

Dispersión de contaminantes criterios emitidos por fuentes móviles en tres vías principales de una ciudad intermedia de Colombia



Revista EIA
ISSN 1794-1237
e-ISSN 2463-0950
Año XIX/ Volumen 20/ Edición N.40
Julio - diciembre de 2023
Reia4014 pp. 1-24

Publicación científica semestral
Universidad EIA, Envigado, Colombia

✉ **ALEX ANDRÉS MURILLO VILLAMIZAR**¹
JOSÉ LUIS RODRÍGUEZ CASTILLA¹
URIAH ARON BUSH FELIPE¹

1. Universidad Popular del Cesar - Colombia

PARA CITAR ESTE ARTÍCULO / TO REFERENCE THIS ARTICLE /

Murillo Villamizar, A. A.; Rodríguez
Castilla, J. L. Bush Felipe, U. A.
Dispersión de contaminantes criterio
emitidos por fuentes móviles en
tres vías principales de una ciudad
intermedia de Colombia
Revista EIA, 20(40), Reia4014.
pp. 1-24.
<https://doi.org/10.24050/reia.v20i40.1696>

✉ Autor de correspondencia:

Murillo Villamizar, A. A. (Alex Andrés).
Ingeniero ambiental y sanitaria
Universidad popular del Cesar
Correo electrónico:
aamurillo@unicesar.edu.co

Recibido: 26-04-2023
Aceptado: 15-05-2023
Disponible online: 01-06-2023

Resumen

El principal objetivo en esta investigación es determinar el comportamiento de la dispersión de contaminantes criterio en la ciudad de Valledupar; además, establecer las áreas de mayor impacto a causa de las emisiones por fuentes móviles de tres de sus principales vías. Para llevar a cabo esta investigación se realizó un análisis de la meteorología de la ciudad de Valledupar para los días de modelación, en la cual se tuvieron en cuenta las variables de dirección del viento, velocidad del viento, temperatura ambiente y humedad relativa, esta información meteorológica se obtuvo de las estaciones meteorológicas de IDEAM, también se simuló el modelo WRF para los días 14, 15 y 16 de octubre del año 2021 y el 13, 14 y 15 de enero 2022 con una resolución de 1 km. Los datos de emisiones de las fuentes móviles fueron producto del modelo IVE; finalmente se realizó la modelación de la dispersión de los contaminantes criterios con el modelo HYSPLIT, para lo cual se usaron como datos de entrada los datos meteorológicos diarios, producto de las simulaciones del modelo WRF; además se estableció la tasa de emisión para cada contaminante resultado del modelo IVE. Se observó que el comportamiento de la dispersión concentración de contaminantes son más frecuentes hacia el este de la ciudad en los días de estudio del mes de octubre y en los días de estudio del mes de enero las plumas de dispersión se dirigieron principalmente hacia la zona oeste de la ciudad, se presentó que el contaminante que obtuvo la máxima concentración en 10 horas de emisión para cada día fue el CO con una concentración de 980 ug/m³ en el mes de octubre, asimismo, en el mes de enero fue el CO con una concentración de 790 ug/m³.

Palabras claves: Contaminación atmosférica, Aire, Dispersión de contaminantes, HYSPLIT, Contaminantes criterios, Modelo IVE, WRF

Dispersion of criteria pollutants emitted by mobile sources on three main roads in an intermediate city of Colombia

Abstract

The main objective in this research is to determine the behavior of the dispersion of the criteria air pollutants in the city of Valledupar; In addition, establish the areas of greatest impact due to emissions from mobile sources from three of its main roads. To carry out this investigation, an analysis of the meteorology of the city of Valledupar was carried out for the days of the modeling, in which the variables of wind direction, wind speed, ambient temperature and relative humidity were taken into account, this Meteorological information was obtained from the Corpocesar and IDEAM meteorological stations, the WRF model was also simulated for October 14, 15 and 16, 2021 and January 13, 14 and 15, 2022 with a resolution of 3 kilometers. The emissions data from mobile sources are the product of the IVE model, finally, the modeling of the dispersion of the criteria pollutants was carried out with the HYSPLIT model, for which the daily meteorological data, product of the WRF model simulations, were used as input data; In addition, the emission rate for each pollutant resulting from the IVE model was established. It was observed that the behavior of the dispersion concentration of pollutants is more frequent towards the east of the city on the study days of October and on the study days of January the dispersion plumes were directed mainly towards the west area from the city, it was presented that the pollutant that obtained the maximum concentration in 10 hours of emission for each day was CO with a concentration of 980 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ in the month of October, likewise, in the month of January it was CO with a concentration of 790 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Key Words: Atmospheric pollution, Air, Pollutant dispersion, HYSPLIT, Criteria pollutants, IVE Model, WRF

1. Introducción

En Colombia, el monitoreo y control de la contaminación atmosférica ha tomado día a día mayor relevancia, debido a que, según estimaciones de 2019, la contaminación del aire ambiente (exterior) en las ciudades y zonas rurales de todo el mundo provoca cada año 4,2 millones de muertes prematuras (OMS, 2022).

Actualmente la contaminación del aire en las zonas urbanas del planeta es causada principalmente por las fuentes móviles. En ciudades importantes de Colombia como Santa Fe de Bogotá y la ciudad Medellín, el aporte de los vehículos a las emisiones de contaminantes es del 78% y del 81% respectivamente (SDA, 2014; Área Metropolitana del Valle De Aburrá, 2016). La exposición a altos niveles de contaminación del aire puede causar una variedad de

resultados adversos para la salud: aumenta el riesgo de infecciones respiratorias, enfermedades cardíacas, derrames cerebrales y cáncer de pulmón las cuales afectan en mayor proporción a población vulnerable, niños, adultos mayores y mujeres (PAHO, 2018).

En la ciudad de Valledupar el encargado de llevar el comportamiento de la calidad del aire es la Corporación Autónoma Regional del Cesar (CORPOCESAR), por lo que en el Informe de Operación del Sistema de Vigilancia de Calidad del Aire de CORPOCESAR, ubicado en la ciudad de Valledupar, Cesar del año 2020, se evidenció que los registros más elevados de PM10 y PM2.5 en la estación de monitoreo calidad del aire los Bomberos (V4), se visualizan en los meses de febrero, marzo, mayo y junio, indicando afectaciones por la temporada seca y por los vientos del Sahara en junio, ahora bien, al analizar los datos de la estación de monitoreo calidad del aire los Seminario (V1) los mayores registros se presentaron en febrero, mayo y agosto, para ambos parámetros (Martínez et al., 2020). En la ciudad de Valledupar se ha tenido mayor actividad en los diferentes sectores, como en el económico, planificación urbana y principalmente el de transporte, debido al incremento de la población de la ciudad esto ha conllevado a una mayor demanda del transporte; si a esto le sumamos un sistema de transporte público ineficiente el problema se hace mucho mayor. La flota vehicular registrada en la ciudad de Valledupar se incrementó en un 74% desde el año 2008 a la actualidad (RUNT, 2008, 2022).

En consecuencia, es preocupante las alteraciones de los contaminantes criterios ya que estos afectan al medio ambiente y a la salud de los seres vivos, primordialmente los niveles de material particulado ya que el tamaño de las partículas se encuentra directamente vinculado con el potencial para provocar problemas de salud. Las partículas pequeñas de menos de 10 micrómetros de diámetro (PM10) suponen los mayores problemas, debido a que pueden llegar a la profundidad de los pulmones, y algunas hasta pueden alcanzar el torrente sanguíneo. La exposición a estas partículas puede afectar tanto a los pulmones como al corazón, la contaminación por partículas tiende a afectar en su mayoría a personas con enfermedades cardíacas o pulmonares, niños y adultos mayores, además, existe efectos sobre el medio ambiente ya que el viento puede transportar las partículas a través de largas distancias y luego, estas pueden instalarse en el suelo o el agua. Según la composición química, los efectos de esta sedimentación pueden provocar que los lagos y arroyos se vuelvan ácidos, cambio en el balance nutricional de las aguas costeras y de las grandes cuencas fluviales, reducción de los nutrientes del suelo, daño en los bosques sensibles y cultivos agrícolas, efectos perjudiciales sobre la

diversidad de ecosistemas y contribución a los efectos de la lluvia ácida (EPA , 2022).

La investigación tiene como finalidad analizar el comportamiento de los contaminantes criterios en la atmosfera emitidos por fuentes móviles en las principales vías de la ciudad de Valledupar; por consiguiente, para determinar la dispersión de contaminantes criterios, primeramente se estimó las emisiones de fuentes móviles con el modelo IVE (The International Vehicle Emissions model) (ISSRC, 2008) y las condiciones meteorológicas de la ciudad de Valledupar mediante el modelo WRF (Weather Research and Forecasting) (NCAR, 2021), posteriormente se lleva a cabo el software Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory (HYSPLIT) (ARL, 2023), el cual permite estimar el transporte de las masas del aire y el comportamiento de las concentraciones de los contaminantes en la atmósfera en la ciudad de Valledupar.

2. Materiales y métodos

2.1. Modelo IVE

El modelo IVE fue diseñado para estimar las emisiones de los vehículos automotores. El modelo predice los contaminantes atmosféricos locales, las emisiones de gases de efecto invernadero y los contaminantes tóxicos (ISSRC, 2008).

