



**MODELACIÓN DE DISPERSIÓN DE  
CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS EN  
ZONAS DE INTERÉS EN LA JURISDICCIÓN  
DE CORNARE**



**ACTUALIZACIÓN DEL INVENTARIO DE EMISIONES AL AIRE Y MODELACIÓN DE  
DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS EN ZONAS DE INTERES EN  
LA JURISDICCIÓN DE CORNARE**

**CONVENIO INTERADMINISTRATIVO DE COLABORACIÓN No. 141-2023**

**MODELACIÓN DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS EN  
ZONAS DE INTERÉS EN LA JURISDICCIÓN DE CORNARE**

**UNA ALIANZA ENTRE:**



**MEDELLÍN, DICIEMBRE 2023**

**TABLA DE CONTENIDO**

<b>LISTA DE TABLAS.....</b>	<b>3</b>
<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>4</b>
<b>1 INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>8</b>
<b>1.1 OBJETIVOS .....</b>	<b>9</b>
1.1.1 Objetivo general .....	9
1.1.2 Objetivos específicos.....	9
<b>2 GENERALIDADES.....</b>	<b>10</b>
<b>2.1 CALPUFF .....</b>	<b>10</b>
<b>2.2 DOMINIO GEOGRÁFICO .....</b>	<b>11</b>
<b>3 METODOLOGÍA .....</b>	<b>12</b>
<b>3.1 INFORMACIÓN UTILIZADA.....</b>	<b>12</b>
3.1.1 Inventario de emisiones atmosféricas año base 2022 de CORNARE .....	12
3.1.2 Meteorología.....	14
3.1.3 Topografía .....	52
<b>3.2 CREACIÓN DE LA MALLA DE CÁLCULO .....</b>	<b>55</b>
<b>3.3 CONFIGURACIÓN DEL MODELO.....</b>	<b>55</b>
3.3.1 Calmet .....	55
3.3.2 Calpuff .....	56
3.3.3 Calpost .....	56
<b>4 RESULTADOS.....</b>	<b>57</b>
<b>4.1 Dominio San Nicolas y La Unión .....</b>	<b>57</b>
4.1.1 Dispersión de Material Particulado (PST, PM10 y PM2.5) .....	58
4.1.2 Dispersión de Dióxido de Nitrógeno (NO <sub>2</sub> ).....	65
4.1.1 Dispersión de Monóxido de Carbono .....	67
4.1.1 Dispersión de Dioxido de azufre .....	68
<b>4.2 Dominio Zona La Calera .....</b>	<b>70</b>
4.2.1 Dispersión de Material Particulado (PST, PM10 y PM2.5) .....	70
4.2.1 Dispersión de Dióxido de Nitrógeno (NO <sub>2</sub> ).....	75
4.2.1 Dispersión de Monóxido de Carbono .....	78
4.2.1 Dispersión de Dioxido de azufre .....	79
<b>4.3 Subdominio La Danta .....</b>	<b>81</b>
<b>5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>85</b>
<b>6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>87</b>

**LISTA DE TABLAS**

Tabla 1. Coordenadas de los puntos estratégicos de la meteorología (Sistema  
Coordenadas: UTM 18N en km. .... 15

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1. Dominio geográfico de la modelación de dispersión de contaminantes atmosféricos.</b> .....	11
Figura 2. Emisiones de contaminantes criterio por subregiones. ....	13
Figura 3. Emisiones de contaminantes criterio por sector productivo.....	14
Figura 4. Ciclo anual velocidad del viento Rionegro.....	16
Figura 5. Ciclo horario velocidad del viento Rionegro .....	16
Figura 6. Rosa de vientos Rionegro.....	16
Figura 7. Análisis de vientos Rionegro.....	16
Figura 8. Ciclo anual temperatura Rionegro.....	17
Figura 9. Ciclo horario temperatura Rionegro .....	17
Figura 10. Ciclo anual altura de capa de mezcla Rionegro. ....	18
Figura 11. Ciclo horario altura de capa de mezcla Rionegro. ....	18
Figura 12. PG Class Rionegro. ....	19
Figura 13. Ciclo anual velocidad del viento La Ceja.....	20
Figura 14. Ciclo horario velocidad del viento La Ceja.....	20
Figura 15. Rosa de vientos La Ceja. ....	21
Figura 16. Análisis de vientos La Ceja. ....	21
Figura 17. Ciclo anual temperatura La Ceja.....	21
Figura 18. Ciclo horario temperatura La Ceja. ....	21
Figura 19. Ciclo anual altura de mezcla La Ceja. ....	22
Figura 20. Ciclo horario altura de mezcla La Ceja.....	22
Figura 21. PG Class La Ceja. ....	23
Figura 22. Ciclo anual velocidad del viento El Carmen de Viboral.....	24
Figura 23. Ciclo horario velocidad del viento El Carmen de Viboral. ....	24
Figura 24. Rosa de vientos El Carmen de Viboral.....	25
Figura 25. Análisis de vientos El Carmen de Viboral.....	25
Figura 26. Ciclo anual temperatura El Carmen de Viboral. ....	26
Figura 27. Ciclo horario temperatura El Carmen de Viboral. ....	26

Figura 28. Ciclo anual altura de mezcla El Carmen de Viboral.....	26
Figura 29. Ciclo horario altura de mezcla El Carmen de Viboral. ....	26
Figura 30. PG Class El Carmen de Viboral. ....	27
Figura 31. Ciclo anual velocidad del viento La Unión.....	28
Figura 32. Ciclo horario velocidad del viento La Unión.....	28
Figura 33. Rosa de vientos La Unión.....	29
Figura 34. Análisis de vientos La Unión.....	29
Figura 35. Ciclo anual temperatura La Unión.....	30
Figura 36. Ciclo horario temperatura La Unión.....	30
Figura 37. Ciclo anual altura de mezcla La Unión.....	31
Figura 38. Ciclo horario altura de mezcla La Unión.....	31
Figura 39. PG Class La Unión.....	32
Figura 40. Ciclo anual velocidad del viento Cocorná.....	33
Figura 41. Ciclo horario velocidad del viento Cocorná.....	33
Figura 42. Rosa de viento Cocorná.....	34
Figura 43. Análisis de vientos Cocorná.....	34
Figura 44. Ciclo anual temperatura Cocorná.....	35
Figura 45. Ciclo horario temperatura Cocorná.....	35
Figura 46. Ciclo anual altura de mezcla Cocorná.....	35
Figura 47. Ciclo horario altura de mezcla Cocorná.....	35
Figura 48. PG Class Cocorná.....	36
Figura 49. Ciclo anual velocidad del viento La Danta.....	37
Figura 50. Ciclo horario velocidad del viento La Danta.....	37
Figura 51. Rosa de vientos La Danta.....	38
Figura 52. Análisis de vientos La Danta.....	38
Figura 53. Ciclo anual temperatura La Danta.....	38
Figura 54. Ciclo horario temperatura La Danta.....	38
Figura 55. Ciclo anual altura de mezcla La Danta.....	39
Figura 56. Ciclo horario altura de mezcla La Danta.....	39
Figura 57. PG Class La Danta.....	40
Figura 58. Ciclo anual velocidad del viento Puerto Triunfo.....	41

Figura 59. Ciclo horario velocidad del viento Puerto Triunfo. ....	41
Figura 60. Rosa de viento Puerto Triunfo.....	42
Figura 61. Análisis de vientos Puerto Triunfo.....	42
Figura 62. Ciclo anual temperatura Puerto Triunfo.....	42
Figura 63. Ciclo horario temperatura Puerto Triunfo. ....	42
Figura 64. Ciclo anual altura de mezcla Puerto Triunfo.....	43
Figura 65. Ciclo horario altura de mezcla Puerto Triunfo. ....	43
Figura 66. PG Class Puerto Triunfo. ....	44
Figura 67. Ciclo anual velocidad del viento Guarne. ....	45
Figura 68. Ciclo horario velocidad del viento Guarne.....	45
Figura 69. Rosa de vientos Guarne. ....	46
Figura 70. Análisis de vientos Guarne. ....	46
Figura 71. Ciclo anual temperatura Guarne. ....	46
Figura 72. Ciclo horario temperatura Guarne.....	46
Figura 73. Ciclo anual altura de mezcla Guarne. ....	47
Figura 74. Ciclo horario altura de mezcla Guarne. ....	47
Figura 75. PG Class Guarne.....	48
Figura 76. Ciclo anual velocidad del viento Marinilla.....	49
Figura 77. Ciclo horario velocidad del viento Marinilla.....	49
Figura 78. Rosa de vientos Marinilla. ....	50
Figura 79. Análisis de vientos Marinilla. ....	50
Figura 80. Ciclo anual temperatura Marinilla. ....	50
Figura 81. Ciclo horario temperatura Marinilla.....	50
Figura 82. Ciclo anual altura de mezcla Marinilla. ....	51
Figura 83. Ciclo horario altura de mezcla Marinilla.....	51
Figura 84. PG Class Marinilla. ....	52
Figura 85. Topografía del dominio geográfico La Calera.....	53
Figura 86. Topografía del dominio geográfico Valles de San Nicolas y La Unión.....	54
Figura 87. Concentración promedio anual de PST dominio San Nicolas y La Unión.....	59
Figura 88. Concentración promedio anual de PM10 dominio San Nicolas y La Unión ....	60
Figura 89. Concentración promedio anual de PM2.5 dominio San Nicolas y La Unión ....	61

Figura 90. Razón Conc. PM2.5 secundario sobre Conc. PM2.5 por emisión de fuentes fijas .....	63
Figura 91. Razón Conc. PM2.5 secundario sobre Conc. PM2.5 total (FF+FA+Sec) .....	64
Figura 92. Concentración promedio anual de NO <sub>2</sub> dominio San Nicolas y la Unión .....	66
Figura 93. Concentración promedio octohoraria y horaria de CO dominio San Nicolas y la Unión .....	68
Figura 94. Concentración de SO <sub>2</sub> diaria dominio San Nicolas y la Unión .....	69
Figura 95. Concentración promedio anual de PST dominio Zona de las Caleras.....	71
Figura 96. Concentración promedio anual de PM10 dominio Zona de las Caleras .....	72
Figura 97. Concentración promedio anual de PM2.5 dominio Zona de las Caleras .....	73
Figura 98. Razón Conc. PM2.5 secundario sobre Conc. PM2.5 por emisión de fuentes fijas .....	74
Figura 99. Razón Conc. PM2.5 secundario sobre Conc. PM2.5 total (FF+FA+Sec) .....	75
Figura 100. Concentración promedio anual de NO <sub>2</sub> dominio Subdominio la Calera .....	77
Figura 101. Concentración octohoraria y horaria de CO dominio Subdominio la Calera ..	79
Figura 102. Concentración octohoraria y horaria de CO dominio Subdominio la Calera ..	80
Figura 103. Concentración promedio anual de PST dominio Subdominio la Danta.....	82
Figura 104. Concentración promedio anual de PM10 dominio Subdominio la Danta .....	83
Figura 105. Concentración promedio anual de PM2.5 dominio Subdominio la Danta .....	84

## **1 INTRODUCCIÓN**

La Corporación Autónoma Regional de las Cuencas del Río Negro y Nare “CORNARE” con el objetivo de contribuir y propender al desarrollo sostenible del medio ambiente y velar por la conservación de un ambiente sano, orientado hacia la gestión de la calidad del aire, hace necesario aunar esfuerzos para la ejecución de proyectos que permitan el fortalecimiento de buenas prácticas ambientales. Es por esto que, en ejercicio de sus funciones se suscribió el convenio 141-2023 entre la Universidad de Antioquia en alianza con CORNARE que tiene como objetivo “la actualización del inventario de emisiones al aire y modelación de dispersión de contaminantes atmosféricos en zonas de interés en la jurisdicción de CORNARE” con acta de inicio del 15 de marzo de 2023.

La actualización de los inventarios de emisiones atmosféricas es primordial para detectar tendencias y realizar proyecciones de emisiones atmosféricas. Además, permite conocer los aportes de las nuevas fuentes de emisiones y determinar cuáles son las fuentes más relevantes en los diferentes sectores productivos, utilizando esta información como base para la implementación, evaluación y ajustes de las medidas de control, con el fin de realizar una buena gestión del recurso aire.

Dentro de la planeación para la ejecución de las actividades del convenio antes mencionado, se encuentra la modelación de dispersión de los contaminantes generados por fuentes fijas, la cual se realiza para las zonas de Valles de San Nicolas, La Calera y el municipio de La Unión, debido a que en esta zona se presenta el mayor número de fuentes fijas que generan emisiones atmosféricas. En este sentido, este informe presenta una descripción de la información requerida para ingresar al modelo Calpuff, la metodología utilizada para preprocesar esta información y correr el modelo; los resultados obtenidos de la modelación y las observaciones y conclusiones.

## **1.1 OBJETIVOS**

### **1.1.1 Objetivo general**

Modelación de la dispersión de contaminantes atmosféricos en la subregión Valles de San Nicolas, el municipio de la unión y la zona la calera de la jurisdicción de CORNARE.

### **1.1.2 Objetivos específicos**

- Obtener y procesar la meteorología en Calmet para los dominios de la modelación.
- Ingresar las emisiones atmosféricas generadas por fuentes fijas obtenidas en la actualización del inventario año base 2022 de la Corporación.
- Configurar el modelo para que incluya la química de la atmósfera.
- Establecer una malla de cálculo que será utilizada por el modelo.
- Realizar el post procesamiento de la información para recopilar los datos de concentración de PST, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> (tanto primarios como secundarios), así como de NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> y CO que se encuentren dispersos dentro del área geográfica analizada.

## **2 GENERALIDADES**

En los últimos años las dinámicas sociales y económicas de la región en jurisdicción de CORNARE están aumentando su ritmo, esto se evidencia a través de los aumentos del parque automotor en gran parte de los municipios de la región y el establecimiento de nuevas actividades productivas (sector primario, manufactura y servicios) así como el traslado desde el Valle de Aburrá hacia el Oriente Antioqueño de empresas de diversos renglones de la economía que son susceptibles de generar contaminantes atmosféricos que provocan impactos importantes en la calidad del aire de la región. Estos cambios, se han evidenciado principalmente en la subregión de Valles de San Nicolás y en la zona denominada La Calera, que incluye los municipios de Sonsón y Puerto Triunfo. Por lo que, se hace necesario realizar una modelación de dispersión de contaminantes atmosféricos, para así evaluar cuáles son los puntos estratégicos en los cuales tener un mayor control y monitoreo de las emisiones atmosféricas generadas por fuentes fijas.

Además, se pretende elaborar un documento técnico que contenga el diseño de la red de monitoreo de calidad del aire (SVCA) en la jurisdicción de CORNARE que sirva como soporte para proponer estrategias prácticas y efectivas que permitan la protección del recurso aire. Por lo cual, saber cómo es el comportamiento de las emisiones en la atmósfera, es de gran importancia para realizar un diagnóstico adecuado y preciso que brinde la información necesaria para el diseño de la red de monitoreo de la Corporación.

### **2.1 CALPUFF**

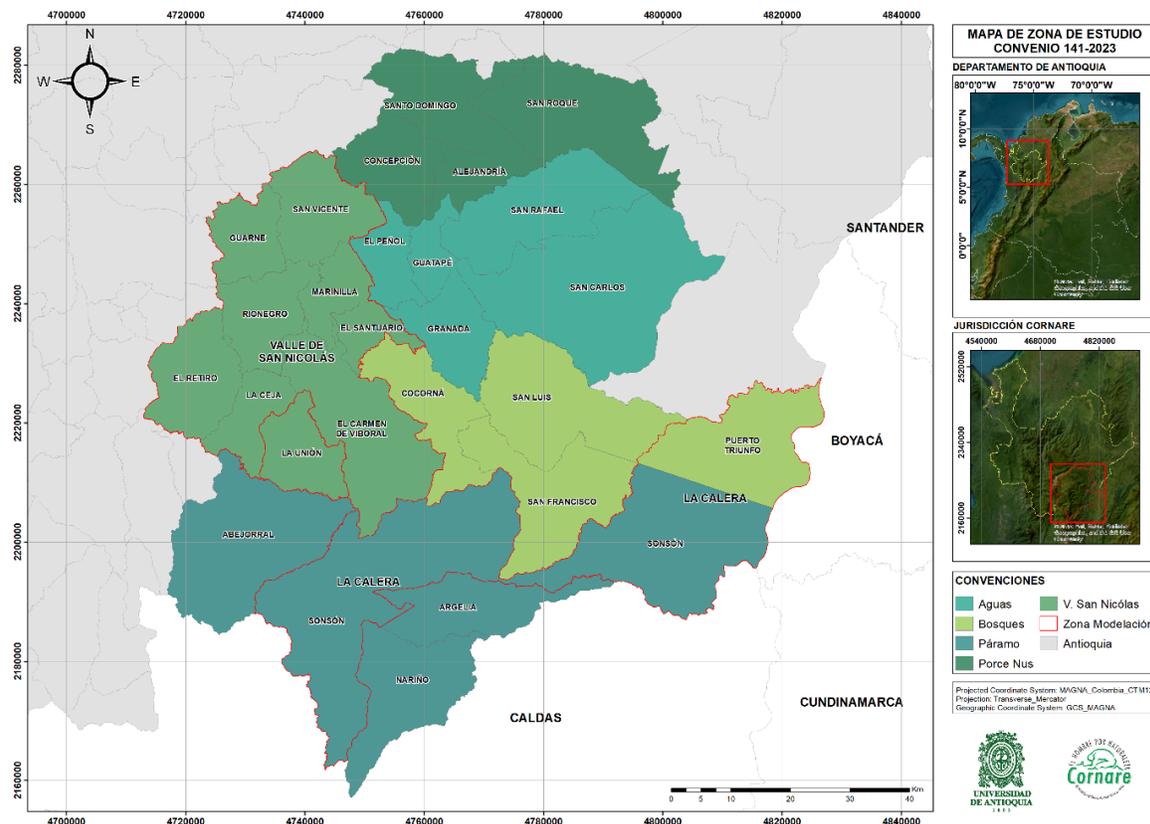
Para llevar a cabo la modelación de dispersión de contaminantes atmosféricos se seleccionó el modelo CALPUFF debido a que este permite simular los efectos de la variación espaciotemporal de las condiciones meteorológicas en el transporte, transformación y remoción de los contaminantes atmosféricos. (Enviroware, 2019) Puesto que, el diseño de este modelo permite evaluar un máximo de 200 fuentes en cada corrida y se contaban con 496 fuentes fijas para modelar, fue necesario correr el modelo tres veces para abarcar el total de estas fuentes identificadas en el inventario de emisiones atmosféricas año base 2022.

Adicionalmente, CALPUFF arroja para cada contaminante un archivo con las concentraciones horarias, flujos de deposición húmeda, flujos de deposición seca y para aplicaciones de visibilidad arroja los coeficientes de extinción. (Enviroware, 2019) Por lo anterior, este modelo resulta de gran utilidad para realizar un análisis detallado de la

dispersión de contaminantes en la jurisdicción de la Corporación y permitir así un diseño del sistema de vigilancia de la calidad del aire adecuado.

## 2.2 DOMINIO GEOGRÁFICO

En cuanto al área de estudio para el modelo de dispersión de contaminantes, se ha elegido la subregión de Valles de San Nicolás. Esta región incluye los municipios de San Vicente, Guarne, Marinilla, Rionegro, El Retiro, La Ceja y El Carmen de Viboral. También se ha considerado la zona de La Calera, compuesta por Puerto Triunfo y Sonsón; y el municipio de La Unión, que por sus dinámicas sociales y climáticas se ha decidido modelar de forma independiente al Valle de San Nicolás. Esta elección de la zona de estudio se basa en los cambios que se han producido en estos municipios en los últimos años, tanto a nivel social como económico.



**Figura 1. Dominio geográfico de la modelación de dispersión de contaminantes atmosféricos.**

### **3 METODOLOGÍA**

En general la metodología de modelación se basó en recopilar la información de entrada que corresponde a:

- El inventario de emisiones atmosféricas: este fue desarrollado para el convenio y se presenta en un documento por aparte, de forma detallada, en este capítulo se presenta un resumen del inventario.
- La meteorología e información geofísica de superficie: esta fue obtenida de Meteocolombia SAS, empresa dedicada a la modelación meteorológica, la información fue obtenida del modelo WRF lista para ser incluida en CALMET lo cual incluye los campos de vientos, las demás variables requeridas por Calmet y los datos geofísicos de topografía y uso del suelo.

Finalmente, estos datos se cargaron al software CALPUFF View de Lakes Environmental donde se configuró el modelo y se corrió con las opciones por defecto, incluyendo la química de la atmosfera por el esquema RIVAD/ARM3 para el cual era posible contar con toda la información de entrada y producir salidas para partículas secundarias en forma de Sulfatos (SO<sub>4</sub>) y Nitratos (NO<sub>3</sub>).

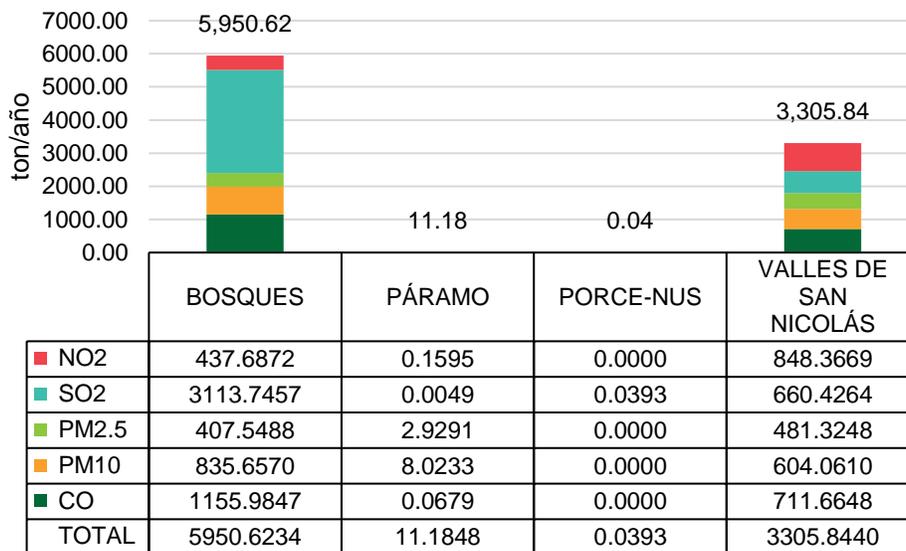
#### **3.1 INFORMACIÓN UTILIZADA**

##### **3.1.1 Inventario de emisiones atmosféricas año base 2022 de CORNARE**

Las emisiones atmosféricas generadas por fuentes fijas que se tomaron de insumo para la modelación se extrajeron del inventario de emisiones atmosféricas año base 2022 de la jurisdicción de CORNARE. Estas emisiones, se calcularon utilizando la metodología de factores de emisión. Para esto, se recopilaron los factores de actividad que están contenidos en diversas fuentes de información, como lo son los informes técnicos, informes previos e informes de mediciones isocinéticas de fuentes fijas que reposan en las bases de datos de la Corporación. Esta información se estandarizó y se multiplicó por un factor de emisión, el cual se le asignó a cada fuente según el tipo de quipo emisor, el tipo de combustible y la existencia de sistemas de control en chimenea. Estos factores de emisión han sido proporcionados tanto por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) como por la Agencia Ambiental Europea (EEA).

Dentro del inventario de emisiones atmosféricas año base 2022 de CORNARE se estimaron diversos grupos y especies de contaminantes, sin embargo, para la modelación de dispersión de contaminantes se seleccionaron únicamente los siguientes contaminantes criterio: dióxidos de azufre (SO<sub>2</sub>), dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>), monóxido de carbono (CO), material particulado grueso (PM<sub>10</sub>), material particulado fino primario y secundario (PM<sub>2.5</sub>) y partículas suspendidas totales (PST).

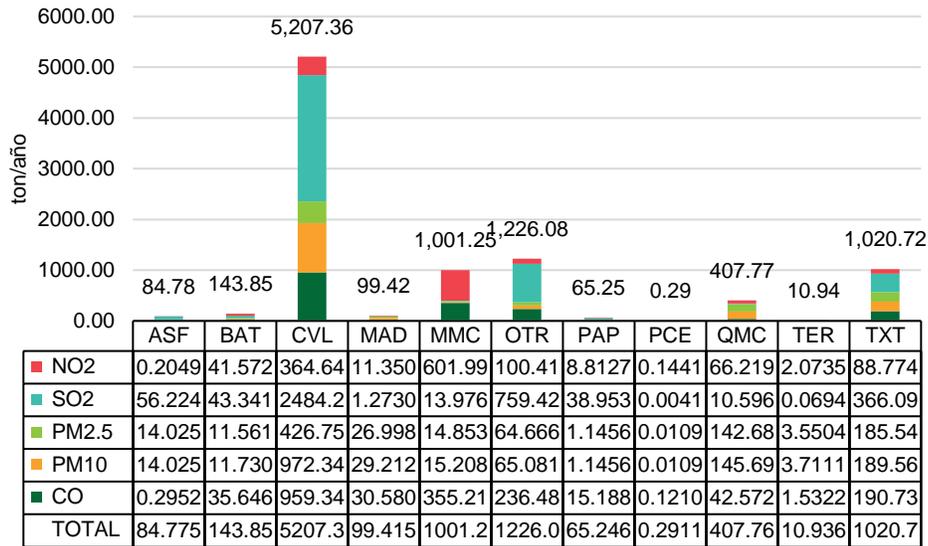
A continuación, se presentan algunos de los resultados más relevantes del inventario de emisiones atmosféricas año base 2022:



**Figura 2. Emisiones de contaminantes criterio por subregiones.**

Según la **Figura 2** se tiene que la subregión donde se encuentran las emisiones más elevadas de contaminantes criterio es Bosques, en donde se emitieron en total, aproximadamente, 6.000 toneladas de contaminantes criterio en el año 2022. La mayor parte de las emisiones generadas en esta subregión se encuentran asociadas a los dióxidos de azufre, con un total de 3.113,75 toneladas para el 2022, mientras que, el material particulado fino (PM<sub>2.5</sub>), es el contaminante criterio con las emisiones más bajas de la subregión. Por otra parte, Páramo presenta unas emisiones mucho menores en comparación con Bosques y Valles de San Nicolás, emitiendo en su mayoría material particulado. Por su parte Porce-Nus presenta unas emisiones muy bajas de contaminantes

criterio, debido a que solo cuenta con una empresa del sector químico que posee dos fuentes fijas, las cuales emiten únicamente dióxidos de azufre (SO<sub>2</sub>).



