



**UNIVERSIDAD  
DE ANTIOQUIA**

**Análisis de Sensibilidad para el Modelo de  
dispersión de Contaminantes Atmosféricos  
AERMOD en el Estudio de Impacto Ambiental PCH  
EL BUEY**

**Autor:**

**Jesús David Heredia Coronado**

**Asesores:**

**José Sebastián Morales Salgado**

**Carlos Andrés Jaimes Hernández**

**Universidad de Antioquia**

**Facultad de Ingeniería, (Escuela Ambiental)**

**Medellín, Colombia**

**Año 2019**



**Análisis de Sensibilidad para el Modelo de dispersión de Contaminantes  
Atmosféricos AERMOD en el Estudio de Impacto Ambiental PCH EL BUEY**

Jesús David Heredia Coronado

Informe de práctica  
Como requisito para optar al título de:  
Ingeniero Ambiental

José Sebastián Morales Salgado - Ingeniero Ambiental

Carlos Andrés Jaimes Hernández - Ingeniero Químico

Universidad de Antioquia  
Facultad de Ingeniería, Escuela Ambiental  
Medellín, Colombia  
Año. 2019

## TABLA DE CONTENIDO

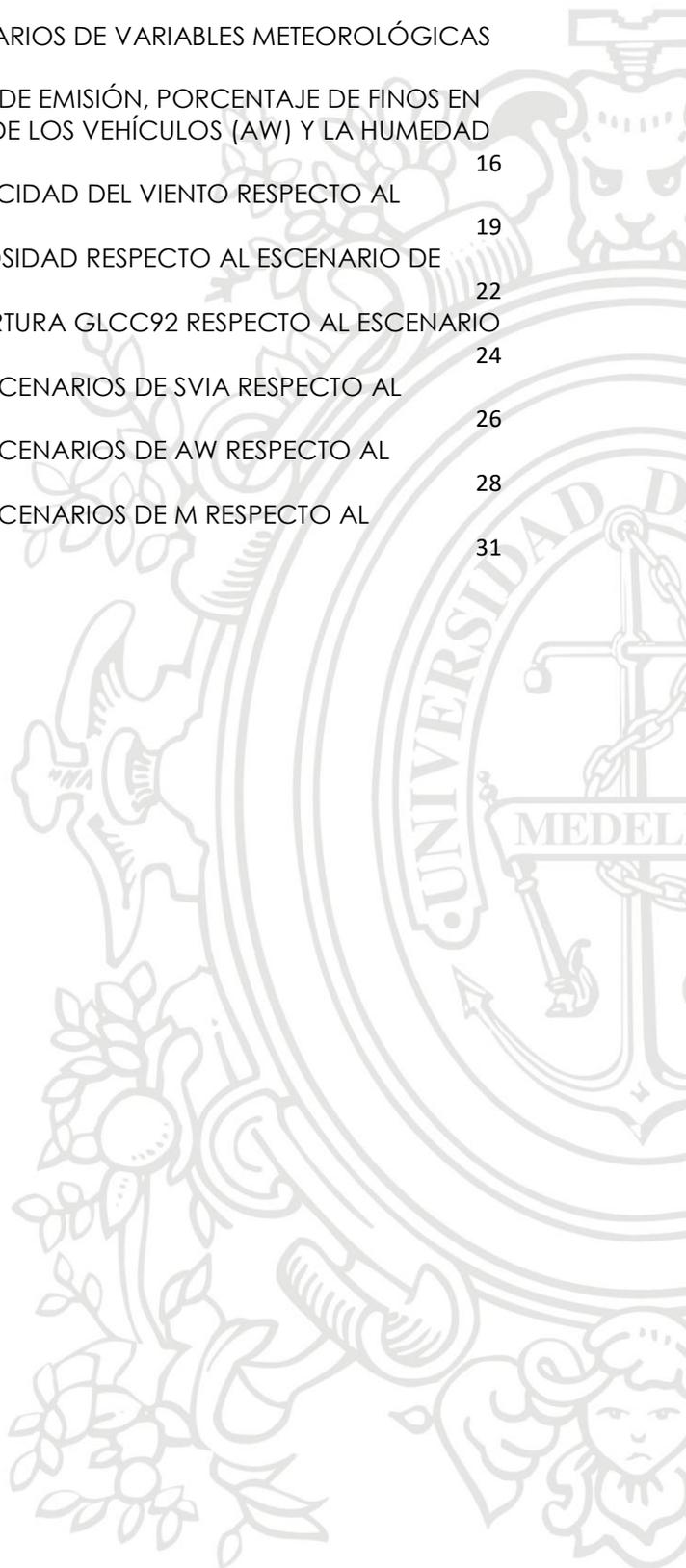
1	Identificación del asesor externo (empresa) ...	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
2	Identificación de la empresa .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
3	Resumen .....	4
4	Introducción .....	4
5	Objetivos .....	5
6	Marco Teórico .....	6
6.1	Modelo y aplicabilidad .....	6
6.2	Marco Legal .....	8
6.3	Limitaciones para la aplicabilidad del modelo .....	8
7	Metodología .....	9
7.1	Área de estudio .....	9
7.2	Configuración del modelo .....	10
7.3	Bases de datos utilizadas.....	10
7.4	Escenario de Control.....	11
7.5	Análisis de sensibilidad.....	13
7.6	Simulaciones: variaciones de datos de entrada .....	13
7.7	Tipos de resultados del modelo .....	16
7.8	Análisis estadístico .....	16
8	Resultados y análisis .....	18
8.1	Simulaciones con variaciones en la velocidad del viento.....	18
8.2	Simulaciones con variaciones en la nubosidad.....	21
8.3	Simulación de cambio en las coberturas.....	23
8.4	Simulaciones con variaciones en el porcentaje de finos en vías (SVIA) 25	
8.5	Simulaciones con variaciones en el peso promedio ponderado de los vehículos (AW) .....	27
8.6	Simulaciones con variaciones en la humedad de las vías (M) .....	30
8.7	Cambios en las distribuciones espaciales .....	32
9	Conclusiones .....	35
10	Referencias bibliográficas .....	36

## Figuras y Tablas

<b>FIGURA 1.</b>	UBICACIÓN GEOGRÁFICA DEL PROYECTO (ORIENTE ANTIOQUEÑO), VEREDAS DENTRO DEL ÁREA DE INFLUENCIA DEL PROYECTO, OBRAS DE CONSTRUCCIÓN (LÍNEAS Y POLÍGONOS DE COLOR NEGRO) .....	9
<b>FIGURA 2</b>	RECEPTORES DISCRETOS EN EL DOMINIO DE MODELACIÓN (AMARILLOS), RECEPTOR CON MAYORES CONCENTRACIONES ESTCA2 (PUNTO ROJO), DEPÓSITOS Y ZONAS INDUSTRIALES (POLÍGONOS VERDES), TUNEL Y VÍAS (LINEAS AZULES) .....	12
<b>FIGURA 3</b>	COBERTURAS DEL PROYECTO A PARTIR DE ORTOFOTO ACOPLADAS A COBERTURAS DEL MODELO DE USO DEL SUELO GLCC 1992 .....	13
<b>FIGURA 4</b>	COBERTURAS DE USO DEL SUELO MODELO GLCC 1992 .....	15
<b>FIGURA 5</b>	DIAGRAMA DE TAYLOR, RELACIONA LA DESVIACIÓN ESTÁNDAR (SD), EL ERROR CUADRÁTICO MEDIO (RMSE) Y LA CORRELACIÓN ENTRE LAS SIMULACIONES (PUNTO AZUL) Y EL CONTROL (OBSERVED) .....	17
<b>FIGURA 6</b>	DIAGRAMA DE TAYLOR PARA EL ESCENARIO DE CONTROL (OBSERVED) VS ESCENARIOS DE VELOCIDAD DEL VIENTOS (MODEL) CON VARIACIONES DEL +5% (PUNTO ROJO), -5% (PUNTO AZUL), +10% (PUNTO VERDE) Y -10% (PUNTO VIOLETA) .....	20
<b>FIGURA 7</b>	DIAGRAMA DE CAJAS Y BIGOTES PARA LAS DIFERENCIAS PORCENTUALES DE CONCENTRACIONES HORARIAS DE PM10 ENTRE LAS ESTIMACIONES DEL ESCENARIO DE CONTROL Y LAS ESTIMACIONES DE LOS ESCENARIOS DE VELOCIDAD DEL VIENTO CON VARIACIONES DEL (A) +5%, (B) -5%, (C) +10% Y (D) -10% .....	20
<b>FIGURA 8</b>	DIAGRAMA DE TAYLOR PARA ESCENARIO DE CONTROL (OBSERVED) VS ESCENARIOS DE NUBOSIDAD CON VARIACIONES DE +1 DÉCIMAS (PUNTO ROJO), -1 DÉCIMAS (PUNTO AZUL), +2 DÉCIMAS (PUNTO VERDE) Y -2 DÉCIMAS (PUNTO VIOLETA) .....	22
<b>FIGURA 9</b>	DIAGRAMA DE CAJAS Y BIGOTES PARA LAS DIFERENCIAS PORCENTUALES DE CONCENTRACIONES HORARIAS DE PM10 ENTRE LAS ESTIMACIONES DEL ESCENARIO DE CONTROL Y LAS ESTIMACIONES DE LOS ESCENARIOS DE NUBOSIDAD CON VARIACIONES DE (A) +1 DÉCIMAS, (B) -1 DÉCIMAS, (C) +2 DÉCIMAS Y (D) -2 DÉCIMAS .....	23
<b>FIGURA 10</b>	DIAGRAMA DE TAYLOR PARA ESCENARIO COBERTURA GLCC92 (PUNTO ROJO) VS ESCENARIO DE CONTROL (OBSERVED) .....	24
<b>FIGURA 11</b>	DIAGRAMA DE CAJAS Y BIGOTES PARA DIFERENCIAS DE CONCENTRACIONES HORARIAS PORCENTUALES DE PM10 OBTENIDAS CON EL ESCENARIO DE COBERTURA GLCC92 Y EL ESCENARIO DE CONTROL .....	25
<b>FIGURA 12</b>	DIAGRAMA DE TAYLOR PARA EL ESCENARIO DE CONTROL (OBSERVED) VS ESCENARIOS DE PORCENTAJE DE FINOS SVIA (MODEL) CON VARIACIONES DEL +5% (PUNTO ROJO), -5% (PUNTO AZUL), +10% (PUNTO VERDE) Y -10% (PUNTO VIOLETA) .....	26
<b>FIGURA 13</b>	DIAGRAMA DE CAJAS Y BIGOTES PARA LAS DIFERENCIAS PORCENTUALES DE CONCENTRACIONES HORARIAS DE PM10 ENTRE LAS ESTIMACIONES DEL ESCENARIO DE CONTROL Y LAS ESTIMACIONES DE LOS ESCENARIOS DE SVIA CON VARIACIONES DEL (A) +5%, (B) -5%, (C) +10% Y (D) -10% .....	27
<b>FIGURA 14</b>	DIAGRAMA DE TAYLOR PARA EL CONTROL (OBSERVED) VS LOS ESCENARIOS DE AW (MODEL) CON VARIACIONES DEL +5% (PUNTO ROJO), -5% (PUNTO AZUL), +10% (PUNTO VERDE) Y -10% (PUNTO VIOLETA) .....	29
<b>FIGURA 15</b>	DIAGRAMA DE CAJAS Y BIGOTES PARA LAS DIFERENCIAS PORCENTUALES DE CONCENTRACIONES HORARIAS DE PM10 ENTRE LAS ESTIMACIONES DEL ESCENARIO DE CONTROL Y LAS ESTIMACIONES DE LOS ESCENARIOS DE AW CON VARIACIONES DEL (A) +5%, (B) -5%, (C) +10% Y (D) -10% .....	30
<b>FIGURA 16</b>	DIAGRAMA DE TAYLOR PARA EL ESCENARIO DE CONTROL (OBSERVED) VS ESCENARIOS DE M (MODEL) CON VARIACIONES DEL; +5% (PUNTO ROJO), -5% (PUNTO AZUL), +10% (PUNTO VERDE) Y -10% (PUNTO VIOLETA) .....	31
<b>FIGURA 17</b>	DIAGRAMA DE CAJAS Y BIGOTES PARA LAS DIFERENCIAS PORCENTUALES DE CONCENTRACIONES HORARIAS DE PM10 ENTRE LAS ESTIMACIONES DEL ESCENARIO DE CONTROL Y LAS ESTIMACIONES DE LOS ESCENARIOS DE M CON VARIACIONES DEL (A) +5%, (B) -5%, (C) +10% Y (D) -10% .....	32
<b>FIGURA 18</b>	ISOPLETAS DE CONCENTRACIÓN EN LOS PERIODOS DE 24 HORAS (IZQUIERDA) Y ANUAL (DERECHA) DE LOS ESCENARIOS DE CONTROL (A Y B), DE VARIACIÓN DE	

NUBOSIDAD -2 DÉCIMAS (C Y D), DE CONTENIDO DE FINOS CON VARIACIÓN DE -10% ( E Y F), Y DE VARIACIÓN DE COBERTURAS(G Y H)..... 34