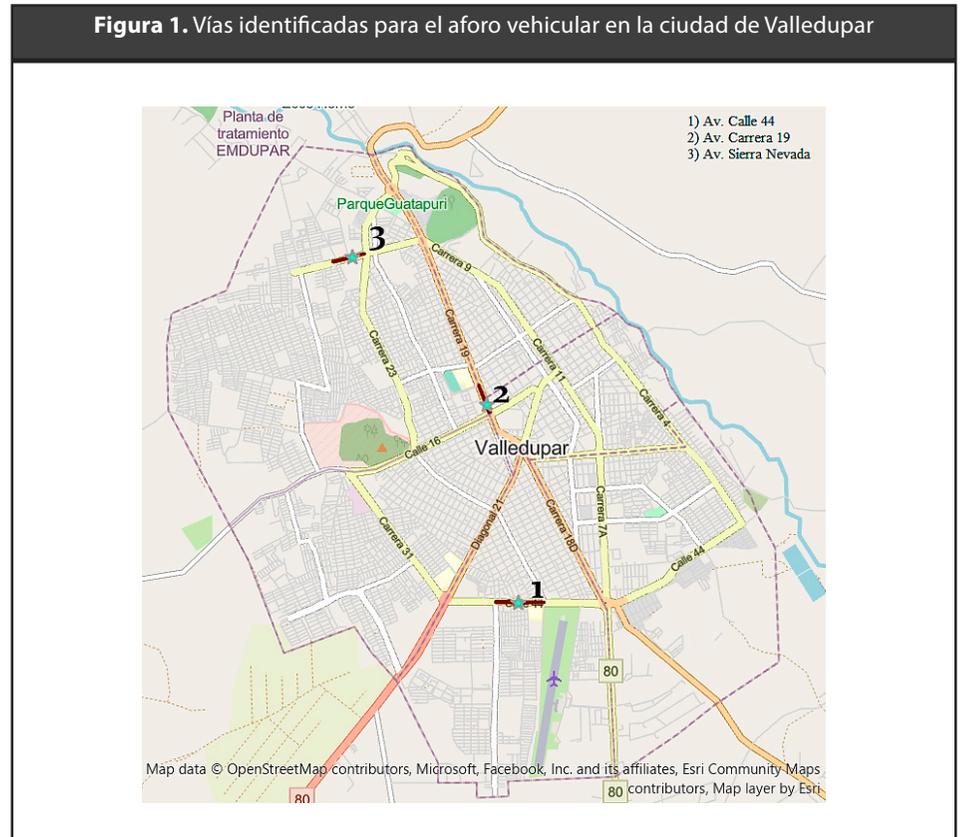
Identificación y aforo de vías con mayor afluencia vehicular.

En el estudio se realizó diferentes visitas de campo, donde se llevó a cabo una inspección visual para determinar las vías de mayor afluencia de vehículos. Por lo tanto, la conclusión a la cual se llegó fue a elegir las siguientes vías (ver Figura 1):

- Avenida Calle 44.
- Avenida Carrera 19.
- Avenida Sierra Nevada.

En estas vías se realizó un aforo durante los días del 14 al 16 de octubre de 2021, mediante grabaciones de video se obtuvo el total de vehículos transitados por las vías de estudio. Para los días 14, 15 y 16 de octubre 2021 se analizaron todas las horas de las grabaciones de video desde las 8:00 hasta las 18:00 UTC-5.

A partir del análisis del aforo vehicular se estimó las emisiones de contaminantes criterios emitidos por los vehículos transitados por las diferentes vías de estudio, utilizando el modelo IVE.



3. Meteorología

Los datos meteorológicos de superficie son los registros de las estaciones meteorológicas instaladas en la ciudad de Valledupar, las variables meteorológicas que se tuvieron en cuenta son la dirección y velocidad del viento, humedad relativa y temperatura ambiente. Con respecto a las bases meteorológicas que se utilizaron en el modelo HYSPLIT, los datos meteorológicos del área de estudio se obtuvieron mediante simulaciones del modelo meteorológico WRF (Skamarock et al., 2021). Se realizó la simulación meteorológica tomando un dominio mayor de resolución de 9 Km que abarcó toda la costa caribe colombiana, un dominio menor de 3 Km que abarcó parte de los departamentos de La Guajira, Cesar y Magdalena y un último dominio de resolución de 1 Km que abarcó el municipio de Valledupar. En las simulaciones se analizó el comportamiento diurno y nocturno de las variables temperatura, humedad relativa, dirección y velocidad del

viento y se validaron los datos obtenidos por el modelo WRF con los datos una estación de superficie meteorológica ubicada en la ciudad.

4. Modelo HYSPLIT

4.1. Cálculo de concentraciones

El modelo HYSPLIT su método de cálculo es un híbrido entre el enfoque lagrangiano que utiliza un marco de referencia móvil para la advección cálculos y el enfoque euleriano que utiliza una cuadrícula tridimensional fija como marco de referencia para los cálculos de difusión para calcular las concentraciones de contaminantes en el aire (Stein et al., 2015).

La dispersión de un contaminante se calcula asumiendo la dispersión de partícula o de tipo puff; entonces, en el modelo de bocanadas o tipo puff, las bocanadas se expanden hasta que superan el tamaño de la celda de la cuadrícula meteorológica (ya sea horizontal o verticalmente) y luego se dividen en varias bocanadas nuevas, cada una con su parte de la masa contaminante; ahora bien, en el modelo de partículas, un número fijo de partículas son advectadas sobre el dominio del modelo por el campo de viento medio y dispersadas por una componente turbulenta. La configuración predeterminada del modelo asume una distribución de partículas tridimensional (horizontal y vertical) (ARL, 2022).

Las ecuaciones que utiliza el modelo para calcular la dispersión de partículas y de bocanadas se expresan en términos de velocidad turbulenta y sus componentes, estos componentes de velocidad son una función de las difusividades turbulentas son calculadas previo al cálculo de dispersión de partículas y soplos; por lo tanto, para la implementación del modelo de partículas, el proceso de dispersión se representa agregando un componente turbulento a la velocidad media obtenida de los datos meteorológicos y el modelo de partículas se puede aplicar en dirección vertical, horizontal o en ambas direcciones (Draxler, 1999).

4.2. Datos de entrada del cálculo de concentración HYSPLIT

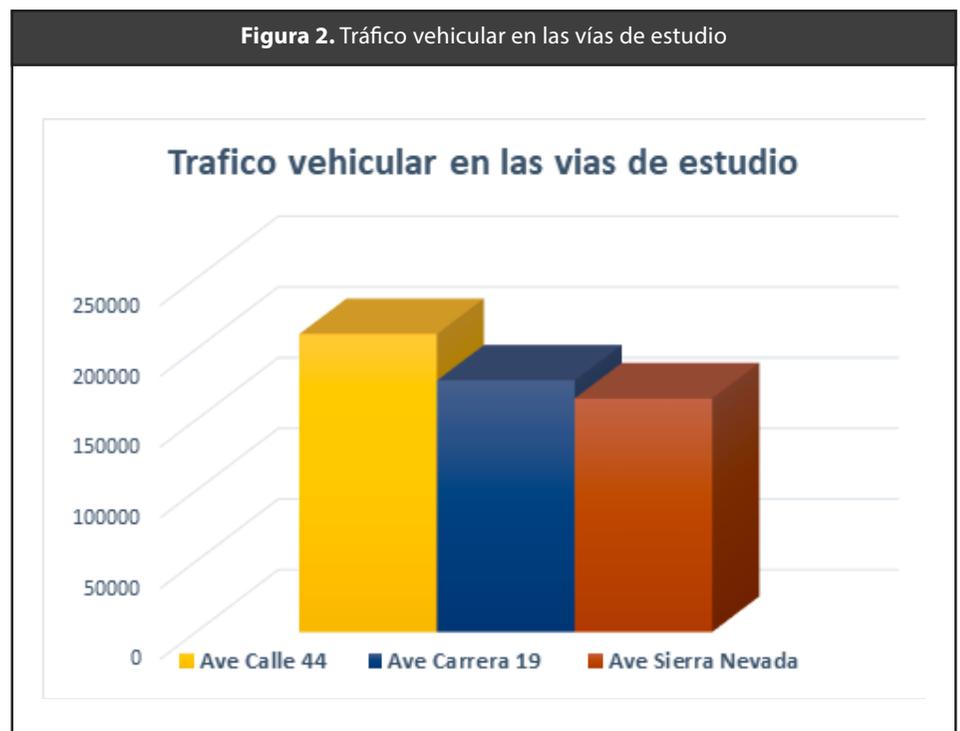
En primer lugar para la ejecución del modelado de dispersión se estableció los parámetros generales como lo son las coordenadas de las 3 vías de estudio y fecha de inicio, en donde se encuentra los días que se realizó el aforo vehicular (14, 15 y 16 de octubre 2021) y se tomó fechas para representar un escenario en condiciones secas (13, 14 y 15 de enero 2022), las horas de

simulación están comprendida desde las 8:00 hasta las 18:00 y la base meteorológica procesada al formato de HYSPLIT empaquetado de ARL correspondiente para cada día de estudio (Draxler et al., 2022), luego de ello se realizó la configuración de contaminantes, en el cual se anexa las tasas de emisión y hora de emisión para cada contaminante, asimismo se configuro la grilla donde se encuentra las características de la cuadrícula de concentración que se acumula la masa en cada partícula.