**Figura 3. Emisiones de contaminantes criterio por sector productivo.**

En cuanto a las emisiones de contaminantes criterio que se generan en los diversos sectores productivos que se identificaron en el inventario, se tiene que el sector de cerámicos, vitreos y ladrillos (CVL) genera las emisiones más elevadas, descargando a la atmósfera principalmente dióxidos de azufre (SO<sub>2</sub>) con un total de 2.484,26 toneladas en el 2022 y 5.207,36 toneladas de contaminantes criterio para este mismo año. Por el contrario, el sector de producción de plásticos (PCE) presenta las emisiones más bajas de contaminantes criterio, emitiendo un total de 0,3 toneladas en el 2022. Ver **Figura 3**.

### 3.1.2 Meteorología

Para correr el modelo Calpuff, primero se deben procesar los datos de la meteorología de superficie, de elevación del terreno, usos del suelo y meteorología de altura en Calmet, para esto se compró información simulada en WRF para el año 2022 para dos dominios: Valles de San Nicolas y La Unión, y La Calera, que cubre Sonsón y Puerto Triunfo. La información suministrada por el proveedor ya se encontraba procesada el CALWRF, por lo cual, la información estaba lista para ser ingresada a CALMET, por tanto, se siguieron las recomendaciones del proveedor para la configuración de CALMET.

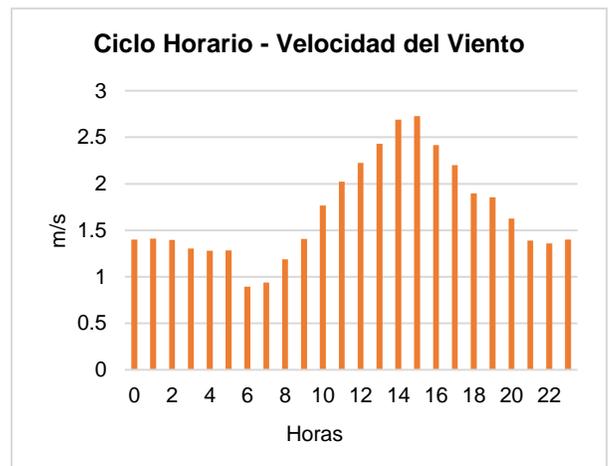
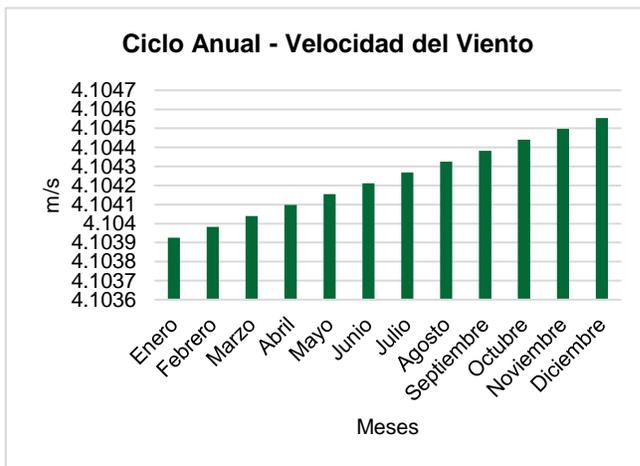
De la meteorología utilizada para correr el modelo se extrajeron nueve puntos estratégicos, los cuales se escogieron según la densidad de fuentes fijas puntuales y dispersas que se identificaron en la jurisdicción de la Corporación. Las coordenadas de estos puntos se presentan en la **Tabla 1**.

**Tabla 1. Coordenadas de los puntos estratégicos de la meteorología (Sistema Coordenadas: UTM 18N en km.**

Punto	X	Y
El Carmen de Viboral	463,313	672,097
Cocorná	478,913	669,697
Guarne	450,652	694,084
La Ceja	451,852	666,484
La Danta	519,713	645,697
La Unión	459,713	660,097
Marinilla	462,652	682,084
Puerto Triunfo	540,113	649,297
Rionegro	453,052	682,084

A continuación, se presenta una descripción de la meteorología de los nueve puntos seleccionados a fin de mostrar las variaciones de estas:

### 3.1.2.1 Rionegro

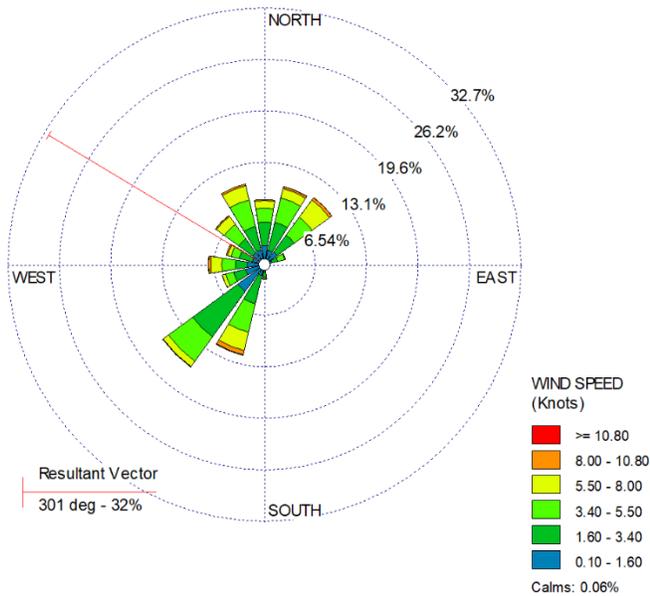


**Figura 4. Ciclo anual velocidad del viento Rionegro**

En la **Figura 4** se presenta el ciclo anual de la velocidad del viento del municipio de Rionegro en m/s, en esta figura se nota un comportamiento lineal, en el cual el mes de enero presenta la velocidad más baja mientras que aumenta progresivamente mes a mes, alcanzando el máximo valor en diciembre.

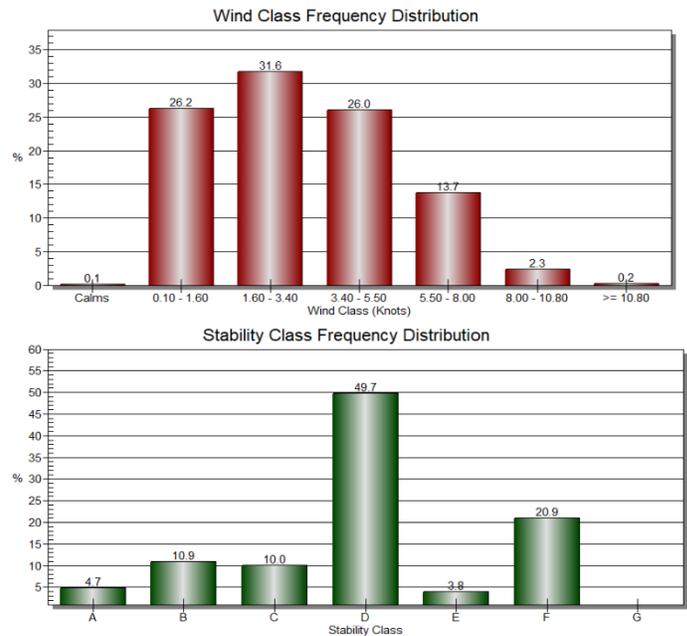
**Figura 5. Ciclo horario velocidad del viento Rionegro**

En **Figura 5** se presenta el ciclo horario de la velocidad del viento del municipio de Rionegro en m/s, donde se presenta una velocidad relativamente constante cercana a 1,5 m/s a partir de la hora 0 hasta las 5 de la mañana. Presentándose a las 6 de la mañana la velocidad mínima durante el día y aumentando progresivamente hora tras horas hasta alcanzar la velocidad máxima a las 3 de la tarde, donde la velocidad del viento comienza a disminuir hasta las 8 de la noche y allí alcanza nuevamente un valor de 1,5 m/s permaneciendo relativamente constante por el resto de la noche.



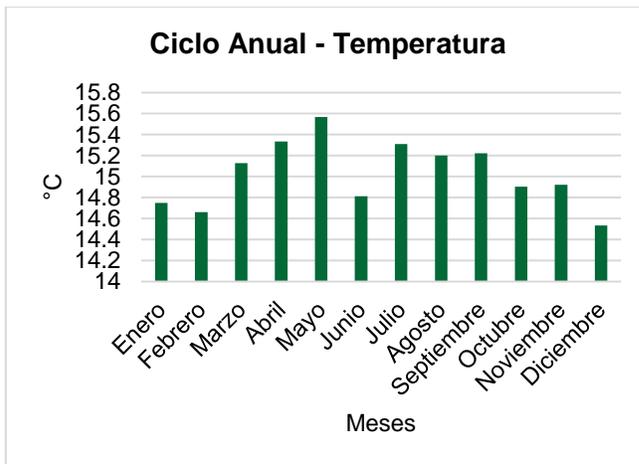
**Figura 6. Rosa de vientos Rionegro**

En la **Figura 6** se presenta la rosa de vientos para el municipio de Rionegro en donde se evidencia que los vientos provienen desde el noroeste, además, la **Figura 7** muestra la

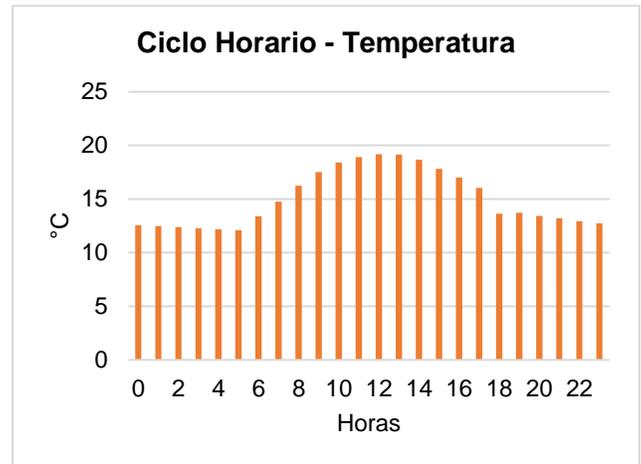


**Figura 7. Análisis de vientos Rionegro**

distribución de la frecuencia de estos vientos, en donde se evidencia que el 31,6% del tiempo los vientos presentan una velocidad que está entre 1,6 m/s y 3,4 m/s, el 26,2% se presentan vientos entre 0,1 m/s y 1,6 m/s. Y el 26% de los vientos se encuentran con velocidades entre 3,4 m/s y 5 m/s. únicamente el 0,1% del tiempo está en calma y el 16,2% de los vientos que presentan velocidades superiores a 5 m/s en su mayoría se deben a ráfagas de vientos que se presentan en la zona evaluada.



**Figura 8. Ciclo anual temperatura Rionegro**

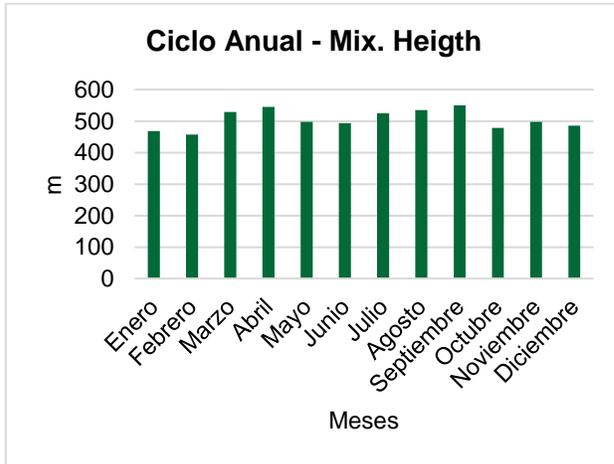


**Figura 9. Ciclo horario temperatura Rionegro**

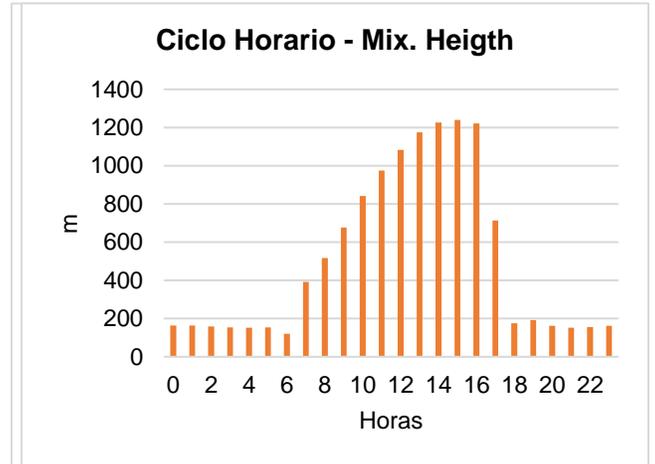
En la **Figura 8** se presenta el ciclo anual de la temperatura en °C para el municipio de Rionegro. Esta figura muestra que en los meses de enero y febrero la temperatura permanece relativamente constante, siendo algo más baja en el mes de febrero con una temperatura aproximadamente de 14,7°C, también, muestra un aumento a partir del mes de marzo hasta alcanzar la temperatura máxima en el mes de mayo y disminuyendo drásticamente en el mes de junio alcanzando nuevamente valores cercanos a 14,8 °C. Entre los meses de julio y septiembre se presenta una velocidad relativamente constante con valores aproximados a 15,2 °C. Para el mes de diciembre la temperatura alcanza su valor mínimo con un valor cercano a 14,5 °C.

En la **Figura 9** se presenta el ciclo horario de la temperatura para el municipio de Rionegro, en ella se evidencia que la temperatura es aproximadamente constante durante las primeras horas de la madrugada y a partir de las 6 de la mañana empieza a aumentar progresivamente hasta alcanzar la temperatura máxima al mediodía (12 pm). A esta hora

comienza a disminuir hasta las 6 de la tarde donde alcanza un valor de 14 °C donde permanece relativamente constante el resto de la noche.



**Figura 10. Ciclo anual altura de capa de mezcla Rionegro.**



**Figura 11. Ciclo horario altura de capa de mezcla Rionegro.**

En la **Figura 10** se presenta el ciclo anual de la altura de la capa de mezcla atmosférica, en donde se nota un comportamiento relativamente constante, ya que la altura se mantiene entre los 450 metros y los 550 metros. Sin embargo, el mes que presenta la altura de la capa de mezcla menor es febrero, mientras que abril y septiembre presentan las alturas de mezcla más altas durante el año.

Por otro lado, la **Figura 11** enseña el ciclo horario de la altura de capa de mezcla atmosférica, en donde se aprecia que en la madrugada esta altura se mantiene relativamente constante y no llega a los 200 m, sin embargo, a partir de la 7 de la mañana la altura de capa de mezcla comienza a aumentar hora tras hora hasta llegar a su valor máximo a las 3 de la tarde con una altura de 1200 m. A las 5 de la tarde la altura disminuye drásticamente y a las 6 de la tarde llega a una altura de 180 m, aproximadamente, donde se mantiene relativamente constante por el resto de la noche.

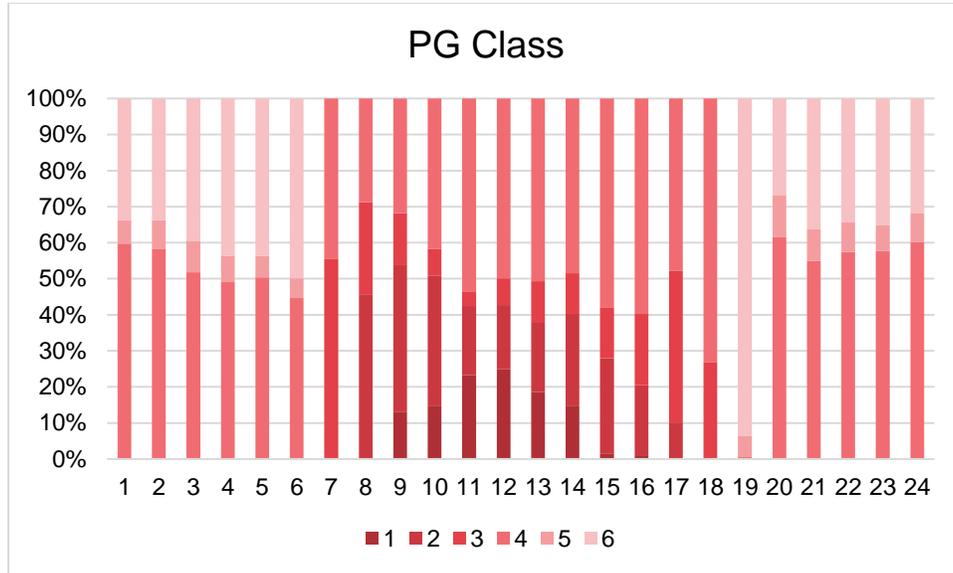
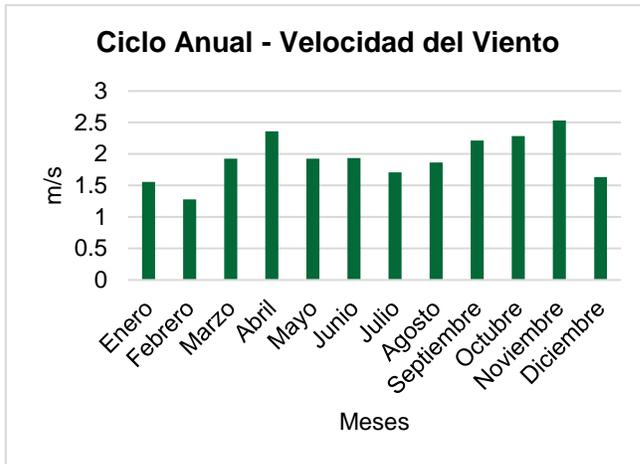


Figura 12. PG Class Rionegro.

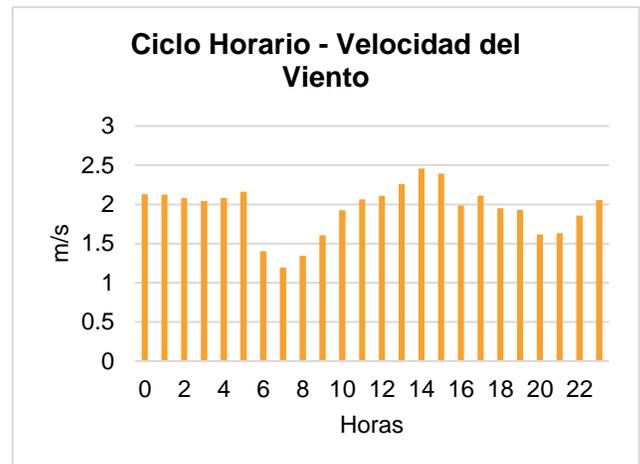
La **Figura 12** presenta la estabilidad atmosférica según las clases de Pasquill Gifford (Pasquill Gifford class) en donde las clases se representan numéricamente y no alfabéticamente debido a que el modelo trabaja únicamente con números. Siendo el 6 un valor que representa estabilidad en la atmósfera y 1 representando condiciones de inestabilidad. Por tanto, en esta figura se aprecia que la atmósfera durante la madrugada presenta condiciones entre neutras y estables, mientras que, en las primera horas de la mañana comienza a presentar condiciones de inestabilidad, presentando al medio día las condiciones más inestables hasta la tarde, en donde a las 7 de la noche, en donde la atmósfera empieza a estabilizarse y presenta condiciones neutras y estables durante la noche.

### 3.1.2.2 La Ceja

La **Figura 13** presenta el ciclo anual de la velocidad del viento para el municipio de La Ceja, en donde se evidencian dos picos en los meses de abril y noviembre con una velocidad del viento aproximada a los 2,5 m/s. Por otro lado, las velocidades más bajas se presentan en los meses de enero, febrero, julio y diciembre.



**Figura 13. Ciclo anual velocidad del viento La Ceja.**



**Figura 14. Ciclo horario velocidad del viento La Ceja.**

En la **Figura 14** se presenta el ciclo horario de la velocidad del viento del municipio de La Ceja, en este, se observa que, en las horas de la madrugada, la velocidad del viento permanece relativamente constante con valores un poco mayores a los 2 m/s. Luego, a las 6 de la mañana la velocidad disminuye hasta alcanzar un valor inferior a los 1,5 m/s y a las 7 de la mañana se presenta la velocidad más baja con un valor cercano a 1 m/s, donde la velocidad el viento comienza a incrementarse hora tras hora hasta llegar a su máximo a las 2 de la tarde con un valor cercano a los 2,5 m/s. Allí comienza a disminuir hasta las 9 de la noche donde nuevamente comienza a aumentar.

La **Figura 15** muestra la rosa de vientos para el municipio de La Ceja, en ella se observa que, los vientos soplan en su mayoría desde el suroeste. Adicionalmente, la **Figura 16** muestra que el 27,7% del tiempo la velocidad del viento está entre 1,6 m/s y 3,4 m/s. El 25,1% del tiempo la velocidad está entre 3,4 m/s y 5,5 m/s. Solamente, el 0,1% del tiempo los vientos estuvieron en calma en este municipio. En cuanto a la estabilidad de la atmósfera, se tiene que el 51,1% del tiempo la atmósfera presentó condiciones neutrales.

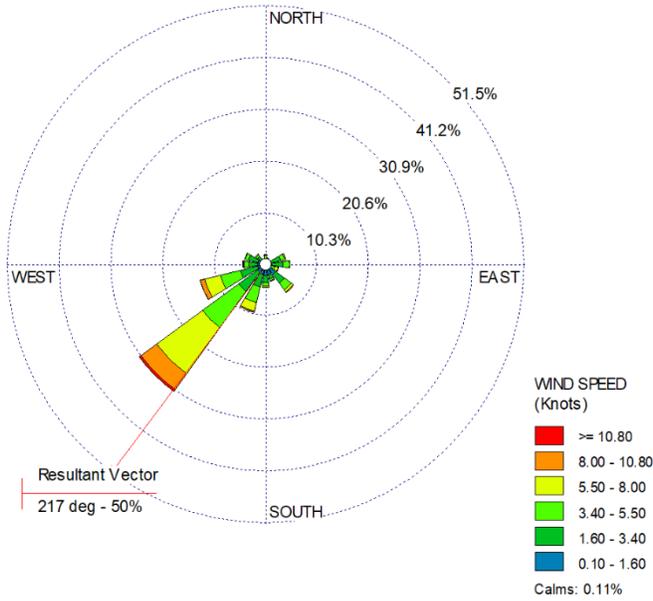


Figura 15. Rosa de vientos La Ceja.

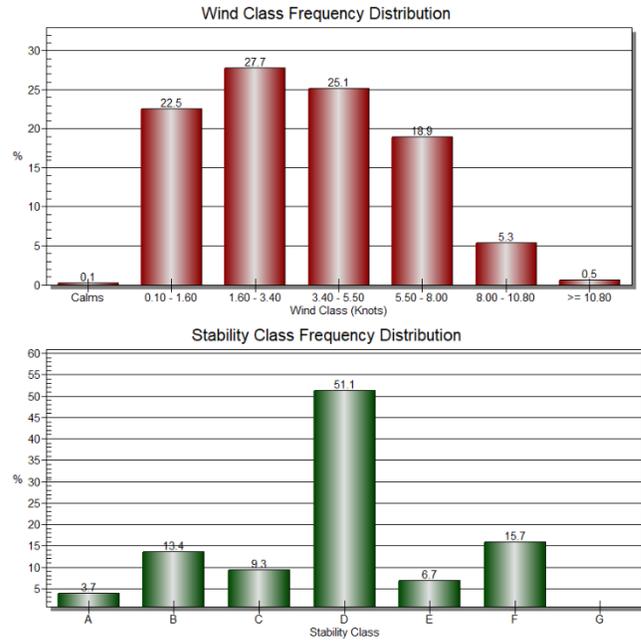


Figura 16. Análisis de vientos La Ceja.

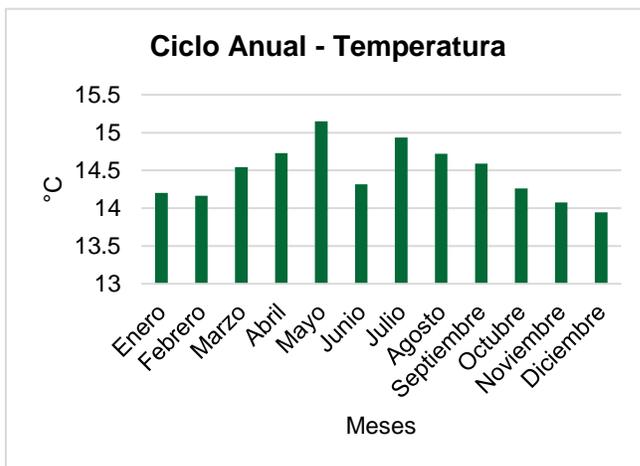


Figura 17. Ciclo anual temperatura La Ceja.