<b>TABLA 1</b>	CAMBIO PORCENTUAL PARA DATOS HORARIOS DE VARIABLES METEOROLÓGICAS	14
<b>TABLA 2</b>	CAMBIO PORCENTUAL EN LOS FACTORES DE EMISIÓN, PORCENTAJE DE FINOS EN LAS VÍAS (SVIA), PESO PROMEDIO PONDERADO DE LOS VEHÍCULOS (AW) Y LA HUMEDAD DE LAS VÍAS (M)	16
<b>TABLA 3</b>	ESTADÍSTICOS PARA ESCENARIOS DE VELOCIDAD DEL VIENTO RESPECTO AL ESCENARIO DE CONTROL	19
<b>TABLA 4</b>	ESTADÍSTICOS PARA ESCENARIOS DE NUBOSIDAD RESPECTO AL ESCENARIO DE CONTROL	22
<b>TABLA 5</b>	ESTADÍSTICOS PARA ESCENARIO DE COBERTURA GLCC92 RESPECTO AL ESCENARIO DE CONTROL	24
<b>TABLA 6</b>	ESTADÍSTICOS PARA CADA UNO DE LOS ESCENARIOS DE SVIA RESPECTO AL ESCENARIO DE CONTROL.	26
<b>TABLA 7</b>	ESTADÍSTICOS PARA CADA UNO DE LOS ESCENARIOS DE AW RESPECTO AL ESCENARIO BASE	28
<b>TABLA 8</b>	ESTADÍSTICOS PARA CADA UNO DE LOS ESCENARIOS DE M RESPECTO AL ESCENARIO BASE	31



# **Análisis de Sensibilidad para el Modelo de dispersión de Contaminantes Atmosféricos AERMOD en el Estudio de Impacto Ambiental PCH EL BUEY**

## **1 Resumen**

El análisis de sensibilidad para modelos de dispersión de contaminantes utilizados en la caracterización del impacto ambiental de proyectos de desarrollo como Pequeñas Centrales Hidroeléctricas (PCH), además de ser un paso crucial para la obtención de resultados que permitan identificar conclusiones más robustas, es un requerimiento de las autoridades ambientales en Colombia. Este procedimiento se basa en el análisis de la sensibilidad del modelo a cambios en las variables de entrada, a través de las estimaciones en la salida del mismo. En el caso de este trabajo se utiliza el modelo de contaminación atmosférica AERMOD, y se analiza su sensibilidad con base en el contaminante criterio PM10 para el Estudio de Impacto Ambiental de la construcción del proyecto hidroeléctrico El Buey en el Oriente antioqueño, durante el segundo año de la etapa de construcción del proyecto. El análisis se desarrolla con base en el receptor discreto para el que se obtuvieron las mayores concentraciones de PM10 (ESTCA2), luego de aplicar cambios en las variables de entrada meteorológicas (nubosidad, velocidad del viento), de coberturas e inventario de emisiones (contenido de finos en las vías, peso promedio ponderado de los vehículos, humedad de las vías). Los resultados obtenidos sugieren que el modelo presenta mayor sensibilidad en la región de estudio, para las variaciones realizadas en los datos de entrada de velocidad del viento, contenido de finos en las vías y coberturas del proyecto. Donde este último escenario fue el que presentó el mayor sesgo en la concentración de PM10 respecto al escenario de control. Asimismo el análisis sugiere que el modelo tiende a ser más sensible durante el periodo diurno en donde domina la capa de mezcla convectiva, dado que en este mismo periodo se presenta la mayor intensidad en las actividades de construcción del proyecto, sin mencionar las características particulares de la región de estudio.

## **2 Introducción**

La modelación de la calidad del aire es una herramienta fundamental que posibilita la simulación y el pronóstico de la dispersión de contaminantes atmosféricos (UdeC & epa 2015) en escenarios que involucran factores meteorológicos (velocidad de viento, nubosidad, precipitaciones, etc), y en algunas ocasiones, características topográficas y de coberturas del suelo. Por esto, la implementación de estos modelos se ha convertido en una herramienta que permite estudiar el efecto de los contaminantes atmosféricos sobre una región determinada, permitiendo evaluar de forma más acertada el impacto que tienen las diferentes fuentes de emisión (móviles y fijas) sobre la calidad del aire (Fernández & Puliafito, E.,2010).

Dentro de los modelos más implementados para el estudio de la calidad del aire se encuentra AERMOD, desarrollado por el Comité de Mejora del Modelo Regulador de la Agencia Meteorológica Americana y la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (AERMIC), quienes recomiendan su aplicación para el modelado de diferentes tipos de fuentes de emisión (EPA, 2018). Estudios como el desarrollado por Perry et al. (2005) han llevado a cabo una evaluación del desempeño del modelo AERMOD, teniendo en cuenta bases de datos observadas y otros modelos, encontrando un mejor desempeño de AERMOD frente a los otros modelos en la mayoría de los ensayos.

En el caso de Colombia, para los proyectos que requieran licenciamiento ambiental, conforme con los términos de referencia (TdR) de la Autoridad de Licencias Ambientales (ANLA), y según las adaptaciones realizadas por las demás autoridades ambientales que así las adopten y modifiquen, para la elaboración de estudios de impacto ambiental (EIA), en proyectos de construcción y operación de centrales generadoras de energía hidroeléctricas (TdR-ANLA-14), tanto el Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS) como la ANLA, recomiendan el uso de AERMOD para la modelación de la calidad de aire.

Los términos de referencia (TdR) previamente mencionados, plantean la necesidad de realizar un análisis de sensibilidad del modelo frente a sus variables y parámetros de entrada, con el objetivo de definir las bandas de confianza de la simulación. Por lo que, en este estudio se realizará este análisis en el área de influencia del proyecto PCH EL BUEY, para el cual se toma como contaminante criterio el PM<sub>10</sub>, el cual se analiza utilizando el receptor discreto (lugares como escuelas, parques, hospitales etc) que presenta los mayores niveles de concentración predichos por el modelo. Teniendo en cuenta esto, el presente trabajo plantea realizar un análisis de sensibilidad del Modelo de dispersión de Contaminación Atmosférica AERMOD frente a sus condiciones iniciales, considerando la física conceptual y matemática del modelo, con el fin de determinar a qué variables o parámetros de entrada el modelo es más sensible.

### **3 Objetivos**

#### **Objetivo general**

Analizar la sensibilidad del Modelo de dispersión de Contaminación Atmosférica AERMOD frente a sus condiciones iniciales, en el área de influencia del proyecto PCH EL BUEY, el cual se encuentra dentro de la jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional Cornare.

## **Objetivos específicos**

Identificar las variables que podrían generar los cambios más significativos en los datos de salida del modelo AERMOD, a partir de revisión de literatura.

Implementar el modelo AERMOD realizando variación porcentual en los datos de entrada asociados a las variables previamente identificadas.

Analizar la sensibilidad del modelo teniendo en cuenta las variaciones porcentuales realizadas en las variables de entrada y el escenario base (sin modificaciones en las entradas) como referencia, a través de un análisis estadístico.

Discutir los resultados obtenidos teniendo en cuenta los resultados esperados y la física de los procesos asociados.

## **4 Marco Teórico**

### **4.1 Modelo y aplicabilidad**

El modelo de dispersión de contaminantes atmosféricos AERMOD, es un modelo de dispersión gaussiana que permite simular las emisiones de diferentes fuentes (puntuales, de área y de volumen) que se encuentran a nivel del suelo y por encima de este y cómo se dispersan en la atmósfera, teniendo en cuenta ecuaciones que describen el comportamiento turbulento de la capa límite y la influencia topográfica de la zona (EPA, 2018). Así, este modelo representa una herramienta útil para el diagnóstico de la contaminación atmosférica a través de la predicción de niveles de concentración de contaminantes, incorporando las emisiones asociadas a diferentes tipos de fuentes y la dinámica atmosférica (EPA, 2018).

Este modelo cuenta con dos componentes de preprocesamiento de datos. El primero es el Meteorological Data Preprocessor (AERMET), que verifica y distribuye la información asociada a las variables meteorológicas a lo largo de la capa de mezcla, la cual para efectos prácticos se define como aquella capa de la atmósfera en la que tienen lugar los procesos de mezclado y dispersión de los contaminantes a través de mecanismos convectivos (principalmente durante ciclo diurno) o mecánicos (principalmente durante el ciclo nocturno) (Huertas, et al, 2008). Los mecanismos convectivos corresponden a procesos de transporte producidos por el movimiento de las masas de aire originado por diferencias de temperaturas (Alemán, 2011), mientras que los mecánicos son aquellos asociados a la presencia de elementos de rugosidad en superficie (Garín, 1988) tales como obstáculos civiles, terreno irregulares o barreras naturales

que perturban el flujo normal del viento (Jiménez, 2017). El otro preprocesador es el Terrain Preprocessor (AERMAP), que se encarga de procesar las características de terreno, topografía, receptores y mallas de modelamiento (EPA, 2018). Este preprocesador determina las elevaciones de los receptores discretos (lugares como escuelas, parques, hospitales etc) por medio de un modelo de elevación digital. Estos receptores comúnmente corresponden a sitios con alta presencia de personas que se probablemente se vean expuestos a los niveles de contaminación y fuentes de emisión. Las alturas determinadas por el preprocesador posteriormente son utilizadas en el modelo para el cálculo de concentraciones y distribución espacial de contaminantes. Por otra parte, el tipo de cobertura y las variables meteorológicas en la región permiten establecer a través de los preprocesadores meteorológicos AERMET y AERMAP las relaciones y parámetros de uso del suelo (albedo, relación de Bowen, rugosidad de la superficie, y altura de capa de mezcla), necesarios para modelar el comportamiento de los contaminantes en la atmósfera (EPA 2018).

El modelo AERMOD fue desarrollado y calibrado a través de la comparación de sus predicciones de niveles de contaminación con bases de datos en terreno rural (topografía compleja), mostrando resultados aproximados a las observaciones, que respaldan su aplicación en este tipo de escenarios (Perry et al. 2005). Por otra parte, estudios como el de Huertas, & González (2012) cuyo dominio de estudio se encuentra en La Guajira y el de la Universidad Pontificia Bolivariana (2015) con dominio de estudio en el Oriente de Antioquia, muestran la aplicabilidad exitosa del modelo en terreno rural colombiano, con diferentes características topográficas y de uso del suelo. En el caso de áreas urbanas, el modelo también presenta un buen desempeño, como lo muestran Burbano (2018) para el estudio de fuentes de emisión en la ciudad de Bogotá y la evaluación de la calidad del aire en el Valle de Sogamoso realizada por Uribe & Suárez (2009).

A pesar de la aplicabilidad del modelo mostrada en los casos anteriores, es importante mencionar que en la gran mayoría de zonas rurales de Colombia donde se requiere modelar la calidad de aire usando AERMOD, se presenta deficiencia de registros históricos de calidad del aire o de resultados de campañas de monitoreo. Lo que limita la realización de un proceso de calibración, que permita por parte del modelador ajustar parámetros del modelo que minimicen el error en las estimaciones.

Finalmente, es de tener en cuenta, que estudios como el desarrollado por Cordova & Tanrikulu (2004), muestran que las aplicaciones del modelo AERMOD para la determinación de niveles de concentración atmosférica en zonas urbanas y rurales, presentan sensibilidad ante algunas de las variables de entrada y parámetros del modelo, tales como: cobertura de nubes, velocidad de viento, albedo, relación de Bowen, y rugosidad superficial; por lo que realizar un análisis inicial de la sensibilidad del modelo ante dichos datos de entrada es usualmente un paso necesario.

## **4.2 Marco Legal**

El Decreto Único Nacional Reglamentario 1076 de 2015 es una recopilación de la normatividad legal ambiental y vigente de los estudios ambientales entre los cuales se tiene el estudio de impacto ambiental (EIA), que se debe radicar ante la autoridad ambiental competente (Artículos 2.2.2.3.3.1 al 2.2.2.3.3.4) los titulares de los proyectos. Donde las actividades que requieren licencia ambiental que se encuentran en el (Artículo 2.2.2.3.2.1).establecen los proyectos, obras y actividades sujetos a licencia ambiental.

De esta forma, por medio de la Resolución 1519 de 2017 el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible adopta los términos de referencia para la elaboración del Estudio de Impacto Ambiental (EIA) para proyectos de construcción y operación de centrales generadoras de energía hidroeléctrica, identificados con el código TdR-14. Estos términos son aplicables a las autoridades ambientales y a los particulares dentro del trámite de licenciamiento ambiental para la elaboración del EIA de los proyectos de construcción y operación de centrales generadoras de energía hidroeléctrica. La sección 7.7.2 de los TdR-14 exige que para la elaboración del informe de la modelación de dispersión de contaminantes atmosféricos se realice un análisis de sensibilidad frente a las variables y parámetros de entrada del modelo a utilizar, que es precisamente el objetivo del presente estudio.

## **4.3 Limitaciones para la aplicabilidad del modelo**

Es preciso tener en cuenta que para la realización de estudios de impacto ambiental, en especial aquellos que se realizan en terreno rural, en muchas ocasiones no se cuenta con la información pertinente o el volumen de información es insuficiente. Hecho que dificulta o limita el proceso de calibración en la modelación, como lo sugieren Sánchez & Wilcken (2016), quienes han encontrado que trabajar con registros que contengan gran número de datos faltantes no permiten obtener resultados confiables en las estimaciones obtenidas del proceso de modelado.