5. Resultados y análisis

5.1 Aforo vehicular en las 3 vías de estudio de la ciudad de Valledupar

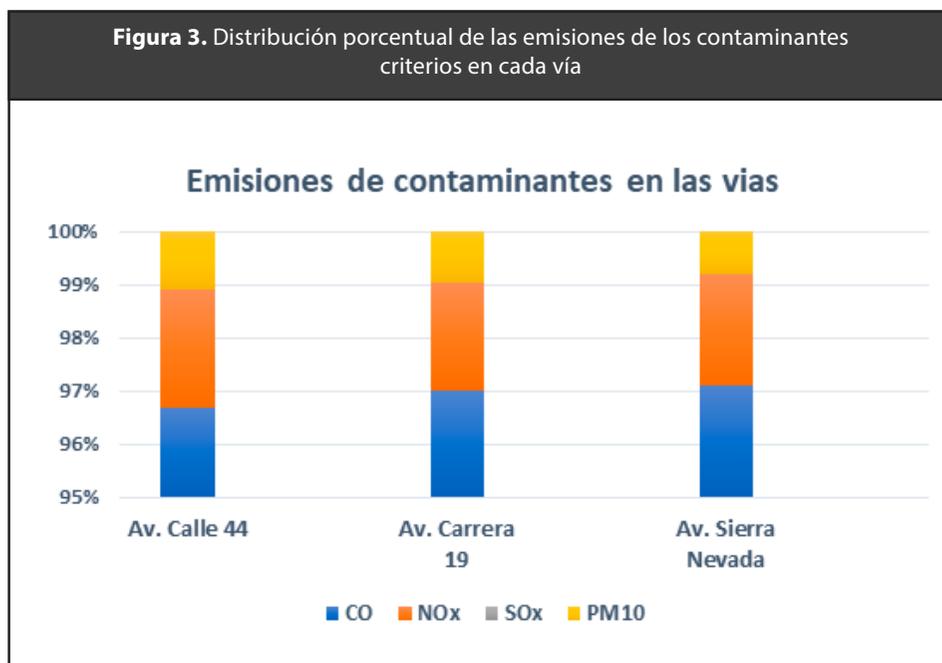
En el análisis del aforo vehicular se logró determinar la cantidad de vehículos que transcurre en las diferentes vías; por lo tanto; se evidencia que el mayor tránsito vehicular fue en la vía Av. Calle 44 (210.645), en segundo lugar, se encuentra la Av. Carrera 19 (177.881) y por último se encuentra la Av. Sierra Nevada (165.112) (Ver figura 2).

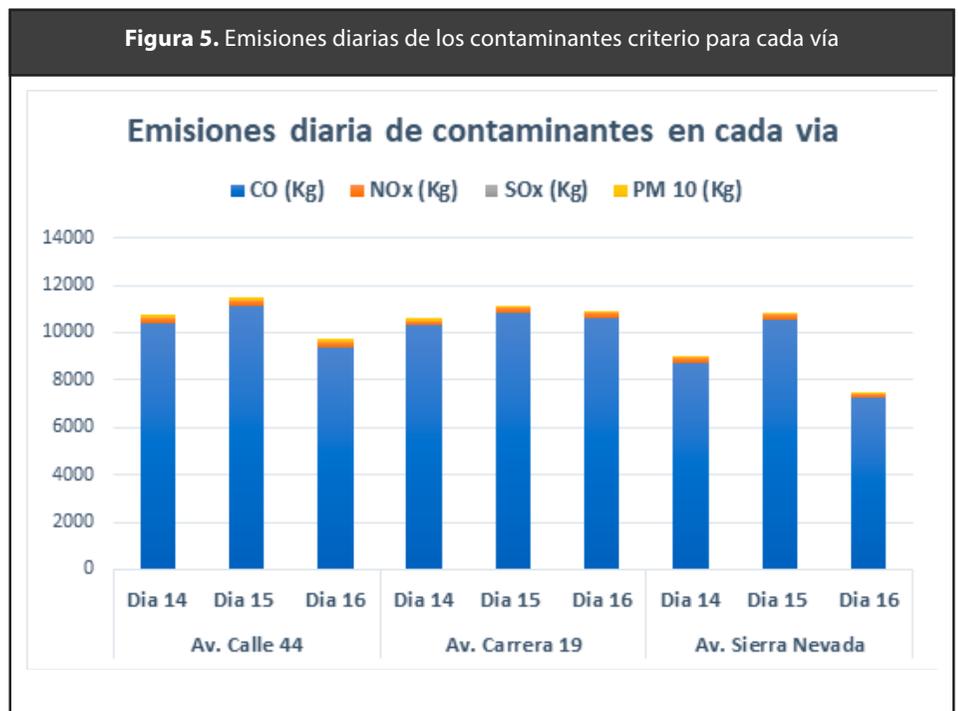
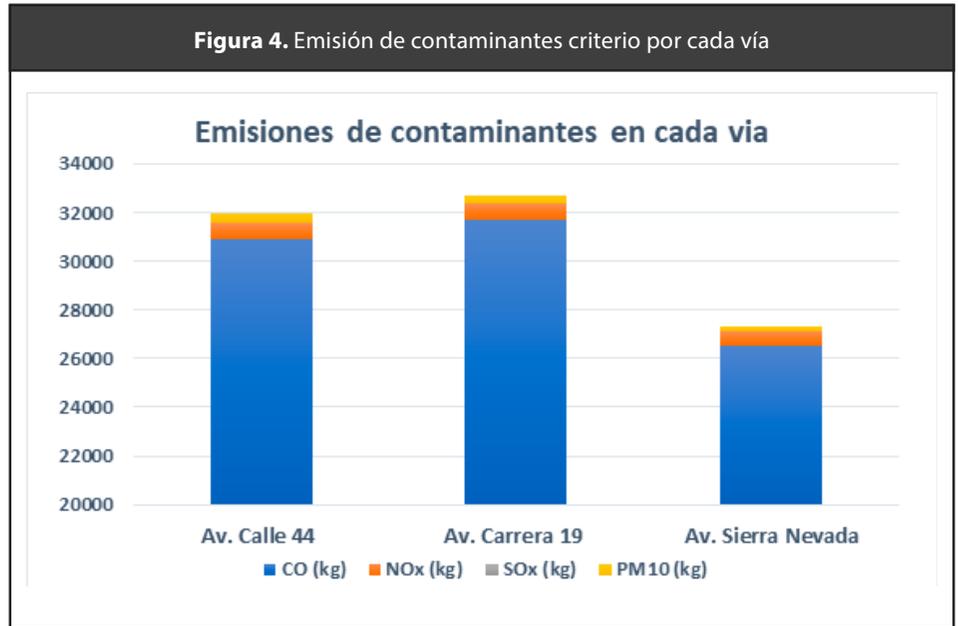


5.2. Emisiones de fuentes móviles en las 3 vías de estudio de la ciudad de Valledupar.

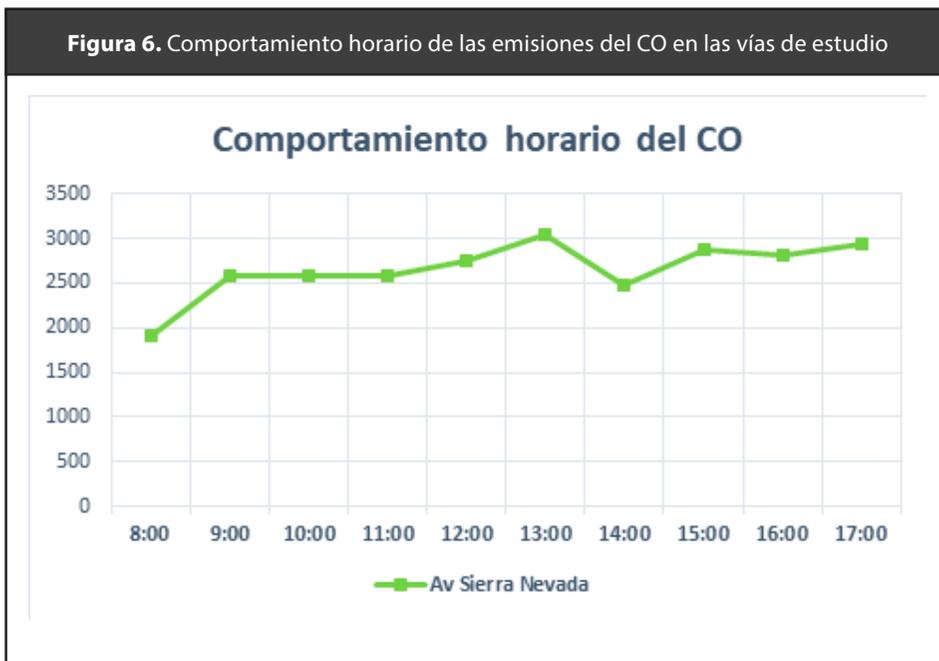
En los resultados obtenidos con el modelo IVE para los contaminantes criterios Monóxido de carbono (CO), Óxidos de nitrógeno (NOx), PM10 y Óxidos de azufre (SOx), se observa que el CO es el que mayor se produce en la ciudad en las diferentes vías de estudio con un valor aproximado de 89.090 Kg con un promedio de 96,9% y el NOx es el siguiente que tiene mayor producción con un valor alrededor de 1.935 Kg con un promedio de 2,1% (ver figura 3).

Se evidencia que vía obtuvo la mayor producción de cada contaminante criterio a excepción del CO durante los tres días de estudio fue la Av. Calle 44, ya que, la Av. Carrera 19 fue la que obtuvo la mayor producción de CO durante los días de estudio (ver figura 4); por otra parte, en la figura 5 se observa que día obtuvo mayor emisión de los diferentes contaminantes criterios en el cual el día que de mayor emisión fue el día 15 de octubre.





Se analizó el comportamiento de las emisiones horarias (ver figura 6), se evidencia que en las horas pico se presenta la mayor emisión de los contaminantes criterios. con valores aproximados de 2300 hasta 4000 kg para el CO.



6. Meteorología

Las variables meteorológicas se obtuvieron principalmente de la estación meteorológica de superficie del aeropuerto como se observa en las siguientes gráficas, se realizó el análisis de las variables meteorológicas en las diferentes condiciones, en la cual, se simuló la dispersión de los contaminantes criterios.