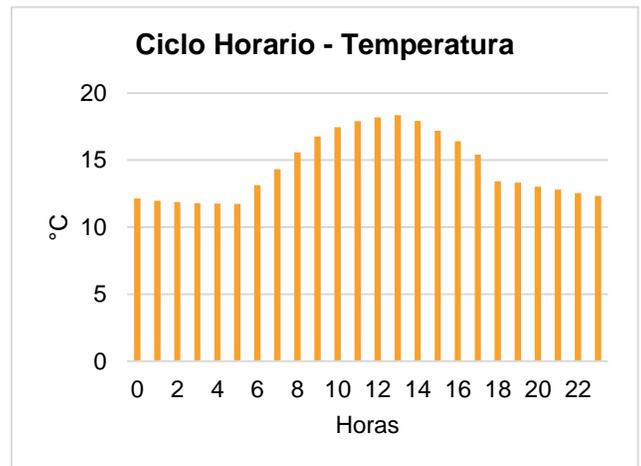
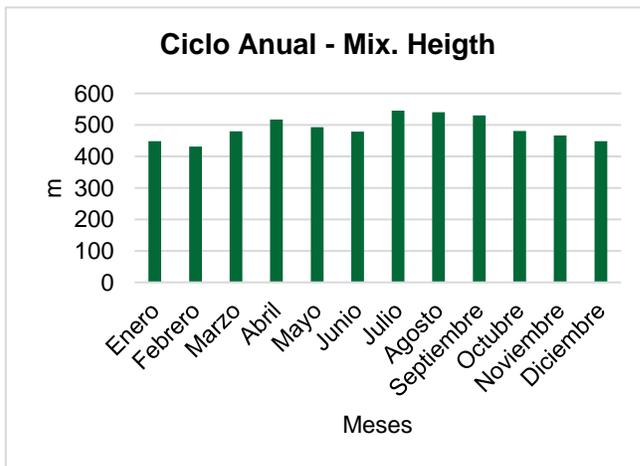


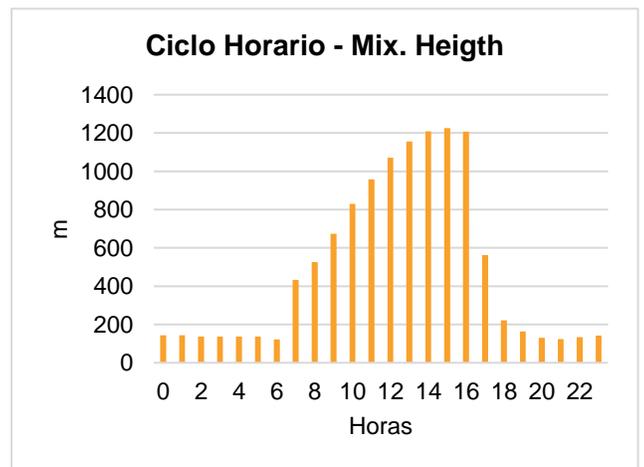
Figura 18. Ciclo horario temperatura La Ceja.

La **Figura 17** expone el ciclo anual de la temperatura para el municipio de La Ceja, allí se observa que la temperatura al inicio del año tiene valores cercanos a los 14°C y va aumentando mes tras mes hasta alcanzar el pico más alto en el mes de mayo con un valor de 15,1°C, disminuyendo drásticamente en el mes de junio alcanzando nuevamente los 14°C. En julio las temperaturas vuelven a aumentar adquiriendo un valor de casi 15°C y disminuyendo mes a mes hasta que en diciembre se presentan las temperaturas más bajas del año con valores inferiores a los 14°C.

Por otro lado, la **Figura 18** presenta el ciclo horario de la temperatura del municipio de La Ceja, en él, se observa que la temperatura permanece relativamente constante en la madrugada y a partir de las 7 de la mañana cuando hay mayor radiación proveniente del sol, es cuando comienza a aumentar la temperatura hasta que a la 1 de la tarde llega a su pico más alto con un valor aproximado de 18°C. A partir de las 2 de la tarde, la temperatura comienza a disminuir hasta las 6 de la tarde en donde alcanza un valor de 13°C aproximadamente y se mantiene relativamente constante el resto de la noche.

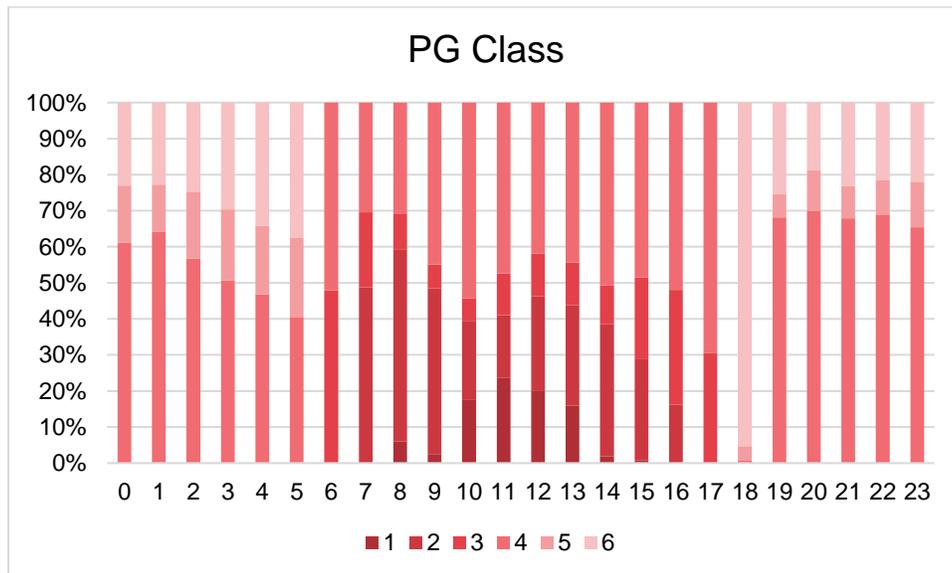


**Figura 19. Ciclo anual altura de mezcla La Ceja.**



**Figura 20. Ciclo horario altura de mezcla La Ceja.**

La **Figura 19** presenta el ciclo anual de la altura de la capa de mezcla atmosférica, en donde se observa que las variaciones no son extremas y las alturas más bajas se dan en enero, febrero, noviembre y diciembre. Mientras que en los meses de julio y agosto se dan las alturas máximas. Por otro lado, en la **Figura 20** se presenta el ciclo horario en donde se observa que, en las horas de la madrugada, hasta las 6 de la mañana se altura de la capa de mezcla se mantiene constante con un valor aproximado de 180 m y a partir de las 7 de la mañana la altura aumenta hora tras hora hasta llegar a su pico más alto a las 3 de la tarde en donde alcanza una altura máxima de 1200 m. A las 5 de la tarde disminuye de forma drástica y a las 6 de la tarde alcanza un valor aproximado de 200 m en donde permanece relativamente constante el resto de la noche.

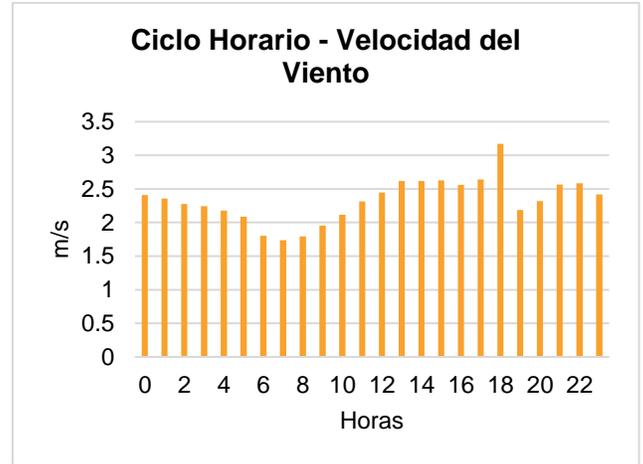
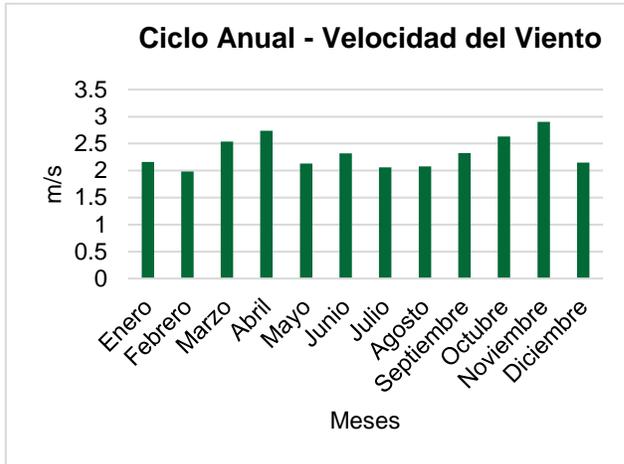


**Figura 21. PG Class La Ceja.**

La **Figura 21** presenta la estabilidad atmosférica según las clases de Pasquill Gifford (Pasquill Gifford class) en donde las clases se representan numéricamente y no alfabéticamente debido a que el modelo trabaja únicamente con números. Siendo el 6 un valor que representa estabilidad en la atmósfera y 1 representando condiciones de inestabilidad. Por tanto, en esta figura se aprecia que en la madrugada la atmósfera presenta condiciones moderadamente estables y neutras, mientras que, en las horas de la mañana y la tarde, es decir, entre las 6 de la mañana y la 5 de la tarde, la atmósfera presenta condiciones inestables y neutras. A las 6 de la tarde es cuando la atmósfera presenta las

condiciones de mayor estabilidad y el resto de la noche se presentan condiciones neutrales y de estabilidad.

### 3.1.2.3 El Carmen de Viboral



**Figura 22. Ciclo anual velocidad del viento El Carmen de Viboral.**

**Figura 23. Ciclo horario velocidad del viento El Carmen de Viboral.**

En la **Figura 22** se presenta el ciclo anual de la velocidad del viento para el municipio del Carmen de Viboral, en donde se aprecian dos picos. El primero se da el mes de abril siendo algo más moderado con un valor aproximado de 2,7 m/s y el segundo pico se observa en el mes de noviembre en donde la velocidad del viento alcanza su valor máximo de aproximadamente 2,9 m/s. Además, la **Figura 23** presenta el ciclo horario de la velocidad del viento, en donde se observa que en la madrugada la velocidad es de aproximadamente 2,5 m/s y va disminuyendo paulatinamente hasta las 7 de la mañana donde alcanza un valor de 1,6 m/s. A partir de las 8 de la mañana, comienza a aumentar hasta la 1 de la tarde en donde alcanza un valor un poco mayor a los 2,5 m/s y permanece constante hasta las 6 de la tarde donde presenta el valor máximo de 3,2 m/s. A las 7 de la noche la velocidad disminuye alcanzando una velocidad de 2,2 m/s y comienza a aumentar hasta las 10 de la noche.

En las **Figura 24** se presenta la rosa de vientos para el Carmen de Viboral en donde se evidencia que los vientos soplan desde el suroeste. Además, según la **Figura 25** el 37,3% del tiempo los vientos poseen una velocidad entre 3,4 m/s y 5,5 m/s. El 26,4% del tiempo la velocidad del viento está entre 1,6 m/s y 3,4 m/s. No se reportan vientos en calma. Y se

alcanzan a presentar algunos vientos superiores a 10,8 m/s, representando el 1,1% del tiempo evaluado. Finalmente, en cuanto a la estabilidad de la atmósfera, se tiene que el 70,1% del tiempo, la atmósfera presenta condiciones neutrales.

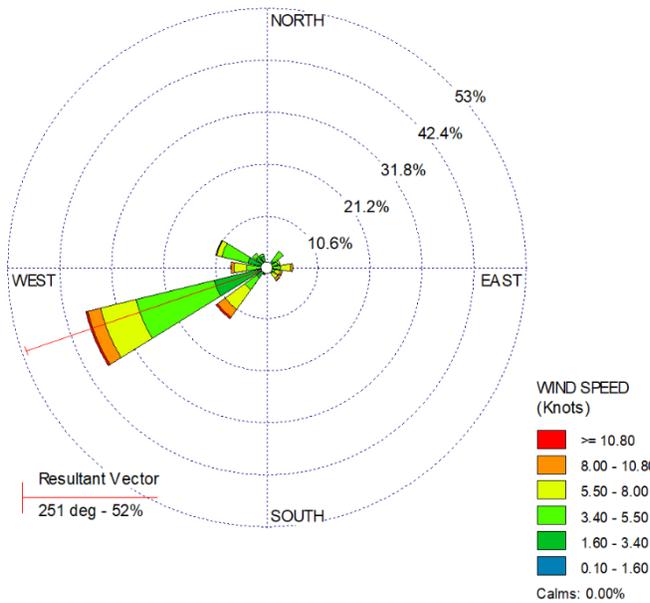


Figura 24. Rosa de vientos El Carmen de Viboral.

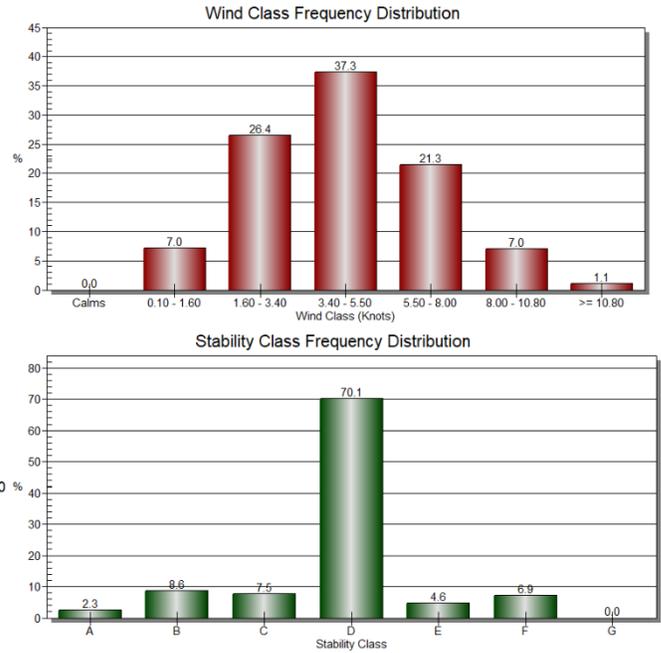
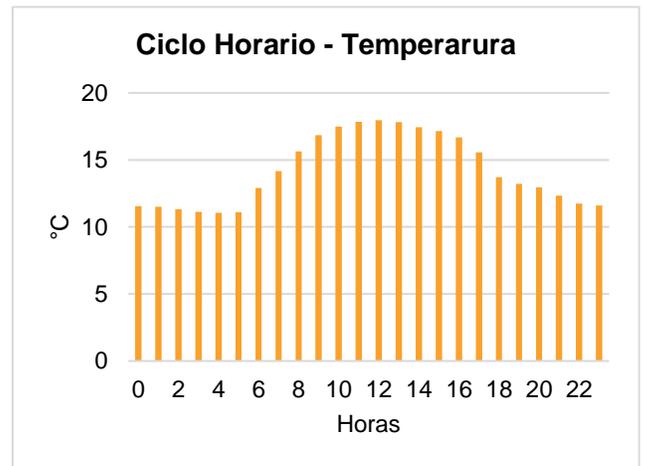
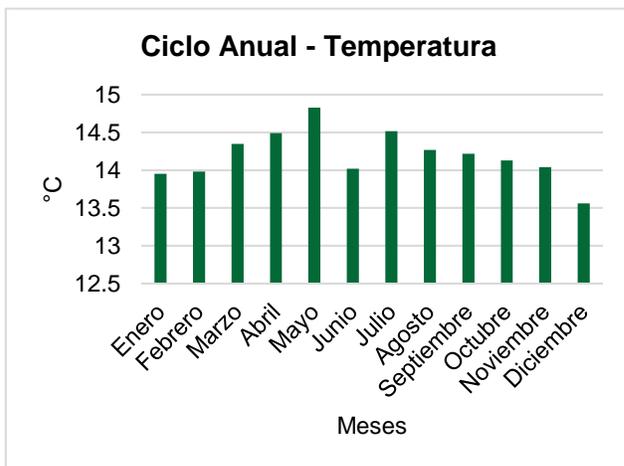


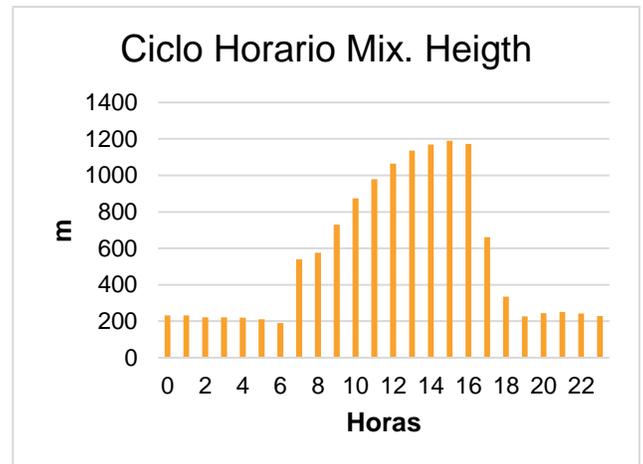
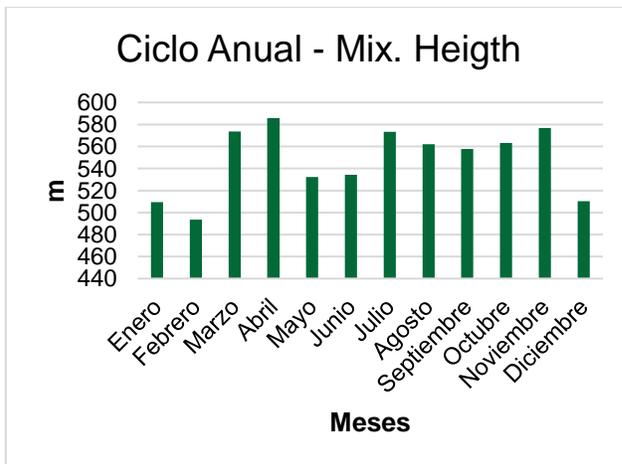
Figura 25. Análisis de vientos El Carmen de Viboral.



**Figura 26. Ciclo anual temperatura El Carmen de Viboral.**

**Figura 27. Ciclo horario temperatura El Carmen de Viboral.**

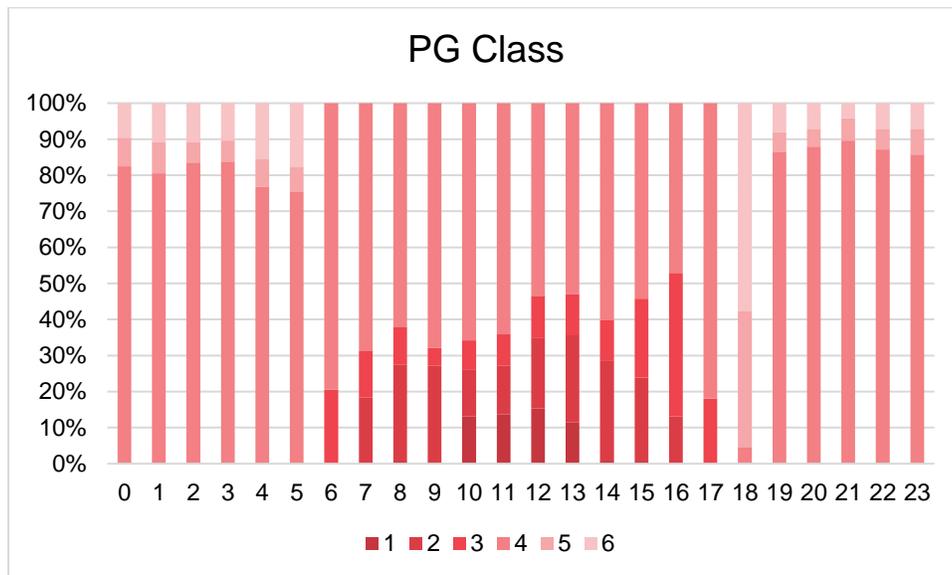
La **Figura 26** presenta el ciclo anual de la temperatura para El Carmen de Viboral, en donde la temperatura aumenta mes a mes hasta que en mayo alcanza su pico máximo con un valor de 14,7 °C. Para el siguiente mes, es decir, junio, la temperatura baja drásticamente alcanzando los 14°C. En julio la temperatura sube hasta los 14,5 °C y comienza a disminuir mes a mes hasta que en diciembre se reporta la temperatura más baja con un valor de 13,6 m/s. Por otro lado, en la **Figura 27** se presenta el ciclo horario para la temperatura, allí es notable que la temperatura a la madrugada presenta valores relativamente constantes disminuyendo poco a poco en cada hora. A las 6 de la mañana, cuando la radiación del sol comienza a incidir en la tropósfera, la temperatura aumenta como es de esperarse hasta alcanzar el pico máximo al mediodía alcanzando un valor aproximado de 17°C. Luego la temperatura disminuye hasta las 6 de la tarde en donde obtiene un valor aproximado de 13°C y allí comienza a disminuir más sutilmente hasta alcanzar los 11°C aproximadamente debido a que no hay radiación solar y la tropósfera comienza a liberar la energía obtenida durante el día.



**Figura 28. Ciclo anual altura de mezcla El Carmen de Viboral.**

**Figura 29. Ciclo horario altura de mezcla El Carmen de Viboral.**

La **Figura 28** expone el ciclo anual de la altura de la capa de mezcla atmosférica del Carmen de Viboral, allí se observa que la altura de la capa de mezcla es un poco variable y no sigue un comportamiento determinado. La altura máxima se registra en el mes de abril con 580 metros y la altura mínima se presenta en febrero con 490 metros. Por otra parte, el ciclo horario de la altura de capa de mezcla se presenta en la **Figura 29** en donde se observa que en la madrugada la altura de mezcla es muy baja en comparación con el resto del día, con un valor relativamente constante hasta las 6 de la madrugada, sin embargo, a partir de las 6 de la mañana la altura comienza a aumentar considerablemente hasta las 3 de la tarde en donde se llega al valor máximo con una altura de 1200 metros. Después, la altura disminuye drásticamente alcanzando los mismo valores presentados en la madrugada que son aproximadamente 200 metros de altura.

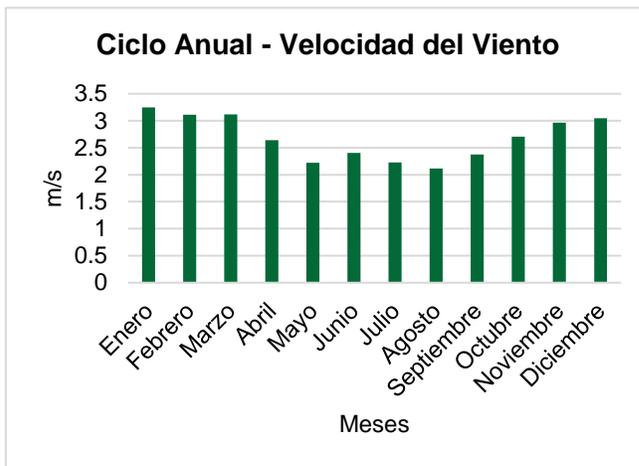


**Figura 30. PG Class El Carmen de Viboral.**

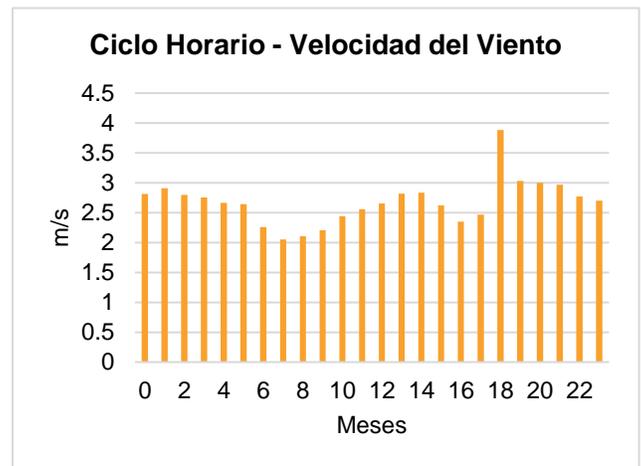
La **Figura 30** presenta la estabilidad atmosférica según las clases de Pasquill Gifford (Pasquill Gifford class) en donde las clases se representan numéricamente y no alfabéticamente debido a que el modelo trabaja únicamente con números. Siendo el 6 un valor que representa estabilidad en la atmósfera y 1 representando condiciones de inestabilidad. Por tanto, en esta figura se aprecia que la atmósfera durante la madrugada presenta condiciones mayormente neutras y en poco porcentaje condiciones estables, mientras que, en las primera horas de la mañana comienza a presentar condiciones de

inestabilidad, pues entre las 10 de la mañana y la 1 de la tarde se presentan las condiciones más inestables de la atmósfera durante el día, estas condiciones de inestabilidad se dan hasta las 7 de la noche, en donde la atmósfera empieza a estabilizarse y presenta condiciones neutras y estables durante el resto de la noche.

### 3.1.2.4 La Unión



**Figura 31. Ciclo anual velocidad del viento La Unión.**



**Figura 32. Ciclo horario velocidad del viento La Unión.**

La **Figura 31** enseña el ciclo anual de la velocidad del viento para el municipio de La Unión en donde se aprecia que los primeros meses del año la velocidad del viento es cercana a 3 m/s y a mitad del año disminuye adquiriendo valores cercanos a 2 m/s. A partir de septiembre la velocidad del viento comienza a aumentar hasta que en diciembre vuelve a obtener valores cercanos a los 3 m/s. Adicionalmente, la **Figura 32** presenta el ciclo horario de la velocidad el viento, allí se aprecian tres especies de picos en donde la velocidad tiene valores cercanos a 3 m/s y dos valles en donde la velocidad es cercana a 2 m/s. A las 6 de la tarde se presenta una velocidad extrema cercana a los 4 m/s.