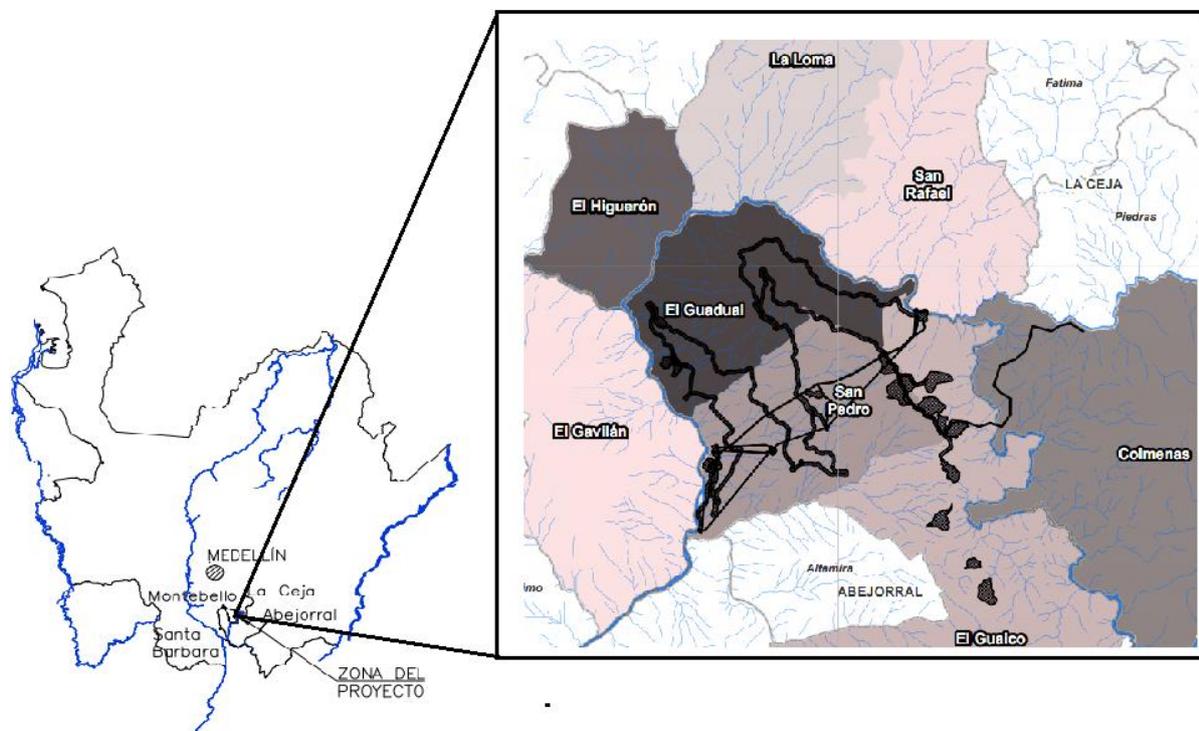
En el caso de este Trabajo, dentro de la información solicitada a Cornare, se solicitó: inventarios de emisiones de las fuentes que se encuentran dentro del área de influencia del proyecto, y resultados de los monitoreos de calidad de aire para contaminantes criterios establecidos dentro de la normatividad de calidad de aire (Resolución N° 2254, 2017), con el objetivo de obtener datos observados que permitieran realizar la calibración y validación del modelo. La información suministrada por la autoridad ambiental no contenía dicha información; dado que dentro del área de influencia del

proyecto no se han realizado campañas de monitoreo, ni existen estaciones de calidad de aire cercanas. Por lo que no fue posible llevar a cabo el proceso de calibración del modelo AERMOD para predecir el impacto del proyecto. Por tal razón, el análisis de sensibilidad del modelo cobra gran relevancia, puesto que al no estar calibrado, se podrán sacar conclusiones más robustas a partir de diferentes simulaciones que muestran la sensibilidad de los resultados ante cambios en las condiciones iniciales.

## 5 Metodología

### 5.1 Área de estudio

El Proyecto Hidroeléctrico El Buey (PHB), se encuentra ubicado en los municipios de Abejorral y La Ceja, en la subregión del Oriente perteneciente al departamento de Antioquia, dentro de la jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional de las Cuencas de los Ríos Negro y Nare (Cornare). En la Figura 1 se muestra la ubicación del proyecto en un contexto departamental y se resaltan las veredas que se encuentran dentro del área de influencia del proyecto, incluyendo las obras de construcción del mismo.



**Figura 1.** Ubicación geográfica del proyecto (Oriente antioqueño), veredas dentro del área de influencia del proyecto, obras de construcción (líneas y polígonos de color negro)

## **5.2 Configuración del modelo**

El modelo se configuró con base en las condiciones de la zona de estudio en un área de 25 km<sup>2</sup>, con centro en las Coordenadas WGS84 5°56'00"N, 75°26'00"W en La Ceja - Antioquia, además se empleó una grilla que incluye los receptores discretos (ver Figura 2). El modelo se configuró en forma estándar teniendo en cuenta la concentración de fondo (o concentración base) en la zona donde se construirá el proyecto, para producir el percentil 99 de cada uno de los tiempos de exposición requeridos por la normatividad vigente (Resolución N° 2254, 2017) para el contaminante criterio PM10. Donde para un promedio de 24 horas y en una distribución de 365 días el valor seleccionado por el percentil 99 corresponde al cuarto valor más alto, considerando dicho estadístico como una medida de posición (Guerra, 2015).

El modelo se configura para despreciar los efectos de deposición seca y húmeda, dado que esta depende esencialmente de propiedades físicas, químicas y termodinámicas de las partículas, y del tipo de fuente de emisión (Viana, 2003); y esta es información con la que no se cuenta para el área de estudio. Además, se tratan los vientos superficiales y/o condiciones de atmósfera estable según la opción ADJ\_U\*, que corresponde a un factor de corrección que reduce la subestimación de la velocidad de fricción en AERMET y la opción LOWWIND que reduce la sobreestimación de los niveles de concentración predichos con los parámetros por defecto (Qian, & Venkatram, 2011). Asimismo, se configura el modelo para predecir el número de ocasiones que se podría presentar sobrepaso a la norma diaria de PM10, con el fin de evaluar el cumplimiento de dicha norma en localidades cercanas al área del proyecto.

## **5.3 Bases de datos utilizadas**

Las bases de datos utilizadas corresponden a:

- Simulaciones WRF: Simulaciones realizadas por la empresa METEOCOLOMBIA S.A.S a través del modelo de pronóstico del tiempo WRF, con una resolución de 6km. En el caso de este estudio se solicitan datos para el periodo correspondiente al año 2017 en Coordenadas WGS84 5°56'00"N, 75°26'00"W en La Ceja - Antioquia. Este punto de malla del modelo WRF que se encuentra a 3.7 km de la zona de obras y se consideró representativo de la meteorología de la zona, ya que se encuentra dentro del área de influencia del proyecto. La empresa METEOCOLOMBIA S.A.S se dedica a la asesoría en el componente atmosférico y se recurre a sus servicios dada la falta de información de

las variables meteorológicas necesarias para correr el modelo AERMOD en el área de influencia del proyecto.

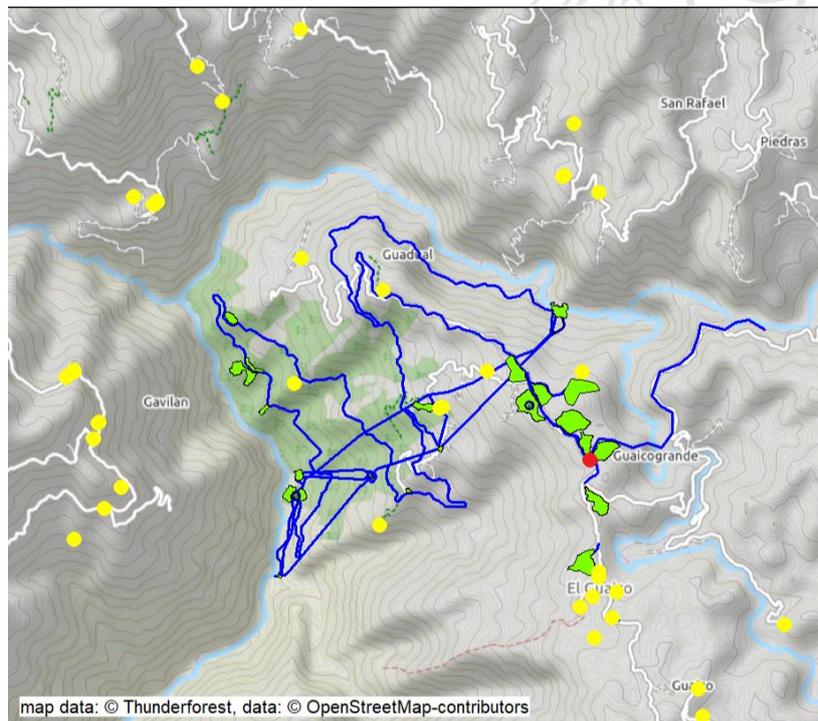
- 30-Meter SRTM: es la Misión Topográfica Shuttle Radar, también conocido como SRTM, desarrollada por la NASA y otros organismos como la Agencia Nacional de Inteligencia Geoespacial. El objetivo principal de esta misión es el desarrollo de Modelos Digitales de Elevación (Kobrick, 2006), o DEM, los cuales son una representación continua de una superficie referida a datos de elevación vertical. Los DEMs son utilizados por AERMAP para establecer la elevación de las fuentes de emisión y de receptores de interés.
- Global Land Cover Characterization (GLCC): es un proyecto desarrollado por el Servicio Geológico de Los Estados Unidos que busca clasificar la cobertura terrestre global no supervisada a 1 km de resolución, las clasificaciones de GLCC consisten en imágenes ráster que contienen valores de número de clase, asociados al tipo de cobertura en cada píxel, utilizando un radiómetro avanzado de alta resolución (Brown, 1993). Donde para el caso de Colombia y específicamente para el proyecto se usaron los datos de clasificación de uso del Suelo y cobertura para América del Sur en categorías NLCD 92.
- HVM Ingenieros Ltda: es una empresa de ingeniería colombiana que presta servicios de consultoría, interventoría o supervisión en múltiples sectores. De ella se obtiene la ubicación de las posibles fuentes de emisión como: Zonas industriales, Depósitos, ubicación de zona de captación y descarga para el proyecto hidroeléctrico. Además de la información relacionada con el proceso constructivo y la operación de las distintas fuentes de emisión atmosférica.
- Ortofoto de la zona del proyecto: se obtuvieron ortofotografías a partir de reconocimiento en campo para definir las coberturas asociadas a la zona donde se realizará proyecto, las cuales se obtienen mediante un conjunto de imágenes aéreas que han sido corregidas para representar una proyección ortogonal y que por lo tanto, permiten caracterizar los diferentes tipos de coberturas y usos del suelo.

#### **5.4 Escenario de Control**

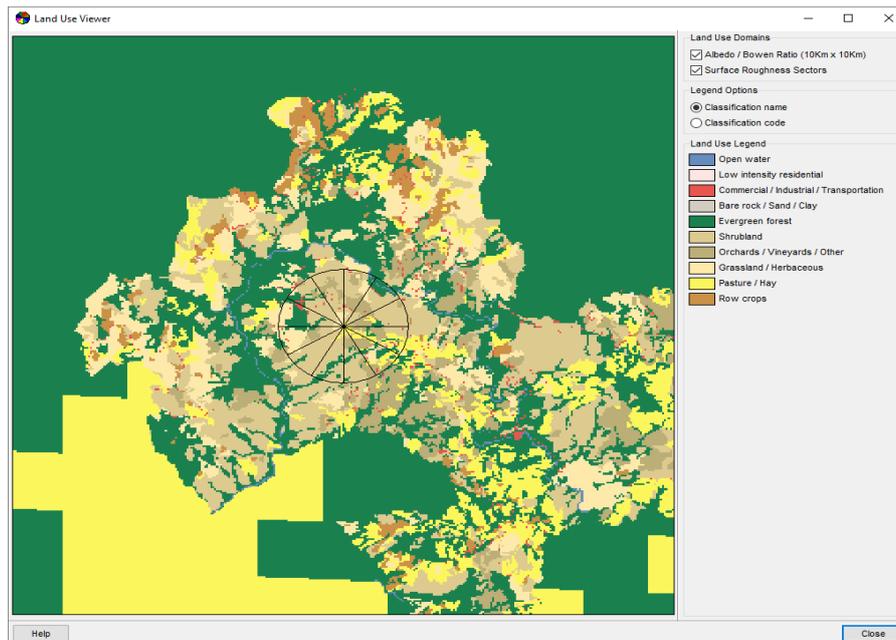
Este escenario corresponde la simulación de un año (8760 datos horarios) realizada con la configuración del modelo descrita en la sección 5.4 sin aplicar ninguna modificación a los datos de entrada. Estos últimos corresponden a datos de meteorología de la base de datos del modelo WRF, fuentes de emisión durante la fase de construcción del proyecto (fuentes de área, volumétricas), topografía del terreno (DEM) y coberturas

del proyecto obtenidas a través de ortofotos acopladas al modelo de uso del suelo GLCC 1992 (Ver Figura 3). Este escenario representa el periodo de construcción donde tiene mayor intensidad las actividades a realizar durante la etapa de construcción del proyecto (el segundo año de tres, donde este último periodo corresponde al tiempo total de construcción); y para su análisis se elige el receptor discreto (ESTCA2) que presenta los mayores niveles de concentración para el dominio de modelación mostrado en la Figura 2.

Es importante mencionar que para el análisis de sensibilidad que se describe a continuación se eligió el PM10 como contaminante criterio, por ser el que se prevé según la naturaleza de las fuentes de emisión (vías sin pavimentar, depósitos y zonas industriales) como el más afectado, puesto que las actividades de la etapa de construcción se asocian a procesos de resuspensión que posicionan al PM10 como el contaminante de mayor generación durante la etapa de construcción del proyecto.



**Figura 2** Receptores discretos en el dominio de modelación (Amarillos), receptor con mayores concentraciones ESTCA2 (Punto rojo), Depósitos y zonas industriales (Polígonos verdes), Túnel y vías (Líneas azules)



**Figura 3** Coberturas del proyecto a partir de ortofoto acopladas a coberturas del modelo de uso del suelo GLCC 1992

## 5.5 Análisis de sensibilidad

Para llevar a cabo el análisis de sensibilidad propuesto en el presente Trabajo, inicialmente se identifican las variables que se han reportado como las más sensibles en la implementación del modelo AERMOD en trabajos como los desarrollados por Long, Cordova, & Tanrikulu (2004) y Karvounis (2007). Además de aquellas variables seleccionadas por criterio de modelador. A continuación se presentan los porcentajes y proporciones de cambio que se aplican a las variables de entrada del modelo.

