

# Atmospheric basins in an annual projection of the municipality of San José de Cúcuta using the HYSPLIT model

Deshiret Chuscano Torres & Leidy Vanessa Tarazona Tobo

Universidad Francisco de Paula Santander, Facultad de ciencias Agrarias y del Ambiente, San José de Cúcuta, Colombia.



**How to cite this article:** D. Chuscano, L. Tarazona, "Cuencas atmosféricas en una proyección anual del municipio de San José de Cúcuta mediante el modelo *HYSPLIT*", *Ing-Nova*, vol. 4, no. 1, pp. 9-21, Ene. 2025.  
<https://doi.org/10.32997/rin-2025-4985>

**Received:** 2 de diciembre de 2024

**Accepted:** 20 de diciembre de 2024

**Corresponding author:**

Deshiret Chuscano Torres  
[deshiretctor@ufps.edu.co](mailto:deshiretctor@ufps.edu.co)

**Editor:** Miguel Ángel Mueses. Universidad de Cartagena-Colombia.

**Copyright:** © 2025 Chuscano, L. Tarazona. Este es un artículo de acceso abierto, distribuido bajo los términos de la licencia <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/> la cual permite el uso sin restricciones, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre y cuando que el original, el autor y la fuente sean acreditados.



## ABSTRACT

This article focused on studying the origin of atmospheric pollutants that affect the air quality of San José de Cúcuta, Colombia, analyzing the influence of meteorological, geographical and anthropogenic factors on the dispersion of pollutants. Initially, the main sources of pollutant emissions to the air basin and the climatic periods of the year 2023 were identified, using data from IDEAM and the Pareto diagram; in addition to the use of the *HYSPLIT* program with a horizontal velocity model and backward trajectory direction, with a resolution of 0.25 degrees and a dispersion time of 72 hours per trajectory and the *FIRMS* platform to identify heat sources, this with the in order to understand how these trajectories vary with climatic periods and their relationship with air quality. The results showed that the main sources of atmospheric pollution come from industrial activities, particulate matter from vehicles, and agricultural burning, and that the greatest influence of pollutants that affect the air basin comes from Venezuelan territory; There was a greater accumulation of pollutants in rainy periods. Finally, it was concluded that the analysis of these trajectories that affect the city's basin allows advancing scientific knowledge of environmental management in the region, providing valuable information for the formulation of public policies, as well as evidence-based mitigation strategies for improve air quality in San José de Cúcuta.

**Keywords:** Airshed; Hysplit; Air quality; Cúcuta.

## Cuencas atmosféricas en una proyección anual del municipio de San José de Cúcuta mediante el modelo *HYSPLIT*

## RESUMEN

El presente artículo se enfocó en estudiar el origen de los contaminantes atmosféricos que afectan la calidad del aire de San José de Cúcuta, Colombia, analizándose la influencia de factores meteorológicos, geográficos y antrópicos, en la dispersión de contaminantes. Inicialmente se identificaron las principales fuentes de emisión de contaminantes a la cuenca atmosférica y los periodos climáticos del año 2023, esto mediante datos del IDEAM y el diagrama de Pareto; además del uso del programa *HYSPLIT* con un modelo de velocidad horizontal y dirección de trayectoria hacia atrás, con una resolución de 0,25 grados y un tiempo de dispersión de 72 horas por trayectoria y la plataforma *FIRMS* para identificar focos de calor, esto con el fin de comprender como estas trayectorias varían con los periodos climáticos y su relación con la calidad del aire. Los resultados evidenciaron que las principales fuentes de contaminación atmosférica provienen de actividades industriales,

material particulado de vehículos, y la quema agrícola, asimismo, que la mayor influencia de contaminantes que afectan la cuenca atmosférica proviene del territorio venezolano; se presentó mayor acumulación de contaminantes en los periodos lluviosos. Finalmente, se concluyó que el análisis de estas trayectorias que afectan la cuenca de la ciudad permite avanzar en el conocimiento científico de la gestión ambiental en la región, otorgando información valiosa para la formulación de políticas públicas, así como estrategias de mitigación basadas en evidencia para mejorar la calidad del aire en San José de Cúcuta.

**Palabras clave:** Cuenca atmosférica; Hysplit; Calidad del aire; Cúcuta.

## 1. Introducción

La contaminación atmosférica se ha consolidado como una de las problemáticas de mayor interés en las ciudades latinoamericanas, esto debido a sus impactos adversos en la salud humana, los ecosistemas y la calidad de vida urbana [1]. La ciudad de San José de Cúcuta se encuentra situada en el departamento de Norte de Santander; geográficamente se caracteriza por estar dentro de un valle y cerca de la frontera con Venezuela, junto con su clima cálido semiárido y sus patrones meteorológicos específicos [2,3], convierten a esta ciudad en un caso de estudio relevante para analizar los procesos de dispersión, acumulación y transporte de contaminantes atmosféricos.

La interacción de factores antropogénicos, como las emisiones provenientes de la industria, el transporte vehicular y agricultura, en conjunto con fenómenos naturales, como la inversión térmica y los periodos climáticos secos y lluviosos, genera episodios recurrentes de contaminación atmosférica, especialmente durante los meses secos, cuando la limitada precipitación y la baja circulación de vientos dificultan la dispersión de contaminantes [4]. Estos episodios no solo tienen repercusiones sobre la salud pública, incrementando la incidencia de enfermedades respiratorias y cardiovasculares, sino que también afectan el desarrollo sostenible de la región [5].