En la **Figura 33** se observa la rosa de vientos para La Unión, allí se evidencia que los vientos provienen del noroeste. Además, en la **Figura 34** se puede notar que la mayoría del tiempo, el 31,8%, la velocidad del viento se encuentra entre 3,4 m/s y 5,5 m/s. Y el 29,8% del tiempo, la velocidad del viento está entre 5,5 m/s y 8 m/s. Con relación a la

estabilidad atmosférica que se presenta, se tiene que el 66% del tiempo la atmósfera presenta condiciones neutrales de estabilidad.

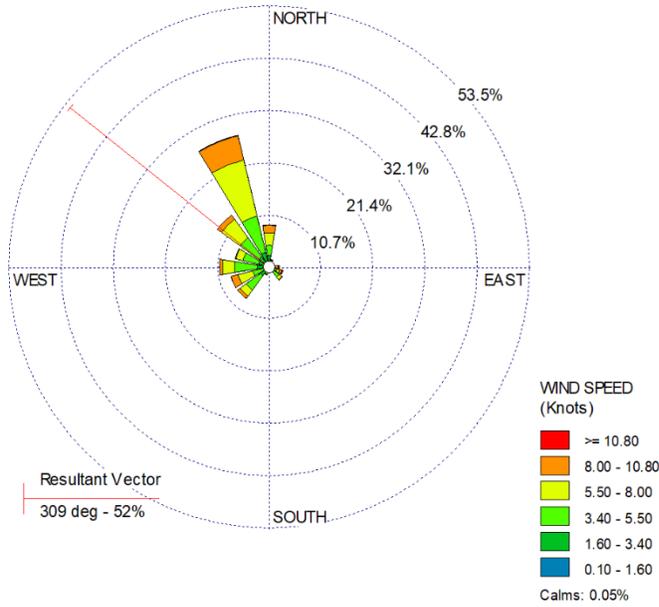


Figura 33. Rosa de vientos La Unión.

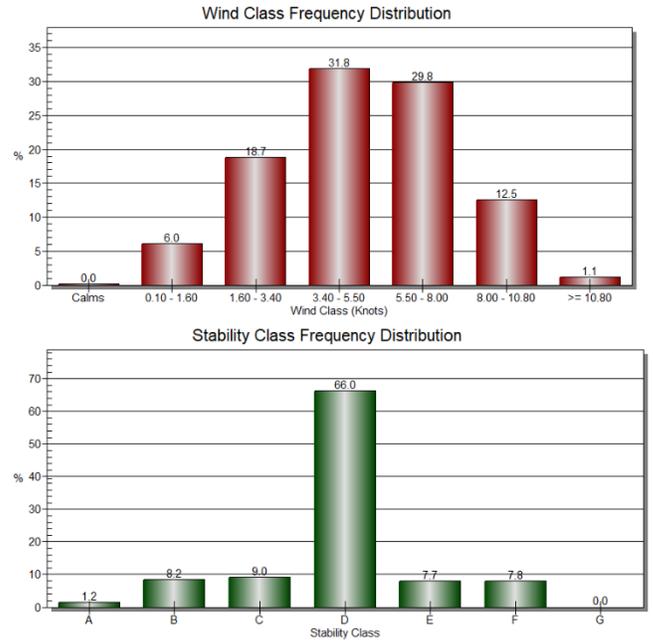
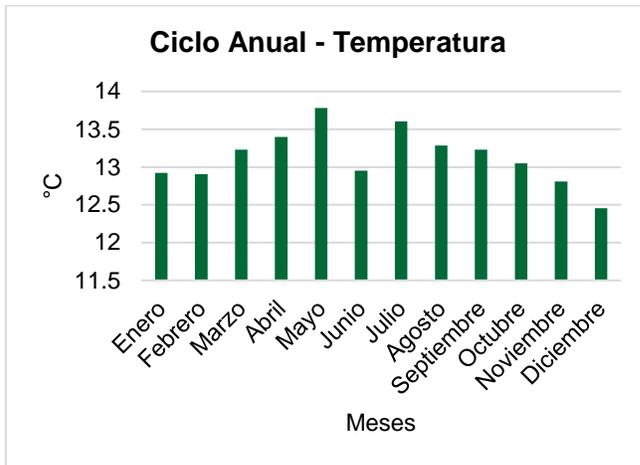
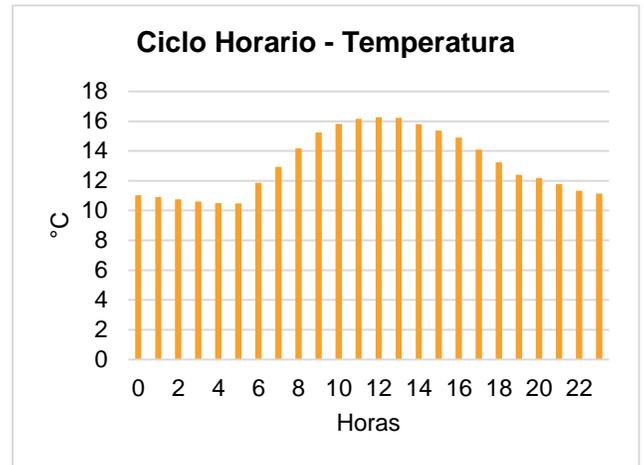


Figura 34. Análisis de vientos La Unión.

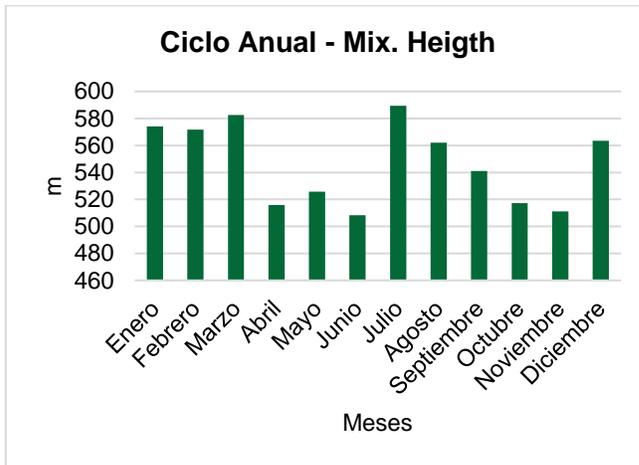


**Figura 35. Ciclo anual temperatura La Unión.**

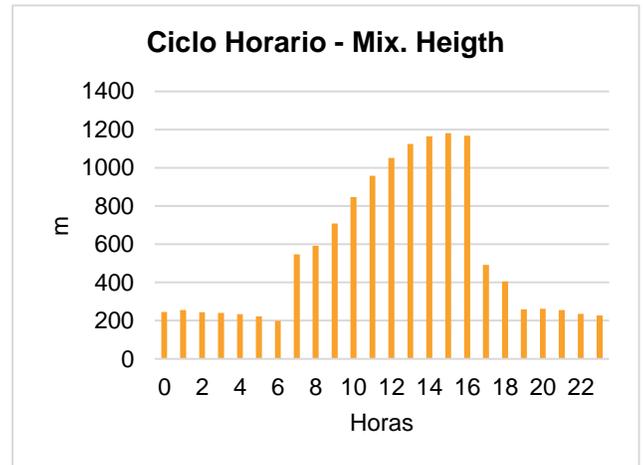


**Figura 36. Ciclo horario temperatura La Unión.**

El ciclo anual de la temperatura para el municipio de La Unión se presenta en la **Figura 35** en donde el primer semestre del año la temperatura aumenta de forma progresiva hasta el mes de mayo donde se presenta la temperatura máxima con un valor de 13,7°C. En el mes de junio la temperatura disminuye drásticamente alcanzando los 13°C aproximadamente y vuelve a aumentar en julio. Para el segundo semestre del año la temperatura comienza a disminuir mes a mes hasta en diciembre alcanzar el valor mínimo con una temperatura cercana a los 12,5°C. Adicionalmente, en la **Figura 36** se presenta el ciclo horario de la temperatura, la cual muestra que en las horas de la madrugada y la noche la temperatura es relativamente constante y presenta los valores más bajos que están cercanos a los 11 m/s y en las horas del mediodía donde la incidencia del sol es mayor, se presentan las temperaturas más altas alcanzando valores cercanos a los 16°C.



**Figura 37. Ciclo anual altura de mezcla La Unión.**



**Figura 38. Ciclo horario altura de mezcla La Unión.**

La **Figura 37** enseña el ciclo anual de la altura de la capa de mezcla atmosférica en donde no se nota un comportamiento determinado. Sin embargo, la altura máxima se presenta en julio con un valor de 590 metros, mientras que la altura de la capa de mezcla mínima se presenta en el mes de junio en donde la altura es de aproximadamente 510 metros. Esto quiere decir que, la altura mínima presentada en junio aumenta abruptamente presentándose en el siguiente mes la altura máxima. Además, según la **Figura 38** muestra el ciclo horario de la altura de capa de mezcla atmosférica, en donde se evidencia que en las horas de la madrugada y de la noche la altura presenta los valores más bajos, con una altura cercana a los 200 metros. Mientras que a partir de las 7 de la mañana, la altura comienza a aumentar progresivamente hasta alcanzar la altura máxima equivalente a 1200 metros. Y a partir de las 5 de la tarde la altura disminuye abruptamente hasta alcanzar nuevamente valores cercanos a los 200 metros.

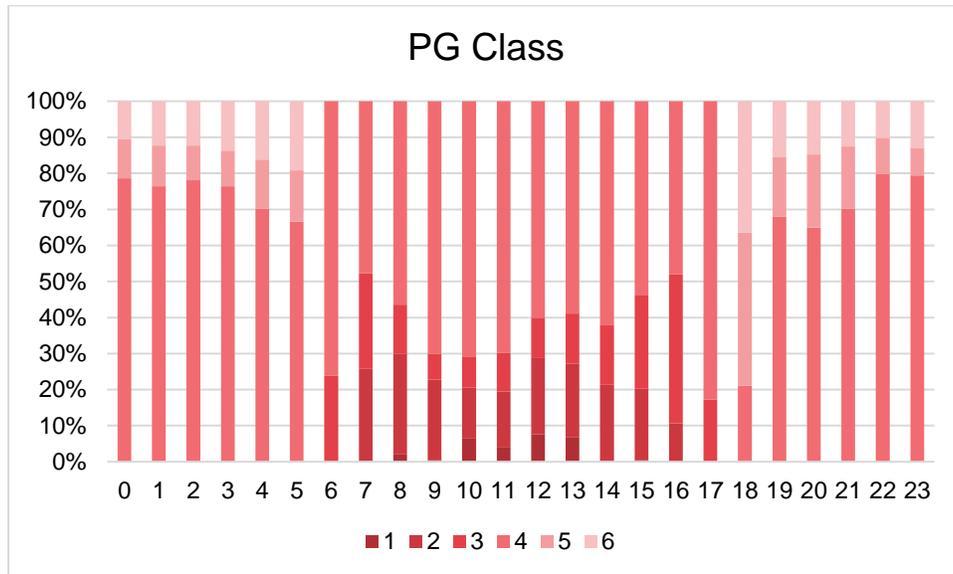
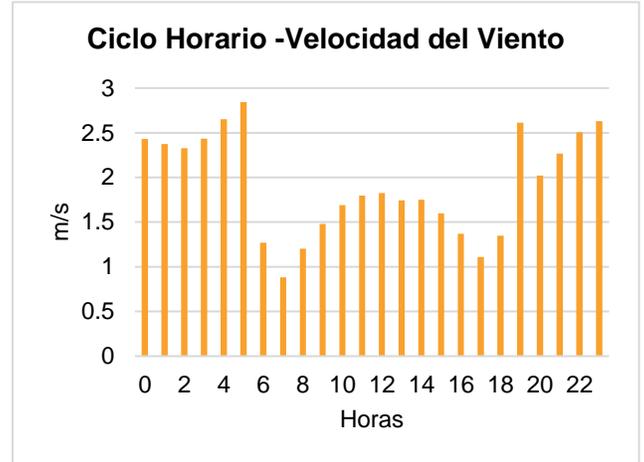
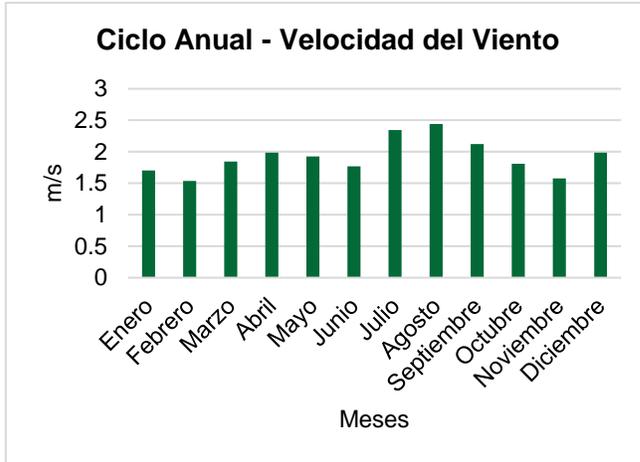


Figura 39. PG Class La Unión.

En cuanto a estabilidad atmosférica, según las clases de Pasquill Gifford (Pasquill Gifford class), se tiene que la atmósfera durante la madrugada presenta condiciones mayormente neutras y en poco porcentaje condiciones estables, mientras que, en las primera horas de la mañana comienza a presentar condiciones de inestabilidad, pues entre las 7 de la mañana y las 4 de la tarde se presentan las condiciones más inestables de la atmósfera durante el día, estas condiciones de inestabilidad se dan hasta las 6 de la tarde, en donde la atmósfera empieza a estabilizarse y presenta condiciones neutras y estables durante el resto de la noche. Ver **Figura 39**

### 3.1.2.5 Cocorná



**Figura 40. Ciclo anual velocidad del viento Cocorná.**

**Figura 41. Ciclo horario velocidad del viento Cocorná.**

En cuanto al municipio de Cocorná, **Figura 40** presentan el ciclo anual, en el cual se evidencia que los meses que presentan las velocidad del viento más altas son agosto, seguido de julio y por último abril y diciembre. Por otra parte, la **Figura 41** presenta el ciclo horario en donde se evidencia que las velocidades más altas se presentan en las horas de la madrugada y de la noche, mientras que, en la mañana y en la tarde la velocidad presenta valores más bajos, especialmente a las 6 de la mañana y a las 5 de la tarde.

En la **Figura 42** se presenta la rosa de vientos para el municipio de Cocorná en donde se aprecia que los vientos provienen del suroeste, adicionalmente, la **Figura 43** muestra que el 32% del tiempo, los vientos poseen una velocidad entre 1,6 m/s y 3,4 m/s. También que, el 26,1% de las veces las velocidades están entre 0,1 m/s y 1,6 m/s. Se presenta únicamente un 0,1 % de vientos en calma y 5,3% de vientos con velocidades superiores a 10,8 m/s. En cuanto a la estabilidad atmosférica, se tiene que, 36,8% del tiempo, se presentan condiciones neutrales.

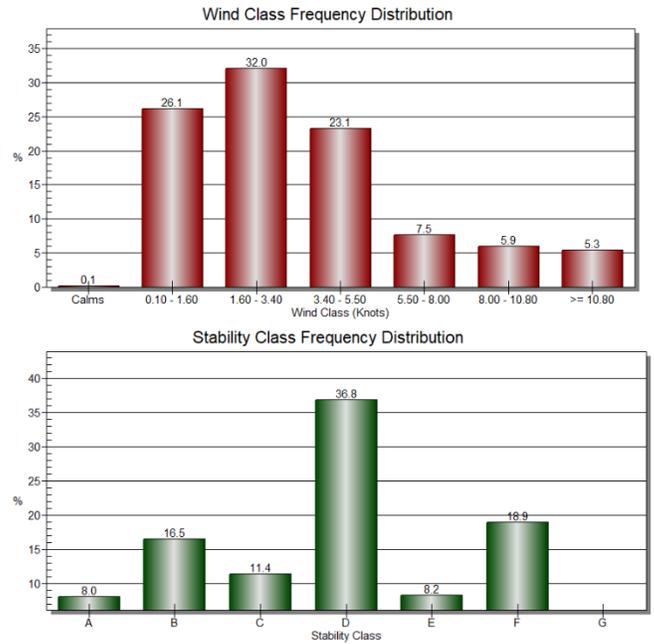
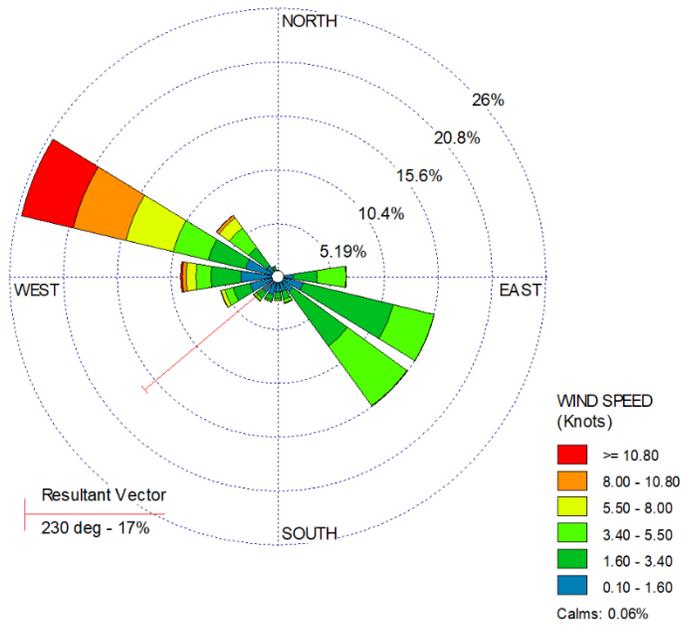
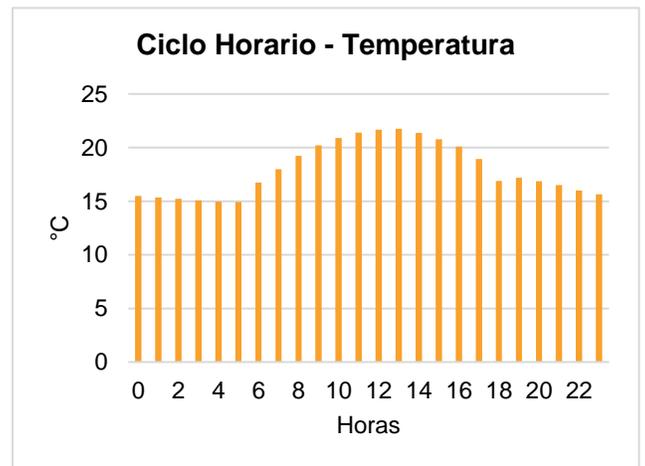
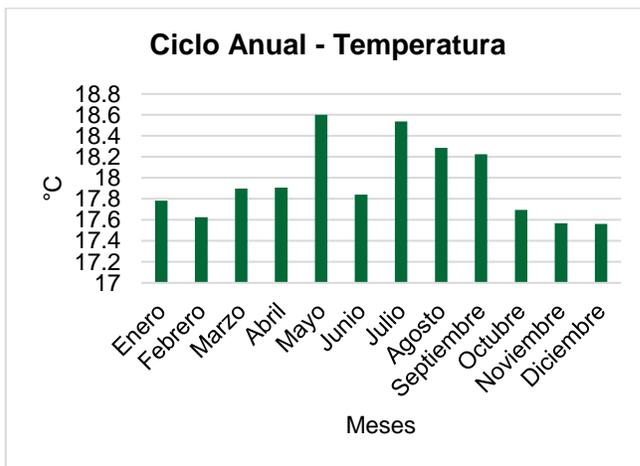


Figura 42. Rosa de viento Cocorná.

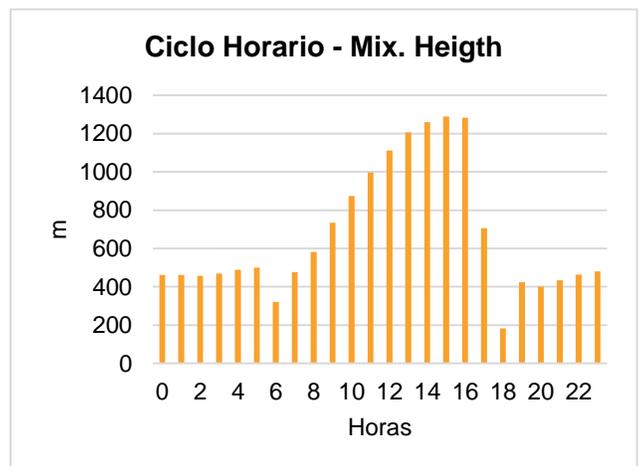
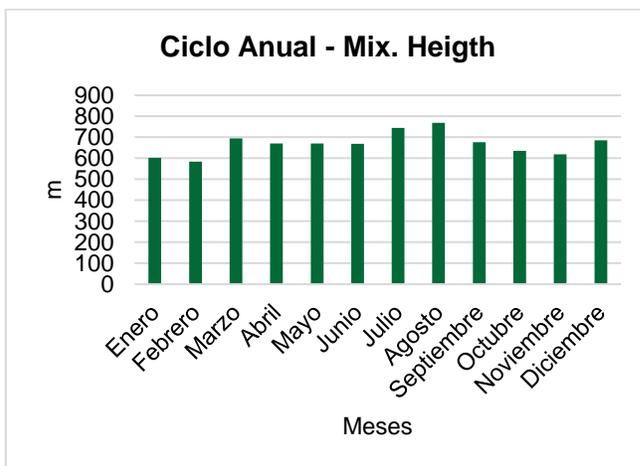
Figura 43. Análisis de vientos Cocorná.



**Figura 44. Ciclo anual temperatura Cocorná.**

**Figura 45. Ciclo horario temperatura Cocorná.**

En la **Figura 44** se enseña el ciclo anual de la temperatura para el municipio de Cocorná, en él se evidencia que la temperatura aumenta progresivamente mes a mes hasta llegar a la temperatura máxima de 18,6°C. Sin embargo, en junio la temperatura baja rápidamente y en julio vuelve a aumentar drásticamente y a partir de este mes comienza a disminuir paulatinamente hasta alcanzar el valor más bajo en el mes de diciembre con temperaturas de 17,5°C. Además, en la **Figura 45** se muestra el ciclo horario de la temperatura en donde las horas de la madrugada y la noche son aquellas que presentan las temperaturas más bajas debido a que no hay incidencia del sol, sin embargo, la temperatura aumenta durante la mañana hasta llegar al valor máximo al mediodía donde comienza a disminuir hasta la noche en donde alcanza un valor de 17°C que se mantiene relativamente constante por el resto del día.

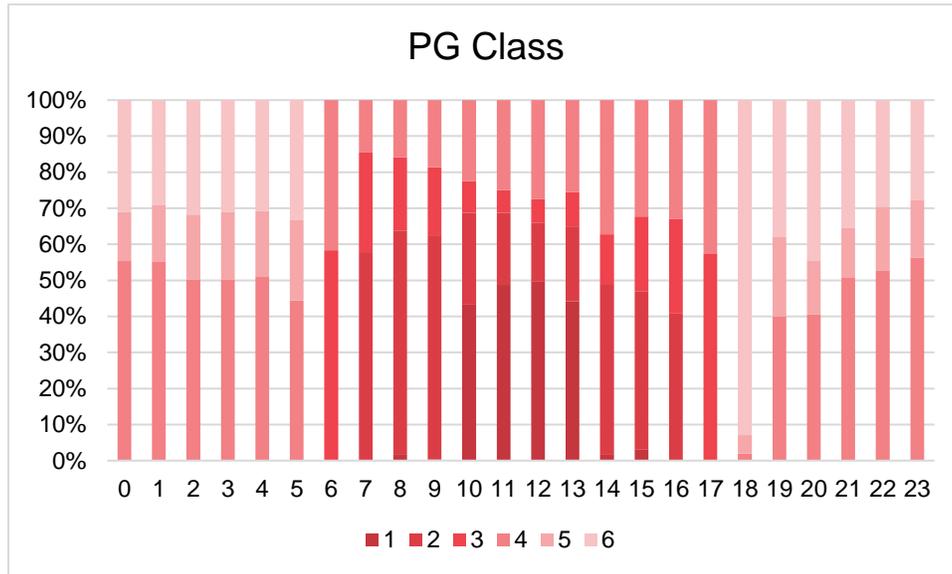


**Figura 46. Ciclo anual altura de mezcla Cocorná.**

**Figura 47. Ciclo horario altura de mezcla Cocorná.**

La **Figura 46** presenta el ciclo anual de la altura de capa de mezcla atmosférica, allí se aprecia que las variaciones durante el año son sutiles, teniendo un valor máximo de 780 metros y un valor mínimo de 590 metros. Por otro lado, en la **Figura 47** se expone el ciclo horario, allí se observa que la altura de capa de mezcla permanece relativamente constante y a niveles más bajos durante la madrugada y la noche, con valores alrededor de los 450 metros. Mientras que, a partir de las 6 de la mañana, la altura comienza a aumentar hasta

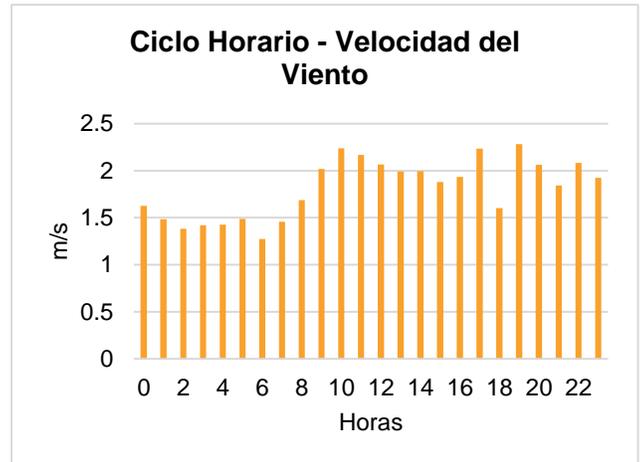
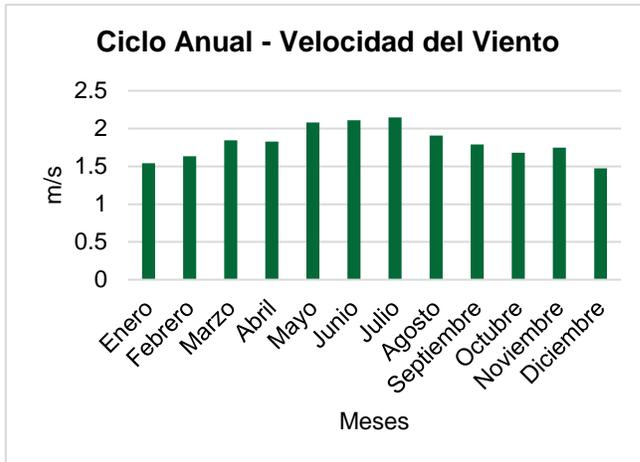
alcanzar el valor máximo a las 3 de la tarde. A partir de las 5 de la tarde disminuye abruptamente adquiriendo los mismos valores de la madrugada.