## 5.6 Simulaciones: variaciones de datos de entrada

A continuación se describen cada una de las variables de entrada del modelo AERMOD por componentes: meteorológico, uso del suelo e inventario de emisiones. En tablas se reportan los cambios porcentuales que se realizan a los registros de cada una de las variables respecto a los datos de entrada utilizados en el escenario de control. Es de tener en cuenta que cada cambio individual representa una simulación independiente, puesto que el objetivo es analizar los cambios en las concentraciones de PM10 asociados al cambio particular realizado respecto al escenario de control. Los cambios por variables son:

1) **Meteorológicos:** El modelo cuenta con los archivos Surface Met Data y Upper Air Met Data, los cuales corresponden a los formatos de entrada

donde se registran las variables meteorológicas de las cuales solo se modificarán la velocidad de viento y cobertura de nubes. El primer archivo comprende los datos horarios a nivel de superficie, mientras que el segundo comprende la información horaria en diferentes niveles verticales.

Para evaluar la sensibilidad del modelo ante estas variables se realizaron simulaciones realizando cambios porcentuales en los datos de cobertura de nubes y velocidad de viento como se indica en la Tabla 1, para obtener un total de 8 simulaciones.

**Tabla 1** Cambio porcentual para datos horarios de variables meteorológicas

Variables	Escenarios			
	Porcentajes de variación			
Cobertura de nubes (décimas)	+2 decimas	+1 decimas	-1 decimas	-2 decimas
Velocidad de viento (m/s)	+10%	+5%	-5%	-10%

2) **Uso del suelo:** se definen parámetros como el albedo, la relación de bowen y la rugosidad superficial, a partir de las coberturas de la zona donde se construirá el proyecto.

Para el análisis de sensibilidad en la cobertura, se tomó la caracterización de uso de suelo obtenida por modelo GLCC en categorías NLCD 92 para Suramérica (ver Figura 4), en el dominio de modelación con una resolución de un kilómetro. En este caso se utilizan directamente estas coberturas (Figura 3), a diferencia de la simulación de control en la que se acoplaron estos datos con las coberturas del proyecto obtenidas a partir de la caracterización generada por medio de ortofotos (Figura 1-3).



**Figura 4** Coberturas de uso del suelo modelo GLCC 1992

3) **Inventario de emisiones:** se definen variables típicas como el contenido de finos de las vías, contenido de humedad de las vías y, peso promedio ponderado de vehículos.

Para el análisis de sensibilidad se modificaron los factores de emisiones de las fuentes, partiendo de la modificación porcentual en el porcentaje de finos en las vías (SVIA), peso promedio ponderado de los vehículos (AW) y la humedad de las vías (M) como se indica en la Tabla 2. Modificando así el proceso de resuspensión de los contaminantes para un total de 12 simulaciones.

**Tabla 2** Cambio porcentual en los factores de emisión, porcentaje de finos en las vías (SVIA), peso promedio ponderado de los vehículos (AW) y la humedad de las vías (M)

Variables	Escenarios			
	Porcentajes de variación			
SVIA (%)	+10%	+5%	-5%	-10%
AW(ton)	+10%	+5%	-5%	-10%
M (%)	+10%	+5%	-5%	-10%

### 5.7 Tipos de resultados del modelo

Los resultados obtenidos de las 21 simulaciones anteriores son de dos tipos; los asociados a concentración en receptores discretos y los que representan distribuciones espacializadas conocidas como isopletas (líneas de igual concentración). Estos se utilizan para predecir los niveles de concentración y espacializar el impacto asociado a la construcción del proyecto, respectivamente.

### 5.8 Análisis estadístico

La sensibilidad se analiza tomando el receptor discreto ESTCA2 y el escenario de control. Los estadísticos utilizados y sus representaciones gráficas se describen a continuación, en términos de: las estimaciones del escenario de control, representadas como  $O_i$  (i-ésimo valor estimado en el escenario de control) y las estimaciones en los escenarios con variaciones porcentuales, representadas como  $M_i$  (i-ésimo valor modelado), para un total de  $n$  valores correspondientes al año de modelación.

Estos estadísticos y gráficos se calculan para analizar los sesgos de simulaciones en diferentes escenarios respecto al escenario de control. La herramienta utilizada para llevar a cabo su cálculo es el paquete desarrollado en el King's College London, disponible para el software R y desarrollado con el propósito de analizar datos de calidad del aire o, en términos más generales, datos de composición atmosférica. A continuación se describen cada uno de las medidas de error calculadas para caracterizar el sesgo de los escenarios con variaciones porcentuales respecto al control:

- **Sesgo medio (MB)**

Representa la diferencia entre cada uno de los  $O_i$  (estimaciones control) y los  $M_i$ , dividido el total de datos. Mostrando en buena medida de si el modelo subestima o sobreestima las observaciones ante un escenario determinado. Así:

$$MB = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^N M_i - O_i$$

Fuente (Carslaw D.C, 2015)

- **Error cuadrático medio, RMSE**

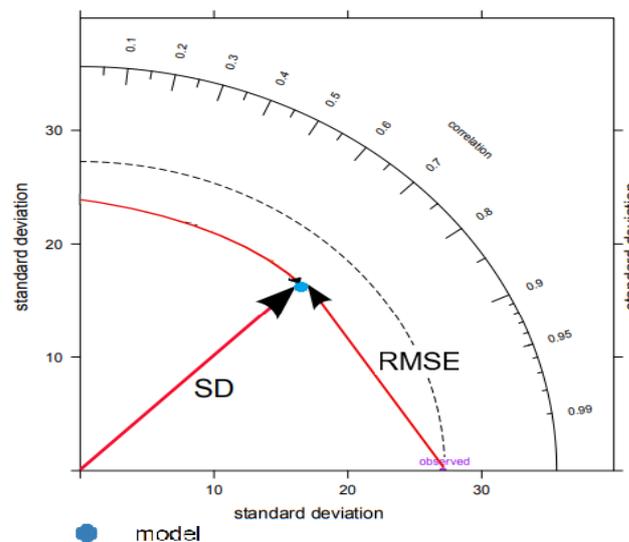
Estadístico utilizado para estimar la medida promedio de las diferencias entre los  $O_i$  y  $M_i$ . Así:

$$RMSE = \left( \frac{\sum_{i=1}^n (M_i - O_i)^2}{n} \right)^{1/2}$$

Fuente (Carslaw D.C, 2015)

- **Diagrama de Taylor**

Este diagrama se construye con la finalidad de resumir y analizar de una forma integral algunas de las medidas anteriores (ver Figura 1-6 ), permitiendo evaluar el rendimiento de cada escenario respecto a los datos del escenario de control, al utilizar la ley de cosenos para mostrar de forma gráfica tres de los estadísticos más representativos para evaluar la precisión y exactitud de los modelos, en dos dimensiones.



**Figura 5** Diagrama de Taylor, relaciona la desviación estándar (SD), el error cuadrático medio (RMSE) y la correlación entre las simulaciones (punto azul) y el control (observed).

Fuente: (Carslaw D.C, 2015), modificado por SAG 2019

El diagrama tiene en cuenta la desviación estándar (SD), medida a partir de la distancia radial desde el origen hasta donde se encuentra el punto en el cual está representado el modelo, el error cuadrático medio (RMSE), medido desde el punto observado (control) como centro radial hasta el punto donde se ubica el modelo, y por último el coeficiente de correlación de Pearson ( $r$ ) medido en la escala representada en la circunferencia con centro en el origen, de tal forma que entre más cercano se encuentre el modelo al eje X (desviación estándar), mayor será dicho coeficiente.

## 6 Resultados y análisis

Los resultados obtenidos se presentan a continuación y se analizan teniendo en cuenta la física de la atmósfera y las características del terreno respecto a la variación inicial realizada en las entradas del modelo. El análisis se enfoca en los resultados obtenidos para las concentraciones horarias de PM10, puesto se espera sea el contaminante que más se genere durante la etapa de construcción de proyecto.

A continuación se evalúan los cambios en concentraciones de PM10 en las simulaciones con variaciones porcentuales en las variables de entradas respecto a los resultados obtenidos en el escenario de control.

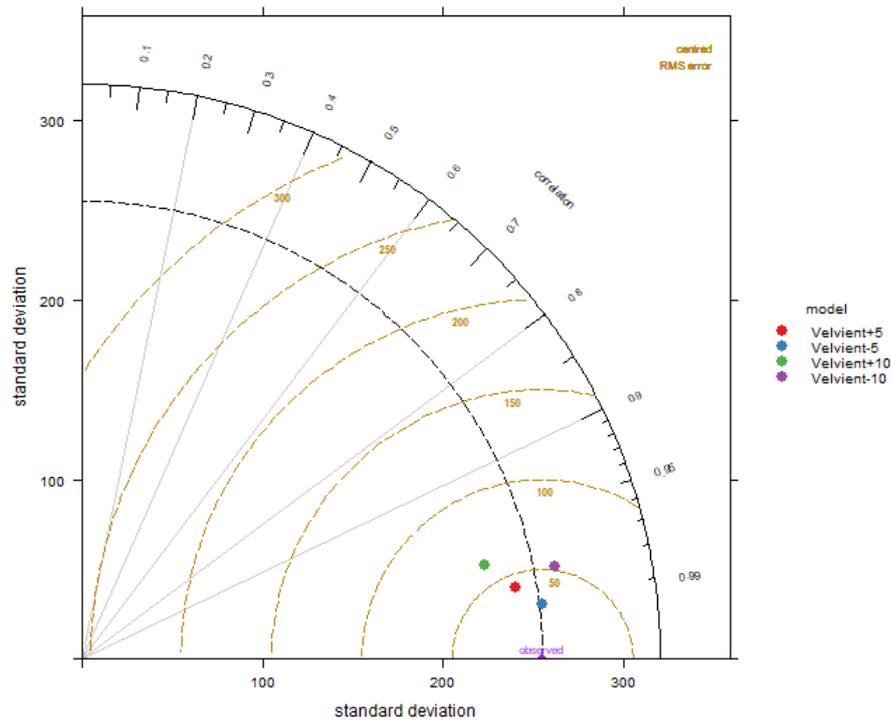
### 6.1 Simulaciones con variaciones en la velocidad del viento

La Tabla 3 presenta los estadísticos obtenidos para las simulaciones asociadas a diferentes cambios porcentuales (Ver Tabla 3) en los registros de velocidad del viento. En la tabla se observa que el MB presenta cambios importantes entre simulaciones, mostrando que el modelo tiende a ser más sensible a los aumentos de velocidad del viento que a la disminución de la misma. Aumentos de un 10% en la velocidad del viento se asocian a una disminución promedio de  $12 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en concentraciones horarias de PM10 de la simulación, respecto al control, mientras que disminuciones de un 10% en esta variable se asocian a aumentos promedios de concentraciones de PM10 de tan solo  $3 \mu\text{g}/\text{m}^3$  de la simulación respecto al control. Estas variaciones son acordes a la física de la atmósfera, puesto que mayores velocidades producen mayor turbulencia, transporte hacia lugares más lejanos y por ende concentraciones menores. El RMSE, por otra parte, muestra que el modelo presenta una mayor amplitud de las oscilaciones para aumentos de la velocidad del viento, lo que implica una menor precisión del modelo respecto al escenario de control cuando se sobreestima la magnitud en la velocidad del viento que cuando se subestima.

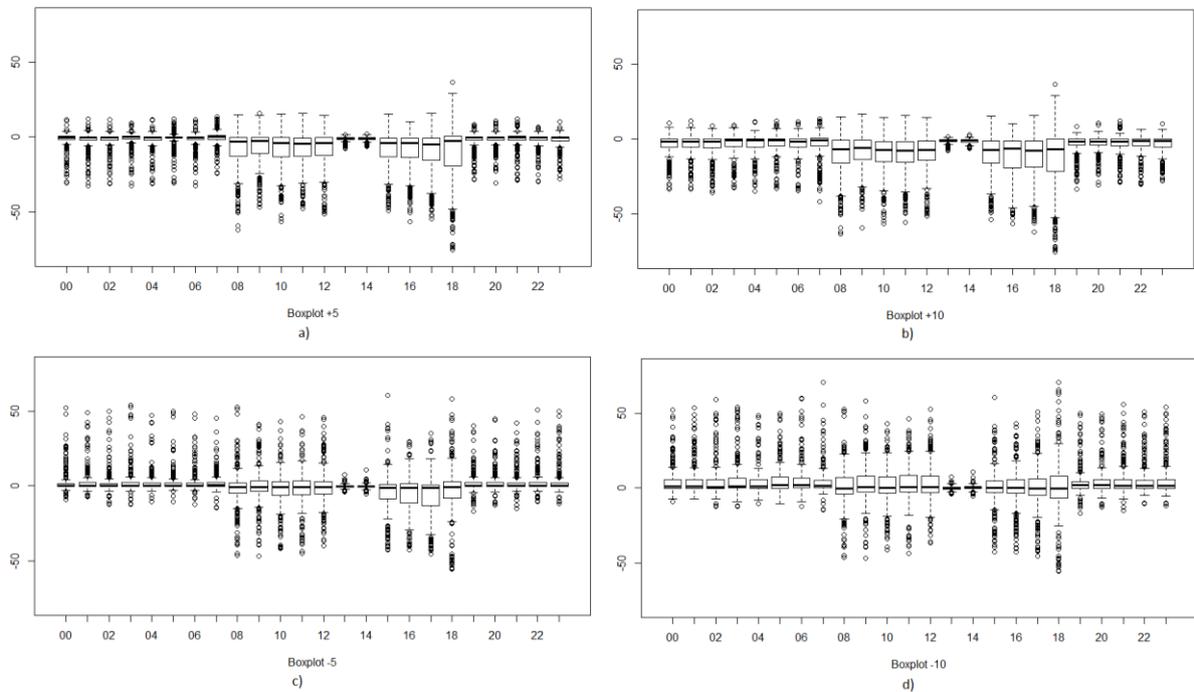
**Tabla 3** Estadísticos para escenarios de velocidad del viento respecto al escenario de control

Variación	MB( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	RMSE( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
Velvient+10%	-12.28	62.72
Velvient+5%	-8.21	43.19
Velvient-5%	-1.111	30.95
Velvient-10%	3.00	51.96

Para observar los sesgos de forma gráfica entre las simulaciones y el control se construye un diagrama de Taylor (Figura 6). Este diagrama muestra que no tiene el mismo efecto en las simulaciones aumentar (puntos rojo y verde) o disminuir (puntos azul y violeta) la velocidad del viento en la misma proporción, es decir, que el modelo no responde de manera simétrica a los cambios realizados en estas variables, lo que es consistente con los resultados mostrados en la Tabla 3. Resultados que sugieren una mayor sensibilidad del modelo en la región de estudio ante la sobreestimación de la velocidad del viento.



