser humano puede exacerbar los síntomas de aquellos individuos que sufren enfermedades respiratorias o cardíacas diagnosticadas (OMS, 2005). Este contaminante solo se modeló para la Fuente 3 y Fuente 6, las cinco fuentes restantes no reportan este contaminante en sus mediciones directas, un dato que debe ser estudiado a fondo por la autoridad ambiental, dado que las actividades de las otras fuentes cumplen con lo que exige el tipo de industria según la Resolución 909 de 2008.

Con respecto a la comparación con la Resolución 2254 de 2017, los valores arrojados por el modelo se encuentran cumpliendo el límite máximo permisible, tal como se evidencia en la Tabla 15 aun así, el valor diario es cercano al límite máximo permisible, si llegaran a incluirse los datos de SO₂ de las demás fuentes en un modelo futuro, este parámetro podría llegar a incumplir con la actual Resolución.

Con respecto a la dispersión de los contaminantes, las isopletras de modelación **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia., ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia. y ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** muestran una tendencia de dispersión en sentido NE y SE, esto sumado con las velocidades del viento y la topografía de la podrían llegar no solo al municipio de Girón y la comuna norte, sino también a la zona centro del municipio de Bucaramanga.

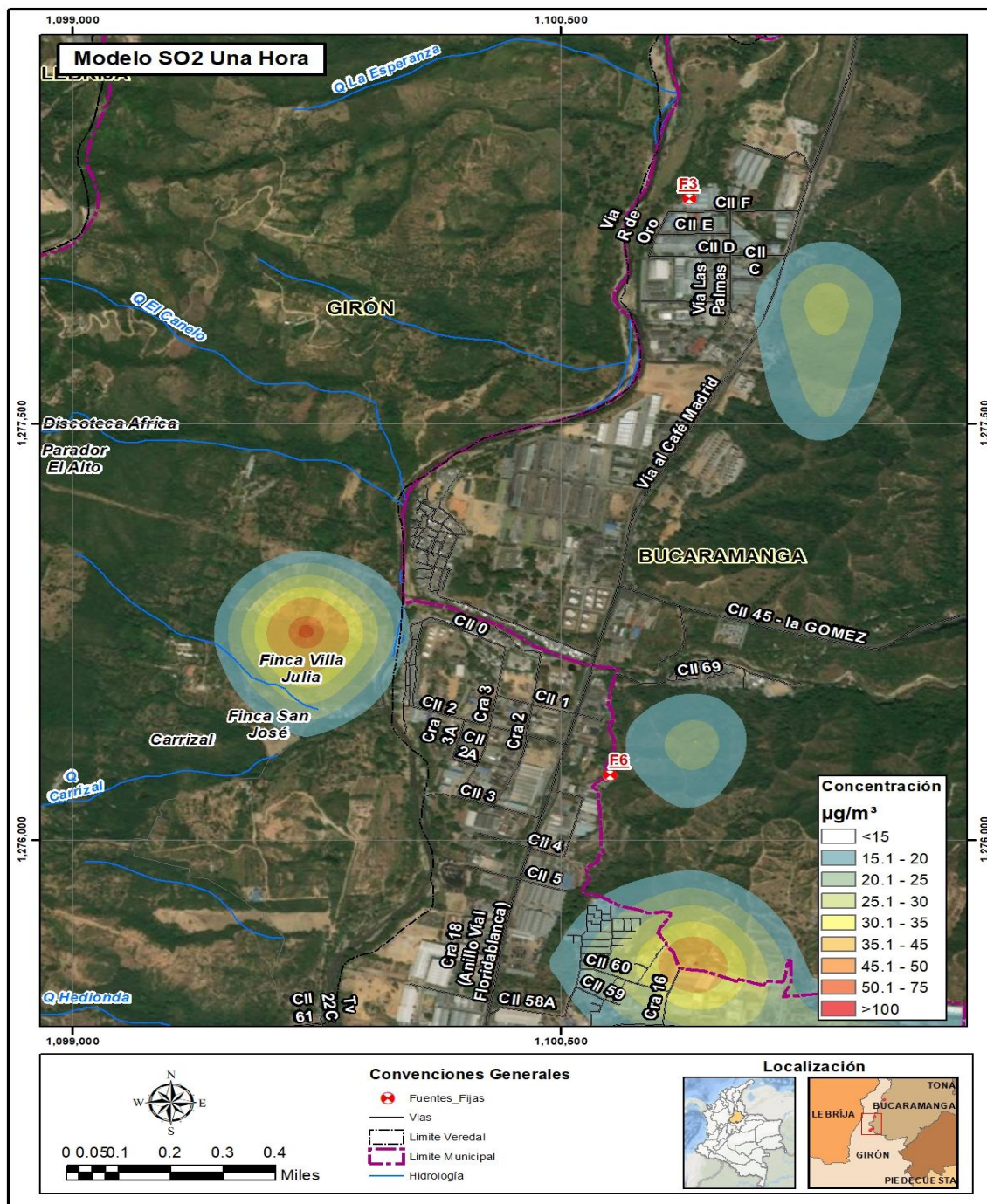


Figura 18. Isopleta de SO₂ una hora

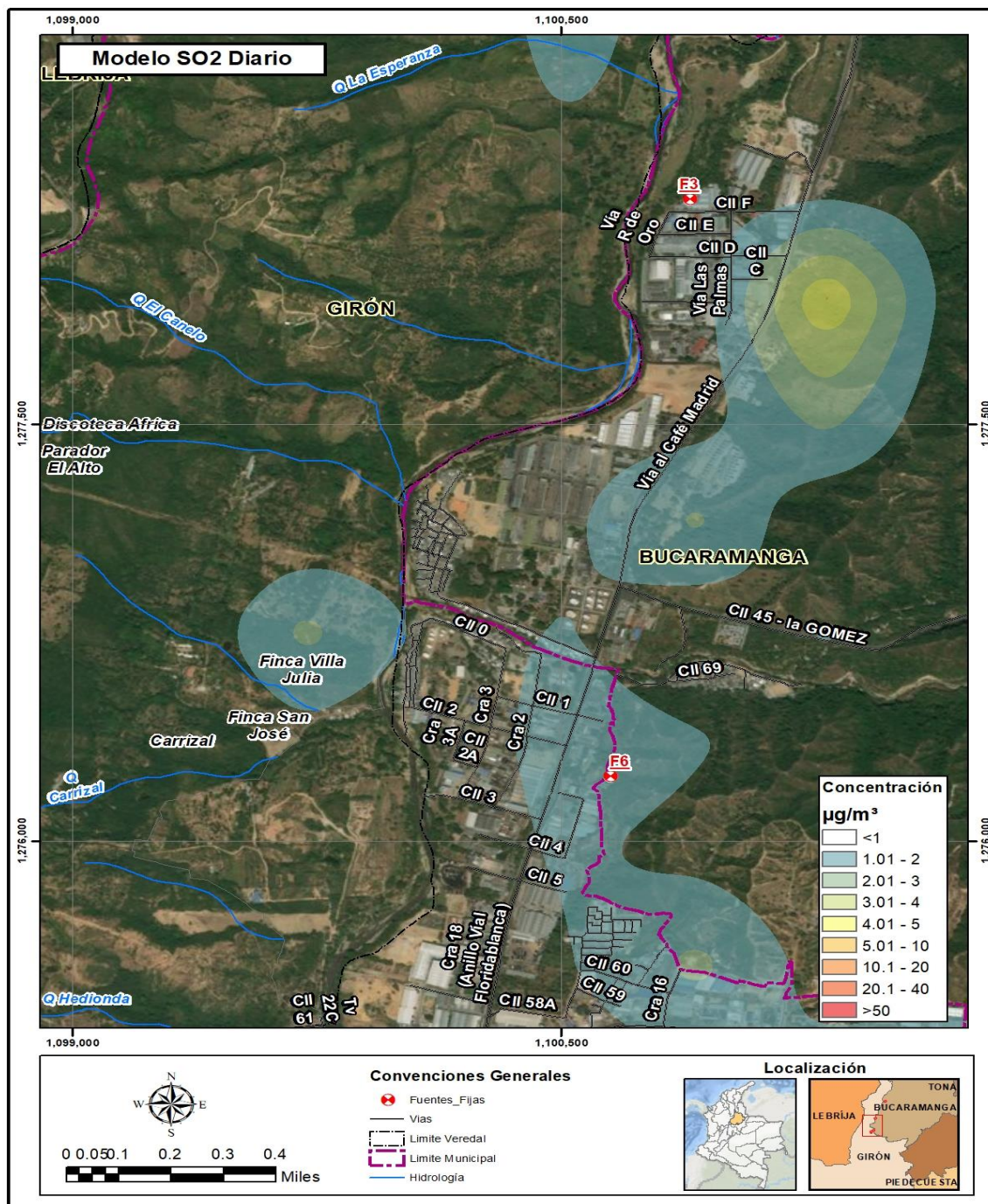


Figura 19. Isopleta de SO₂ diaria

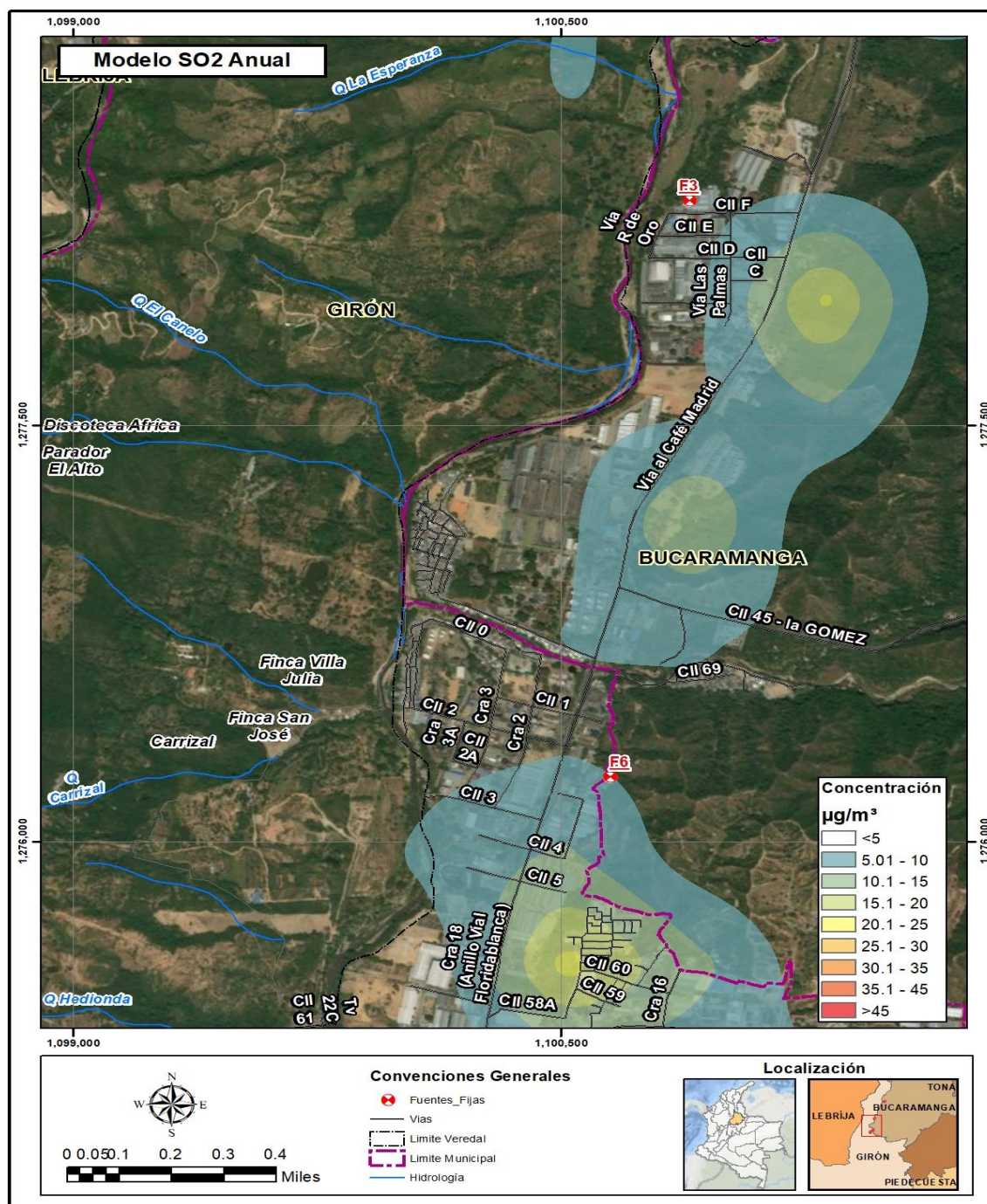


Figura 20. Isopleta de SO₂ anual.

5. Conclusiones

- En cuanto al comportamiento meteorológico del área de estudio se observó que se la dispersión de los contaminantes se da en las direcciones sureste y noreste con variaciones al este, con una velocidad predominante de 2 m/s, con vientos tranquilos por debajo del 19%, los cuales desfavorecen la dispersión de contaminantes, por ende, ocupan un área más pequeña, pero con mayores concentraciones.