**Figura 48. PG Class Cocorná.**

En cuanto a estabilidad atmosférica, según las clases de Pasquill Gifford (Pasquill Gifford class), se tiene que la atmósfera durante la madrugada presenta condiciones neutras y estables, mientras que, entre las 6 de la mañana y las 5 de la tarde se presentan en mayor medida condiciones moderadamente inestables y en un poco porcentaje se dan condiciones neutras. Las 6 de la tarde es la hora más estable atmosféricamente y entre las 7 y las 11 de la noche se presentan condiciones neutras y estables. Ver **Figura 48**.

### 3.1.2.6 La Danta



**Figura 49. Ciclo anual velocidad del viento La Danta.**

**Figura 50. Ciclo horario velocidad del viento La Danta.**

En la **Figura 49** se presenta el ciclo anual de la velocidad del viento para la zona denominada La Danta, en donde se evidencia que en el primer semestre del año las velocidades de los vientos aumentan paulatinamente hasta el mes de julio en donde se presentan las velocidades más altas. Par el segundo semestre del año los vientos disminuyen su velocidad mes tras mes hasta que en diciembre se presentan las velocidades más bajas de viento, con valores cercanos a 1,5 m/s. Por otro lado, en la **Figura 50** se presenta le ciclo horario de la velocidad del viento en donde se evidencia que la velocidad de los vientos varía en cada hora, sin embargo, en las horas de la madrugada se presentan las velocidades más bajas, mientras que a las 10 de la mañana, a las 5 de la tarde y a las 7 de la noche se presentan las velocidades del viento más altas.

En la **Figura 51** y **Figura 52** se presenta el análisis de vientos para el sector de La Danta, en donde se evidencia que los vientos provienen del sureste y que 36,4% de los vientos poseen velocidades entre 1,6 m/s y 3,4 m/s; y el 38,4% presentan velocidades entre 3,4 m/s y 5,5 m/s. No se presentan vientos en calma y solo un 0,5% de los vientos presentan velocidades superiores a los 10,8 m/s. En cuanto a la estabilidad atmosférica, se tiene que el 37% del tiempo las condiciones son estables y el 20% del tiempo son moderadamente inestables.

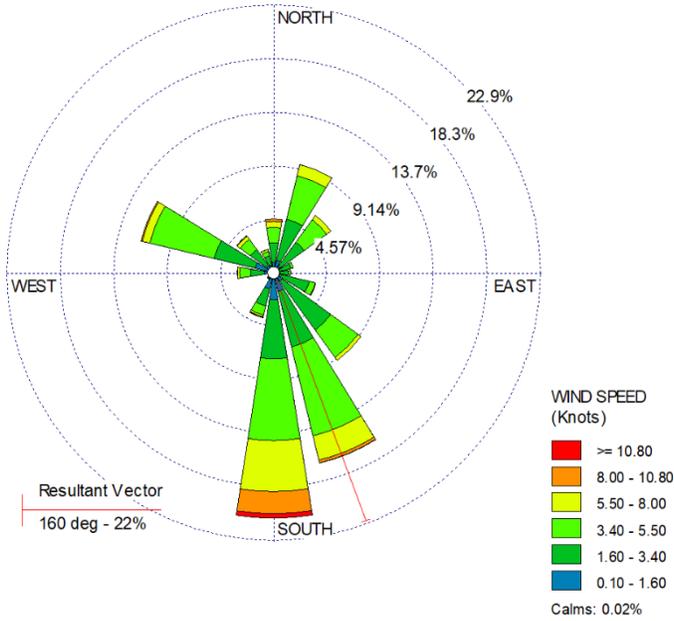


Figura 51. Rosa de vientos La Danta.

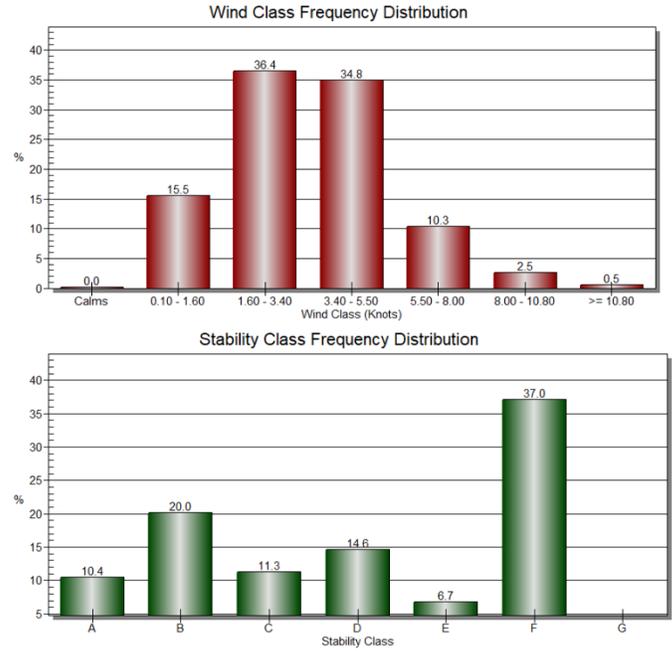


Figura 52. Análisis de vientos La Danta.

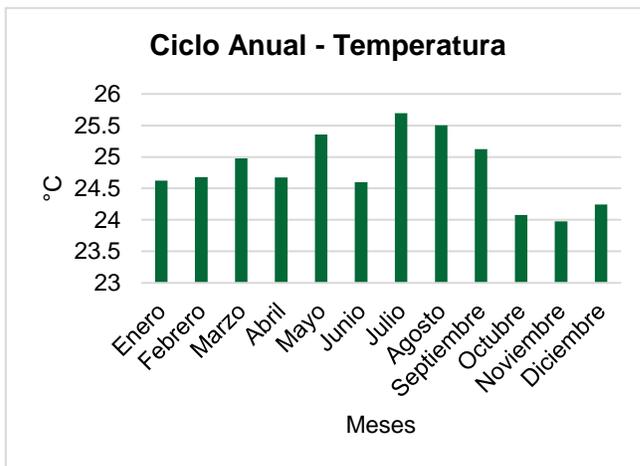


Figura 53. Ciclo anual temperatura La Danta.

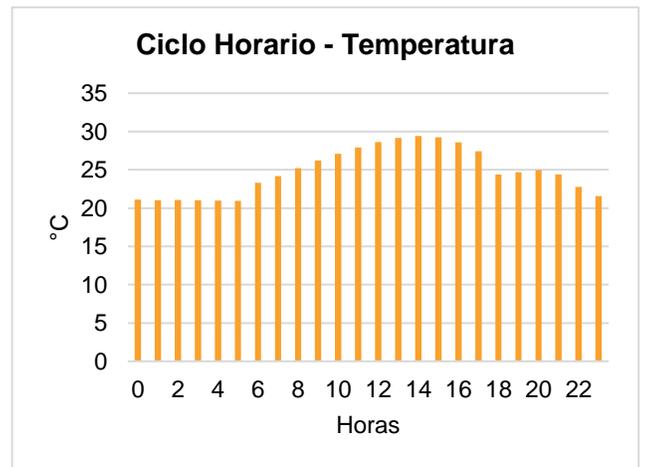
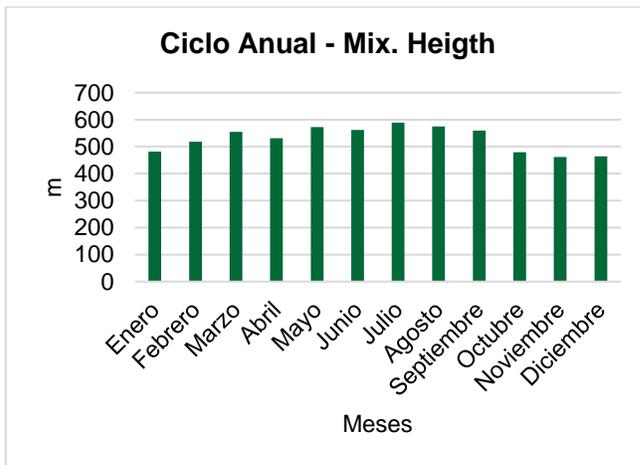
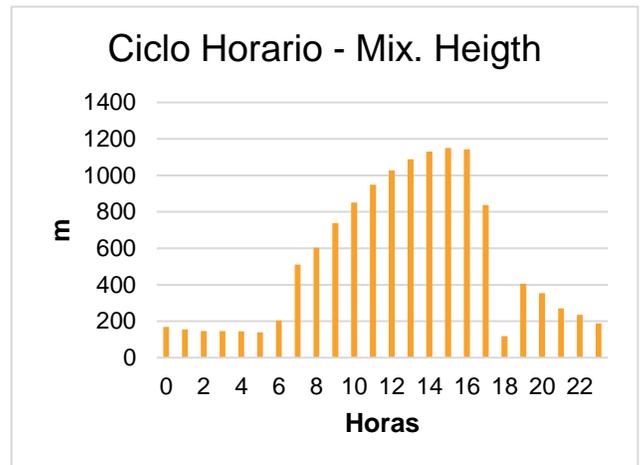


Figura 54. Ciclo horario temperatura La Danta.

En la **Figura 53** se presenta el ciclo anual de la velocidad del viento del sector de La Danta, en donde se observa que el primer semestre del año la temperatura aumenta mes a mes a excepción de los meses de abril y junio, sin embargo, en julio se presentan las temperaturas más altas de alrededor de 25,7°C. En el mes de agosto la temperatura comienza a disminuir, alcanzando para el mes de noviembre las temperaturas más bajas de hasta 24°C. Por otro lado, en la **Figura 54** se presenta el ciclo horario de la temperatura, allí se aprecia que en las horas de la madrugada las temperaturas son más bajas y relativamente constantes, con valores cercanos a los 20°C. A partir de las 6 de la mañana, cuando comienza la incidencia del sol, la temperatura aumenta progresivamente hasta alcanzar sus valores máximos a las 2 de la tarde. Desde las 3 de la tarde hasta las 6 de la tarde la temperatura disminuye hasta alcanzar nuevamente los 20°C.



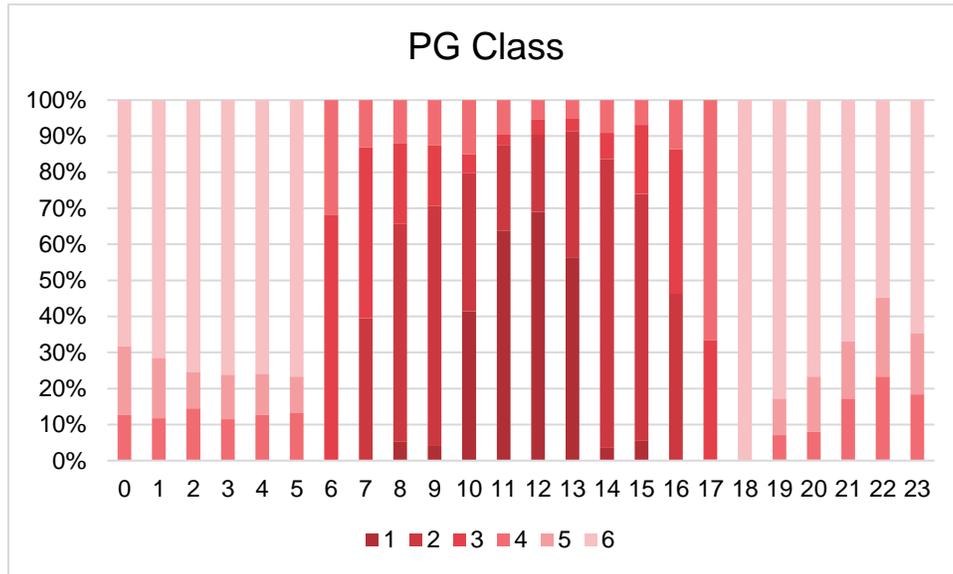
**Figura 55. Ciclo anual altura de mezcla La Danta.**



**Figura 56. Ciclo horario altura de mezcla La Danta.**

En la **Figura 55** se presenta el ciclo anual de la altura de la capa de mezcla atmosférica, en donde es evidente que las variaciones de altura son sutiles, presentándose una altura máxima de casi 600 metros y una altura mínima de aproximadamente 460 metros. Por otro lado, la **Figura 56** enseña el ciclo horario, en donde es notable que en las horas de la madrugada la altura de la capa de mezcla es más baja que el resto del día, alcanzando valores cercanos a los 200 metros. Sin embargo, a partir de las 6 de la mañana cuando comienza a incidir la radiación solar, la altura de la capa comienza a aumentar hasta alcanzar la altura máxima a las 3 de la tarde. A partir de las 4 de la tarde esta altura

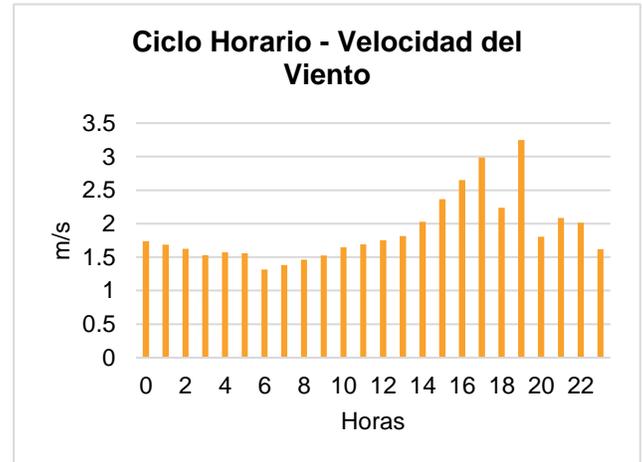
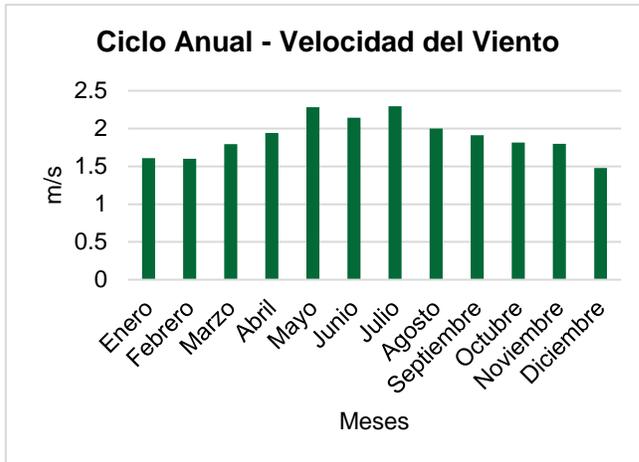
comienza a disminuir drásticamente hasta alcanzar la misma altura que se da en la madrugada.



**Figura 57. PG Class La Danta.**

En cuanto a estabilidad atmosférica, según las clases de Pasquill Gifford (Pasquill Gifford class), se tiene que la atmósfera durante la madrugada presenta alto porcentaje de condiciones estables y en algunas ocasiones presenta condiciones neutrales. Entre las 6 de la mañana y las 5 de la tarde las condiciones de la atmósfera son más inestables, especialmente, entre las 10 y la 1 de la tarde. A las 6 de la tarde la atmósfera presenta condiciones estables y el resto de la noche presenta condiciones mayormente estables y en algunas ocasiones condiciones neutrales. Ver **Figura 57**.

### 3.1.2.7 Puerto Triunfo



**Figura 58. Ciclo anual velocidad del viento Puerto Triunfo.**

**Figura 59. Ciclo horario velocidad del viento Puerto Triunfo.**

En la **Figura 58** se enseña el ciclo anual de la velocidad del viento para el municipio de Puerto Triunfo en donde se evidencia que el primer semestre del año las velocidades tienden a aumentar paulatinamente hasta alcanzar una velocidad máxima de aproximadamente 2,5 m/s. En el mes de agosto la velocidad del viento comienza a disminuir mes tras mes hasta alcanzar el valor más bajo en el mes de diciembre con una velocidad de 1,5 m/s. Por otra parte, la **Figura 59** presenta el ciclo horario en donde se observa que, la velocidad del viento aumenta hora tras hora, mostrando un comportamiento levemente exponencial hasta alcanzar la velocidad máxima que es de aproximadamente 3,2 m/s. A las 8 de la noche la velocidad disminuye rápidamente alcanzando valores de hasta 1,6 m/s.

En la **Figura 60** y **Figura 61** se presenta el análisis de viento en donde según la rosa de los vientos, estos provienen desde el suroeste. El 29,9% de los vientos presentan velocidades entre 1,6 m/s y 3,4 m/s; y el 28,2% poseen velocidades entre los 3,4 m/s y 5,5 m/s. Solo se presenta el 0,1% de los vientos en calma y 0,8% de vientos con velocidades superiores a los 10,8 m/s. En cuanto a la estabilidad de la atmósfera, se cuenta con que 34,5% del tiempo se dan condiciones estables.

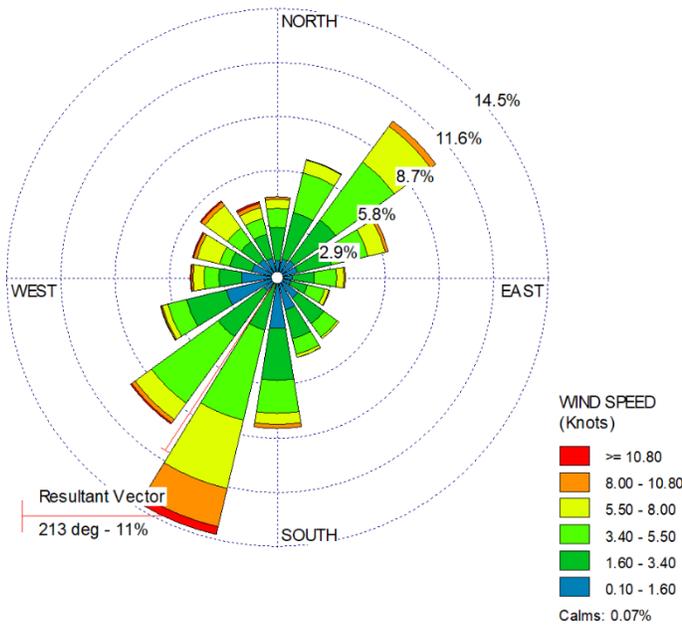


Figura 60. Rosa de viento Puerto Triunfo.

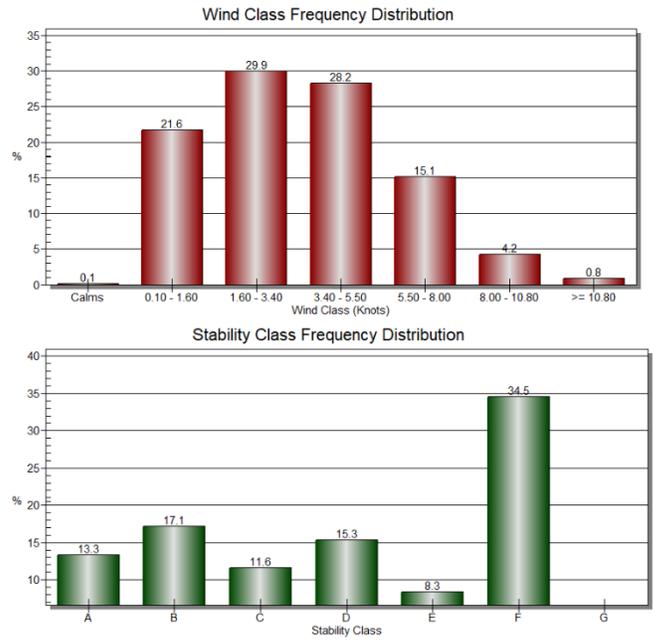


Figura 61. Análisis de vientos Puerto Triunfo.

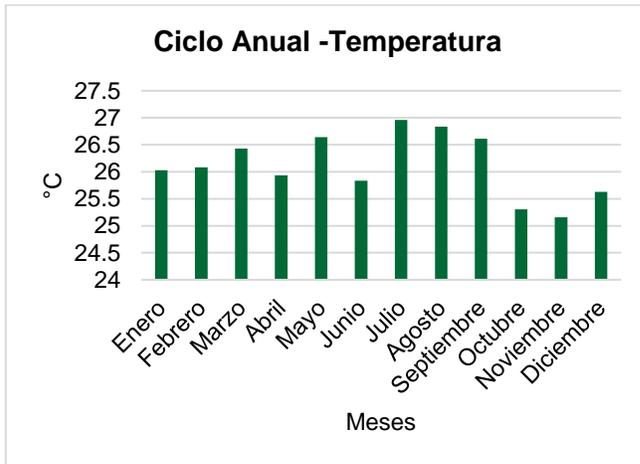


Figura 62. Ciclo anual temperatura Puerto Triunfo.

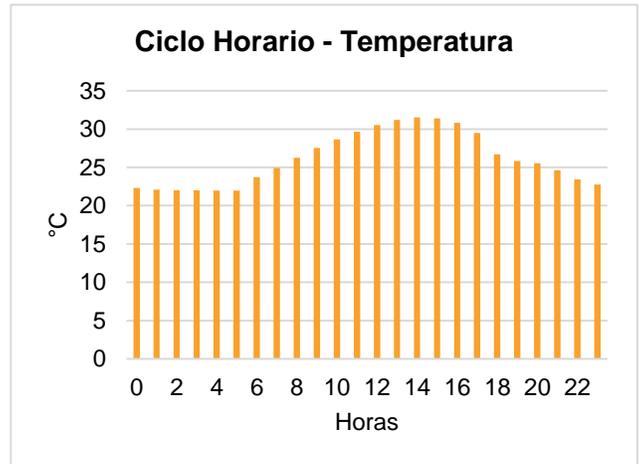
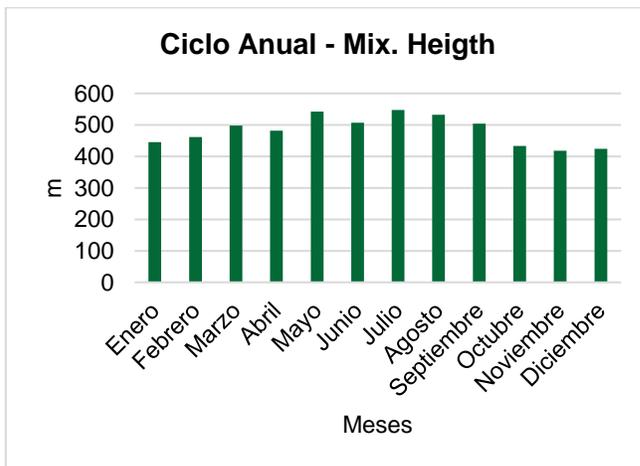
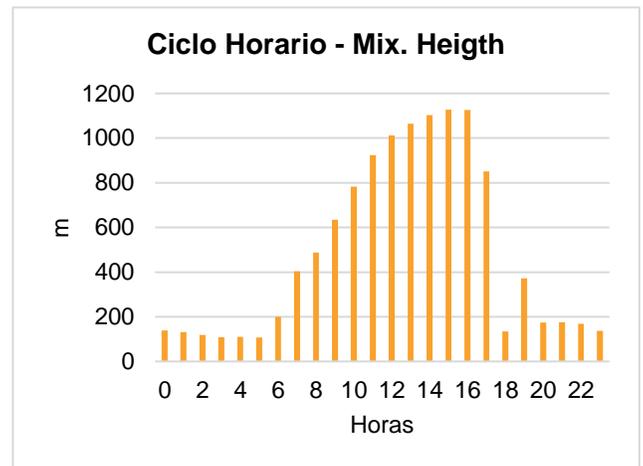


Figura 63. Ciclo horario temperatura Puerto Triunfo.

En cuanto al ciclo anual de la temperatura del municipio de Puerto Triunfo, la **Figura 62** muestra que, el primer semestre del año, la temperatura tiende a aumentar a excepción de los meses de abril y junio. En el mes de julio se presenta la temperatura máxima con un valor de 27°C. A partir del mes de agosto, la temperatura comienza a disminuir alcanzando en el mes de noviembre la temperatura más baja con un valor aproximado de 25,2°C. Finalmente, el mes de diciembre la temperatura aumenta hasta los 25,7°C. Por otro lado, en relación con el ciclo horario de la temperatura, este sigue el comportamiento típico, es decir que durante la madrugada y la noche presenta los valores más bajos cercanos a los 22°C y se mantienen relativamente constantes, mientras que, durante la mañana la temperatura aumenta hasta llegar a su máximo valor a las 2 de la tarde con una temperatura de 31°C y durante la tarde la temperatura disminuye paulatinamente. Ver **Figura 63**.