**Figura 6** Diagrama de Taylor para el escenario de control (observed) vs escenarios de velocidad del viento (model) con variaciones del +5% (punto rojo), -5% (punto azul), +10% (punto verde) y -10% (punto violeta).



**Figura 7** Diagrama de cajas y bigotes para las diferencias porcentuales de concentraciones horarias de PM10 entre las estimaciones del escenario de control y las estimaciones de los escenarios de velocidad del viento con variaciones del (a) +5%, (b) -5%, (c) +10% y (d) -10%

Por otro lado en la Figura 7 se muestra el diagrama de cajas y bigotes para las diferencias porcentuales entre los estimados de PM10 del escenario de control y los escenarios asociados a variaciones porcentuales de velocidad de viento. En esta figura, se observa que en general las concentraciones de PM10 tienen a disminuir respecto al control cuando aumenta la velocidad del viento. También se observa una mayor variación en las distribuciones de los datos durante el ciclo diurno entre las 8-12 am y las 2-6 pm, lo cual se puede asociar los efectos dominantes de la capa de mezcla convectiva y la mayor intensidad de actividades de construcción durante ese periodo del día. En el caso de los valores atípicos se observa que para escenarios de aumento de velocidad del viento (a y b), la mayoría de ellos corresponden a diferencias negativas, que sugieren una subestimación del modelo respecto a lo estimado por el control, mientras que para los escenarios de disminución de velocidad del viento (b y c) la mayor parte de los valores atípicos corresponden a diferencias positivas.

Así mismo, las menores variaciones en las distribuciones de diferencias se presentan durante la predominancia de la capa de mezcla mecánica entre las 18 y 6 am. Es importante mencionar que entre las 1-2 pm la distribución de las diferencias se encuentra alrededor de cero, lo que podría asociarse a que durante este periodo se suspenden las actividades de construcción y los principales factores que aportan a las niveles de concentración son los efectos erosivos naturales. Es preciso notar que a pesar de la suspensión de las actividades a las 12 pm, el efecto en las concentraciones se percibe a partir de la siguiente hora, resultado que puede estar asociado a la velocidad de dispersión de los contaminantes.

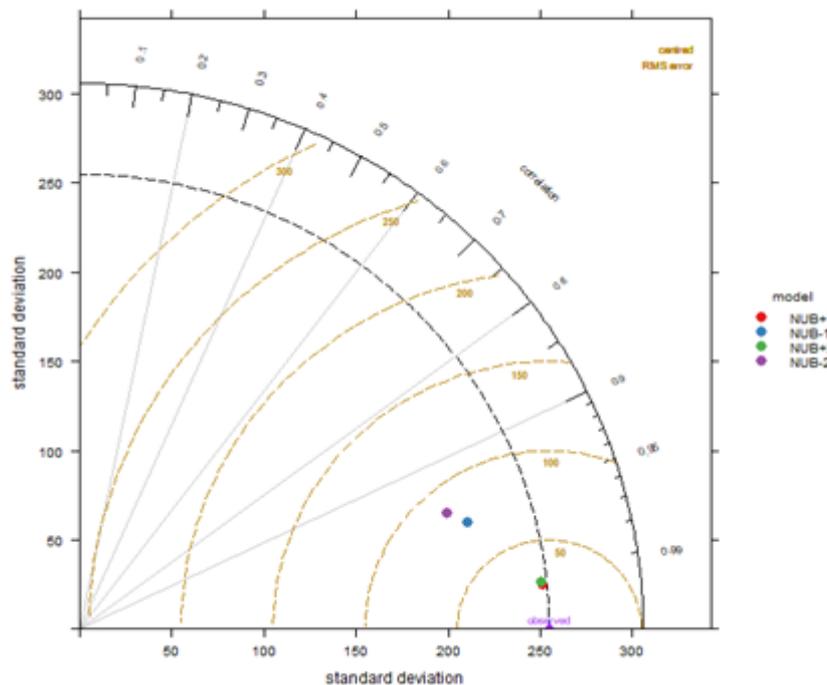
## **6.2 Simulaciones con variaciones en la nubosidad**

En la Tabla 4 se muestran las medidas estadísticas de sesgo calculadas para las simulaciones de nubosidad presentadas en la Tabla 1. En la Tabla 4 se observa que el MB presenta cambios importantes entre simulaciones, mostrando que el modelo tiende a ser más sensible a las disminuciones de nubosidad que a los aumentos de la misma. Disminuciones de nubosidad en 2 décimas se asocian a una disminución promedio de los valores de concentración de PM10 en  $11 \mu\text{mg}/\text{m}^3$ , mientras que para incrementos de 2 décimas las disminuciones son tan solo en  $5 \mu\text{mg}/\text{m}^3$  de la simulación respecto al control. Es importante notar que para todos los escenarios de variación de la nubosidad se generan disminuciones en los niveles de concentración respecto al escenario de control. Lo que se puede asociar a que estos cambios en nubosidad no son tan determinantes para la región de estudio, dado que si bien de acuerdo a la física atmosférica se esperarían menores niveles de concentración cuando existen aumentos en la nubosidad, es decir para el escenario NUB+1 y NUB+2 debido a la menor radiación incidente en la superficie; para escenarios como NUB-1 y NUB-2 se esperarían menores niveles de concentración. El RMSE, por otra parte, muestra que el modelo presenta oscilaciones mayores para disminuciones de la nubosidad, lo que implica una menor precisión del modelo respecto al

escenario de control, ante subestimaciones que ante sobreestimaciones de esta variable.

**Tabla 4** Estadísticos para escenarios de nubosidad respecto al escenario de control

Variación	MB( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	RMSE( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
NUB+2	-4.66	27.19
NUB+1	-4.58	25.78
NUB-1	-9.96	75.28
NUB-2	-11.42	85.98

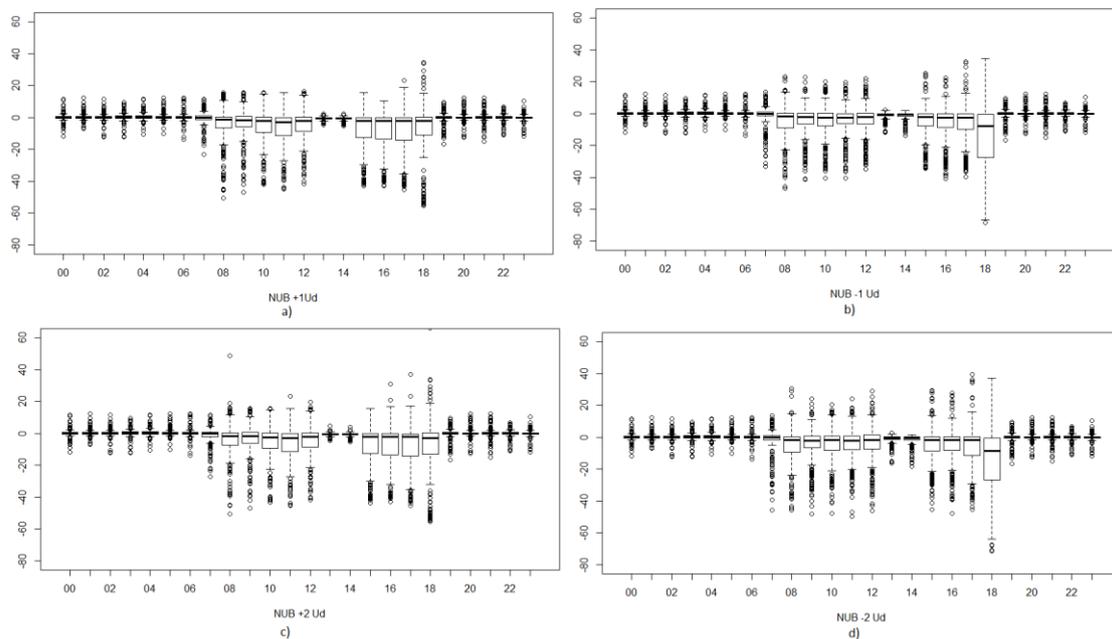


**Figura 8** Diagrama de Taylor para escenario de control (observed) vs escenarios de nubosidad con variaciones de +1 décimas (punto rojo), -1 décimas (punto azul), +2 décimas (punto verde) y -2 décimas (punto violeta).

Para observar los sesgos de forma gráfica entre las simulaciones y el control se construye un diagramas de Taylor Figura 8, el cual es consistente con lo con los resultados mostrados en la Tabla 4, mostrando disminuciones en los estimados de PM10 de todos escenarios respecto al escenario de control. Lo que sugiere que el modelo no responde de forma simétrica a los cambios en

esta variable. Además, el diagrama sugiere sesgos mucho mayores ante la subestimación de los datos de nubosidad (puntos azul y violeta) que ante la sobrestimación (puntos rojo y verde) de los mismos.

Las variaciones horarias porcentuales de las diferencias de las concentraciones de PM10 se presentan en diagramas de caja y bigotes en la Figura 9. En esta figura, se observa que para todos los escenarios de nubosidad analizados, aproximadamente el 75% de los datos presentan disminución en las concentraciones de PM10 respecto al escenario de control. También se observa una mayor variación en las distribuciones de los datos durante el ciclo diurno entre las 8-12 am y las 2-6 pm, lo cual se puede asociar los efectos dominantes de la capa de mezcla convectiva y la mayor intensidad de actividades de construcción.



**Figura 9** Diagrama de cajas y bigotes para las diferencias porcentuales de concentraciones horarias de PM10 entre las estimaciones del escenario de control y las estimaciones de los escenarios de nubosidad con variaciones de (a) +1 décimas, (b) -1 décimas, (c) +2 décimas y (d) -2 décimas

### 6.3 Simulación de cambio en las coberturas

Para el análisis de sensibilidad en la cobertura, se compara la simulación que utiliza las coberturas del modelo GLCC con la simulación de control. En la Figura 4 se muestra el archivo ráster con la cobertura utilizada donde domina la capa de bosque.

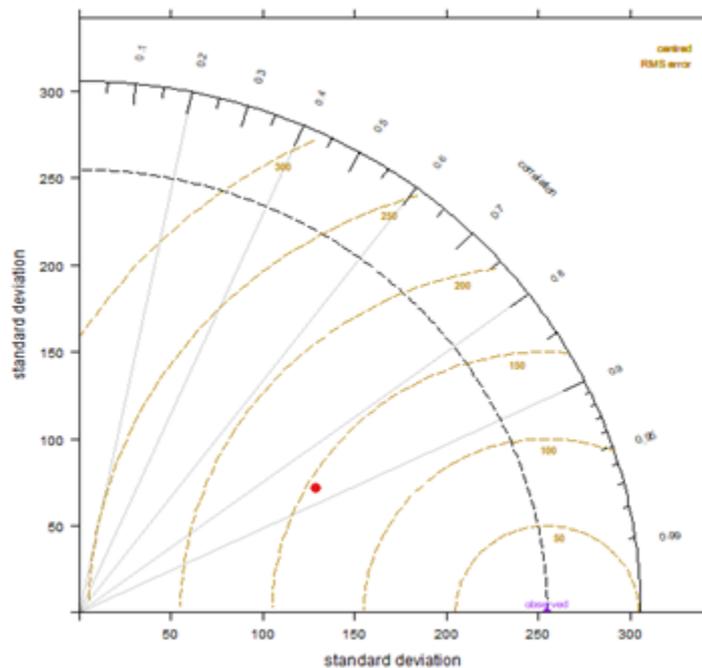
En la Tabla 5 se muestran los estadísticos obtenidos para el cambio en la cobertura del terreno. El MB sugiere que el modelo tiende a subestimar las concentraciones de PM10 cuando aumenta la cobertura boscosa, en un promedio de  $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , siendo esta la mayor variación registrada en dicho estadístico entre las 21 simulaciones realizadas. Este resultado se podría

asociar al incremento de la rugosidad superficial que induce un mayor desarrollo de la capa límite, que favorece una mayor dispersión de contaminantes. Así, la amplitud de las oscilaciones registradas por el RMSE ( $147\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) muestra un sesgo considerable de los datos de este escenario de coberturas respecto al escenario de control.