- Las concentraciones simuladas para los cuatro contaminantes PST, PM₁₀, NO₂ y SO₂, presentan aportes en calidad del aire que en su mayoría no exceden los límites máximos permisibles, pero que a futuro puede afectar la salud de la población local, la fauna y la flora si no se realizan estudios ambientales de mayor complejidad.
- Se observó que la zona montañosa del área de estudio influyó en la dispersión de los contaminantes que son arrastrados por el viento en dirección NE y SE, los cuales, al chocar con este obstáculo topográfico (escarpa), buscan bordearlo y se dispersan en sentido norte y sur, confirmando la influencia de las características topográficas sobre la dispersión y concentración de los contaminantes a nivel del suelo.
- Aunque los resultados del trabajo de aplicación mostraron que no existe un impacto significativo de las emisiones de PST, SO₂, NO₂ sobre los receptores poblacionales identificados en el estudio, es necesario considerar que en esta área existen otras industrias y fuentes móviles que podrían contribuir al deterioro de la calidad del aire sobre los receptores estudiados, siendo recomendable realizar una modelización integral que considere todas las emisiones fijas y móviles teniendo en cuenta que este corredor vial comunica el centro y el norte del país.

6. Recomendaciones

Teniendo en cuenta que el interés de la cuantificación del material particulado fino en las fuentes de combustión externa, se recomienda a la autoridad ambiental local solicitar a todos los industriales que posean este tipo de fuentes la medición directa de PM₁₀ y PM_{2.5} mediante el método 201 de la EPA. Lo anterior mejoraría significativamente la calidad de los inventarios de emisiones de material particulado fino y por ende la modelización de este contaminante de gran interés a nivel epidemiológico.

Se recomienda realizar mediciones en tiempo real con estaciones de monitoreo de calidad del aire en la zona industrial Palenque – Café Madrid, principalmente para material particulado PM₁₀ y PM_{2.5}, teniendo en cuenta la presencia importante de viviendas de interés social identificadas en la zona de estudio.