**Figura 64. Ciclo anual altura de mezcla Puerto Triunfo.**



**Figura 65. Ciclo horario altura de mezcla Puerto Triunfo.**

Con relación al ciclo anual de la altura de la capa de mezcla atmosférica del municipio de Puerto Triunfo, se tiene que las variaciones de altura son muy leves, con un altura máxima de 550 metros dada en mayo y una altura mínima de 420 metros obtenida en octubre. Ver **Figura 64**. Por otra parte, en el ciclo horario se evidencia que en la madrugada la altura es mínima con valores cercanos a los 180 metros y a partir de las 6 de la mañana cuando comienza a incidir la radiación solar, la altura de la capa aumenta exponencialmente hasta alcanzar su valor máximo de 1100 metros a las 3 de la tarde. A partir de las 5 de la tarde la altura de la capa disminuye abruptamente hasta alcanzar nuevamente niveles cercanos a los 200 metros. Ver **Figura 65**.

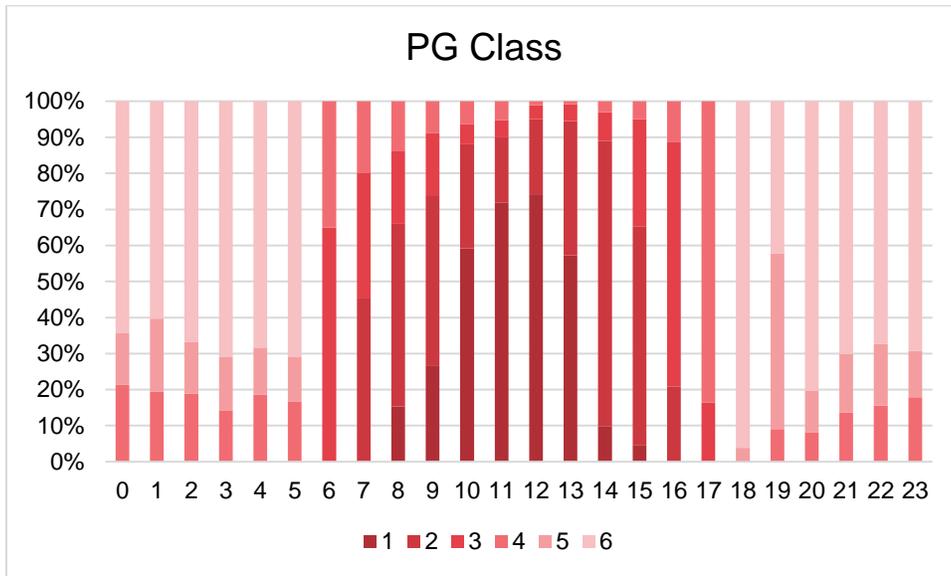
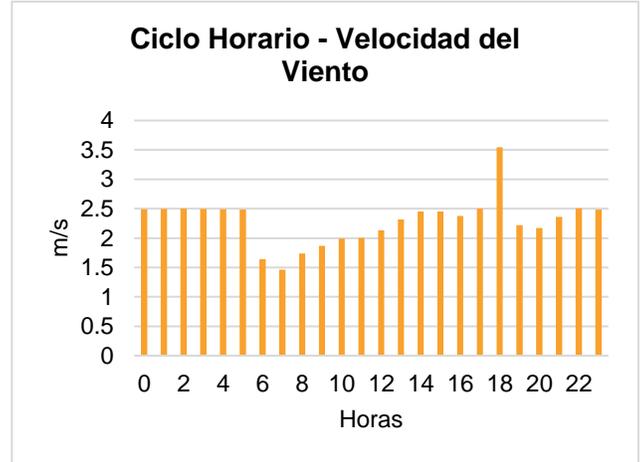
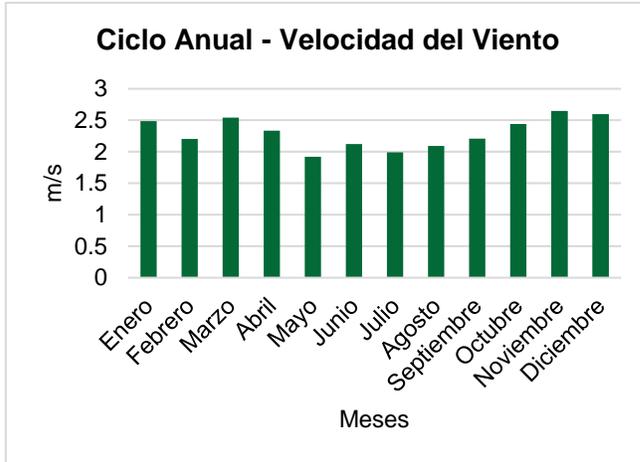


Figura 66. PG Class Puerto Triunfo.

Con respecto a la estabilidad atmosférica, según las clases de Pasquill Gifford (Pasquill Gifford class), se tiene que la atmósfera durante la madrugada presenta alto porcentaje de condiciones estables y en algunas ocasiones presenta condiciones neutrales. Entre las 6 de la mañana y las 5 de la tarde las condiciones de la atmósfera son más inestables, especialmente, entre las 8 de la mañana y las 3 de la tarde. A las 6 de la tarde la atmósfera presenta condiciones estables y el resto de la noche presenta condiciones mayormente estables y en algunas ocasiones condiciones neutrales. Ver **Figura 66**.

### 3.1.2.8 Guarne



**Figura 67. Ciclo anual velocidad del viento Guarne.**

**Figura 68. Ciclo horario velocidad del viento Guarne.**

Con relación al ciclo anual de la velocidad del viento presentada en la **Figura 67** para el municipio de Guarne, se observa que se presentan dos picos leves en el año, el primero se da en el mes de marzo y el segundo en el mes de noviembre y diciembre, con velocidades cercanas a los 2,5 m/s. Las velocidades de los vientos más bajas se reportan en mayo con valores cercanos a 1,8 m/s. Por otra parte, en la **Figura 68** la velocidad del viento permanece constante en la madrugada con un valor de 2,5 m/s, a las 6 de la mañana la velocidad disminuye hasta aproximadamente 1,5 m/s. A partir de las 8 de la mañana las velocidades aumentan paulatinamente hasta volver a alcanzar un valor de 2,5 m/s. A las 6 de la tarde se presentan velocidades extremas que alcanzan los 3,5 m/s.

La **Figura 69** y **Figura 70** exponen los análisis de la velocidad del viento, en donde se aprecia que los vientos provienen del noroeste y que el 35% de estos presentan velocidades entre 3,4 m/s y 5,5 m/s; y el 26,9% poseen velocidades entre 5,5 m/s y 8 m/s. No se presentan vientos en calma y solo un 0,6% de los vientos tienen velocidades superiores a los 10,8 m/s. En cuanto a la estabilidad atmosférica, se evidencia que el 45,3% del tiempo la atmósfera presenta condiciones neutrales.

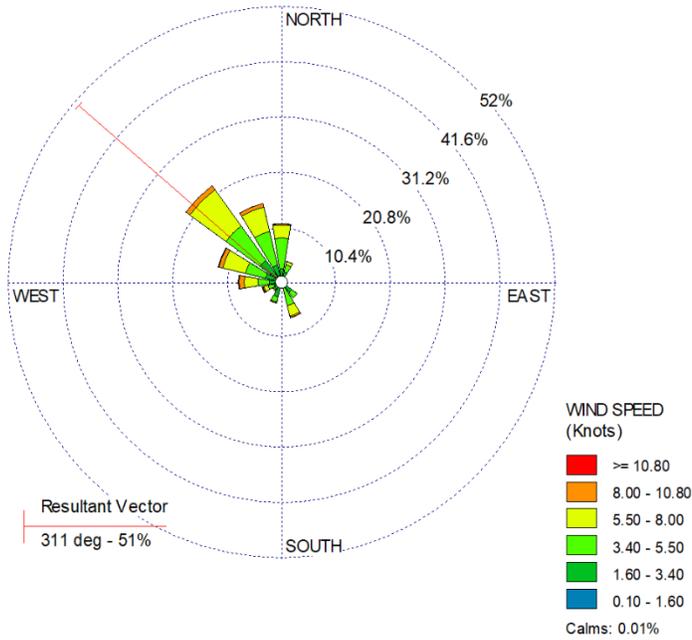


Figura 69. Rosa de vientos Guarne.

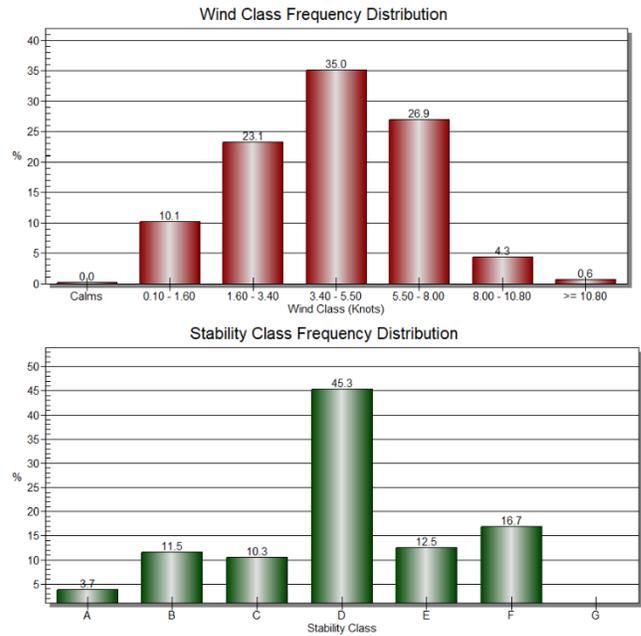


Figura 70. Análisis de vientos Guarne.

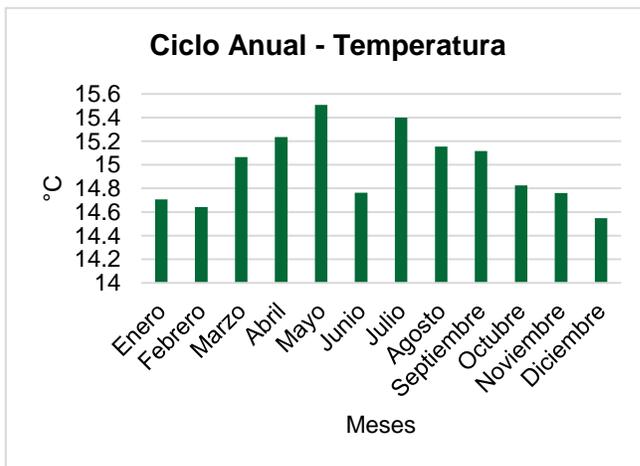


Figura 71. Ciclo anual temperatura Guarne.

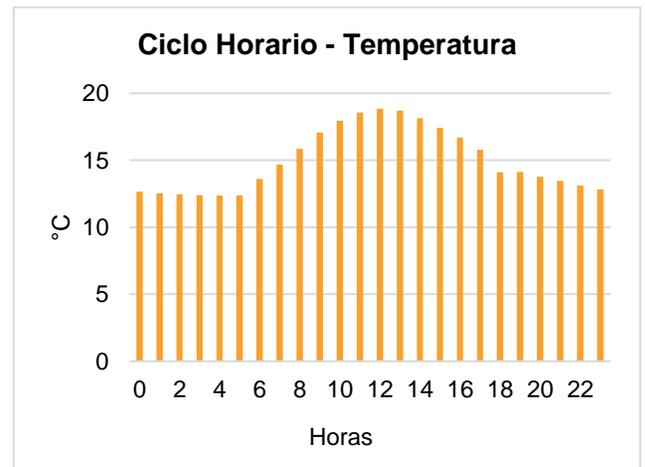
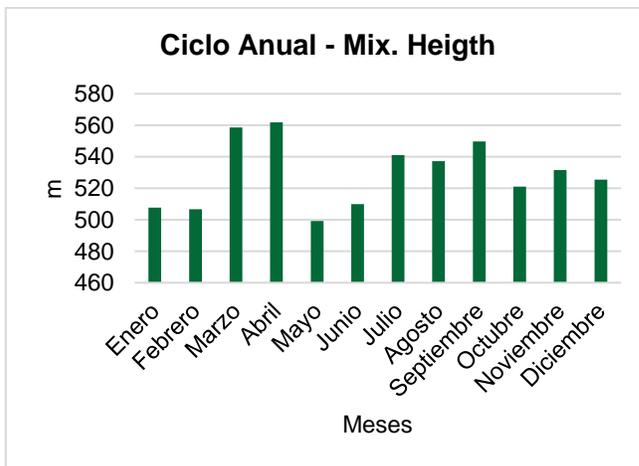
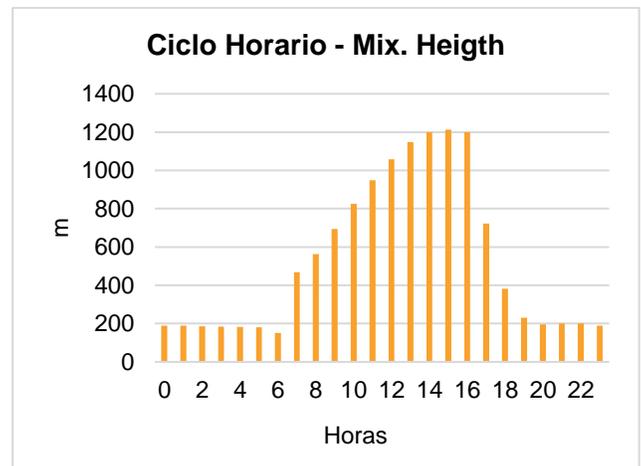


Figura 72. Ciclo horario temperatura Guarne.

Con respecto al ciclo anual de las temperaturas registradas en el municipio de Guarne, la **Figura 71** muestra que en el primer semestre del año la temperatura aumenta progresivamente de los 14,6°C a los 15,5°C alcanzados el mes de mayo. En el mes de junio la temperatura disminuye y tiene valores cercanos a los 14,8°C, al siguiente mes, es decir en julio vuelve a aumentar hasta alcanzar un valor de 15,4°C y para el segundo semestre del año disminuye mes tras mes hasta que en el mes de diciembre se presentan las temperaturas más frías con valores cercanos a 14,5°C. Por otro lado, el ciclo horario que se presenta en la **Figura 72** muestra que en las horas de la madrugada y de la noche la temperatura es relativamente constante y presenta los valores más bajos debido a que no hay incidencia de la radiación solar, con temperaturas cercanas a los 12°C. A partir de las 6 de la mañana las temperaturas aumentan hasta la 1 de la tarde que alcanza la temperatura máxima de aproximadamente 18°C. Desde las 2 de la tarde la temperatura comienza a disminuir hasta que a las 6 de la tarde se estabiliza.



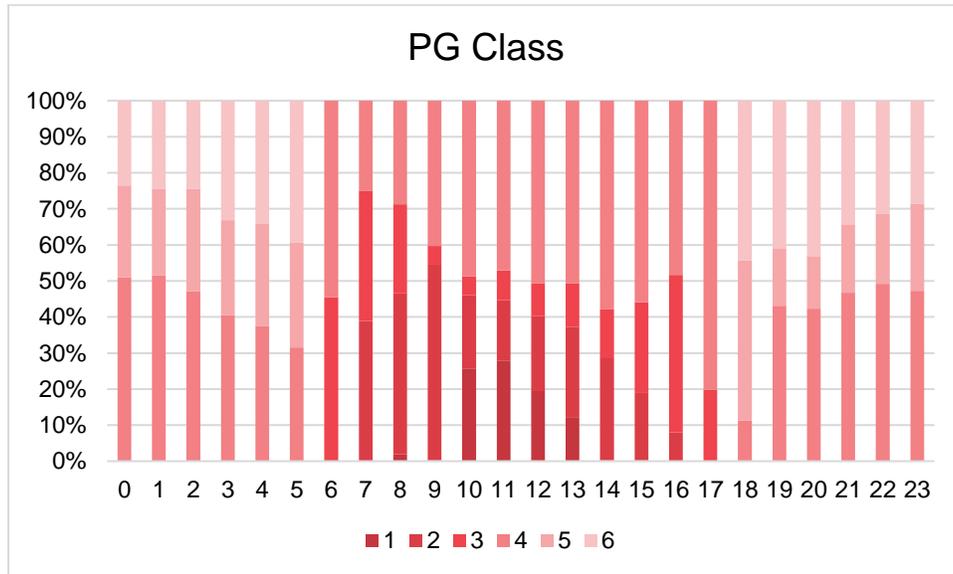
**Figura 73. Ciclo anual altura de mezcla Guarne.**



**Figura 74. Ciclo horario altura de mezcla Guarne.**

La **Figura 73** presenta el ciclo anual de la altura de la capa de mezcla en donde no se nota un comportamiento determinado dado que la altura varía cada mes sin mostrar alguna tendencia. Sin embargo, la altura máxima se presenta el mes de abril con un valor de 560 metros y la altura más baja se da en el mes siguiente, es decir, en mayo donde la altura es de 500 metros. Además, la **Figura 74** presenta el ciclo horario en donde se aprecia que en las horas de la madrugada la altura de la capa de mezcla tiene los valores más bajos y estables con alturas cercanas a los 200 metros. A partir de las 7 de la mañana la altura comienza a aumentar hora tras hora hasta alcanzar el valor máximo a las 3 de la tarde con

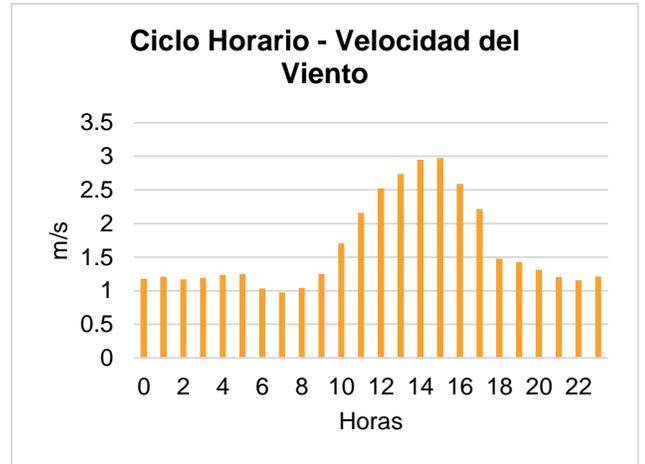
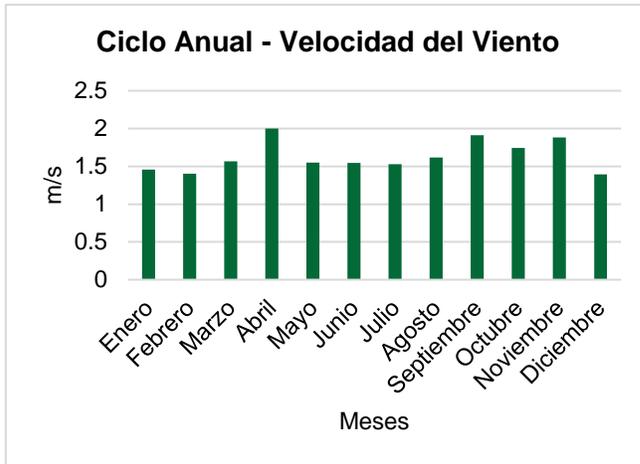
una altura de 1200 metros. A partir de las 5 de la tarde la altura comienza a disminuir abruptamente hasta alcanzar nuevamente los 200 metros, los cuales se mantienen por el resto de la noche.



**Figura 75. PG Class Guarne.**

Con relación a la estabilidad atmosférica, según las clases de Pasquill Gifford (Pasquill Gifford class), se tiene que la atmósfera durante la madrugada presenta tanto condiciones neutras como estables. Entre las 6 de la mañana y las 5 de la tarde las condiciones de la atmósfera son más inestables, especialmente, entre las 7 de la mañana y las 4 de la tarde. A las 6 de la tarde la atmósfera presenta condiciones estables y el resto de la noche presenta condiciones neutras y estables. Ver **Figura 75**.

### 3.1.2.9 Marinilla



**Figura 76. Ciclo anual velocidad del viento Marinilla.**

**Figura 77. Ciclo horario velocidad del viento Marinilla.**

La **Figura 76** presenta el ciclo anual de la velocidad del viento para el municipio de Marinilla, en donde los vientos no presentan muchas variaciones, sin embargo, la velocidad máxima se presenta el mes de abril alcanzando los 2 m/s, por el contrario, la velocidad mínima se da en el mes de diciembre con un valor cercano a 1,4 m/s. En cuanto al comportamiento horario de los vientos, en la **Figura 77** se aprecia que en las horas de la madrugada la velocidad es relativamente constante con valores cercanos a 1,2 m/s. A partir de las 8 de la mañana, las velocidades aumentan hasta llegar a la velocidad máxima a las 3 de la tarde con un valor de 3 m/s. A partir de las 4 de la tarde la velocidad disminuye hasta lograr estabilizarse.

La **Figura 78** y la **Figura 79** presentan el comportamiento de los vientos, en donde la rosa de los vientos expone que estos provienen del sureste y el 31,6% poseen velocidades entre 1,6 m/s y 3,4 m/s; y el 30,1% de los vientos tienen velocidades entre 0.1 m/s y 1,6 m/s. Se presenta solo un 0,1% de los vientos en calma y el 0,3% con velocidades superiores a 10,8 m/s. En cuanto a la estabilidad de la atmósfera, se tiene que el 55% del tiempo se presentan condiciones neutras.

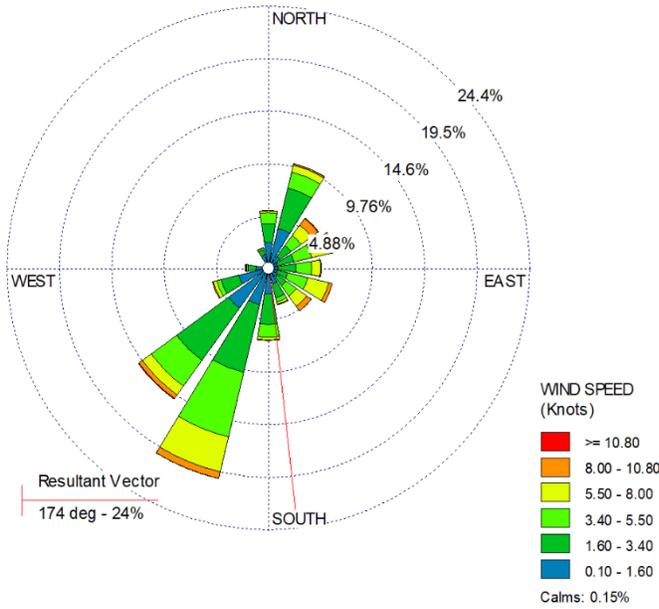


Figura 78. Rosa de vientos Marinilla.

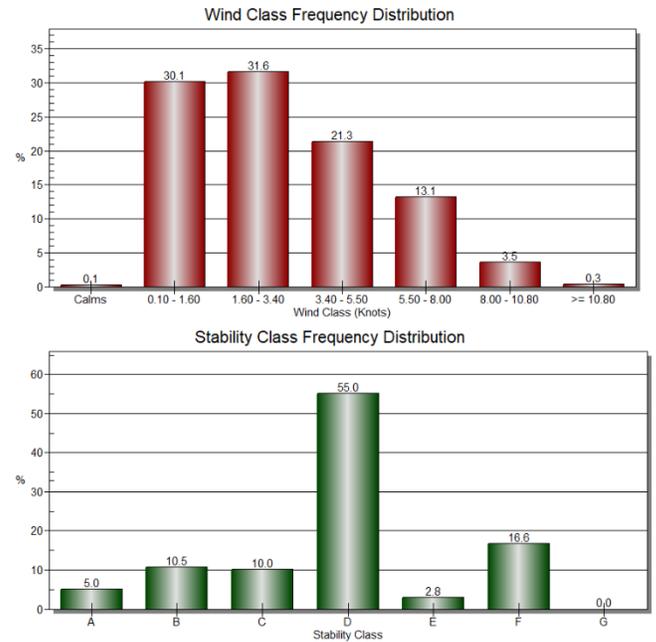


Figura 79. Análisis de vientos Marinilla.

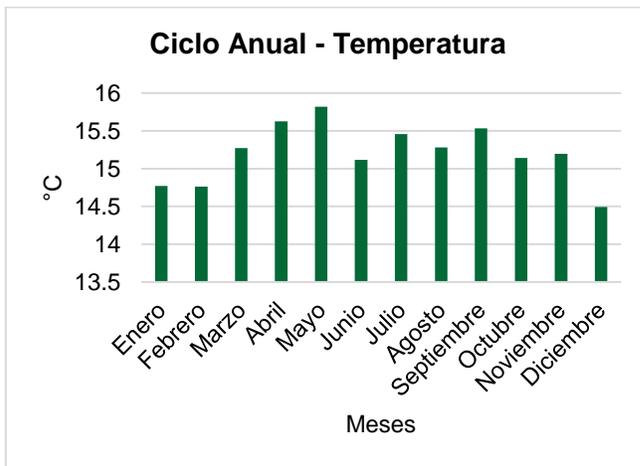


Figura 80. Ciclo anual temperatura Marinilla.