**Tabla 5** Estadísticos para escenario de cobertura GLCC92 respecto al escenario de control

Variación	MB( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	RMSE( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
COB1	-30.47	147.85

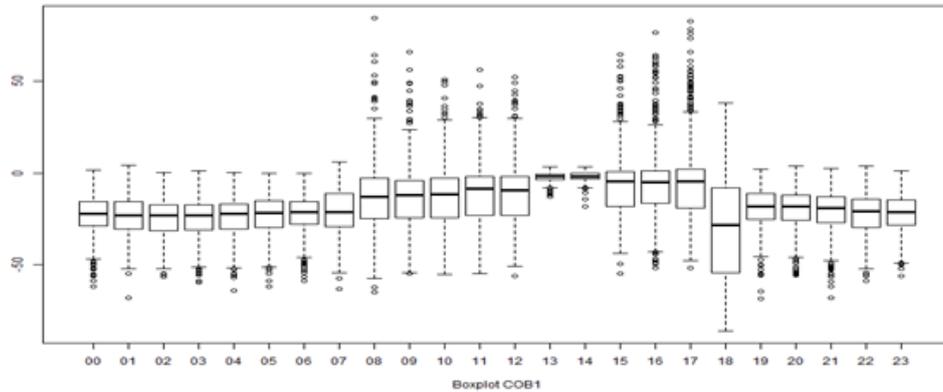
Por otra parte, el diagrama de Taylor presentado en la Figura 10 muestra una considerable disminución de las concentraciones de PM10 para escenario de cobertura GLCC92 (punto rojo) respecto al escenario de control. Lo que sugiere que se debe ser cuidadoso al incluir coberturas no realistas que favorezcan el desarrollo de la capa límite, puesto que las variaciones en los resultados del modelo tienden a ser considerables.



**Figura 10** Diagrama de Taylor para escenario cobertura GLCC92 (punto rojo) vs escenario de control (observed)

Las variaciones horarias porcentuales en las diferencias del escenario de coberturas respecto al control se presentan en el diagrama de cajas y bigotes de la Figura 11. En la Figura 11, se observa que para casi en todas las

horas se subestiman las concentraciones de PM10 respecto al escenario de control. Estos resultados se presentan tanto para las horas donde domina la capa de mezcla convectiva (8-6pm) como para aquellas donde prima la capa de mezcla mecánica (6 pm- 7am). Es importante mencionar que en el caso de los valores atípicos se observa que para el escenario de cobertura la mayoría de ellos corresponden a diferencias positivas de hasta más del 50%.



**Figura 11** Diagrama de cajas y bigotes para diferencias de concentraciones horarias porcentuales de PM10 obtenidas con el escenario de cobertura GLCC92 y el escenario de control

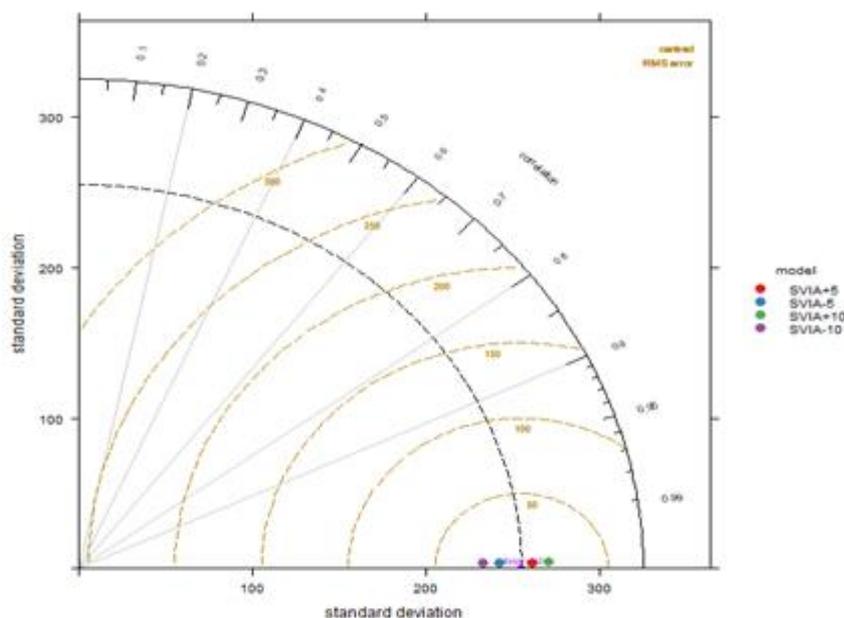
#### 6.4 Simulaciones con variaciones en el porcentaje de finos en vías (SVIA)

La Tabla 6 presenta los estadísticos obtenidos de la comparación de las simulaciones asociadas a cambios en el porcentaje de finos en las vías y el escenario de control. Los valores de MB sugieren que el modelo tiende a ser más sensible cuando se producen disminuciones en el contenido finos, que cuando se producen aumentos en los mismos; dado que al aumentar en 10% el contenido de finos las concentraciones solo incrementan  $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , mientras que al disminuir la variable un 10% el modelo disminuye las concentraciones en  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  respecto al control. Estos resultados son acordes a la física atmosférica considerando que los incrementos de esta variable aumentan la emisión por resuspensión. Por otro lado el RMSE muestra que la distribución de los datos para disminución de SVIA presenta una mayor variabilidad en comparación con los incrementos en esta cantidad.

**Tabla 6** Estadísticos para cada uno de los escenarios de SVIA respecto al escenario de control.

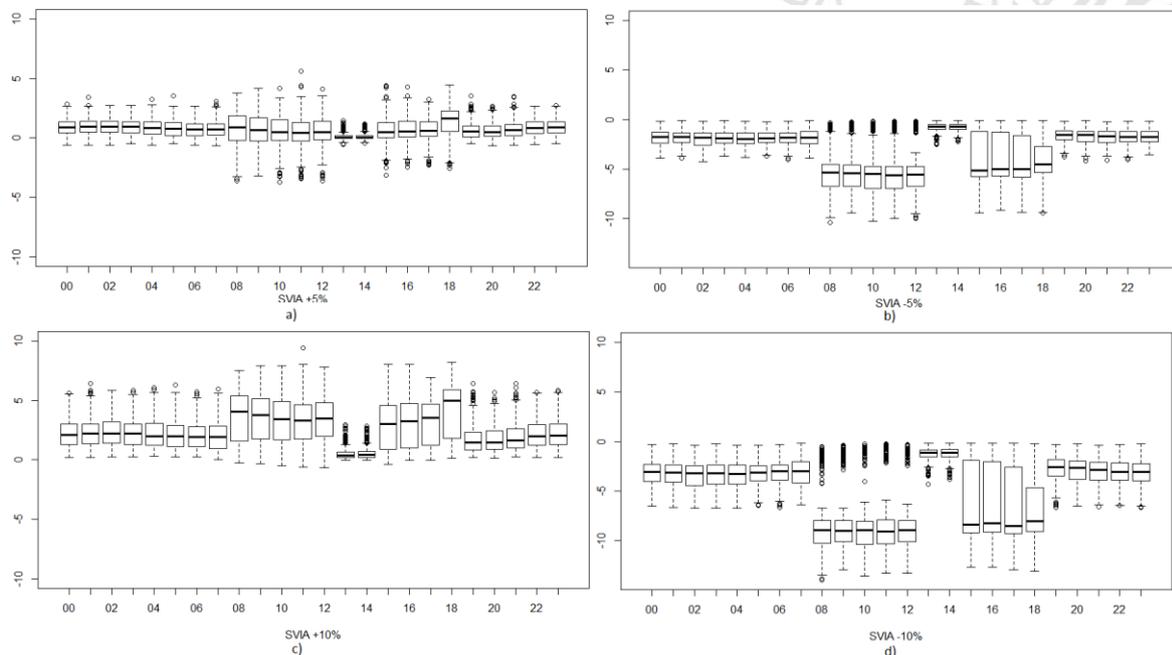
Variación	FAC2	MB( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	RMSE( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
SVIA+10%	1	5.24	17.25
SVIA+5%	1	1.52	7.75
SVIA-5%	1	-6.03	14.48
SVIA-10%	1	-9.87	24.70

Para observar los sesgos de forma gráfica entre las simulaciones y el escenario de control se construye un diagrama de Taylor mostrado en la Figura 12. Este diagrama muestra que no tiene el mismo efecto en las simulaciones aumentar (puntos rojo y verde) que disminuir (puntos azul y violeta) el SVIA en la misma proporción, es decir, que el modelo no responde de manera simétrica a los cambios realizados en esta variable, lo que es consistente con los resultados mostrados en la Tabla 1-6. Resultados que sugieren una mayor sensibilidad del modelo en la región de estudio ante la subestimación del porcentaje de finos.



**Figura 12** Diagrama de Taylor para el escenario de control (observed) vs escenarios de porcentaje de finos SVIA (modelo) con variaciones del +5% (punto rojo), -5% (punto azul), +10% (punto verde) y -10% (punto violeta).

En la Figura 13 se muestra el diagrama de cajas y bigotes para las diferencias porcentuales entre los estimados de PM10 del escenario de control y los escenarios asociados a variaciones porcentuales de SVIA. En esta figura se observa que en general las concentraciones de PM10 tienden a disminuir respecto al escenario de control cuando disminuye el SVIA ( b y d) y a aumentar cuando se aumenta el SVIA(a y c). Por otro lado, los valores atípicos muestran que para los escenarios de aumentos (a y c) y disminuciones (b y d) en el porcentaje de finos, la mayoría de ellos corresponden a diferencias cercanas a cero.



**Figura 13** Diagrama de cajas y bigotes para las diferencias porcentuales de concentraciones horarias de PM10 entre las estimaciones del escenario de control y las estimaciones de los escenarios de SVIA con variaciones del (a) +5%, (b) -5%, (c) +10% y (d) -10%

### 6.5 Simulaciones con variaciones en el peso promedio ponderado de los vehículos (AW)

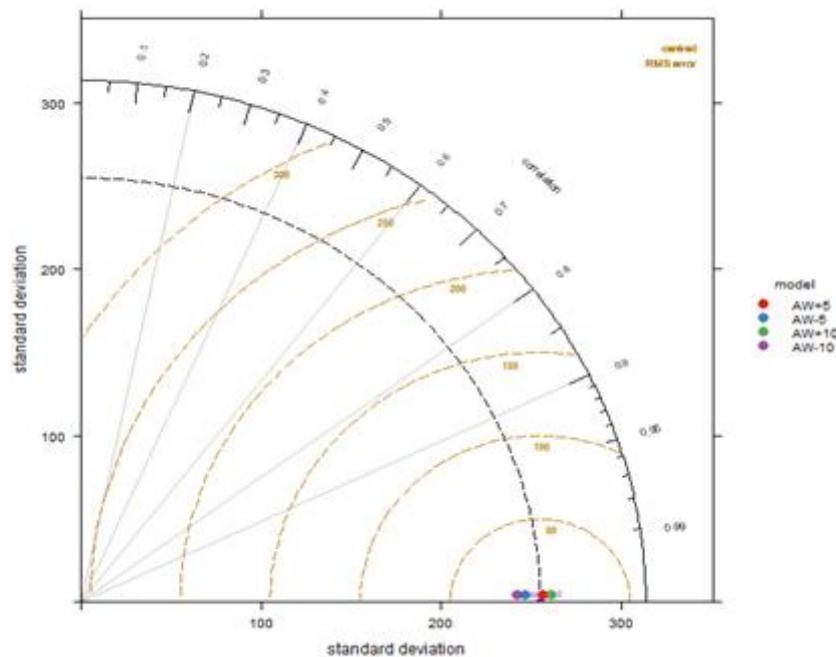
En la Tabla 7 se muestran los estadísticos obtenidos para las variaciones realizadas en AW, en la tabla se observa que el MB obtenido sugiere que el modelo tiende a ser más sensible a las disminuciones del AW que incrementos en el mismo, dado que para aumentos del 10% las concentraciones tienden a aumentar en  $1 \mu\text{mg}/\text{m}^3$ , mientras que para disminuciones de 10% el modelo tiende a registrar en promedio disminuciones de  $6 \mu\text{mg}/\text{m}^3$  de la simulación respecto al control. Por otro lado el escenario de AW +5 % presenta resultados que no son acordes a lo

esperado (aumento en el peso de los vehículos incrementa la resuspensión por rodadura), dado que en promedio tienden a disminuir las concentraciones aunque su sesgo medio sea bajo. El RMSE muestra que el modelo presenta una mayor variabilidad en la distribución de sus datos cuando se subestima el AW, mostrando que las diferencias para este estadístico son de aproximadamente el doble cuando se analiza un mismo porcentaje en incremento y disminución.