Es importante que las autoridades ambientales realicen cada año los inventarios de emisiones acorde a la normatividad legal vigente, con el fin de ejercer control sobre todas las industrias asentadas en el área de influencia del proyecto.

Se recomienda instalar una estación meteorológica de alta precisión en la zona para analizar de forma más detallada los comportamientos horarios de la dirección y velocidad del viento y la posible dispersión de los contaminantes atmosféricos de la zona industrial hacia el norte y centro de Bucaramanga por la escarpa occidental.

Referencias Bibliográficas

- Área Metropolitana del Valle de Aburrá, & Universidad Pontificia Bolivariana, 2011. (2013). *Inventario de Emisiones Atmosféricas del Valle de Aburrá*, año base 2011, (243).
- Arrieta-Fuentes,(2016) “*Dispersión de material particulado (PM₁₀), con interrelación de factores meteorológicos y topográficos*”. Rev. Ing. Inv. Desarrollo., vol. 16, no. 2, pp. 43-54, 2016.
- Askariyeh, M. H., Kota, S. H., Vallamsundar, S., Zietsman, J., & Ying, Q. (2017). *AERMOD for near-road pollutant dispersion: Evaluation of model performance with different emission source representations and low wind options. Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 57(October), 392–402. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.10.008>
- Baawain, M., Al-Mamun, A., Omidvarborna, H., & Al-Jabri, A. (2017). *Assessment of hydrogen sulfide emission from a sewage treatment plant using AERMOD. Environmental Monitoring and Assessment*, 189(6). <https://doi.org/10.1007/s10661-017-5983-6>
- Castro Ortiz, H. (2010). *Tecnología Sistema de Vigilancia de Calidad del Aire del Área Metropolitana de Bucaramanga*, 19–24.
- Centro de Gestión de Residuos de Gipuzkoa, (2009), *Proyecto técnico y estudio de impacto ambiental del centro de gestión de residuos de Gipuzkoa; Guipúzcoa, España*.
- CONPES (2005). *Consejo Nacional de Política Económica y Social Lineamientos para la Formulación de la Política de Prevención y Control de la Contaminación del Aire*.
- Cuesta O. *Caracterización de las concentraciones de los principales compuestos del nitrógeno atmosférico en Cuba y su relación con los tipos de situaciones sinópticas*. Tesis para optar por el grado de Doctor en Ciencias Meteorológicas. Ciudad de La Habana, 1995
- DAGMA, “*Sistema de vigilancia de calidad del aire de Cali–SVCAC*”. (2017).

[http://www.cali.gov.co/dagma/publicaciones/38365/sistema de vigilancia de calidad del aire de cali svcac/](http://www.cali.gov.co/dagma/publicaciones/38365/sistema_de_vigilancia_de_calidad_del_aire_de_cali_svcac/)

Dos Santos Cerqueira, J., de Albuquerque, H. N., & de Assis Salviano de Sousa, F. (2019).

Atmospheric pollutants: modeling with Aermod software. Air Quality, Atmosphere and Health, 12(1), 21–32. <https://doi.org/10.1007/s11869-018-0626-9>

EPA, «*Compilation Pollutant Emission Factors. AP-42. Fifth Edition. Volume I: Stationary Point and Area Sources. United States of America,*» 2009.

Environmental, software WRPLOT View – Freeware V: 6.7.165 – Lake.

Gopalaswami, K. Kakosimos, L.V Echot, T. Olewski, M.S Mannan, “*Analysis of Meteorological Parameters for Dense Gas Dispersion Using Mesoscale Models*”. J Loss Prev Process Ind., vol. 35, no. 1, pp. 145-156, 2015.

IDEAM (2014) Instituto de Hidrología y Meteorología de Estudios Ambientales, *Regionalizacion de Colombia según la estacionalidad de la precipitación media mensual a través de análisis de componentes principales*. 2014.