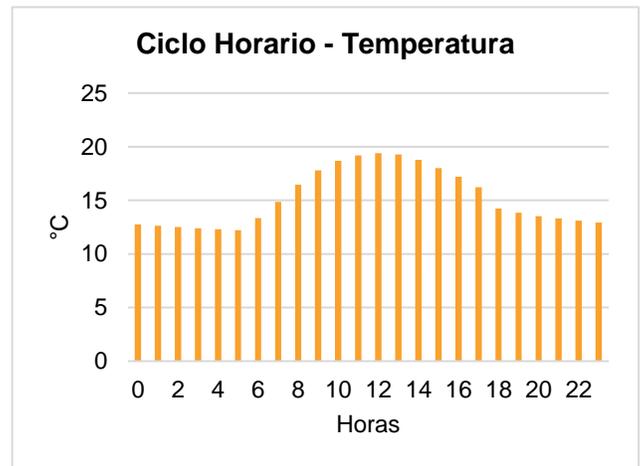
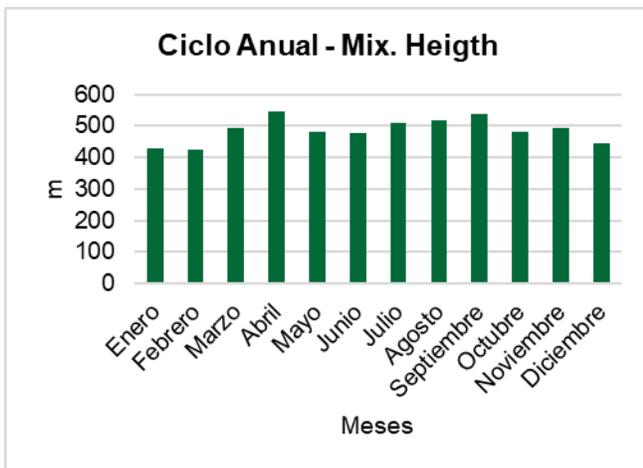


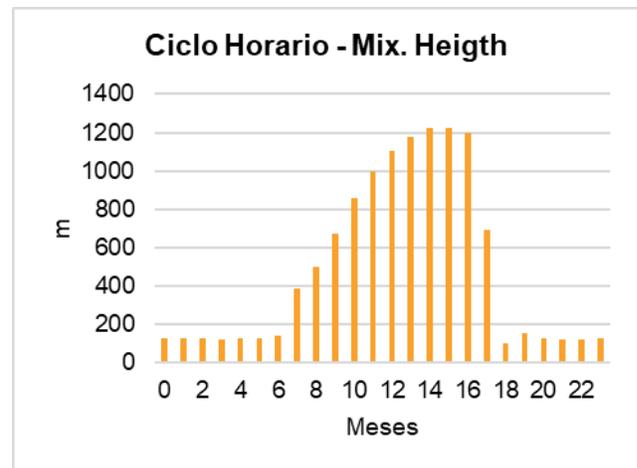
Figura 81. Ciclo horario temperatura Marinilla.

La **Figura 80** presenta el ciclo anual de la temperatura registrada en Marinilla, en donde se observa que en el primer semestre del año la temperatura tiende a aumentar hasta que en

el mes de mayo llega al valor máximo con 15,7°C. Para el segundo semestre del año la temperatura varía entre los 15°C y los 15,5°C, sin embargo, en diciembre se presentan los valores más bajos de temperatura con un valor cercano a los 14,5°C. Por otro lado, en la **Figura 81** se presenta el ciclo horario en donde se aprecia que en las horas de la madrugada y de la noche cuando no hay incidencia del sol, la temperatura permanece relativamente constante y presenta los valores más bajos cercanos a los 12°C, en las horas de la mañana la temperatura aumenta hasta alcanzar la temperatura máxima a las 12 del día con una temperatura de 18°C aproximadamente, mientras que en las horas de la tarde la temperatura disminuye hora tras hora hasta estabilizarse nuevamente.

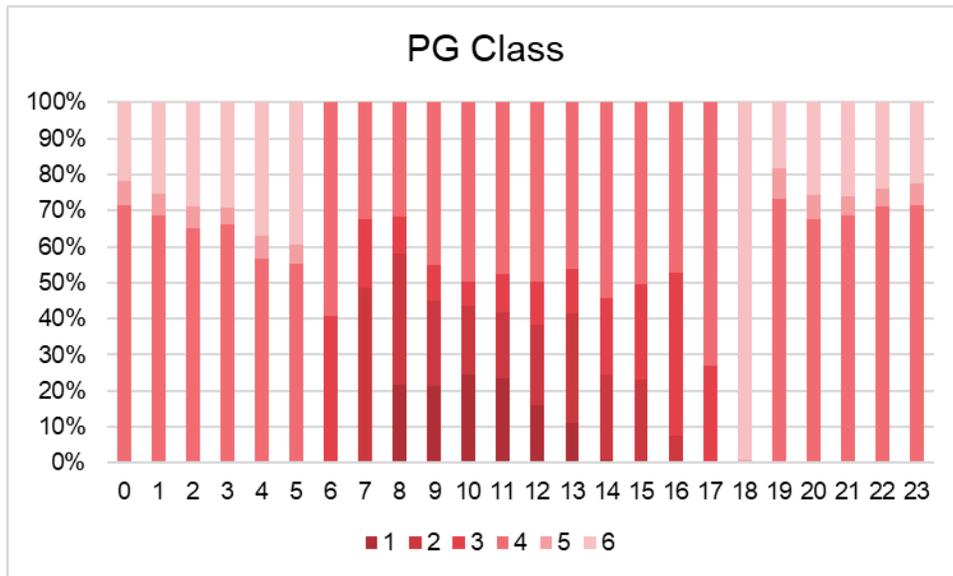


**Figura 82. Ciclo anual altura de mezcla Marinilla.**



**Figura 83. Ciclo horario altura de mezcla Marinilla.**

La **Figura 82** presenta el ciclo anual de la altura de la capa de mezcla atmosférica, en donde se nota que no hay alta variabilidad de la altura, ya que permanece relativamente estable, sin embargo, la altura máxima es de 520 metros, mientras que la altura mínima tiene un valor de 420 metros aproximadamente. En cuanto al ciclo horario, en las horas de la madrugada y la noche la altura presenta los valores más bajos y estables con alturas aproximadas a los 120 metros. A partir de las 7 de la mañana la altura comienza a aumentar hora tras hora hasta llegar a los 1200 metros a las 2 de la tarde. A las 3 de la tarde la altura disminuye drásticamente hasta nuevamente llegar a los 120 metros donde permanece relativamente estable el resto de la noche. Ver **Figura 83**.



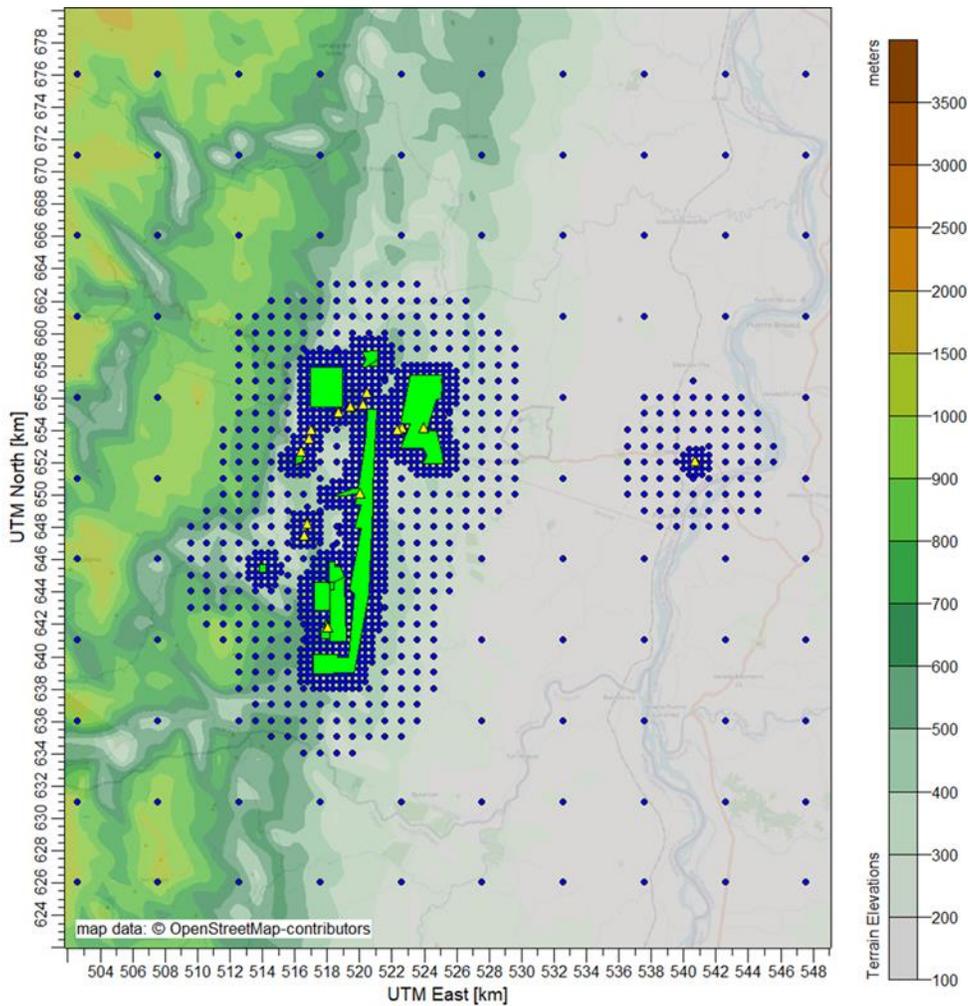
**Figura 84. PG Class Marinilla.**

Con relación a la estabilidad atmosférica, según las clases de Pasquill Gifford (Pasquill Gifford class), se tiene que la atmósfera durante la madrugada presenta condiciones principalmente neutras, pero también estables. Entre las 6 de la mañana y las 5 de la tarde las condiciones de la atmósfera son más inestables, especialmente, entre las 8 de la mañana y la 1 de la tarde. A las 6 de la tarde la atmósfera presenta condiciones estables y el resto de la noche presenta condiciones mayormente neutras y en ocasiones estables. Ver **Figura 84**.

### 3.1.3 Topografía

A continuación, se presenta la topografía que fue extraída del modelo WRF y entregada por el proveedor, para cada dominio de modelación:

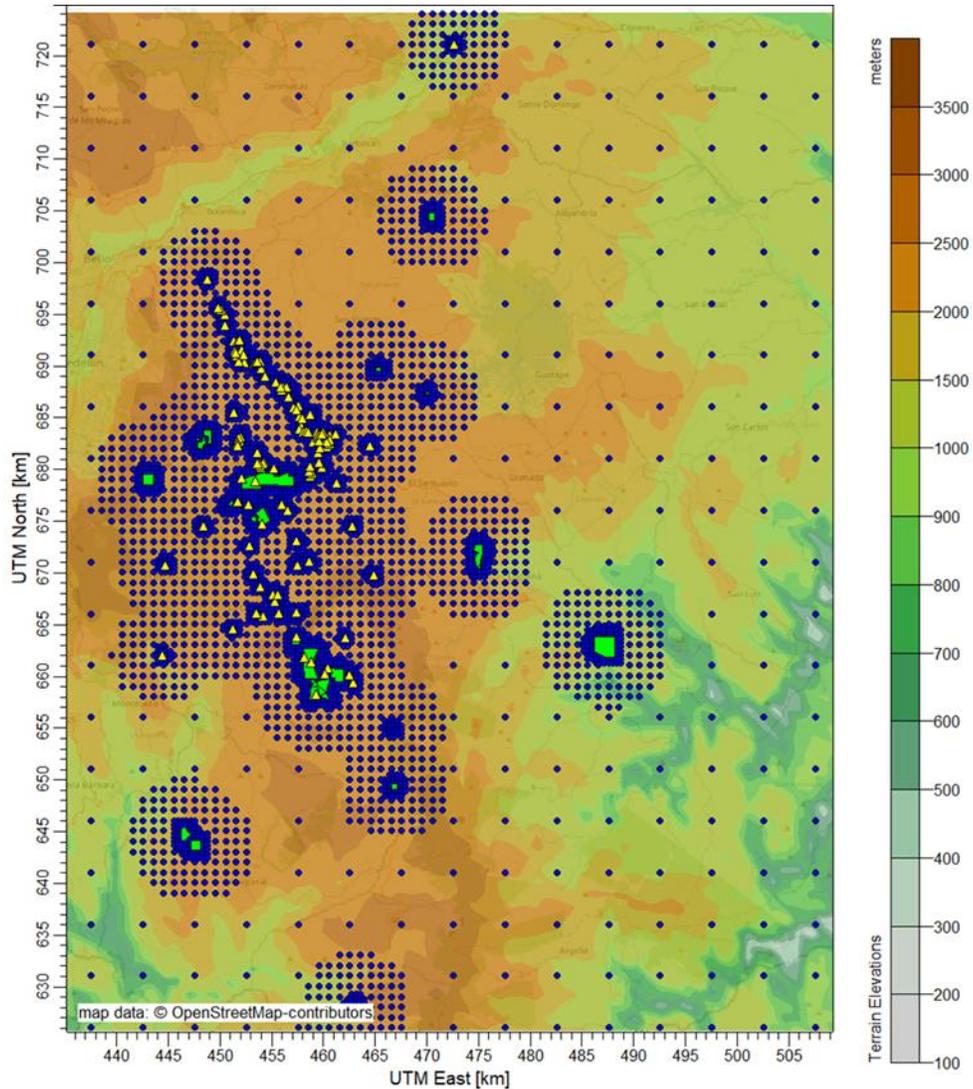
#### 3.1.3.1 Dominio La Calera.



**Figura 85. Topografía del dominio geográfico La Calera.**

En la **Figura 85** se observa que la mayor parte de las fuentes fijas puntuales (puntos amarillos) y de las fuentes fijas dispersas (polígonos verdes) se ubican en un área con una altura entre los 100 y 400 metros. Y muy pocas fuentes se ubican en una altura entre los 400 y 500 metros.

**3.1.3.2 Dominio Valles de San Nicolas y La Unión.**



**Figura 86. Topografía del dominio geográfico Valles de San Nicolas y La Unión.**

En la **Figura 86** se observa que la mayor parte de las fuentes fijas puntuales (puntos amarillos) y de las fuentes fijas dispersas (polígonos verdes) se ubican en un área con una altura entre los 2.000 y 2.500 metros. Y muy pocas fuentes se ubican en una altura entre los 1.000 y 1.500 metros.

### 3.2 CREACIÓN DE LA MALLA DE CÁLCULO

Con el objetivo de crear una malla de cálculo óptima que permita que los “puff” realicen el recorrido y registren los resultados en cada punto, y a su vez evitar que hagan un trayecto por cada 400 metros por todo el todo el dominio de modelación, dado que esto tomaría más tiempo para la ejecución del modelo, se llevó a cabo el siguiente procedimiento para cada uno de los dominios:

- A partir de las fuentes fijas puntuales y dispersas, se realizó un buffer de 1.000 metros, con una malla cuyas cuadrículas tienen 400 metros de longitud, para que en cada punto se escriban las concentraciones. Estas dimensiones se toman según las recomendaciones dadas por el manual del modelo para evitar que se contabilicen las concentraciones más de una vez. (Ver en **Figura 85** y **Figura 86** los puntos azules más cercanos a las fuentes que están en puntos amarillos y polígonos verdes).
- Luego, a partir de las fuentes fijas, se construyó un buffer de 5.000 metros, con una malla cuyas cuadrículas tienen 1.000 metros de longitud. (Ver en **Figura 85** y **Figura 86** que los puntos azules están un poco más separados de las fuentes que están en puntos amarillos y polígonos verdes).
- Finalmente, para el dominio de modelación, se construyó una malla con una cuadrícula de 5.000 metros de longitud. (Ver en **Figura 85** y **Figura 86** los puntos azules que se encuentran más lejanos a las fuentes que están en puntos amarillos y polígonos verdes).

Estas mallas de cálculo se muestran en la **Figura 85** para el dominio de La Calera y en la **Figura 86** para el dominio de Valles de San Nicolás y La Unión, en donde las mallas están representadas con puntos de color azul oscuro.

### 3.3 CONFIGURACIÓN DEL MODELO

#### 3.3.1 Calmet

Como se mencionó en la **sección 3.1.2** para preparar los datos de entrada al modelo Calpuff, debe procesarse la información de la meteorología de superficie, de elevación del terreno, usos del suelo y meteorología de altura en Calmet para generar los datos geo, datos de superficie y datos de altura, sin embargo, esta información se compró de forma tal, que el proveedor realizó un procesamiento previo en el modelo 3D WRF, por lo tanto,

la información simulada que se compró para el año 2022 y para los dos dominios de modelación (Sonsón y Viboral) estaba lista para ser ingresada a Calmet, por tanto, esta se configuró según lo recomendado por el proveedor y se importó a Calmet. Este último, se corrió tres veces: una vez para el dominio de Sonsón y dos veces para el dominio de Viboral, debido a que este contaba con más de 200 fuentes lo que superaba el número de entradas con el que el modelo puede ejecutarse.

### **3.3.2 Calpuff**

La configuración del modelo se realizó por defecto o Default, que incorpora las recomendaciones del desarrollador, no se incluyeron tratamientos especiales o diferentes a los recomendados, al modelo se incluyó química de la atmosfera por el esquema RIVAD/ARM3 para el cual era posible contar con toda la información de entrada y producir salidas para partículas secundarias en forma de Sulfatos (SO<sub>4</sub>) y Nitratos (NO<sub>3</sub>).

Al modelo no le fueron incluidas concentraciones de fondo y se configuró para producir únicamente la concentración de salida de cada contaminante, además los Sulfatos (SO<sub>4</sub>) y Nitratos (NO<sub>3</sub>) se agregaron para ser representados como PM<sub>2.5</sub> secundario.

### **3.3.3 Calpost**

La configuración de Calpost se realizó por defecto, se seleccionó cada contaminante como salida y se especificaron las salidas para ser entregadas como el primer máximo en el caso de los tiempos de exposición cortos (1 horas, 8 horas y 24 horas) y como el promedio de anual para los tiempos largos de exposición, según lo dispuesto en la Resolución 2254 de 2017, dada la importancia del PST en la minería y que este tenía tiempos de exposición iguales a los de PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> se le asignaron los mismos tiempos de exposición, sin embargo, debe tener en cuenta que este contaminante no es criterio ni regulado por la normatividad en Colombia.

## **4 RESULTADOS**

Los resultados se presentan en forma de mapas de dispersión para cada uno de los dominios, el dominio de San Nicolas y la Unión, el dominio de la zona de Las Caleras y el subdominio de la Danta. Para cada uno de los dominios se presentan los resultados de los contaminantes tenidos en cuenta en la modelación en los tiempos largos de exposición, para el dominio la zona de Las Caleras se sumaron los resultados del subdominio de La Danta que incluye dicha vía.

Dadas las limitaciones de Calpuff al poder incluir un máximo de 200 fuentes los modelos fueron separados por paquetes de fuentes, por tanto, los datos máximos de 1 hora, 8 horas y 24 horas representan los máximos predichos por cada grupo, estos no pueden ser sumados dado que representan valores diferentes en el tiempo y por tanto se presentan los máximos predichos para cada grupo de fuentes, sin embargo, los datos del promedio anual si pueden ser sumados y se presentan como uno solo para todo el dominio, los archivos de entrada y salida del modelo Calpuff se presentan en el Anexo 1.

Es de tener en cuenta que el modelo fue configurado con las parametrizaciones de química de la atmosfera a fin de estimar el PM2.5 Secundario como la suma de nitratos y sulfatos, así entonces en el PM2.5 se incluye el primario, o emitido, y el secundario, en este se presenta entonces una razón de PM2.5 secundario sobre el emitido y sobre el total.

Es de aclarar que Calpuff no es un modelo fotoquímico sino un modelo que incluye parametrizaciones de la química de la atmosfera por lo cual la concentración de ozono no es un dato de salida sino de entrada al modelo.

Para la adecuada interpretación de los datos debe tenerse en cuenta que, en cuanto a las fuentes de área, las máximas concentraciones de el orden de cientos y miles se presentan sobre las fuentes, sin embargo, estas se dispersan rápidamente con la distancia disminuyendo hacia los mínimos, por tal razón se recomienda revisar la cartografía adjunta en el Anexo 2

### **4.1 Dominio San Nicolas y La Unión**

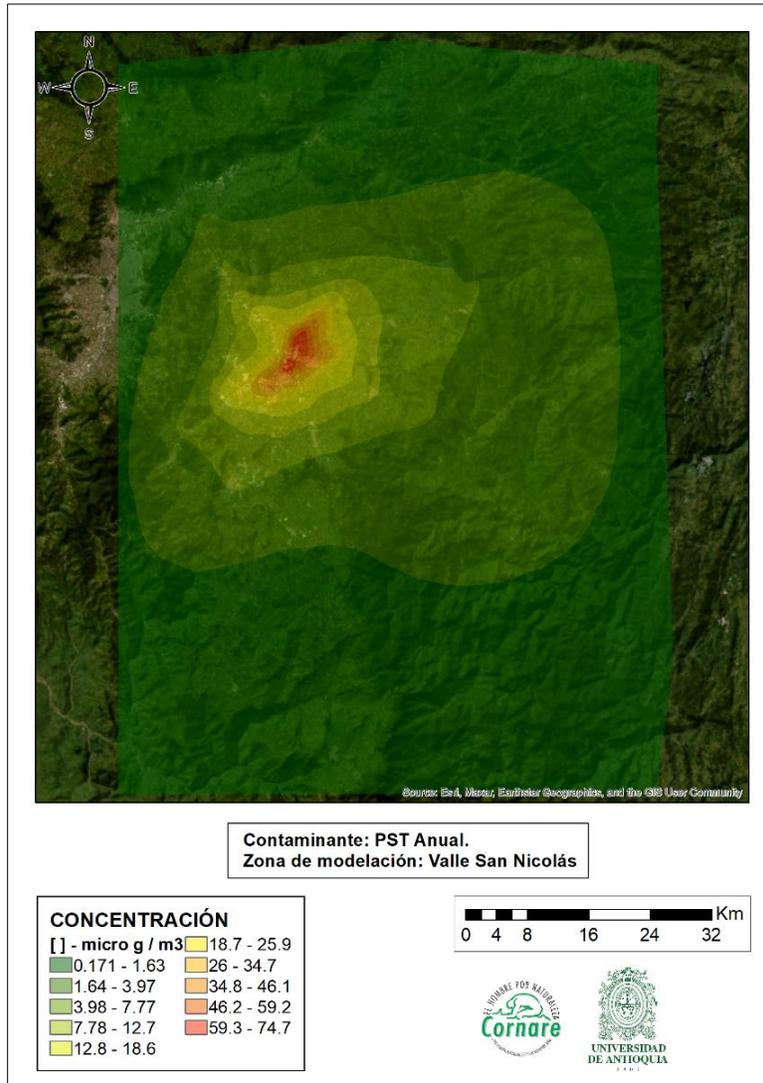
Para este dominio el modelo fue dividido en dos partes para las fuentes fijas y una parte para las fuentes de área resultando en 3 partes para todas las fracciones de material particulado y dos partes para los demás contaminantes, las dispersiones de cada parte del modelo para los tiempos cortos de exposición se presentan de forma individual dado que

sumarlas incurriría en posibles sobrestimaciones en la presentación del estadístico, mientras que para los valores de concentraciones que corresponden a promedios de largo plazo si se realizan la suma de las diferentes partes ya que no se incurre en errores.

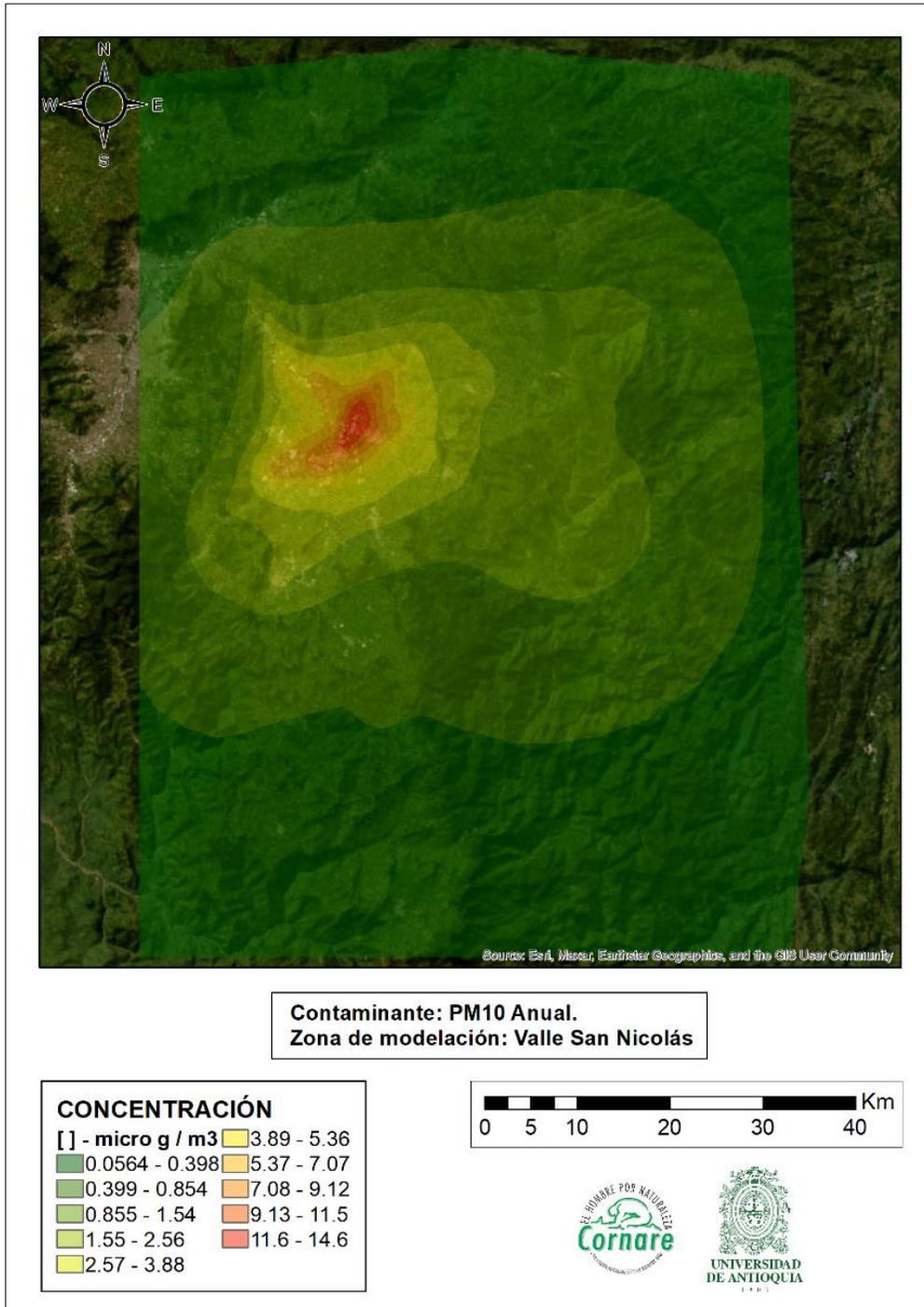
#### **4.1.1 Dispersión de Material Particulado (PST, PM10 y PM2.5)**

La Figura 87, Figura 88 y Figura 89 , se visualiza la dispersión de Partículas Suspendidas Totales (PST), Material Particulado de 10 micrómetros o menos (PM10) y Material Particulado de 2.5 micrómetros o menos (PM2.5) durante el tiempo de exposición promedio anual en el dominio de San Nicolas y la Unión. Estas representaciones identifican a las fuentes fijas como el principal contribuyente, destacándose especialmente aquellas ubicadas en el corredor de Guarne.