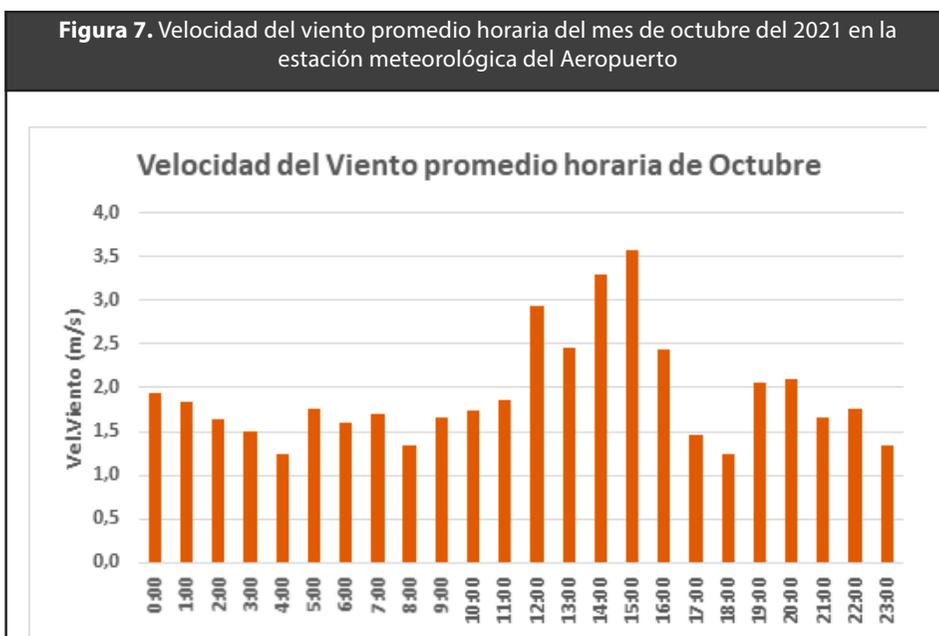


Figura 8. Velocidad del viento promedio horaria del mes de enero del 2022 en la estación meteorológica del Aeropuerto

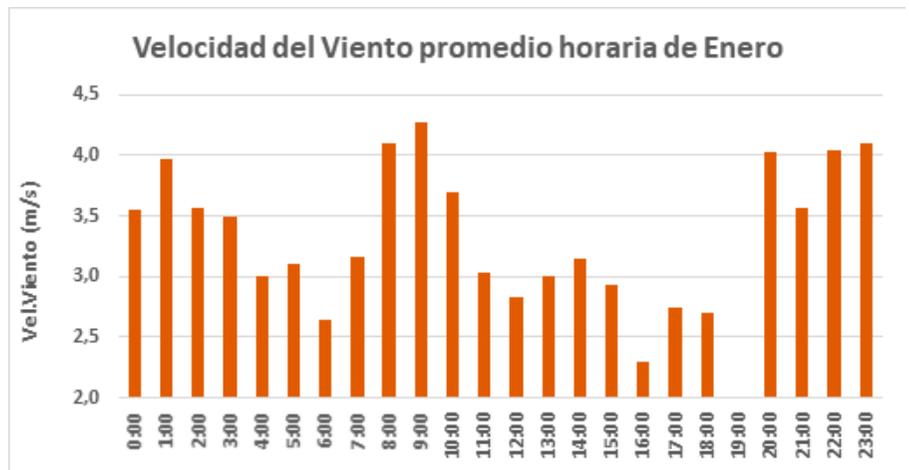


Figura 9. Dirección del viento promedio horaria del mes de octubre del 2021 en la estación meteorológica del Aeropuerto

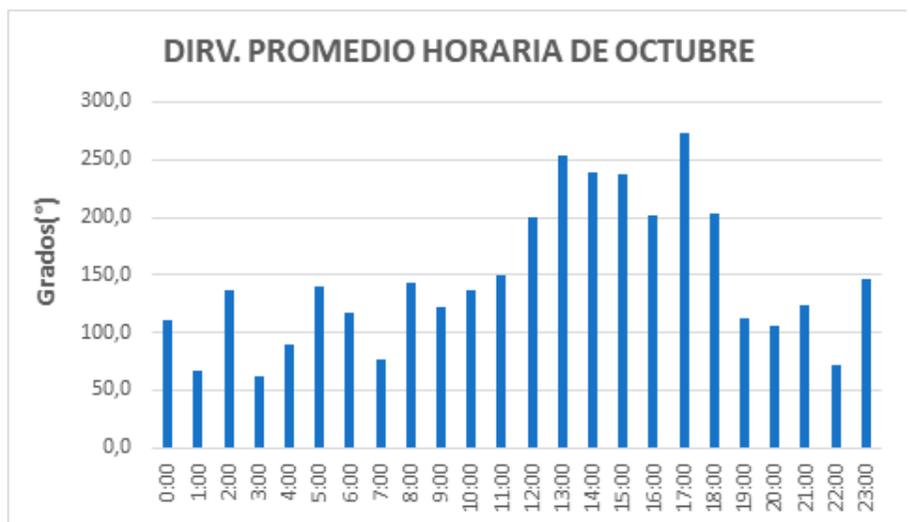
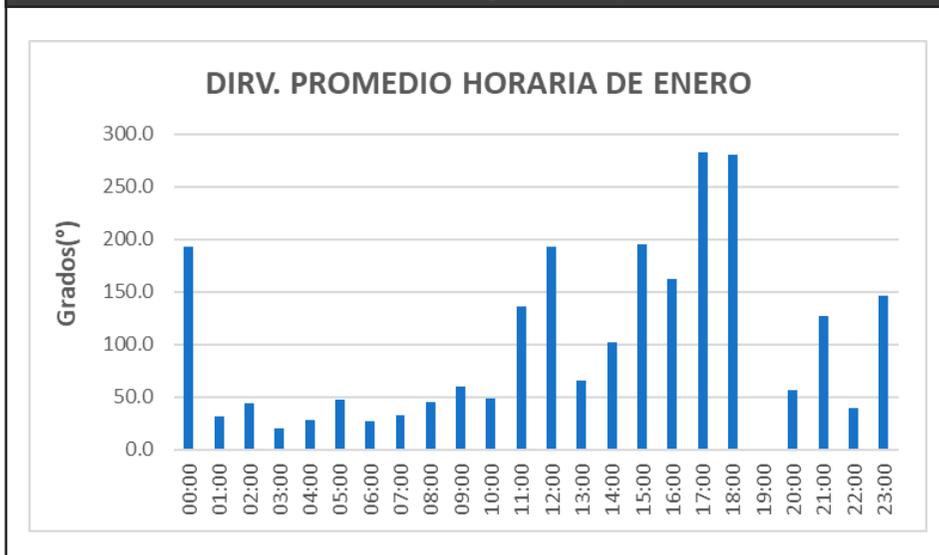


Figura 10. Dirección del viento promedio horaria del mes de enero del 2022 en la estación meteorológica del Aeropuerto



En las figuras anterior se observa el comportamiento de la velocidad y dirección del viento durante los días simulados, se evidencia en la velocidad en el mes de octubre su velocidad no sobrepasa los 4 m/seg y se mantienen durante todo el día con una velocidad de 2 m/seg y la dirección en las horas de la mañana y noche predomina la dirección hacia el Este y Sureste y en la tarde esta se dirige principalmente hacia el Suroeste y Oeste de la ciudad; en cambio, para el mes de enero su comportamiento en la dirección hacia el Este y Sureste y la velocidad del viento sobrepasa los 4 m/seg y se mantiene en un intervalo entre los 2 y 3,5 m/seg.

Figura 11. Temperatura promedio horaria del mes de octubre 2021 en la estación meteorológica del Aeropuerto y el modelo WRF

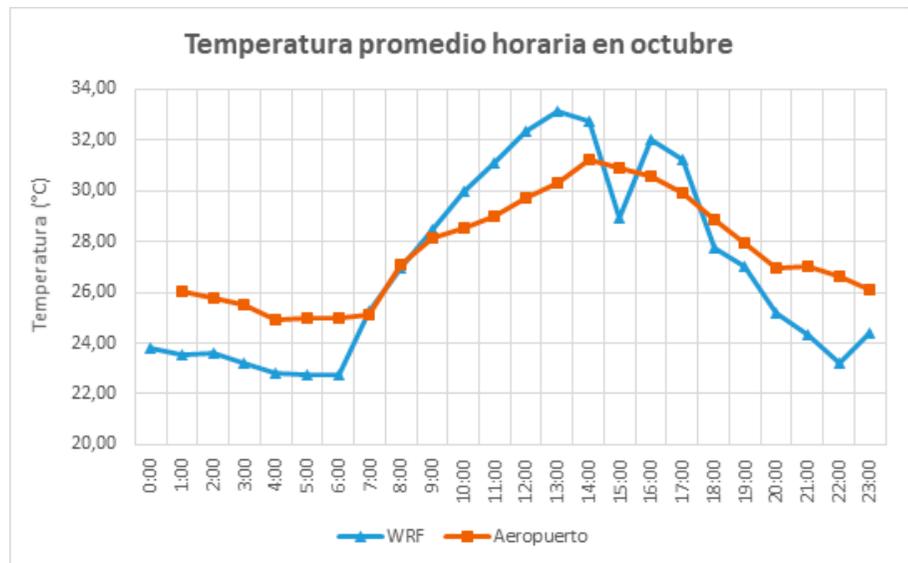


Figura 12. Humedad Relativa promedio horaria del mes de octubre 2021 en la estación meteorológica del Aeropuerto y el modelo WRF

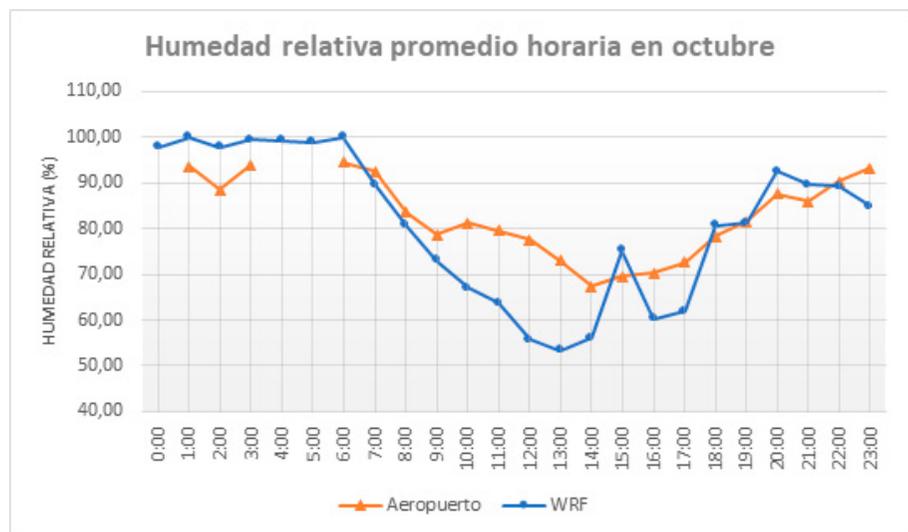


Figura 13. Mapas de temperatura, líneas de corriente del viento a las 8 AM y 6 PM de 2021(simulación con WRF).