Para abordar estos desafíos, el modelo *HYSPLIT (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory)*, desarrollado por la NOAA (Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de EE.UU.), ha demostrado ser una herramienta clave en el análisis de las trayectorias de contaminantes y en la comprensión de las dinámicas atmosféricas [6]. Asimismo, el uso de herramientas complementarias, como el sistema *FIRMS* de la NASA, permite monitorear y analizar los focos de calor que contribuyen a la contaminación atmosférica, especialmente en zonas limítrofes con Venezuela [7]. Estos focos, derivados de incendios forestales o prácticas agrícolas no controladas, son fuentes importantes de material particulado y gases contaminantes que, bajo ciertas condiciones meteorológicas, son transportados hacia la cuenca atmosférica de Cúcuta [8].

Las fuentes de emisión de contaminantes en Cúcuta provienen de diversas fuentes; principalmente fuentes de origen industrial, domestico o del transporte, algunas son: Las industrias locales, como la extracción de materias primas (la arcilla), la alimentaria, materiales de construcción y curtiembres, son responsables de la emisión de contaminantes debido al uso de calderas y combustibles fósiles para sus procesos productivos [9]. Los registros de contaminación por material particulado PM10 y metales pesados Pb, Zn, Mn, Cu y Cr se presenta en las zonas con actividad industrial; además de la influencia del viento que proviene del sur en dirección norte atrayendo material particulado y otro tipo de contaminantes [10].

La ciudad de Cúcuta posee una gran influencia de los vientos permanentes que fluyen en la región ecuatorial de este a oeste, alterando el clima mundial y la temperatura del océano. Estas fluctuaciones climáticas afectan las aguas oceánicas principalmente por dos patrones contrarios, El Niño y La Niña; que impactan el clima global y proporcionan la generación de incendios forestales [11]. El parque automotor en la ciudad está compuesto en gran parte por motos; estos representan el mayor número de vehículos en la ciudad. Además de automóviles particulares, buses y camiones, que contribuyen significativamente a la contaminación del aire. Según un reporte de CORPONOR del año 2021, las motos representan los porcentajes más elevados de emisión de contaminantes a la atmósfera; generando monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) y material particulado (PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>) [12].

Los rellenos sanitarios, tanto de los residuos de la ciudad de Cúcuta, de los municipios aledaños y el país vecino liberan metano (CH<sub>4</sub>) y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Estos gases de efecto invernadero se desplazan por las corrientes de aire llegando a localizarse en la ciudad de Cúcuta [13].

En un contexto de creciente preocupación por la salud pública y la sostenibilidad ambiental, esta investigación aporta un marco científico sólido para entender los factores que influyen en la calidad del aire de Cúcuta [14].

Este estudio tiene como objetivo analizar la cuenca atmosférica de Cúcuta mediante una aproximación interdisciplinaria que combina herramientas de modelación, análisis estadístico y datos meteorológicos históricos.

## 2. Materiales y métodos

### Descripción del área de estudio

Geográficamente la ciudad de Cúcuta, capital del departamento de Norte de Santander, está situada en el noreste de Colombia, cerca de la frontera con Venezuela. Su ubicación exacta está a una latitud de 7°54'N y una longitud de 72°30'O. Su altitud promedio es de 320 metros sobre el nivel del mar [15]. Tiene un clima tropical cálido semiárido según la clasificación climática de Köppen; caracterizado por temperaturas mayormente cálidas durante todo el año (3). Su temperatura promedio anual se encuentra entre los 20°C y 37°C, con máximas que pueden llegar a los 39°C en épocas más cálidas; la circulación de los vientos mayormente es suave, lo que, combinado con las altas temperaturas y la poca precipitación en la temporada seca, contribuye a la acumulación de contaminantes en la atmósfera. Durante la temporada de lluvias, la contaminación tiende a disminuir debido a la precipitación que limpia la atmósfera [16].

### Definición de los periodos climáticos

El Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) ofrece información hidrometeorológica, que aporta datos reales para el desarrollo de diferentes estudios. Estos datos se clasifican entre distintos parámetros ambientales y fechas de interés que datan del año 1981; además de la cobertura en el territorio colombiano, por medio de su red de más de 8500 estaciones meteorológicas [17].

La determinación de los periodos climáticos de una ciudad o zona específica se puede obtener por un análisis de sus precipitaciones mensuales promedio; clasificando los meses con mayor o menor precipitación en

temporadas secas o lluviosas [18]. Esto en conjunto con un diagrama de Pareto, que permite la distinción por porcentaje de lluvias de cada uno de los periodos; estableciéndose el 80% como el periodo lluvioso [19].

Para definir los periodos climáticos en la ciudad de Cúcuta se usaron datos del IDEAM, donde se obtuvieron los datos hidrometeorológicos, con fecha de estudio del año 2023; se usó el parámetro de precipitación total mensual, para una identificación concreta de los periodos secos y lluviosos; el parámetro usado se determina según las características del estudio que se desee realizar en este caso la precipitación total mensual [20].