**Tabla 7** Estadísticos para cada uno de los escenarios de AW respecto al escenario base

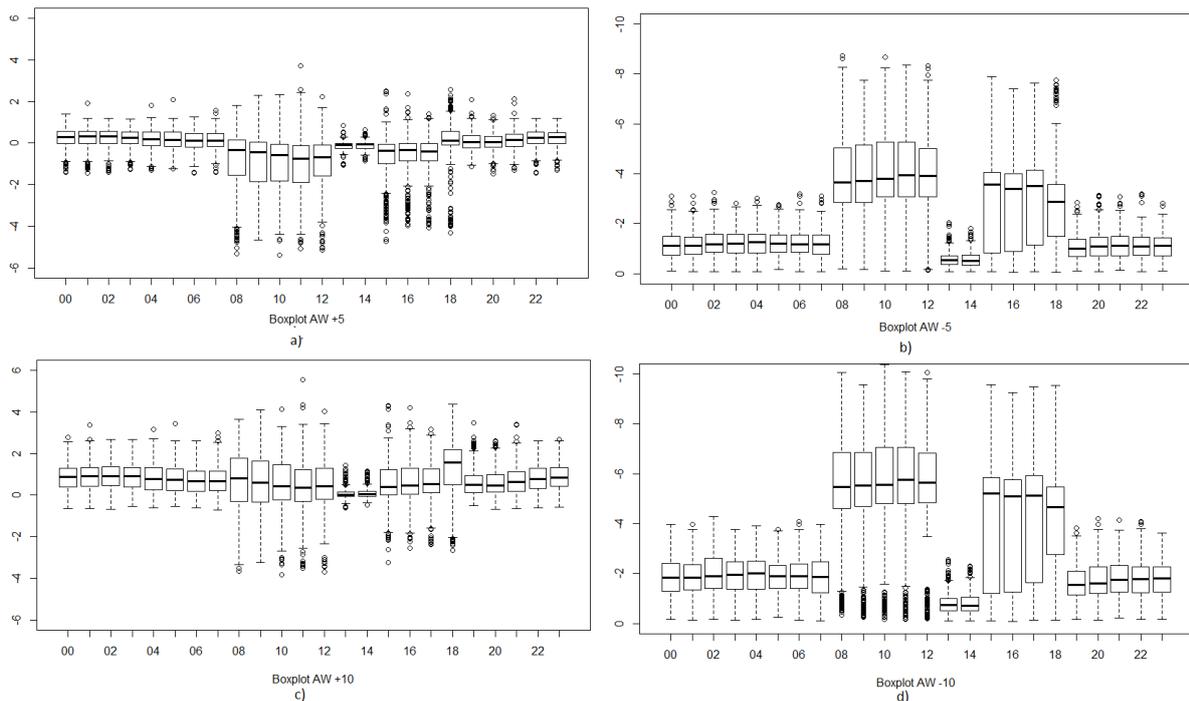
Variación	MB( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	RMSE( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
AW+10	1.43	7.55
AW+5	-0.37	4.25
AW-5	-4.15	9.67
AW-10	-6.13	14.75

Para observar los sesgos de forma gráfica entre las simulaciones y el control se construye unos diagramas de Taylor mostrado en la Figura 14. Este diagrama muestra que no tiene el mismo efecto en las simulaciones aumentar (puntos rojo y verde) o disminuir (puntos azul y violeta) el AW en la misma proporción, es decir, que el modelo no responde de manera simétrica a los cambios realizados en esta variables, lo que es consistente con los resultados mostrados en la Tabla 7, que sugieren una mayor sensibilidad del modelo en la región de estudio ante la subestimación del peso promedio de los vehículos.



**Figura 14** Diagrama de Taylor para el control (observed) vs los escenarios de AW (model) con variaciones del +5% (punto rojo), -5% (punto azul), +10% (punto verde) y -10% (punto violeta).

Por otro lado en la Figura 15 se muestra el diagrama de cajas y bigotes para las diferencias porcentuales entre los estimados de PM10 del escenario de control y los escenarios asociados a variaciones porcentuales de AW. En esta figura se observa que en general las concentraciones de PM10 tienden a disminuir respecto al control cuando disminuye el AW ( b y d) y a incrementar cuando aumenta dicha cantidad en un 10% (c) . Es importante resaltar que en el caso de AW +5 (a) el modelo tiende a subestimar las concentraciones respecto al escenario de control, lo que no es acorde a la física atmosférica, ya que al aumentar el AW incrementa el proceso de resuspensión por rodadura y por tanto los niveles de concentración.



**Figura 15** Diagrama de cajas y bigotes para las diferencias porcentuales de concentraciones horarias de PM10 entre las estimaciones del escenario de control y las estimaciones de los escenarios de AW con variaciones del (a) +5%, (b) -5%, (c) +10% y (d) -10%

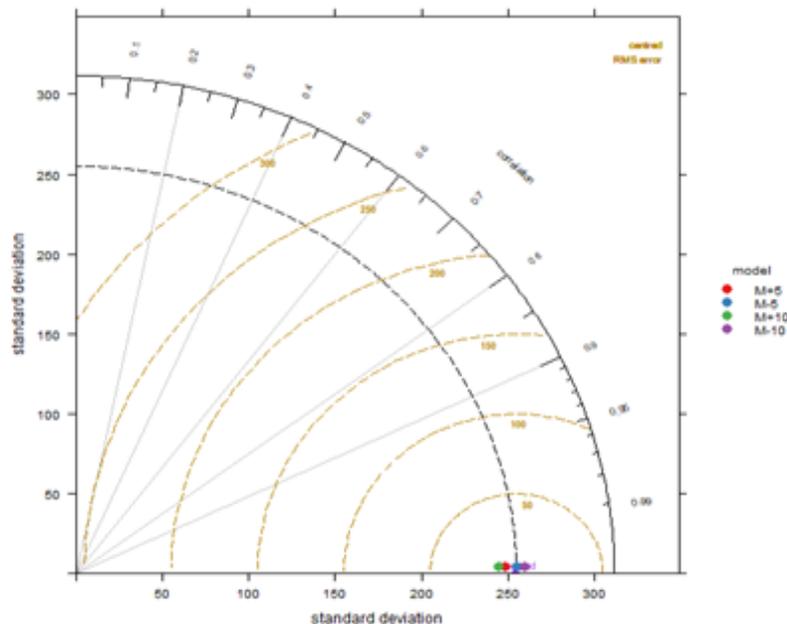
## 6.6 Simulaciones con variaciones en la humedad de las vías (M)

En la Tabla 8 se presentan los estadísticos obtenidos para las simulaciones asociadas a los diferentes cambios porcentuales (ver Tabla 2) en los registros de humedad de las vías. Los valores obtenidos para el MB muestran que los datos se encuentran más alejados del escenario de control cuando existe incremento en dicha variable, registrando que para aumentos del 10% el modelo tiende a disminuir las concentraciones en  $5 \mu\text{mg}/\text{m}^3$  y para disminuciones del 10% el modelo tiende a aumentar las concentraciones en  $0.8 \mu\text{mg}/\text{m}^3$  respecto al escenario de control. Para el escenario de disminución de M -5% el sesgo medio sugiere disminuciones promedio en las concentraciones de PM10 de  $0.77 \mu\text{mg}/\text{m}^3$  debido a que la disminución de la humedad en las vías aumenta la resuspensión del material particulado. El RMSE obtenido muestra que para los escenarios de incrementos (+10 % y +5%) de M en un porcentaje determinado la variación de las distribuciones es aproximadamente el doble de las variaciones asociadas a escenarios con un porcentaje de disminución equivalente (-10 % y -5%).

**Tabla 8** Estadísticos para cada uno de los escenarios de M respecto al escenario base

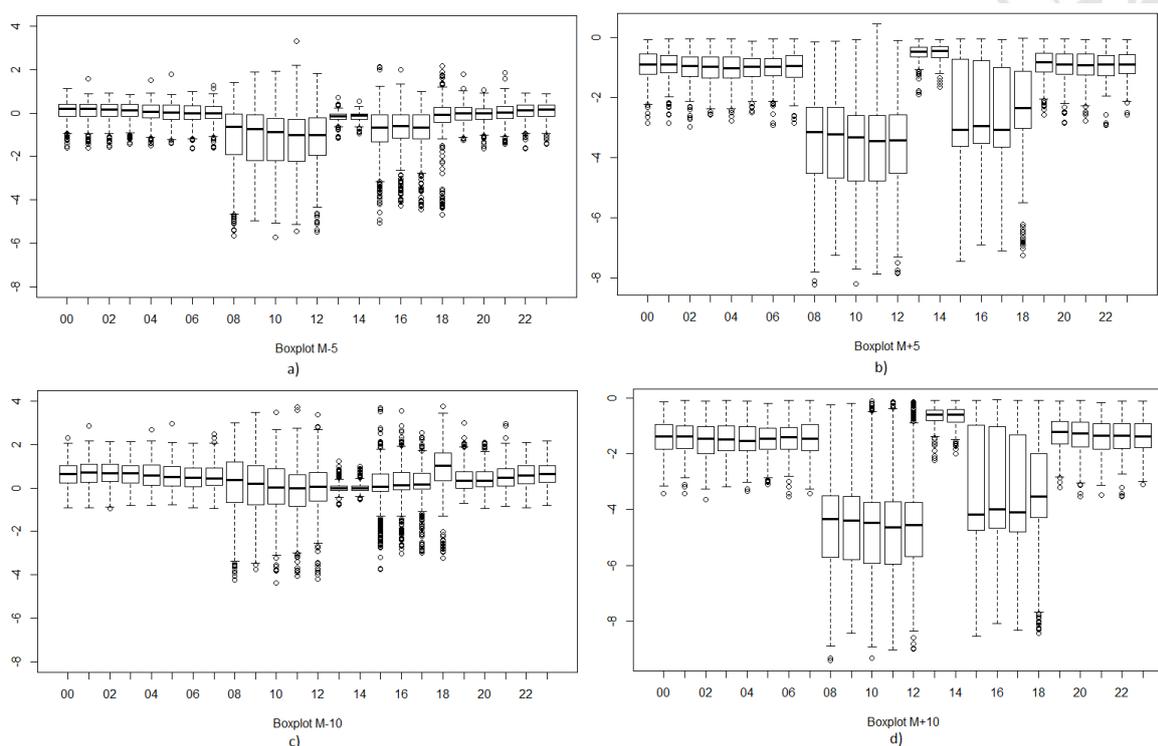
Variación	MB( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	RMSE( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
M+10	-4.90	11.55
M+5	-3.61	8.34
M-5	-0.77	4.01
M-10	0.79	6.14

Para observar los sesgos de forma gráfica entre las simulaciones y el control se presenta el diagrama de Taylor en la Figura 16. En esta figura se muestra que no tiene el mismo efecto en las simulaciones aumentar (puntos rojo y verde) o disminuir la humedad de las vías (puntos azul y violeta) en la misma proporción, debido a que el modelo no responde de manera simétrica a los cambios realizados en esta variables, puesto que los resultados sugieren una mayor sensibilidad del modelo en la región de estudio ante la sobre estimación de la humedad de las vías que ante la subestimación.



**Figura 16** Diagrama de Taylor para el escenario de control (observed) vs escenarios de M (modelo) con variaciones del; +5% (punto rojo), -5% (punto azul), +10% (punto verde) y -10% (punto violeta)

El diagrama de caja y bigotes de la Figura 17 muestra la distribución para las diferencias porcentuales entre los estimados de PM10 del escenario de control y los escenarios asociados a variaciones de M. En la figura se observa que para los escenarios asociados a incrementos en humedad (a y c), aproximadamente la totalidad de la distribución de sus datos está de acuerdo a lo esperado, encontrándose por encima cero. Sin embargo esto no ocurre para escenarios asociados a disminuciones de M (b y d); como es el caso del escenario de M -5% (b), donde gran parte de su distribución subestima el escenario de control.



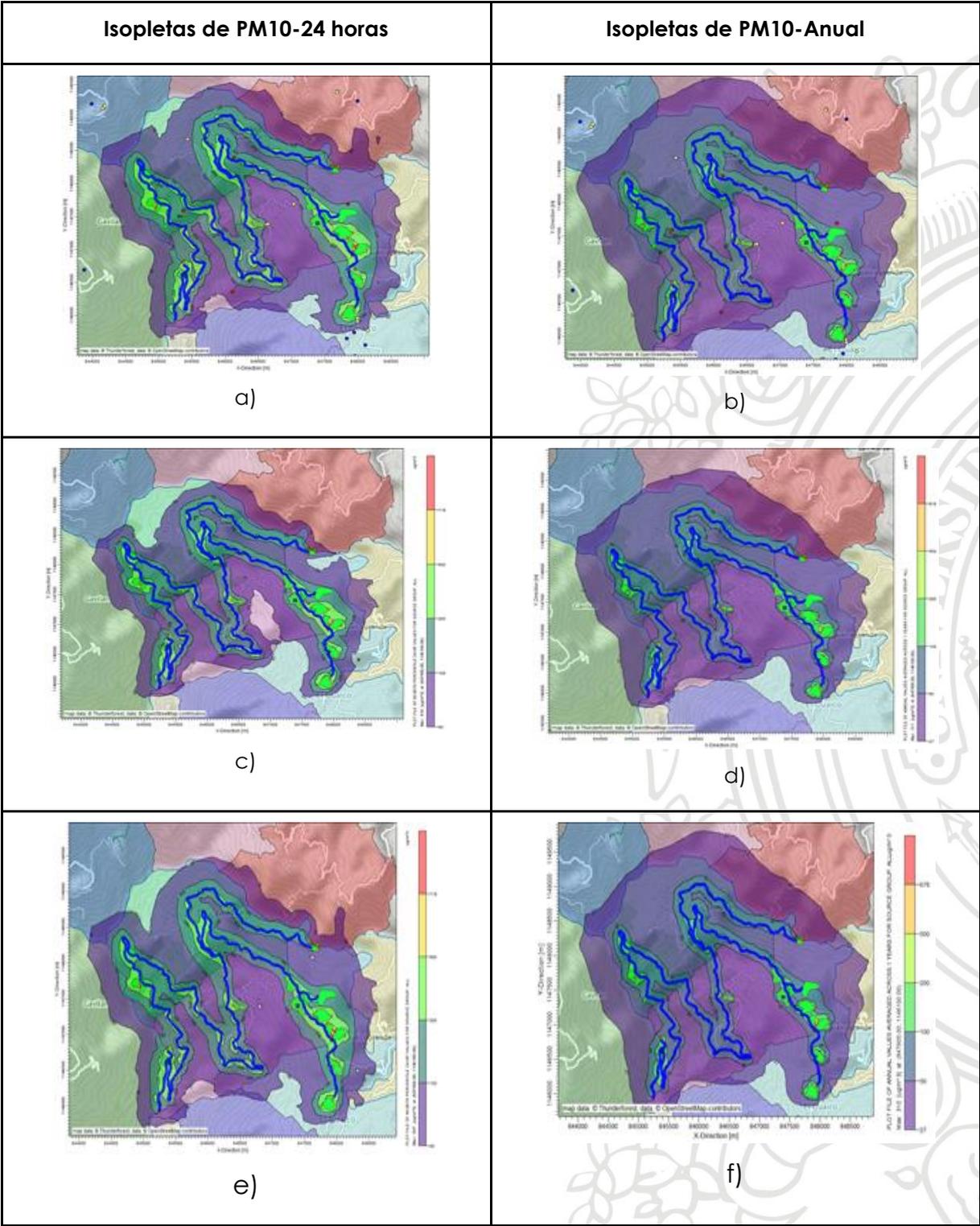
**Figura 17** Diagrama de cajas y bigotes para las diferencias porcentuales de concentraciones horarias de PM10 entre las estimaciones del escenario de control y las estimaciones de los escenarios de M con variaciones del (a) +5%, (b) -5%, (c) +10% y (d) -10%