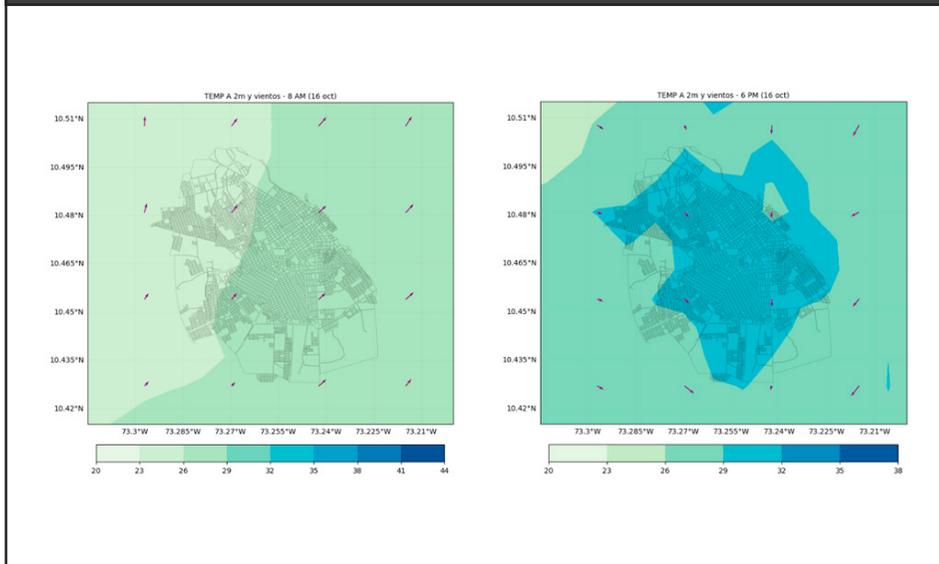


Figura 14. Capa límite planetaria a las 8 AM y 6 PM del 15 de octubre de 2021 (simulación con WRF).

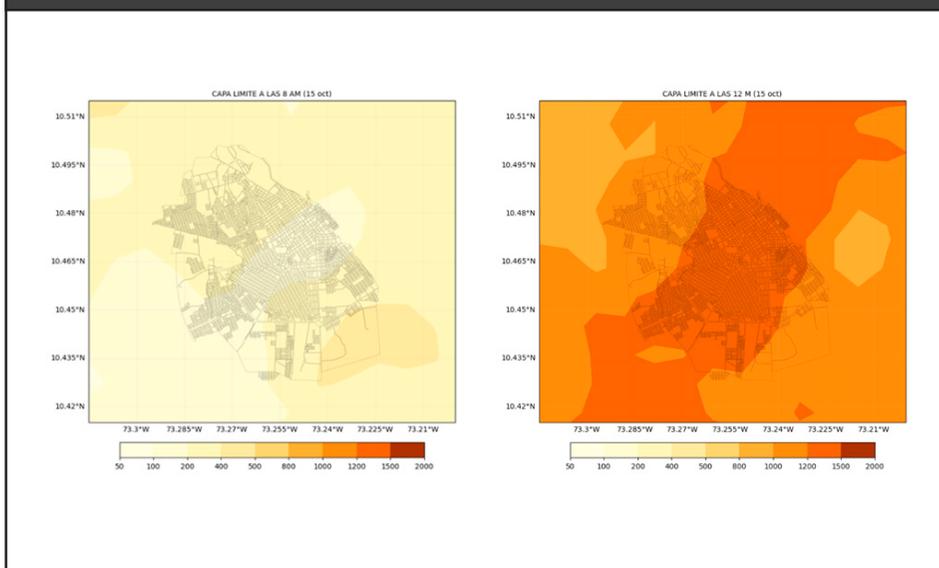


Figura 15. Relación de altura capa límite y concentración para el día 14 de octubre en la estación de monitoreo "los bomberos".

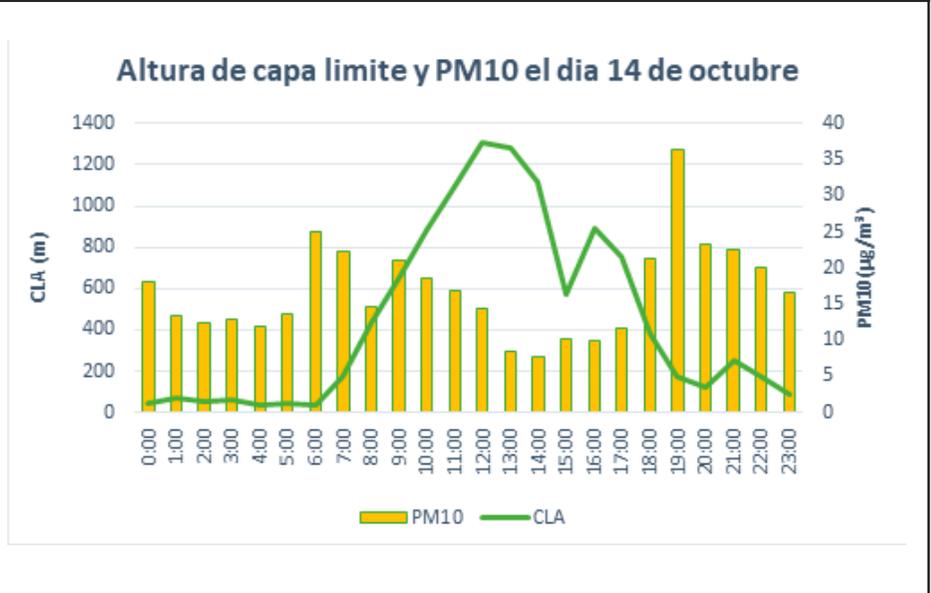


Figura 16. Relación de altura capa límite y concentración para el día 15 de octubre en la estación de monitoreo los bomberos

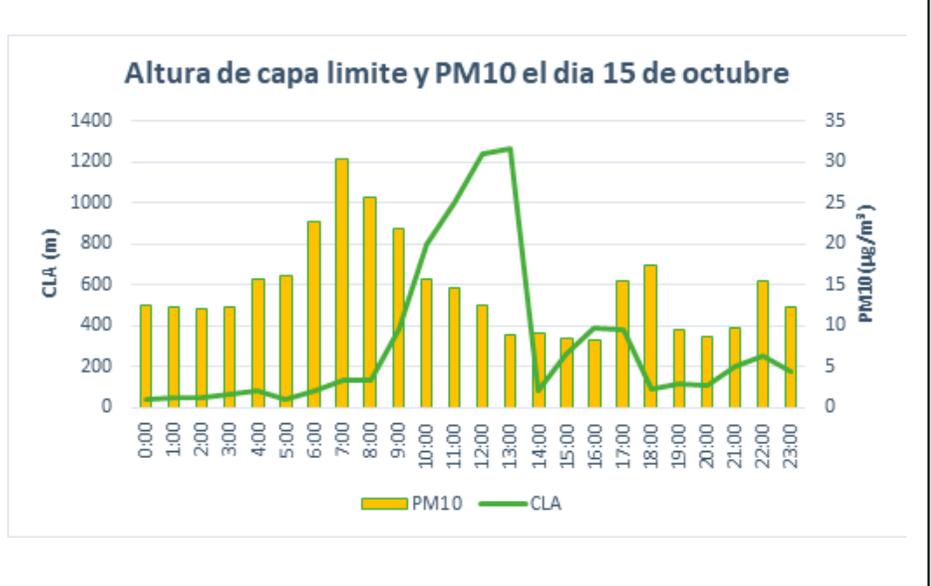


Figura 17. Relación de altura capa límite y concentración para el día 16 de octubre en la estación de monitoreo los bomberos