La estación de estudio elegida fue el Aeropuerto Internacional Camilo Daza, que por su ubicación central de la ciudad y cercanía al punto de estudio, brinda datos y registros más completos; cumpliendo con los lineamientos establecidos por la OMM [21].

### **Determinación de las trayectorias de contaminantes mediante el programa *HYSPLIT***

La determinación de las trayectorias de contaminantes que afectan la ciudad de Cúcuta se realizó mediante el programa (*HYSPLIT*); esta herramienta desarrollada por la NOAA, es útil para estudiar la trayectoria de contaminantes, como, cenizas volcánicas, productos químicos o materiales radiactivos; así como para predecir la dispersión de humos de incendios [22]. El programa es ampliamente utilizado en meteorología, medio ambiente y gestión de emergencias [6]. Además, se utiliza para simular y predecir cómo se dispersan partículas y gases en la atmósfera [23].

El método de frecuencia del modelo *HYSPLIT* se centra en analizar la cantidad de veces que las trayectorias de contaminantes pasan por un área determinada en un período de tiempo específico, permitiendo identificar patrones frecuentes en el transporte de contaminantes y determinar las trayectorias más frecuentes de dispersión de masas de aire que transportan contaminantes hacia un punto específico, como la ciudad de Cúcuta [23].

La metodología incluyó la modelación con un modelo de velocidad horizontal y dirección de trayectoria hacia atrás [24]; el tipo de trayectoria asignada se determina por el número de puntos de origen y la trayectoria. En este caso, se usó un solo punto de origen representativo de la ciudad; ubicado en la Universidad Francisco de Paula Santander con coordenadas exactas en latitud 7.8954212 N y longitud 72.4882382 O. La trayectoria de frecuencia permite a diferencia de otros tipos la representación de varias trayectorias a lo largo de un periodo de tiempo; permitiendo patrones de transporte más generales y repetitivos, en lugar de estudiar un solo evento [25], esto con una resolución de 0,25 grados que referencia a la distancia entre los puntos de la malla de datos del modelo, la cual es en este caso de aproximadamente 25 kilómetros [26], ayudando a simular y analizar trayectorias de contaminantes con mayor precisión por su resolución; el tiempo total de ejecución representa el tiempo durante el cual el modelo sigue el recorrido de las partículas, este tiempo se configura en horas generalmente, se usan trayectorias de 24, 48 o 72 horas, esto depende del objetivo del estudio, el cual fue de 72 horas.

Este programa de la NOAA otorga un rendimiento óptimo en el cálculo de trayectorias de los contaminantes hacia un punto específico a analizar, brindando resultados en un tiempo entre 20 a 30 min aproximadamente [27].

### Determinación de focos de calor mediante el proyecto *FIRMS*

El Sistema de Información sobre Incendios para la Gestión de Recursos (*FIRMS*), ofrece datos de incendios y fuentes de calor con altas temperaturas. Esto por medio del espectrorradiómetro de imágenes de resolución moderada (*MODIS*), que se encuentra a bordo de los satélites Aqua y Terra; y del conjunto de radiómetros de imágenes infrarrojas visibles (*VIIRS*) a bordo de *S-NPP*, *NOAA 20* y *NOAA 21*. Los datos globales ofrecidos por este sistema se encuentran disponibles en un plazo de 3 horas, pero para EE. UU. y Canadá son visibles en tiempo real; además de la disponibilidad de registro históricos anuales [8].

Los satélites Aqua y Terra con los sensores (*MODIS*) poseen una resolución de 1 Km de píxel y un ancho de análisis de 2330 Km; orbitando la tierra diariamente; Terra por la mañana y Aqua por la tarde [28]. Los satélites *S-NPP*, *NOAA 20* y *NOAA 21* con los sensores (*VIIRS*) poseen una resolución espacial de 375 m de píxel y un ancho de análisis de 3000 Km; orbitando dos veces al día la Tierra en su totalidad [29]. Dado esto los sensores que ofrecen mejor resolución y cobertura son los (*VIIRS*); registrando mayor número de focos de calor.

Los archivos se encuentran tanto en tiempo real, como en datos históricos, lo que ofrece la visualización de diferentes periodos de estudios, se descargó mensualmente cada registro del año 2023 para el mes más lluvioso y el menos lluvioso.

### 3. Resultados

#### Definición de periodos climáticos de la ciudad de Cúcuta mediante el diagrama de Pareto y el uso de datos históricos del IDEAM

La información generada en el portal del IDEAM permitió obtener la precipitación total mensual de todos los meses del año 2023, para la determinación de los periodos húmedos y secos de la ciudad por medio del diagrama de Pareto. Los resultados presentados en la Tabla 1 corresponden a la precipitación total mensual de la ciudad de Cúcuta de acuerdo con el IDEAM en la estación de código 16015010 ubicada en el Aeropuerto Internacional Camilo Daza.

**Tabla 1.** Precipitación total mensual del año 2023 en la ciudad de Cúcuta, Colombia.

Mes	Precipitación Total Mensual (mm)
Enero	13
Febrero	8
Marzo	67
Abril	126.3
Mayo	81
Junio	27.7
Julio	38.6
Agosto	36.8
Septiembre	42.7
Octubre	196.9
Noviembre	50.1
Diciembre	80.2

Los meses con mayor precipitación en el año 2023 fueron octubre con 196.9 mm y abril con 126.3 mm, seguidos de mayo con 81 mm, diciembre con 80.2; marzo presento 67 mm, noviembre 50.1 mm; septiembre, julio y agosto presentaron valores similares, con 42.7 mm, 38.6 mm y 36.8 mm respectivamente; junio tuvo una precipitación de 27.7, enero de 13 mm y febrero de 8 mm siendo los meses con menos cantidad de precipitación total Tabla 1.