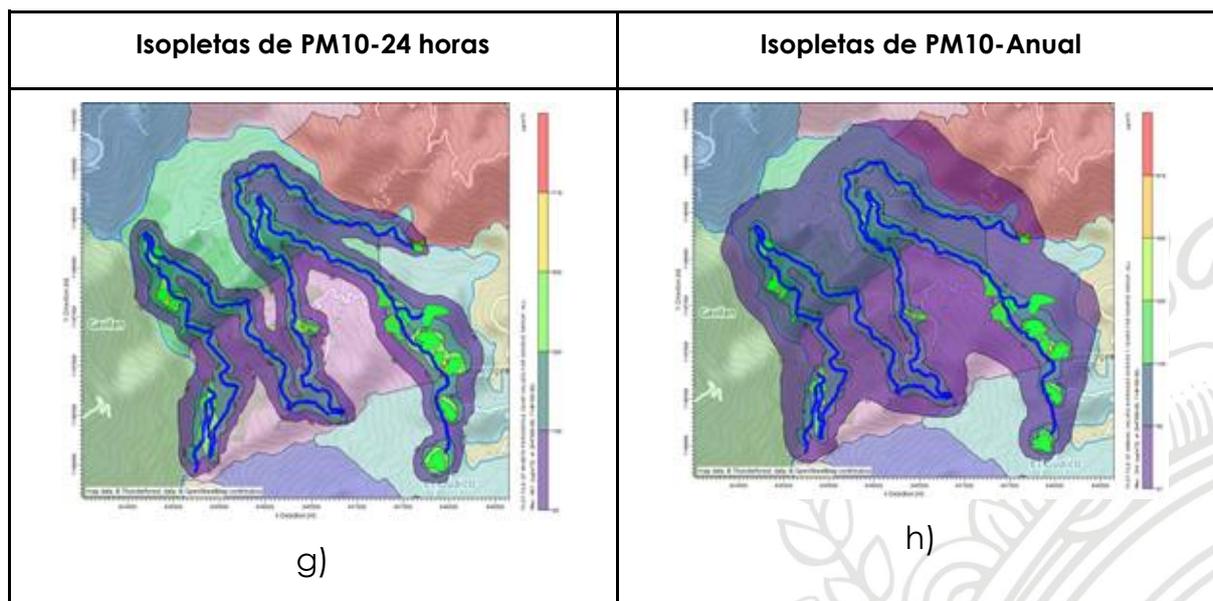
## 6.7 Cambios en las distribuciones espaciales

Esta sección presenta de forma cualitativa los cambios que se presentan en las distribuciones espaciales para las variables más características de cada grupo (meteorología, cobertura e inventario). La sección anterior mostró que la nubosidad, el contenido de finos y los cambios en las coberturas son variables muy sensibles, por lo que en esta sección el análisis se centra en los cambios espaciales asociados a estas simulaciones.

En la Figura 18 se presentan las distribuciones de concentración para el escenario de control (a y b) y el escenario de nubosidad -2 (c y d). Siendo este último el que produjo las mayores diferencias de los datos

meteorológicos en concentraciones de PM10 respecto al escenario de control.





**Figura 18** Isopletas de concentración en los periodos de 24 horas (izquierda) y anual (derecha) de los escenarios de de control ( a y b), de variación de nubosidad -2 décimas (c y d), de contenido de finos con variación de -10% ( e y f), y de variación de coberturas(g y h)

En la figura se observa que para el escenario de nubosidad -2 se contrae el área de influencia respecto al control, contracción que tiene un mayor efecto en el comportamiento de las concentraciones de PM10 a corto plazo (24 horas)(c) que en las asociadas al largo plazo (Anual)(d). Asimismo, para el escenario de porcentaje de finos -10% se observa que el área de influencia (e y f) tiende a disminuir respecto al control( a y b). Sin embargo, el efecto es menor que el presentado para el caso del escenario de nubosidad -2. Por otra parte, las isopletas de concentración cuando se modifican las coberturas muestran una reducción considerable en la distribución del PM10 a lo largo de la región de estudio respecto al control, incluyendo reducciones importantes de los máximos niveles de concentración en 24 horas (g); Al igual que reducciones considerables para la distribución anual (h) en algunas áreas registradas en todo el contorno.

Los resultados anteriores sugieren que ante un escenario que modifique sustancialmente los resultados de concentración de PM10, como es el caso de la cobertura (COB1), se podría generar un menor número de eventos con niveles de concentración que superen la norma, ya sea en el corto plazo (24 horas) o en el largo plazo (anual); caso contrario al del escenario con la tendencia a sobreestimar los niveles de concentración respecto al escenario de control, donde se esperaría un mayor número de niveles de concentración que superen la norma en el corto y largo plazo.

## 7 Conclusiones

El análisis de sensibilidad realizado para el modelo AERMOD muestra que de los grupos de variables analizados los cambios de coberturas son los que producen las mayores diferencias tanto espaciales como puntuales entre simulaciones en el área de influencia del proyecto PCH el Buey. Lo que sugiere que al usar coberturas construidas a partir de ortofotos actuales para la zona del proyecto pudo reducir sesgos asociados a la sensibilidad encontrada para esta variable, aunque es de resaltar la incertidumbre que podría estar asociada a las fronteras del mapa de coberturas utilizado en el control, que se extrajeron de GLCC. De las variables meteorológicas analizadas la nubosidad, para todas las variaciones realizadas mostró disminución de las concentraciones lo que no responde a la física conceptual en dicha variable, dado que menor nubosidad implicar mayor incidencia de la radiación en la superficie lo que favorece los procesos convectivos en la capa de mezcla. En cuanto a las variables que modificaron el inventario de emisiones, se encontró que tiene mayor efecto sobre el modelo las disminuciones en el contenido de finos de las vías respecto a los valores de concentración de PM10, en general cuanto más se disminuye el contenido de finos de las vías, más se tienden a disminuir las concentraciones predichas por el modelo. Asimismo, dado el comportamiento de las concentraciones de PM10 obtenidas para las 21 simulaciones se debe ser cuidadoso con las bases de datos de velocidad del viento, ya que la sensibilidad del modelo ante sobreestimaciones de dicha variable es alta. Mientras que para el caso del contenido de finos en las vías la mayor sensibilidad del modelo se presenta ante subestimación de los mismos.

Finalmente, es importante mencionar que los cambios más significativos para todas las simulaciones se obtuvieron durante los periodos del ciclo diurno, donde predomina la capa de mezcla convectiva, hecho que se puede asociar principalmente a que este es el periodo donde tienen mayor intensidad en las obras durante la etapa de construcción. Por otro lado los escenarios correspondientes a las variaciones porcentuales del inventario de emisiones muestra cambios no tan marcados, quizás como respuesta a la matemática del modelo, para la cual estos valores son directamente proporcionales a la predicción de concentración, caso diferente a lo que ocurre con las variables meteorológicas y de coberturas del proyecto.

## 8 Referencias bibliográficas

- (UPB), U. P. (2016). ESTUDIO DE LA DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS EN LA JURISDICCIÓN DE CORNARE: INFORME GENERAL, (págs. 50-64). Medellín.
- Alemán, J., & Alomar, M. (2011). Convección atmosférica.
- Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (2017). Términos de referencia para la elaboración del estudio de impacto ambiental para la construcción y operación de centrales generadoras de energía hidroeléctricas.
- Bhardwaj, K. S. (2005). *Examination of sensitivity of land use parameters and population on the performance of the AERMOD model for an urban area* (Doctoral dissertation, University of Toledo).
- Brown, J. F., Loveland, T. R., Merchant, J. W., Reed, B. C., & Ohlen, D. O. (1993). Using multisource data in global land-cover characterization: Concepts, requirements, and methods. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 59(6), 977-987.
- Burbano Sefair, G. A. (2018). Modelación de fuentes de emisión en AERMOD con información meteorológica de Bogotá.
- Carlaw, D. C., & Ropkins, K. (2012). Openair—an R package for air quality data analysis. *Environmental Modelling & Software*.
- DISEÑO DEL SISTEMA INTELIGENTE DE MONITOREO DE LA CALIDAD AMBIENTAL DEL DISTRITO DE CARTAGENA. Convenio Interadministrativo 0133-(2015) entre el Establecimiento Público Ambiental de Cartagena – EPA y la Universidad de Cartagena.
- EPA. (2018). *AERMOD Model Formulation and Evaluation*. Air Quality Assessment Division, Office of Air Quality Planning and Standards,, North Carolina. Disponible en: [https://www3.epa.gov/ttn/scram/models/aermod/aermod\\_mfed.pdf](https://www3.epa.gov/ttn/scram/models/aermod/aermod_mfed.pdf)
- Fernandez, R., Allende, D., Castro, F., Cremades, P., & Puliafito, E. (2010). Modelado regional de la calidad de aire utilizando el Modelo WRF/Chem: Implementación de datos globales y locales para Mendoza. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 14(01.43), 01.
- Garín, A. B. D. (1988). Estructura del viento en una atmósfera sobre una superficie con cobertura vegetal.
- Guerra, S. A. Annual Conference & Exhibition, Raleigh, NC, (2015). Use of Probabilistic Statistical Techniques in AERMOD Modeling Evaluations.
- Huertas, J. I., Huertas, M. E., Izquierdo, S., & González, E. D. (2012). Air quality impact assessment of multiple open pit coal mines in northern Colombia. *Journal of environmental management*, 93(1), 121-129.

- Jiménez, J. (2017). Altura de la Capa de Mezcla en un area urbana, montanosa y tropical  
Caso de estudio: Valle de Aburrá (Colombia).
- José I. Huertas, et al, 2008. Guía Nacional de Modelación de Calidad del Aire. Centro de  
Investigación en Mecatrónica Automotriz. Tecnológico de Monterrey.
- Karvounis, G. D. (2007). On the sensitivity of AERMOD to surface parameters under various  
anemological conditions. *In Proceedings of the 11th International Conference on  
Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes*, (págs.  
pp. 43-47). Cambridge, UK. Disponible en:  
[https://www3.epa.gov/ttn/scram/models/aermod/aermod\\_mfed.pdf](https://www3.epa.gov/ttn/scram/models/aermod/aermod_mfed.pdf)
- Kobrick, M. (2006). On the Toes of Giants- How SRTM was Born. *Photogrammetric Engineering  
and Remote Sensing*, 72(3), 206-210.
- Long, G. E., Cordova, J. F., & Tanrikulu, S. (2004). *AN ANALYSIS OF AERMOD SENSITIVITY TO  
INPUT PARAMETERS IN THE SAN FRANCISCO BAY AREA*. San Francisco, CA: Air Quality  
Management District.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015). Decreto Único Reglamentario 1076  
del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2017). Resolución N° 1519 del Sector  
Ambiente y Desarrollo Sostenible.
- Perry, S. G., Cimorelli, A. J., Paine, R. J., Brode, R. W., Weil, J. C., Venkatram, A, & Peters, W. D.  
(2005). AERMOD: A dispersion model for industrial source applications. Part II: Model  
performance against 17 field study databases. *Journal of applied meteorology*, 44(5),  
694-708.
- Qian, W., & Venkatram, A. (2011). Performance of steady-state dispersion models under low  
wind-speed conditions. *Boundary-layer meteorology*, 138(3), 475-491.
- Sánchez Valbuena, D. A., & Wilcken López, D. R. (2016). Evaluación de tres modelos de  
micro-escala (AERMOD, CALINE4 y R-Line) en su aplicación a las vías principales de la  
ciudad de Bogotá.
- Silva, A. y Arcos, D. (2011). Aplicación del programa AERMOD para modelar dispersión de  
PM10 emitido por equipos de calefacción a leña en la ciudad de Constitución. *Obras  
y Proyectos* 9, 4-10
- Uribe Barón, L. J., & Suárez Araque, N. Evaluación de la calidad del aire del Valle de  
Sogamoso, respecto a material particulado menor a 10 micras (MP10), aplicando el  
modelo de dispersión aermod como herramienta de planificación.
- US EPA. (2018). Air Quality Dispersion Modeling - Preferred and Recommended Models US  
EPA. [online] Disponible en: <https://www.epa.gov/scram/air-quality-dispersion-modeling-preferred-and-recommended-models>

Viana, M. d. (2003). Niveles, composición y origen del material particulado atmosférico en los sectores Norte y Este de la Península Ibérica y Canarias. Barcelona, España.

Zou, B., Zeng, Y., Liu, H., Zhang, H., Qiu, Y., & Zhan, B. F. (2010, June). Sensitivity analysis of AERMOD in modeling local air quality under different model options. In *2010 4th International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering* (pp. 1-4). IEEE.