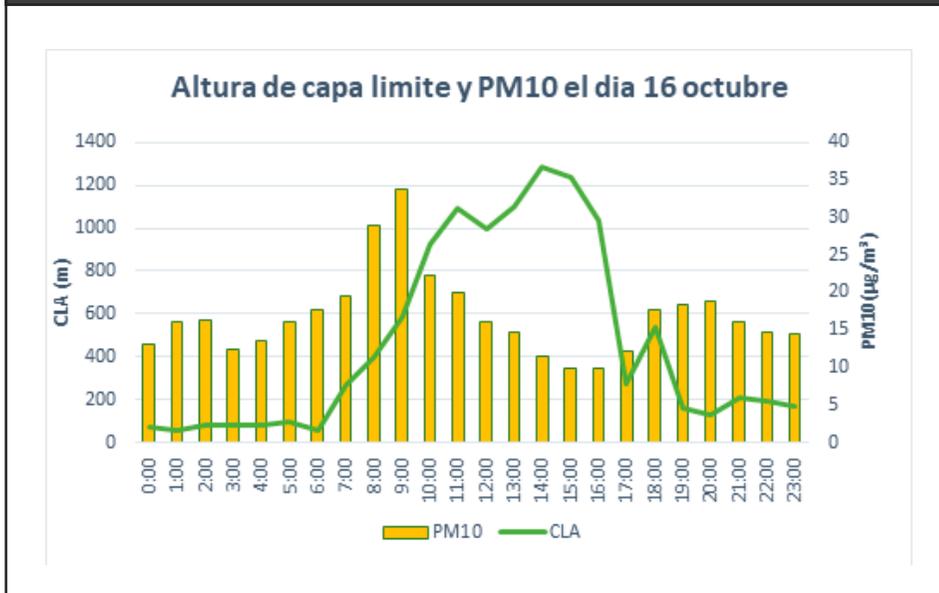
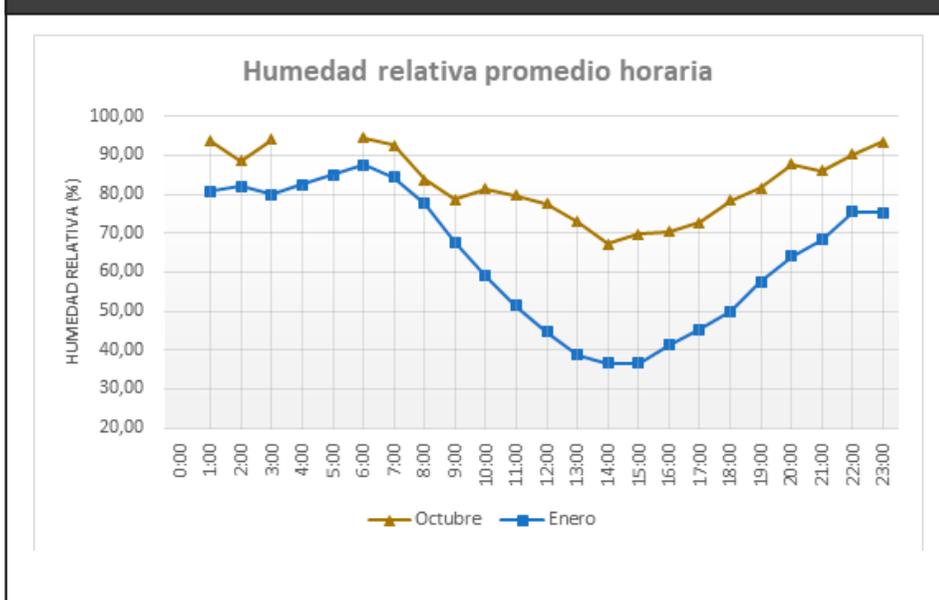
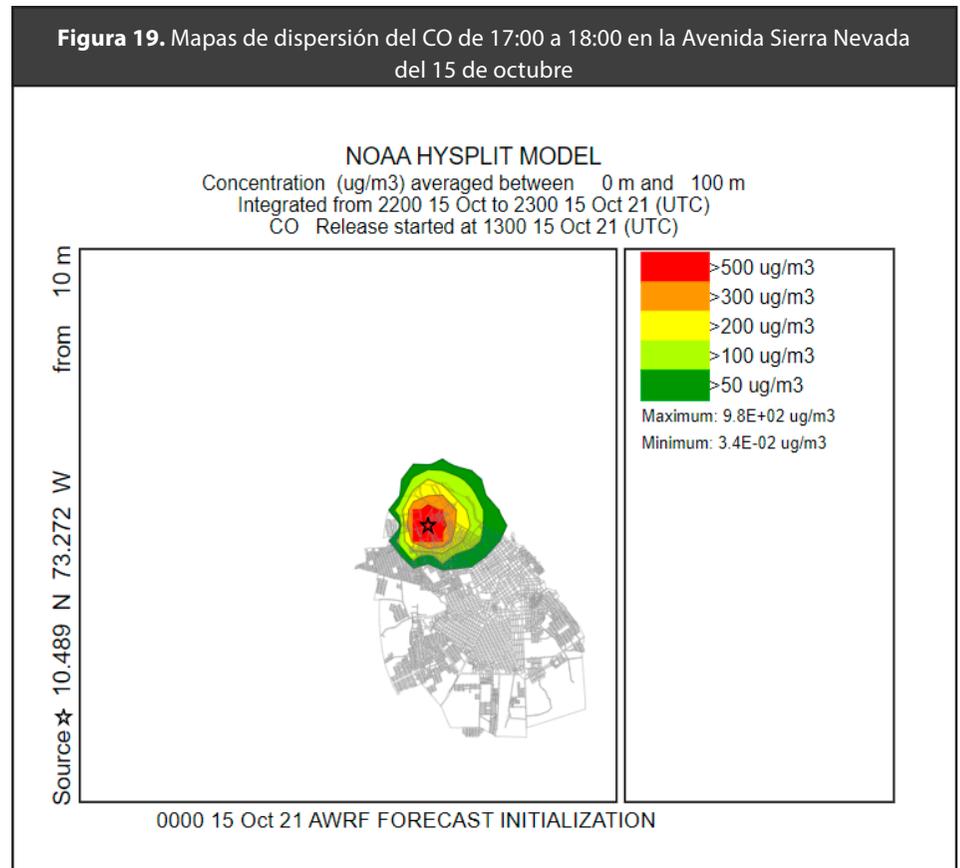


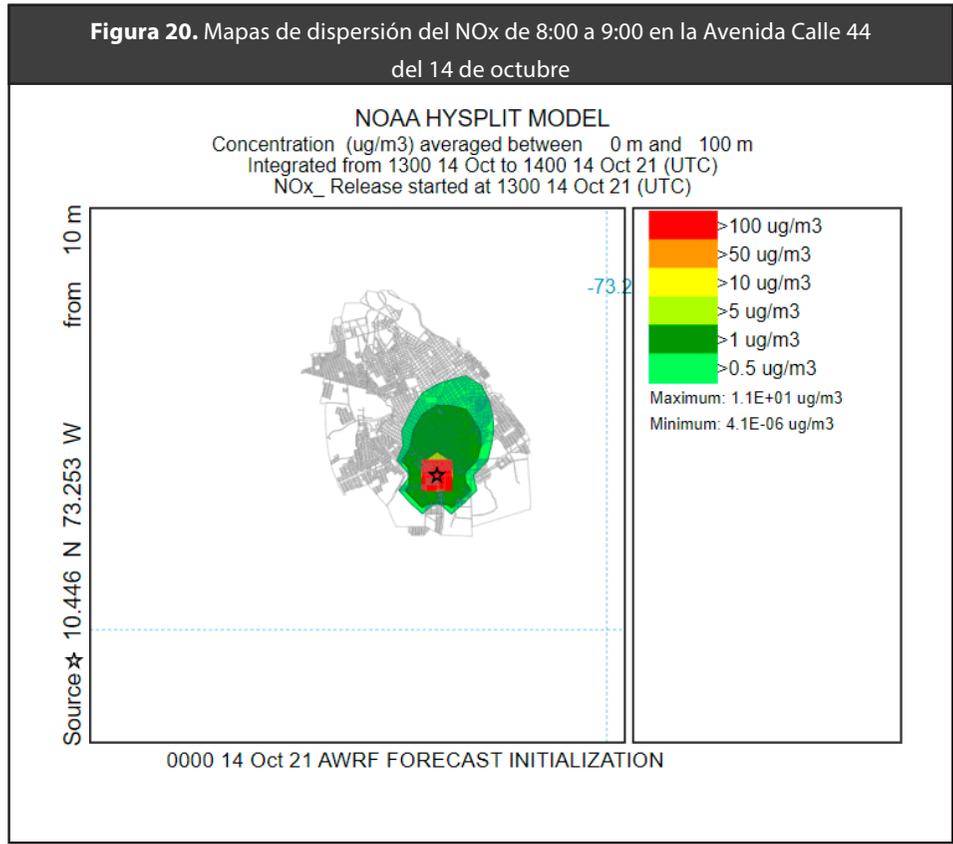
Figura 18. Humedad relativa promedio horaria del mes octubre 2021 y de enero del 2022 en la estación meteorológica del Aeropuerto



Simulación de la dispersión.

El modelo HYSPLIT estimó la dispersión de los contaminantes criterios (CO, PM10, NOx, SOx) emitidos en las calles de estudio. El modelo fue simulado para los días 14, 15 y 16 del mes de octubre; Se obtuvieron un total de 240 mapas de dispersión. Para los mapas de dispersión se establecieron tres puntos de emisión en las vías de estudio (Ave Sierra Nevada, Ave Carrera 19 y Ave Calle 44). Los días 14, 15 y 16 se observó en las siguientes figuras que las plumas de dispersión se dirigían principalmente hacia el oriente de la ciudad.