El diagrama de Pareto de la Figura 1 permitió identificar los meses pertenecientes a el periodo lluvioso y al periodo seco, donde se determinó que aquellos meses con precipitaciones que representan una acumulación del 80% pertenecen a el periodo lluvioso como lo son octubre, abril, mayo, diciembre, marzo y noviembre; y el periodo seco conformado por los meses de septiembre, julio, agosto, junio, enero y febrero; que representan el 20% de las precipitaciones del año 2023.

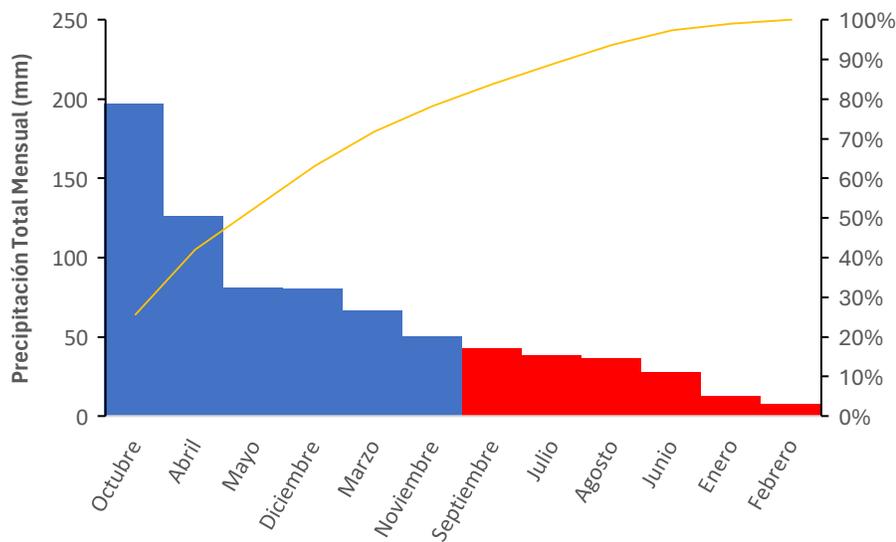


Figura 1. Diagrama de Pareto

### Modelación del programa HYSPLIT para la determinación de las trayectorias mensuales de los contaminantes en la cuenca atmosférica de la ciudad de Cúcuta durante el año 2023

La definición de trayectorias de los contaminantes en la cuenca atmosférica de la ciudad de Cúcuta se realizó mediante la generación de gráficos de frecuencias, en el programa HYSPLIT. Representando el porcentaje de contaminantes por zonas que llegan a la cuenca atmosférica e identificándose las de mayor y menor influencia; además de sus trayectorias mediante el tiempo de análisis. Esto por medio de periodos de análisis mensuales del año 2023, siguiendo los pasos de programación planteados en la metodología propuesta.

#### Periodo seco

Los resultados de la Figura 2 mostraron que la cuenca atmosférica global presenta variaciones entre los periodos climáticos, con distintos patrones de origen de las trayectorias. Para el mes de febrero, ubicado en periodo seco, la cuenca atmosférica cercana concentra el 90% del origen de las corrientes de viento (menos de 4 horas de trayectoria) en la ciudad de San Cristóbal (Táchira). La cuenca atmosférica media, que incluye

trayectorias de 20 a 40 horas, representa entre el 20% y el 40% de las corrientes afluentes involucrando los estados venezolanos de Táchira, Barinas, Apure, Portuguesa y Cojedes. La cuenca atmosférica lejana, con trayectorias de 72 horas y menos del 10% de las corrientes afluentes, abarca los estados del norte de Venezuela, así como el Mar Caribe. Las principales fuentes de contaminación en estas áreas son las emisiones industriales, de vehículos y quemas agrícolas en Venezuela y Colombia.