K-2 ingeniería LTDA, 2005, *Modelación de la Dispersión de Contaminantes Atmosféricos Para Fuentes Fijas*, p.74.

Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible. (2016). *Colombia hace parte de los países que se comprometen a frenar el cambio climático*. Recuperado a partir de <http://www.minambiente.gov.co/index.php/noticias/2275-colombia-hace-parte-de-los-paises-que-se-comprometen-a-frenar-el-cambio-climatico>

IDEAM. (2016). *Informe del Estado de la Calidad del Aire en Colombia 2011 – 2015*. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

K-2 ingeniería LTDA, 2005, *Modelación de la Dispersión de Contaminantes Atmosféricos Para*

Fuentes Fijas, p.74.

Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible. (2016). *Colombia hace parte de los países que se comprometen a frenar el cambio climático*. Recuperado a partir de <http://www.minambiente.gov.co/index.php/noticias/2275-colombia-hace-parte-de-los-paises-que-se-comprometen-a-frenar-el-cambio-climatico>

Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible, 2012. *Diagnostico nacional de salud ambiental*.
Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2008. *Guía nacional de modelación de calidad del aire*.

Ministerio de Salud y Protección Social, (2015). *Abecé de aire y salud*. Bogotá D.C. Recuperado a partir de <https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/VS/PP/SA/abc-aire.pdf>

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010. *Política de Prevención y Control de la Contaminación del Aire*.

MeteoSIM, «Meteorología WRF Proyecto, *Estimación de los niveles de calidad del aire, mediante modelización de las fuentes fijas, en el corredor industrial comprendido entre el Palenque y el Café Madrid del Área Metropolitana de Bucaramanga*, » 2017.

Hasan MM, Rabbi MA, Maitra B, Faruk O, Sarwar M and Roy (2018). *Assessment of Nitrogen Oxides and Sulphur Dioxide Content in the Ambient Air near the Garments Industries of Bangladesh*. *Environmental and social sciences*, 5(1), 3-6.

Organización Mundial de la Salud. (2005). *Guía de Calidad del aire en exteriores (2005)*: 1–21.

Parker, A., 1983, *Contaminación del Aire por la Industria*; Editorial Reverté, S.A.: España, pp. 179-216.

PNUMA; CLAI, 2003, *Programa “Ciudadanía Ambiental”*; *Manual de Ecología Básica y de*

Educación Ambiental, Modulo 8: Meza México-Suiza, pp. 4,8.

Quiceno, 2014. *Estimación de Emisiones Atmosféricas de Fuentes Móviles en el Valle de Aburrá Usando el Modelo Leap.*

Rypdal, K., & Paciornik, N. (2006). *CAPÍTULO 1. Introducción a las directrices de 2006. 103 | P á g i n a En Directrices del IPPC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero (pp. 1-13). Recuperado a partir de https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/spanish/pdf/1_Volume1/V1_1_Ch1_Introduction.pdf*

Rodríguez, «*Variación de la estabilidad y altura de la capa de mezcla en la ciudad de Pinar del Río: su relación con condiciones sinópticas.*» 2014.

Secretaria Distrital de Ambiente, Dirección de Control Ambiental, Red de monitoreo de Calidad del aire de Bogotá D.C. *Informe anual consolidado sobre niveles de concentración de contaminantes,*» 2008.

Universidad de Buenos Aires, Departamento de Geografía. *La Observación meteorológica.*

Valdés, J., 2002, *Octavo informe sobre el Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible: Gestión de la Calidad del Aire*, 3.

Wark, K.; Warner, C., 2005, *Contaminación del Aire: Origen y Control*; Editorial Limusa S.A.: Distrito Federal, México, pp. 58-59.

Weng, Z., Mudd, G. M., Martin, T., & Boyle, C. A. (2012). *Pollutant loads from coal mining in Australia: Discerning trends from the National Pollutant Inventory (NPI).* Environmental Science and Policy, 19-20, 78-89. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2012.03.003>.