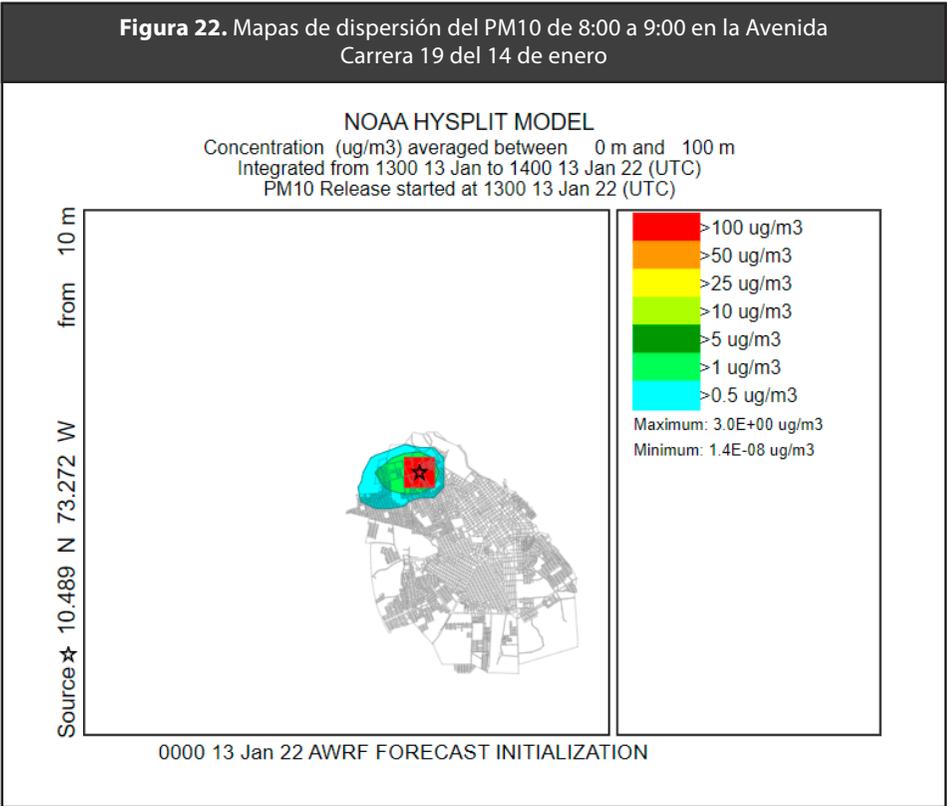
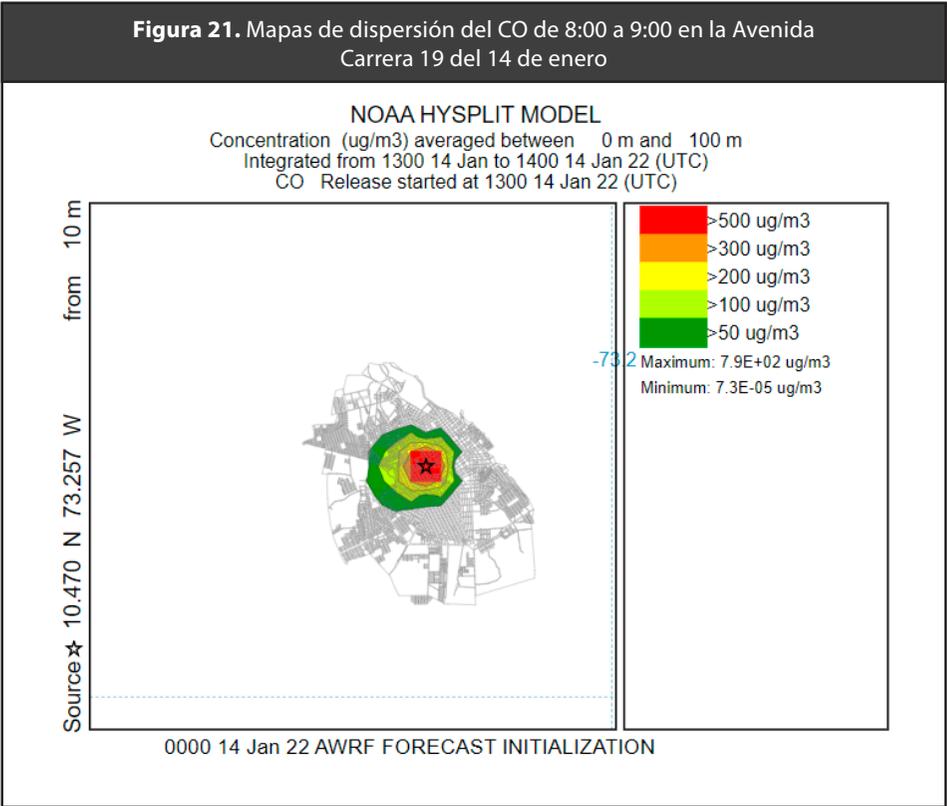




En la figura se observa además de su dirección, las concentraciones del CO que se está presentando en la zona noreste de la ciudad de Valledupar resultando así concentraciones mayor de los 50 ug/m³.

El contaminante que obtuvo la mayor concentración fue el CO, en el cual el pico de concentración durante las 10 horas de emisión fue de 980 ug/m³ en el día 15 en la vía Sierra nevada, a este le sigue el NOx con una concentración de 19 ug/m³ en el día 14 en la vía calle 44 y en el día 15 de la vía sierra nevada, también se presentó el mismo valor; dado lo anterior, la vía que alcanzo mayormente las máximas concentraciones fue la vía calle 44 donde abarco los picos del NOx, SOx y PM10.

Por otra parte, se simulo los días 13, 14, 15 de enero de 2022 se tomaron estos tres días para observar el comportamiento en condiciones secas, las plumas de dispersión en este caso su dirección fue hacia al oeste de la ciudad como se evidencia en la figura 9.



El contaminante que obtuvo la mayor concentración fue el CO, en el cual el pico de concentración durante las 10 horas de emisión fue de 790 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en el día 14 en la vía Carrera 19, a este le sigue el NO_x con una concentración de 17 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en el día 14 en la vía calle 44 y en la vía sierra nevada también se presentó el mismo valor; dado lo anterior, la vía que acaparo mayormente las máximas concentraciones fue la vía carrera 19 donde abarco los picos del CO, NO_x y SO_x.

Para simplificar el análisis de concentraciones de los contaminantes en las vías de estudio durante 10 horas de simulación para los días de estudio en condiciones secas y húmedas, se puede deducir que:

- En el mes de octubre las plumas de dispersión se dirigen principalmente hacia la zona este de la ciudad; por otra parte, en el mes de enero la dirección de estas es sobre la zona oeste de la ciudad. El cambio de dirección de las plumas de dispersión se debe a la predominancia de los vientos alisios del noreste durante todo el año en la ciudad de Valledupar, además tiene una influencia vientos alisios del sureste otro factor que interviene en las direcciones del viento es la ubicación geográfica y ya que la ciudad de Valledupar se encuentra en un valle y contiene diferentes se presenta brisas de valle-montaña.
- La concentración de los contaminantes durante las horas de simulación, se presenta que generalmente las máximas concentraciones de los contaminantes son en las horas de la tarde-noche principalmente y un segundo pico en las horas del mañana en el mes de octubre; en cambio, en el mes de enero ocurre que en las horas de la mañana se presenta principalmente las máximas concentraciones y en las noches su segundo pico.
- El contaminante que obtuvo las mayores concentraciones durante la modelación fue el CO en el mes de octubre y enero, debido a que el CO es el contaminante con mayor tasa de emisión
- La vía que acaparo las máximas concentraciones de los diferentes contaminantes a excepción del CO, durante la modelación fue la avenida calle 44 en el mes de octubre y en enero fue la avenida carrera 19 a excepción del PM₁₀.

Se compararon las concentraciones que se obtuvieron del modelo con las de la estación de calidad del aire los bomberos con el fin de evaluar el modelo; por lo tanto, se escogió la vía carrera 19, ya que esta encuentra cerca a la estación de los bomberos por lo que

se va obtener concentraciones que se dispersa de la fuente hacía la estación, pero esta solo registra valores de PM10 por lo que solo se evaluó este contaminante, en la figuras 11 y 12 se evidencia las concentraciones por el modelo y los registros de las concentraciones de PM10 de la estación, durante las horas de 8:00 hasta las 18:00 en los días de estudio.

Figura 23. Comportamiento horario del PM10 en la estación de calidad del aire los bomberos en los días 14, 15 y 16 de octubre

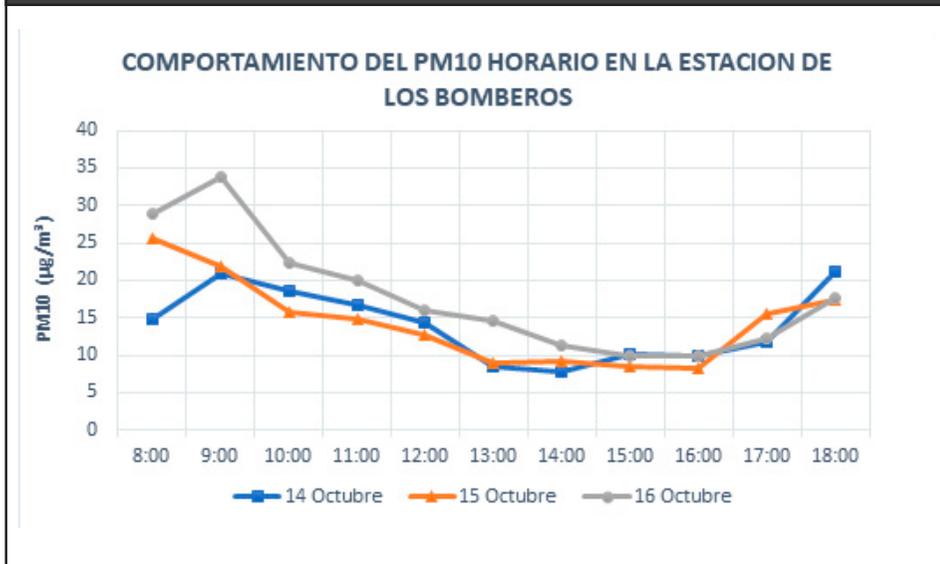
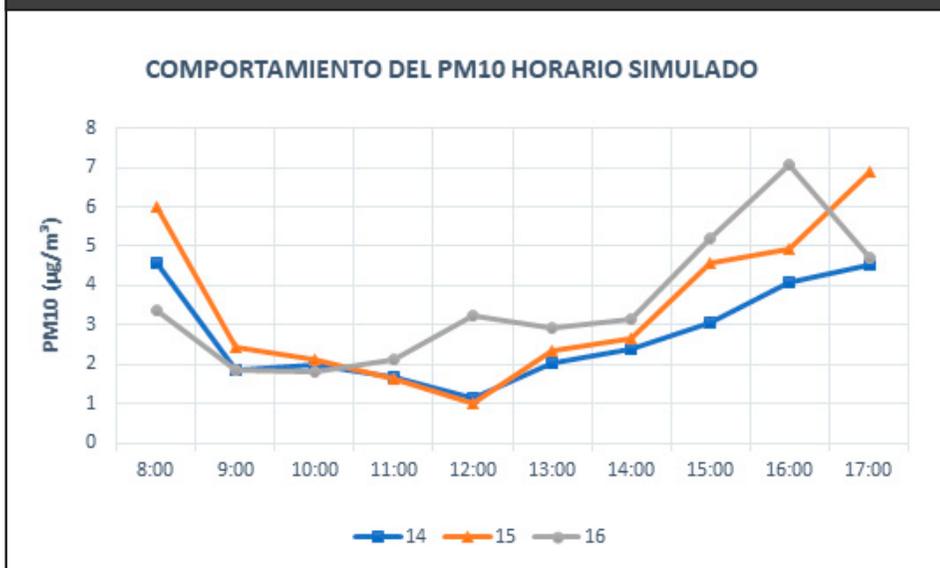