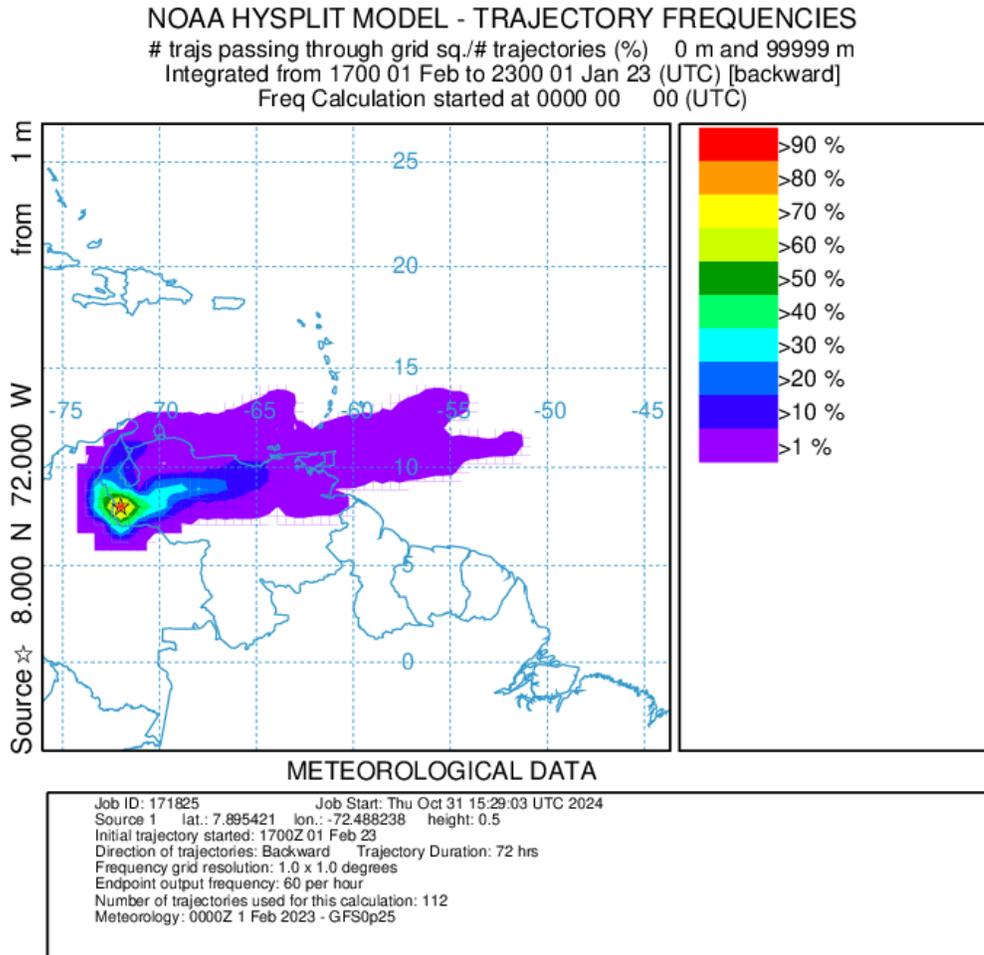


Figura 2. Trayectorias de contaminantes del mes de febrero. Elaborado en HYSPLIT.

### Periodo de lluvia

Los resultados de la Figura 3 mostraron que la cuenca atmosférica global presenta variaciones entre los periodos climáticos, con distintos patrones de origen de las trayectorias. Para el mes de octubre, ubicado en periodo de lluvia, la cuenca atmosférica cercana concentra el 90% del origen de las corrientes de viento (menos de 4 horas de trayectoria) en la ciudad de San Cristóbal (Táchira). La cuenca atmosférica media, que incluye trayectorias de 20 a 40 horas, representa entre el 20% y el 40% de las corrientes afluentes, involucrando los estados venezolanos de Táchira, Barinas y parte de Apure; además de los departamentos colombianos de Arauca, Santander, Boyacá y Casanare. La cuenca atmosférica lejana, con trayectorias de 72 horas y menos del 10% de las corrientes afluentes, abarca los estados del norte de Venezuela, así como la frontera con Venezuela por Arauca y Vichada, y con Brasil por Guainía.

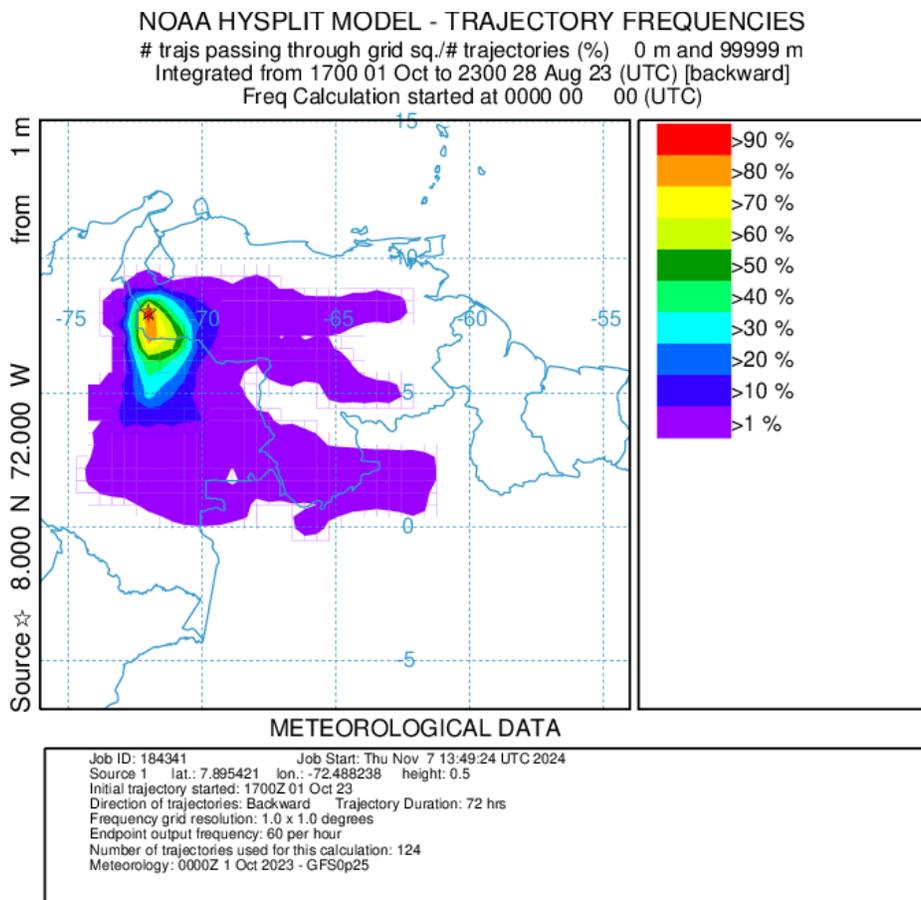


Figura 3. Trayectorias de contaminantes del mes de octubre. Elaborado en el programa HYSPLIT.