Figura 24. Comportamiento horario del PM10 simulado en HYSPLIT en la estación de calidad del aire los bomberos en los días 14, 15 y 16 de octubre



En las figuras se observa que su comportamiento horario es similar en los diferentes días de estudio, en las horas de la mañana se presenta un pico en las concentraciones y en las horas nocturnas de igual forma; sin embargo, en los valores de las concentraciones simulados por el HYSPLIT son menores a lo que está registrando la estación de los bomberos y esto se debe a diferentes factores, uno de ellos es que el modelo solo está simulando la tasa de emisión de fuentes móviles en una sola vía y la estación registra concentración de diferentes fuentes bien sea móvil de otras vías y fuentes fijas que se encuentren en el área, además, la estación registra concentraciones que arriban de diferentes sectores de la ciudad y regiones del país o incluso de otros países.

7. Conclusión

La investigación tuvo como finalidad brindar aportes a la ciudad de Valledupar, en cuanto al estudio de las emisiones de contaminantes criterio generados por las fuentes móviles y la dispersión de estos contaminantes que transitan por la ciudad, el cual servirá como línea base para futuros estudios. En la estimación de las emisiones, encontramos que, el CO fue la mayor emisión con 89.090 Kg y seguido por el NOx con 1.935 Kg. Las emisiones de fuentes móviles varían según la hora del día, siendo las horas pico las donde se produce el mayor impacto.

Las plumas de dispersión de las concentraciones del mes de octubre sus máximas concentraciones se dan en las horas de la tarde mayormente de todos los contaminantes criterios y en el mes de enero se presenta en horas de la mañana, por lo cual se evidencia que según las condiciones meteorológicas que se encuentren las concentraciones varían. En las concentraciones en los días de estudio de octubre se encuentra que el CO es el contaminante que presenta las mayores concentraciones con picos de hasta 910 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y en el mes de enero al igual que en octubre fue el CO el contaminante que presentó las máximas concentraciones obteniendo picos de hasta 790 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Las plumas de dispersión en los días 14, 15 y 16 de octubre su trayecto fue principalmente al este de la ciudad y en los días 13, 14 y 15 de enero predominó la dirección hacia el oeste de la ciudad; por lo tanto, estas plumas de dispersión abarcaron las zonas de la ciudad en la que se encuentran conjuntos residenciales, parques recreativos, hospitales, restaurantes, locales comerciales e instituciones educativas, puesto que hay hospitales cerca de vías con alto tráfico vehicular, como lo es la vía carrera 19, serán afectados posiblemente personas con enfermedades pulmonares o cardíacas, asimismo, se

encuentran parques recreativos alrededor de las 3 vías de estudio, en estos parques se dirigen constantemente a este lugar generalmente grupos poblacionales sensibles (Ancianos, niños, mujeres embarazadas y personas con afectaciones pulmonares o cardiacas) por lo que es posible que sean afectados por las concentraciones que reciben diariamente a cada hora.

El desarrollo de la dispersión de los contaminantes como herramienta para la planificación territorial enmarca un nuevo punto de vista que puede ser de gran utilidad para el establecimiento de Planes de Ordenamiento Territorial y la toma de decisiones, a partir del comportamiento de la dispersión de los contaminantes en diferentes ciudades y regiones donde su meta sea garantizar el cuidado de los ecosistemas y la salud humana que pueden llegar a verse afectados, además, implementar modelos atmosféricos para estimar la dispersión de la concentración de los contaminantes es de gran ayuda para fortalecer los Sistemas de Vigilancia de la Calidad del Aire (SVCA), ya que se logra interpretar las áreas que son principalmente afectados por diferentes fuentes de contaminación.

8. Agradecimientos.

Los autores agradecen a la Universidad Popular de César por financiar el proyecto de investigación, acuerdo No. 062 - 2019. ESTUDIO DE LA EMISIÓN Y DISPERSIÓN DE PM10 MATERIAL PARTICULADO GENERADO POR TRÁFICO VEHICULAR EN LA PRINCIPAL VÍAS DE LA CIUDAD DE VALLEDUPAR, IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO HYSPLIT.

10. Referencias

- Air Resources Laboratory's (ARL). (2022). HYSPLIT. <https://www.arl.noaa.gov/hysplit/>
- Air Resources Laboratory's (ARL). (2023). Air Resources Laboratory's. HYSPLIT. <https://www.ready.noaa.gov/HYSPLIT.php>
- Área Metropolitana del Valle De Aburrá. (2016). Actualización Inventario de Emisiones Atmosféricas del Valle De Aburrá - 2015.
- Draxler, R. R. (1999). NOAA Tech. Memo. ERL ARL-230. HYSPLIT4 user's guide. Silver Spring: NOAA Air Resources Laboratory.
- Draxler, R. R.; Hess, G. D. (1997). An Overview of the HYSPLIT_4 Modelling System for Trajectories, Dispersion, and Deposition. Australian Meteorological Magazine, 47 (1998), 295-308.
- Draxler, R.; Stunder, B.; Rolph, G.; Stein, A.; Taylor, A.; Zinn, S.; Loughner, C.; Crawford, A. (2022). HYSPLIT USER'S GUIDE. https://www.arl.noaa.gov/documents/reports/hysplit_user_guide.pdf

- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (2019). Contaminación atmosférica. <http://www.ideam.gov.co/web/contaminacion-y-calidad-ambiental/contaminacion-atmosferica>
- International Sustainable Systems Research Center (ISSRC). (2008). Manual del Usuario del Modelo IVE Versión 2.0: <http://www.issrc.org/ive/downloads/manuals/UsersManual%28sp%29.pdf>
- Martínez-Manjarrez, Y.; Fernández-Lascarro, J. C.; Osorio-Molina, C. A.; K2 Ingeniería S.A.S. (2020). Informe de Operación del Sistema de Vigilancia de Calidad del Aire. Informe Anual - 2020, Valledupar, Colombia.
- NCAR (2021). Mesoscale & Microscale Meteorology Laboratory, Weather Research & Forecasting Model (WRF). <https://www.mmm.ucar.edu/models/wrf>
- Organización Mundial de la Salud (OMS). (2016). Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre. https://www.who.int/phe/health_topics/AQG_spanish.pdf
- Organización Mundial de la Salud (OMS). (2022). Ambient (ourdoor) air pollution. [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)
- Organización Mundial de la Salud (OMS). (2022). Contaminación del aire ambiente (exterior). [https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)
- Pan American Health Organization (PAHO). (2018). Air Quality. <https://www.paho.org/en/topics/air-quality>
- Ramírez Hernández, O. J. (2014). Origen de masas de aire en cuatro ciudades de Colombia mediante el modelo HYSPLIT. *Revista De Investigación Agraria Y Ambiental*, 5(1), 103–119. <https://doi.org/10.22490/21456453.935>
- Registro Único Nacional de Tránsito (RUNT). (2008). Flota Vehicular registrada en la ciudad de Valledupar, Secretaría de tránsito de Valledupar.
- Registro Único Nacional de Tránsito (RUNT). (2022). RUNT en cifras. <https://www.runt.com.co/runt-en-cifras>
- Secretaría Distrital de Ambiente (SDA). (2015). Informe anual de calidad de aire de Bogotá (2014), Bogotá. D.C. https://oab.ambientebogota.gov.co/?post_type=dlm_download&p=3146
- Skamarock, W. C.; Klemp, J.; Dudhia, J.; Gill, D.; Liu, Z.; Berner, J.; Wang, W.; Powers, J.; Duda, M.; Barker, D.; Huang, X.-Y. (2021). A description of the advanced research WRF model version 4.3. National Center for Atmospheric. <https://doi.org/10.5065/1dfh-6p97>
- Stein, A. F.; Draxler, R. R.; Rolph, G. D.; Stunder, B. J. B.; Cohen, M. D.; Ngan, F. (2015). NOAA's HYSPLIT Atmospheric Transport and Dispersion Modeling System. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 96(12), 2059-2077. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00110.1>
- United States Environmental Protection Agency (EPA). (2022). Health and Environmental Effects of Particulate Matter (PM). <https://www.epa.gov/pm-pollution/health-and-environmental-effects-particulate-matter-pm>
- Valverde, D. L.; Zegarra, J. C. (2018). Evaluación del transporte de contaminantes atmosféricos: PM2.5, CO, NO2 y SO2 de la ciudad de Huaraz al nevado San Juan -quebrada Shallap- marzo de 2015 a junio de 2016. Ancash.