El análisis general de la influencia de los periodos climáticos y los contaminantes a la cuenca atmosférica de la ciudad de Cúcuta según resultados del programa HYSPLIT, presenta que en los meses del periodo lluvioso como lo son octubre, abril, mayo, diciembre, marzo y noviembre, se evidenció una tendencia de mayor frecuencia en la acumulación de los contaminantes; durante el periodo lluvioso los vientos presentaron mayor velocidad, ocasionando un arrastre de los contaminantes desde zonas más lejanas, esto genera una mayor área de frecuencia y acumulación de contaminantes en los departamentos fronterizos como Norte de Santander, Santander, el norte de Boyacá y Arauca; y los estados de Venezuela, Táchira, Mérida y Barinas. Sin embargo, los periodos de lluvia permiten un asentamiento de los contaminantes. El periodo seco conformado por los meses de septiembre, julio, agosto, junio, enero y febrero mostró un menor rango de frecuencia en la acumulación de contaminantes en la cuenca atmosférica de la ciudad de Cúcuta.

### Identificación de los focos de calor presentados en la cuenca atmosférica de la ciudad de Cúcuta en el año 2023

El proyecto FIRMS permitió el análisis de los focos de calor, que representan la emisión de contaminantes a la cuenca atmosférica en la ciudad de Cúcuta; estos contaminantes son producidos por la combustión en el desarrollo de procesos industriales y quemados de zonas verdes, generando gases contaminantes y material particulado. La información de los puntos calientes obtenidos en el mes de febrero y octubre se presenta a continuación:



#### 4. Discusión de los resultados

El análisis realizado en el presente trabajo proporciona un marco integral para comprender la dinámica de la calidad del aire en San José de Cúcuta, evidenciándose la relación entre factores geográficos, meteorológicos y antropogénicos que influyen en la dispersión de contaminantes. Mediante la implementación del modelo *HYSPLIT*, la determinación de periodos climáticos con los datos meteorológicos del IDEAM y el proyecto *FIRMS*, se logró caracterizar la cuenca atmosférica del municipio, brindando resultados que contribuyen significativamente al conocimiento sobre los patrones que siguen los contaminantes atmosféricos en la cuenca atmosférica de la ciudad de Cúcuta.

Los hallazgos indican que la variación estacional tiene un impacto importante en las trayectorias de las masas de aire y, por ende, en la dispersión de contaminantes. Durante los periodos secos, se presentaron trayectorias más estables y cortas, mientras que, en los periodos lluviosos, se evidencia una mayor dispersión de las trayectorias debido a cambios en la dirección y velocidad del viento, lo que afecta la acumulación de contaminantes en la atmósfera de la ciudad. Estos resultados refuerzan la necesidad de considerar la estacionalidad como un factor clave en la gestión de la calidad del aire; adicional a esto el monitoreo por parte de autoridades ambientales para la prevención de los eventos de contaminación atmosférica, con el fin de tomar medidas anticipadas, que ayuden a la mitigación de contaminación en la ciudad de San José de Cúcuta. Priorizándose la toma de decisiones en asuntos de calidad del aire.

#### 5. Conclusiones

Se analizaron los contaminantes que afectan la cuenca atmosférica de la ciudad de Cúcuta, con una proyección anual, para el año 2023, mediante el modelo *HYSPLIT*, evidenciándose que, durante el año, distintos factores morfológicos, climáticos y antrópicos, afectaron la calidad del aire de la ciudad y la región, generándose la acumulación de contaminantes atmosféricos.

Se determinó la influencia de las variaciones estacionales y meteorológicas mediante el análisis de lluvias mensual total del año 2023; el diagrama de Pareto permitió identificar dos periodos, uno lluvioso y otro seco. El modelo *HYSPLIT* brindó información del comportamiento de las trayectorias de los contaminantes; evidenciándose un aumento en la acumulación de contaminantes en la cuenta atmosférica durante los meses lluviosos, que presentan vientos más rápidos, lo que generó una mayor cantidad de arrastre de contaminantes.

Se caracterizaron las masas de aires que impactan a la ciudad de Cúcuta, esto mediante la identificación de fuentes contaminantes como la quema en zonas agrícolas, incendios forestales, la quema de basura y la emisión de material particulado, no solo generados en la región; ya que se evidenciaron trayectorias provenientes de Venezuela y otras regiones de Colombia.

#### Contribución de autores

**Conceptualización:** Dshiret Chuscano Torres, Leidy Vanessa Tarazona Tobo; **Metodología:** Dshiret Chuscano Torres, Leidy Vanessa Tarazona Tobo; **Análisis de Resultados:** Dshiret Chuscano Torres, Leidy Vanessa Tarazona Tobo; **Redacción y Preparación del Artículo:** Dshiret Chuscano Torres, Leidy Vanessa Tarazona Tobo; **Supervisión:** Dshiret Chuscano Torres, Leidy Vanessa Tarazona Tobo; **Datos experimentales:** Dshiret Chuscano Torres, Leidy Vanessa Tarazona Tobo; **Fuentes de Financiación:** Dshiret Chuscano Torres, Leidy Vanessa Tarazona Tobo.

## Agradecimientos

No manifiestan.

## Referencias

- [1] L. A. Sandía Rondón, "The environment and sustainable development in Latin American cities," *Investigación y Desarrollo* vol. 17, no. 2, pp. 268-287, 2009.
- [2] L. F. Valenzuela Ramírez, "Características físicas de un predio y condiciones de energía de vientos: dos elementos para la definición del perfil de proyecto de construcción de un parque eólico en el área metropolitana de Cúcuta, NS," Trabajo de Grado, Pregrado, Universidad Francisco de Paula Santander, Cúcuta, Colombia 2022.
- [3] C. A. Bonilla Granados, A. Y. Sánchez Delgado, D. I. Sanchez Tapiero, "Diseño de techos verdes y jardines verticales como sistemas urbanos de drenaje sostenible en edificaciones," *Respuestas* vol. 26, no. 3, pp. 27-40, Jun., 2020. <https://doi.org/10.22463/0122820X.3206>.
- [4] D. Becerra Moreno, L. F. Ramirez Rios, L. F. Plaza Galvez, C. H. Oviedo Sanabria, M. V. Niño Ovalles, "Relationship between air quality and incidence of respiratory diseases in communes 4, 6, 7 and 8 of the municipality of Cúcuta, Norte de Santander," *Ingeniería y Competitividad* vol. 23, no. 2, Art. e2029698, May., 2021. <https://doi.org/10.25100/iyc.v23i2.9698>.
- [5] M.A. Hussein, B.A.H.M. Sharhan, Z.J. Kadhim, W.R. Abed, S.A. Razzaq, "Assessing the impact of urban air pollution on public health: a case study," *European Journal of Modern Medicine and Practice* vol. 4, no. 8, pp. 187-211, Aug., 2024.
- [6] A. F. Stein, R. R. Draxler, G. D. Rolph, B. J. B. Stunder, M. D. Cohen, F. Ngan, "NOAA's HYSPLIT Atmospheric Transport and Dispersion Modeling System," *Bulletin of the American Meteorological Society* vol. 96, no. 12, pp. 2059-2077, Dec., 2015. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00110.1>.
- [7] T. Yao, D. Green, K. Michael, L. Manager, D. Davies, "Using NASA's LANCE Near Real-time Products for Disaster Risk Reduction", In Nasa Technical Report Server, NTRS, 2021. [https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20210022251/downloads/FOSS4G2021\\_TianYao\\_v3.pdf](https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20210022251/downloads/FOSS4G2021_TianYao_v3.pdf).
- [8] NASA-FIRMS, "Fire Information for Resource Management System, NASA-FIRMS2", Nov., 2024. <https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov>.
- [9] Y. E. Leal Esper, E. Castiblanco Ramírez, "La contaminación atmosférica en el municipio de san José de Cúcuta – Colombia," *Saber Ciencia & Libertad* vol. 15, no. 1, May., 2020. <https://orcid.org/0000-0002-4493-5866>.
- [10] J.E. Trujillo, J.E. Caballero, J.D. Ramón, "Determinación de las concentraciones de metales pesados presentes en el material particulado PM10 del municipio de San José de Cúcuta, Norte de Santander," *Revista ambiental agua, aire y suelo* vol. 10, no. 1, pp. 1-14, Ene., 2021.
- [11] J. A. Castro Correa, S. B. Sepúlveda Mora, B. Medina Delgado, C. D. Escobar Amado, D. Guevara Ibarra, "A forest fire monitoring and detection system based on wireless sensor networks," *Scientia et Technica* vol. 27, no. 2, pp. 89-96, Jun. 2022. <https://doi.org/10.22517/23447214.24784>.

- [12] M. T. Puentes Gutierrez, C. A. Valdés Oliveros, "Implementación del modelo de emisiones vehiculares MOVES en las ciudades de Bogotá, Bucaramanga y Cúcuta como herramienta para la gestión de calidad del aire," 2022. <https://ciencia.lasalle.edu.co/server/api/core/bitstreams/aaf98356-700f-4427-9012-38c82300c6d1/content>.
- [13] D. M. Chaves Ramírez, "Aprovechamiento y valorización energética del biogás en un relleno sanitario, aprovechamiento y valorización energética del biogás en el relleno sanitario del parque de Tecnología Ambiental Guayabal," Trabajo de Grado Maestría, Universidad de Pamplona, 2019. Repositorio Hulago Universidad de Pamplona. <http://repositoriodspace.unipamplona.edu.co/jspui/handle/20.500.12744/4685>.
- [14] Y. A. Alonso Mirama, L. Y. Ospina Franky, "Determinantes de la salud ambiental de los municipios intermedios de Colombia," Trabajo de grado, pregrado en Administración en Salud, Institución Universitaria Antonio José Camacho, 2024. <https://repositorio.uniajc.edu.co/server/api/core/bitstreams/a9025a09-4077-4075-9418-066e15a9c6c3/content>.
- [15] A. Quijano Parra, M.J. Quijano Vargas, I. Meléndez Gélvez, I, "Genotoxicidad de los hidrocarburos aromáticos policíclicos extraídos mediante el sistema diclorometano-etanol-tolueno en muestras del aire de Cúcuta, Norte de Santander, Colombia," *Acta Toxicológica Argentina* vol. 25, n.1, pp. 1-11, May., 2017.
- [16] H. A. Ortiz Diaz, C. D. Escobar Amado, S. B. Sepúlveda Mora, "Statistical analysis of the climatological variables an their potential applications in the city of Cucuta," *Respuestas* vol. 23, no.1, pp. 39-44, Apr., 2018. <https://doi.org/10.22463/0122820X.1328>.
- [17] O. Vargas Pineda, D. Castañeda Rodríguez, "Análisis espacial y temporal de la precipitación en imágenes satelitales Chirps en el contexto de la Orinoquía colombiana," Trabajo de Grado Universidad Santo Tomás, Villavicencio, Colombia, 2024.
- [18] M. Deitch, M. Sapundjieff, S. Feirer, "Characterizing Precipitation Variability and Trends in the World's Mediterranean-Climate Areas," *Water* vol. 9, no. 4, pp. 259, Apr., 2017, <https://doi.org/10.3390/w9040259>.
- [19] M. Zasadzień, M. "Using the Pareto diagram and FMEA (Failure Mode and Effects Analysis) to identify key defects in a product," *Management Systems in Production Engineering* vol. 4, no. 16, pp. 153-156, Oct., 2014. <https://doi.org/10.12914/MSPE-02-04-2014>.
- [20] R. M. Altman, O. Harari, N. Moisseeva, D. Steyn, "Statistical Modelling of the Annual Rainfall Pattern in Guanacaste, Costa Rica," *Water* vol. 15, no. 4, pp. 700, Jan., 2023.
- [21] G. A. Corzo Perez, D. I. Sanchez Tapiero, M. A. Contreras Martínez, C. Zevenbergen, "Development of a hazard risk map for assessing pedestrian risk in urban flash floods: A case study in Cúcuta, Colombia," *River* vol. 3, no. 1, pp. 8-23, Feb., 2024. <https://doi.org/10.1002/rvr2.78>.
- [22] Y. F. Ma, B.Y. Du, Q. Wang, Q.Q. Hu, Y.S. Bian, M.B. Wang, S.Y. Jin, "Analysis of the atmospheric pollution transport pathways and sources in Shenyang, based on the HYSPLIT model," *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* vol. 351, no. 1, Art. 012030, Oct., 2019. Doi: 10.1088/1755-1315/351/1/012030.

- [23] N. Wu, Y. Ge, J. Abuduwaili, G. Issanova, G. Saparov, "Insights into Variations and Potential Long-Range Transport of Atmospheric Aerosols from the Aral Sea Basin in Central Asia," *Remote Sensing* vol. 14, no. 13, Art. 3201, Jul., 2022. <https://doi.org/10.3390/rs14133201>.
- [24] S. Al-Yahyai, Y. Charabi, A. Gastli, "Review of the use of Numerical Weather Prediction (NWP) Models for wind energy assessment," *Renewable and Sustainable Energy Reviews* vol. 14, no. 9, pp. 3192-3198, Dec., 2010, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.07.001>
- [25] N. Gammoudi, J. Kovács, F. Gresina, G. Varga, "Combined use of HYSPLIT model and MODIS aerosols optical depth to study the spatiotemporal circulation patterns of Saharan dust events over Central Europe," *Aeolian Research* vol. 67-69, Art. 100899, Sep. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2024.100899>.
- [26] A.J.P. Flores Aguilar, "Predicción diaria de temperaturas extremas y precipitación en la región Áncash mediante posprocesamiento estadístico del modelo GFS," Tesis de Pregrado, Universidad Nacional Agraria La Molina, Perú, 2024.
- [27] S. Delfi, M. Mosaferi, M. S. Hassanvand, S. Maleki, "Investigation of aerosols pollution across the eastern basin of Urmia lake using satellite remote sensing data and HYSPLIT model," *Journal of Environ Health Science & Engineering* vol. 17, no. 2, pp. 1107-1120, Dec., 2019. <http://dx.doi.org/10.1007/s40201-019-00425-3>.
- [28] O. Jonasson, A. Ignatov, B. Petrenko, V. Pryamitsyn, Y. Kihai, "NOAA MODIS SST Reanalysis Version 1," *Remote Sensing* vol. 15, no. 23, Art. 5589, Nov., 2023. <https://doi.org/10.3390/rs15235589>.
- [29] D. W. Schroeder, L. Giglio, "Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS) 375 m & 750 m Active Fire Detection Data Sets Based on NASA VIIRS Land Science Investigator Processing System (SIPS) Reprocessed Data - Version 1 Product User's Guide Version 1.3", 2018 [visited February 18<sup>th</sup>, 2025]. [https://viirsland.gsfc.nasa.gov/PDF/VIIRS\\_activefire\\_User\\_Guide.pdf](https://viirsland.gsfc.nasa.gov/PDF/VIIRS_activefire_User_Guide.pdf).