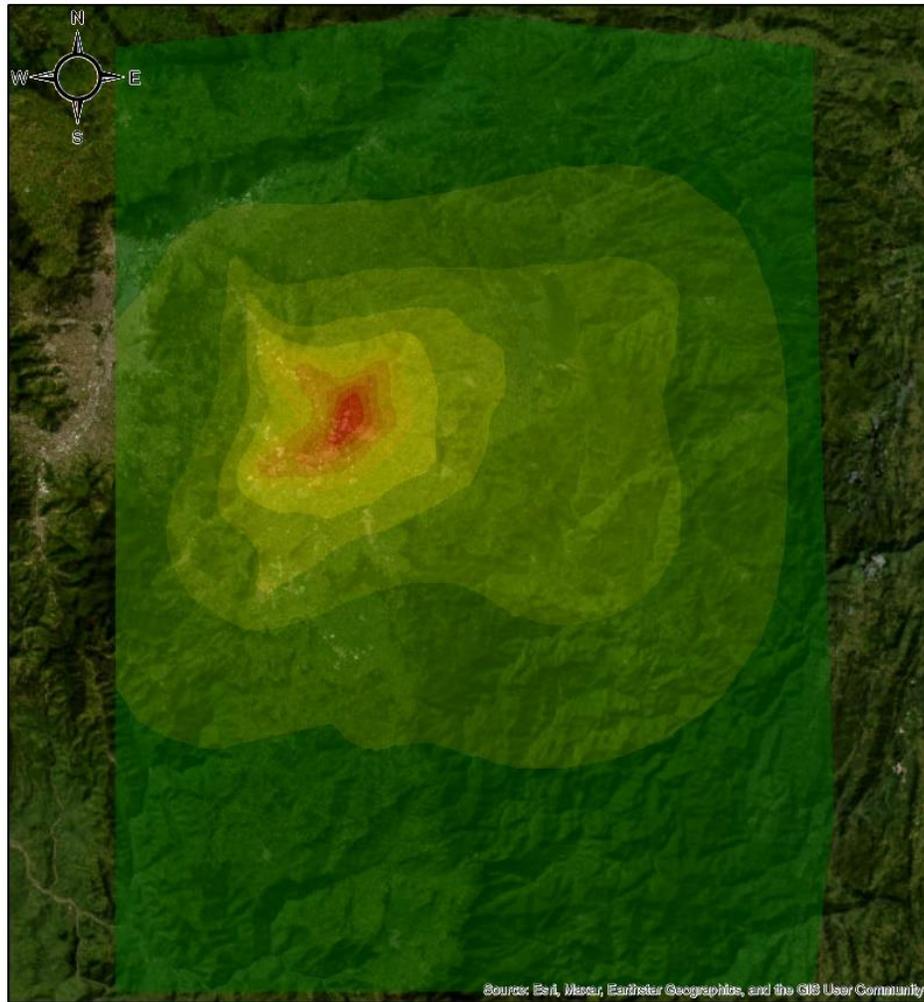
Es particularmente notable la influencia de las fuentes fijas ubicadas en el corredor de Guarne, esto concuerda con los resultados obtenidos en el inventario de emisiones atmosféricas, en el cual se encontró que la mayor cantidad de las emisiones asociadas a partículas en la Subregión Valles de San Nicolas se dan asociadas a las fuentes fijas puntuales ubicadas en Guarne, Marinilla y Rionegro.



**Figura 87. Concentración promedio anual de PST dominio San Nicolás y La Unión**

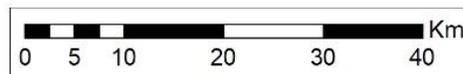


**Figura 88. Concentración promedio anual de PM10 dominio San Nicolás y La Unión**



**Contaminante: PM2.5 Anual.**  
**Zona de modelación: Valle San Nicolás**

CONCENTRACIÓN	
[ ] - micro g / m <sup>3</sup>	2.2 - 3.04
0.0321 - 0.228	3.05 - 4.02
0.229 - 0.457	4.03 - 5.19
0.458 - 0.849	5.2 - 6.56
0.85 - 1.44	6.57 - 8.36
1.45 - 2.19	



**Figura 89. Concentración promedio anual de PM2.5 dominio San Nicolás y La Unión**

Dado que el modelo ha sido configurado para incorporar parametrizaciones de química atmosférica, las emisiones totales de Material Particulado de 2.5 micrómetros o menos (PM2.5) están incluidas en el análisis. En la Figura 90 y, se presenta la proporción de PM2.5 secundario respecto al PM2.5 emitido por fuentes fijas y respecto al total, respectivamente.

Es notable observar que, a distancias significativas de las fuentes, donde las concentraciones de PM2.5 son bajas e incluso despreciables, las razones de PM2.5 secundario son más elevadas, superando incluso el valor de uno. Esta situación se explica porque el modelo continúa prediciendo la presencia de PM2.5 secundario a grandes distancias, aunque no se presenten nuevas emisiones en esas áreas.

Estos resultados destacan la importancia de considerar la química atmosférica en la interpretación de los resultados del modelo, especialmente en áreas alejadas de las fuentes principales. Teniendo en cuenta la implementación de medidas de reducción de las emisiones, no solo para las partículas emitidas de forma primaria, sino también las sustancias precursoras para la formación de partículas.

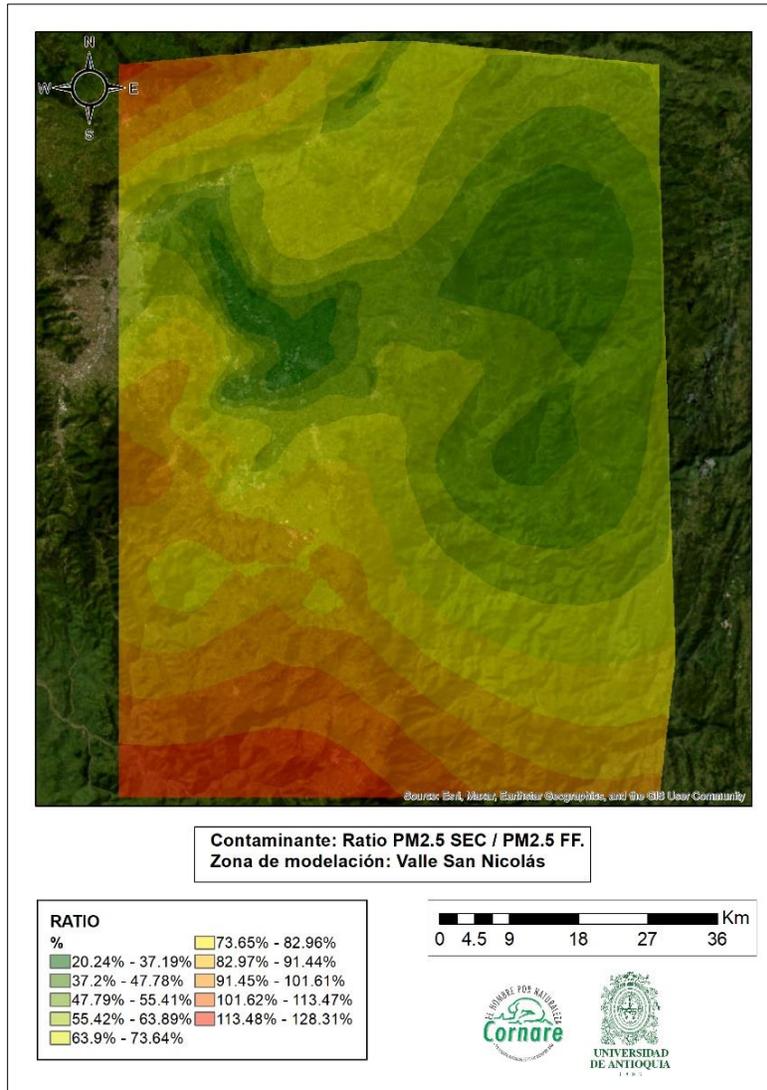
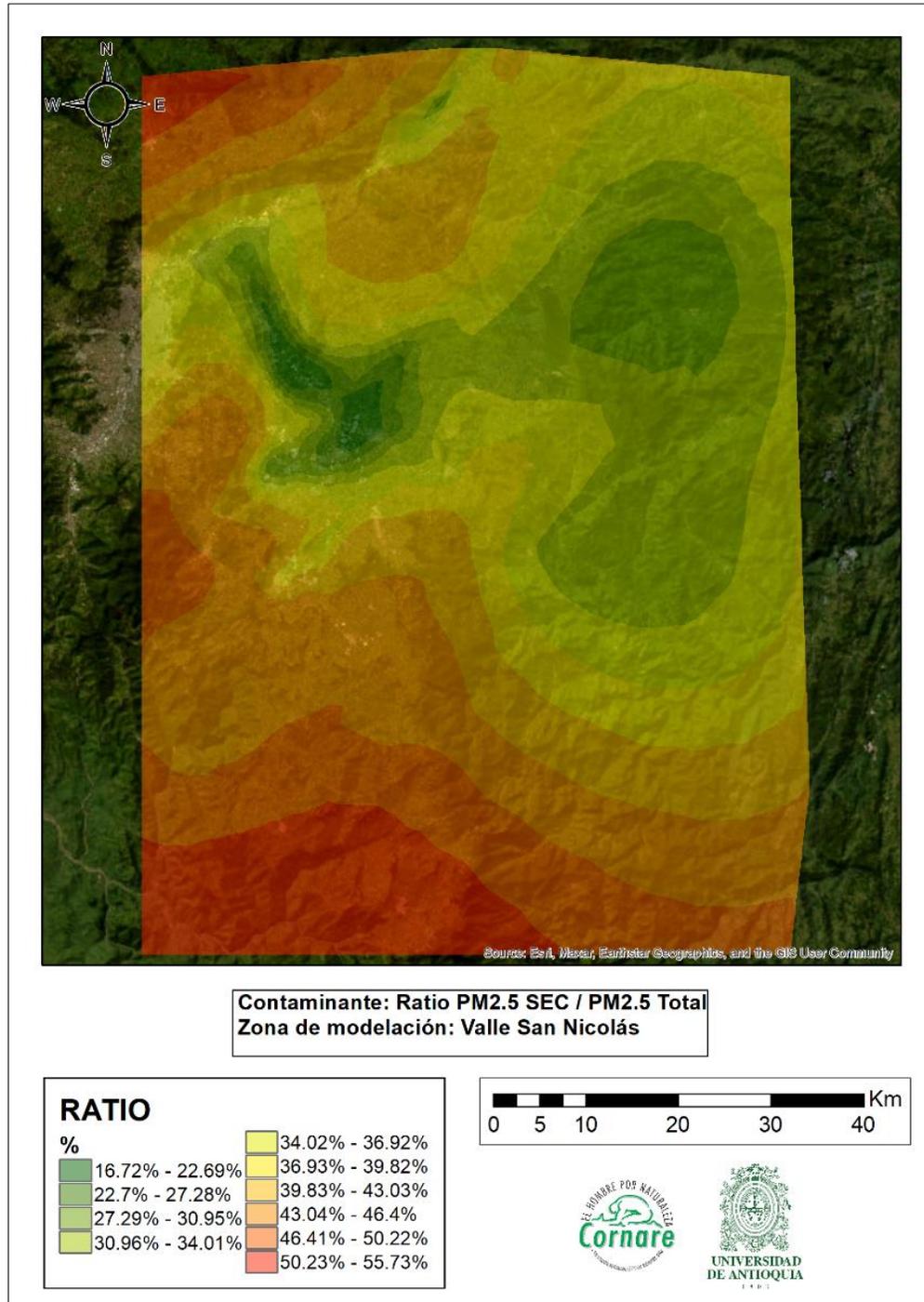


Figura 90. Razón Conc. PM2.5 secundario sobre Conc. PM2.5 por emisión de fuentes fijas

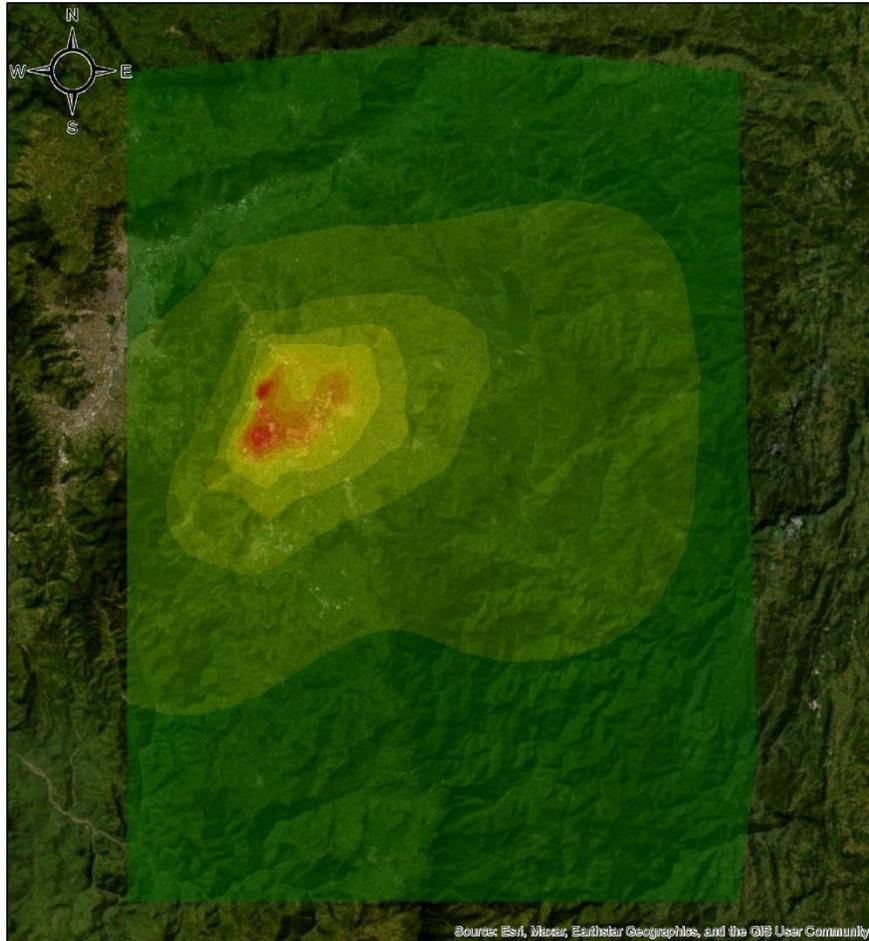


**Figura 91. Razón Conc. PM2.5 secundario sobre Conc. PM2.5 total (FF+FA+Sec)**

#### **4.1.2 Dispersión de Dióxido de Nitrógeno (NO<sub>2</sub>)**

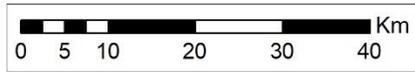
Al analizar la dispersión de NO<sub>2</sub> a partir de los resultados del inventario de emisiones, se destaca que las mayores concentraciones se registran en la zona con la densidad empresarial más alta, específicamente en el municipio de Rionegro. Es fundamental tener en cuenta que estas estimaciones no consideran la concentración de fondo de los contaminantes, lo cual añade complejidad al panorama.

Resulta crucial destacar que las áreas con concentraciones comprendidas entre 27.17 y 40.24 µg/m<sup>3</sup> deben considerarse como zonas de interés al desarrollar estrategias para reducir las emisiones. Esto se debe a que la norma anual de calidad del aire para NO<sub>2</sub>, según la Resolución 2254 del año 2017, establece un límite de 60 µg/m<sup>3</sup>. En este contexto, es evidente que un aumento en las emisiones podría superar dicho límite en estas áreas específicas, lo que podría tener repercusiones significativas en la salud de las personas que residen en dichas zonas.



**Contaminante: NO2 Anual.**  
**Zona de modelación: Valles San Nicolás**

CONCENTRACIÓN	
[ ]-micro g /m3	
0.05 - 0.52	9.36 - 12.81
0.53 - 1.62	12.82 - 16.44
1.63 - 3.51	16.45 - 21.33
3.52 - 6.04	21.34 - 27.16
6.05 - 9.35	27.17 - 40.24



**Figura 92. Concentración promedio anual de NO<sub>2</sub> dominio San Nicolás y la Unión**

#### **4.1.1 Dispersión de Monóxido de Carbono**

Los resultados obtenidos en la modelación del monóxido de carbono (CO) en el dominio de Valles de San Nicolás y el municipio de La Unión ofrecen valiosas contribuciones en relación con las emisiones de CO calculada a partir del inventario de emisiones atmosféricas para fuentes fijas puntuales y la dispersión de sus isopletas. En el análisis octohorario, se observaron concentraciones en un rango que varía desde 0,9 hasta 1170  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Es importante destacar que estos valores se sitúan por debajo de la norma octohoraria establecida en la resolución 2257 del año 2017, la cual establece un límite máximo permisible para el CO con un tiempo de exposición de 8 horas de 5000  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

De otro lado, la modelación del monóxido de carbono con un tiempo de exposición más corto, de una hora, dio como resultado rangos de dispersión de emisiones que abarcan desde 1,9 hasta 4730  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . A pesar de estos valores, es importante resaltar que tampoco se sobrepasa la norma horaria establecida para este contaminante, la cual se encuentra en 35000  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Estos resultados sugieren que las concentraciones de monóxido de carbono en la región analizada se mantienen dentro de los límites establecidos por las normativas vigentes, tanto en el marco de exposición octohoraria como horaria. Es importante resaltar nuevamente que las concentraciones estimadas no poseen la suma de las concentraciones de fondo de monóxido de carbono que puedan presentarse en la zona.

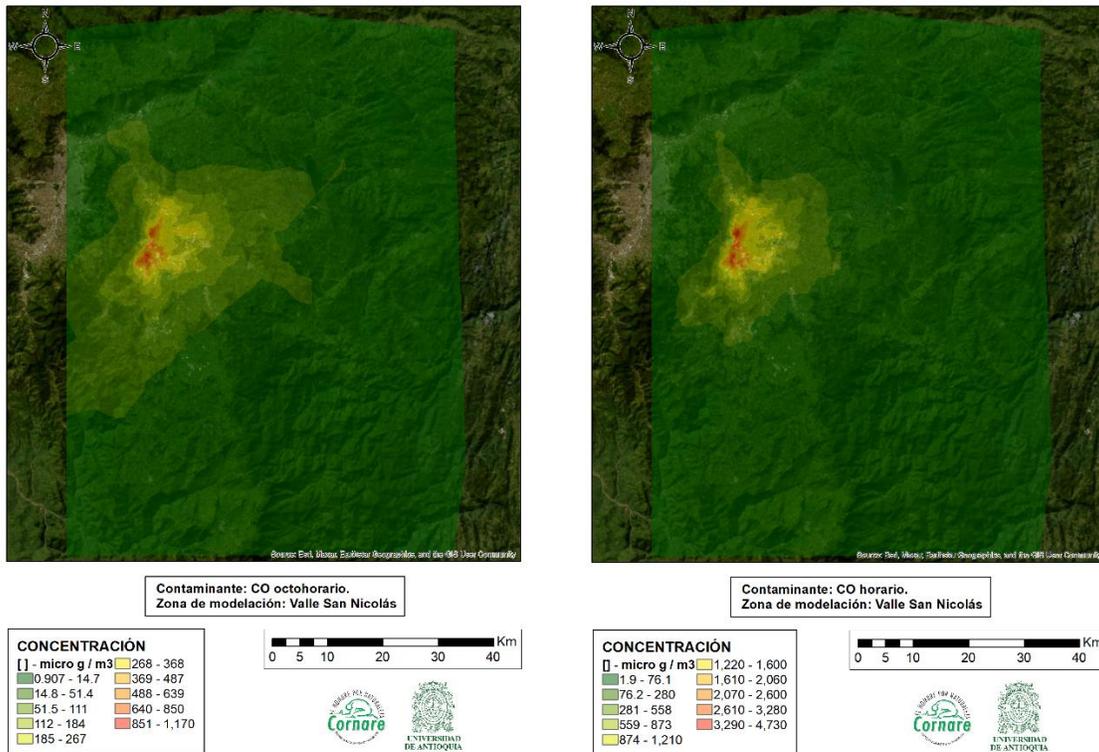
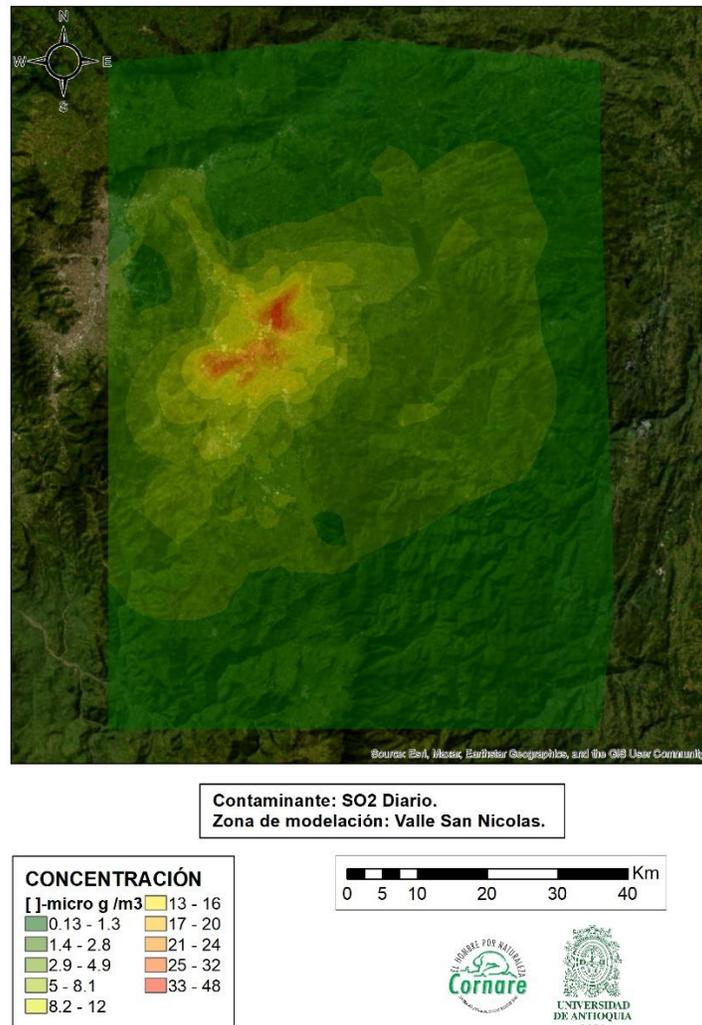


Figura 93. Concentración promedio octohoraria y horaria de CO dominio San Nicolás y la Unión

#### 4.1.1 Dispersión de Dióxido de azufre

Los resultados obtenidos de la modelación del dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) en el dominio de Valles de San Nicolás y el municipio de La Unión proporcionan información acerca de las emisiones de SO<sub>2</sub> y la dispersión de sus isopletas, centrándose en un análisis de carácter diario. En este contexto, se ha observado un rango de concentraciones de isopletas que varía entre 0,13 y 48 µg/m<sup>3</sup>. Es importante destacar que estos valores se sitúan por debajo de la norma diaria para el SO<sub>2</sub>, establecida en la resolución 2257 del año 2017, donde se fija un nivel máximo permisible con un tiempo de exposición de 24 horas en 50 µg/m<sup>3</sup>. Sin embargo, aunque los valores asociados a la salida del modelo se encuentran por debajo del límite establecido por la normativa para este contaminante, es necesario llevar a cabo verificaciones periódicas de las concentraciones, con el objetivo de prevenir cualquier posible excedencia de los límites permitidos. Asimismo, se sugiere la implementación de medidas efectivas de reducción de las emisiones de SO<sub>2</sub>, con el fin de garantizar el mantenimiento de la calidad del aire en niveles aceptables y cumplir con los estándares ambientales establecidos.

Los resultados obtenidos muestran, como es de esperar, que las concentraciones más elevadas de SO<sub>2</sub> se encuentran en proximidad a las fuentes puntuales de emisión identificadas en el inventario de emisiones.



**Figura 94. Concentración de SO<sub>2</sub> diaria dominio San Nicolas y la Unión**

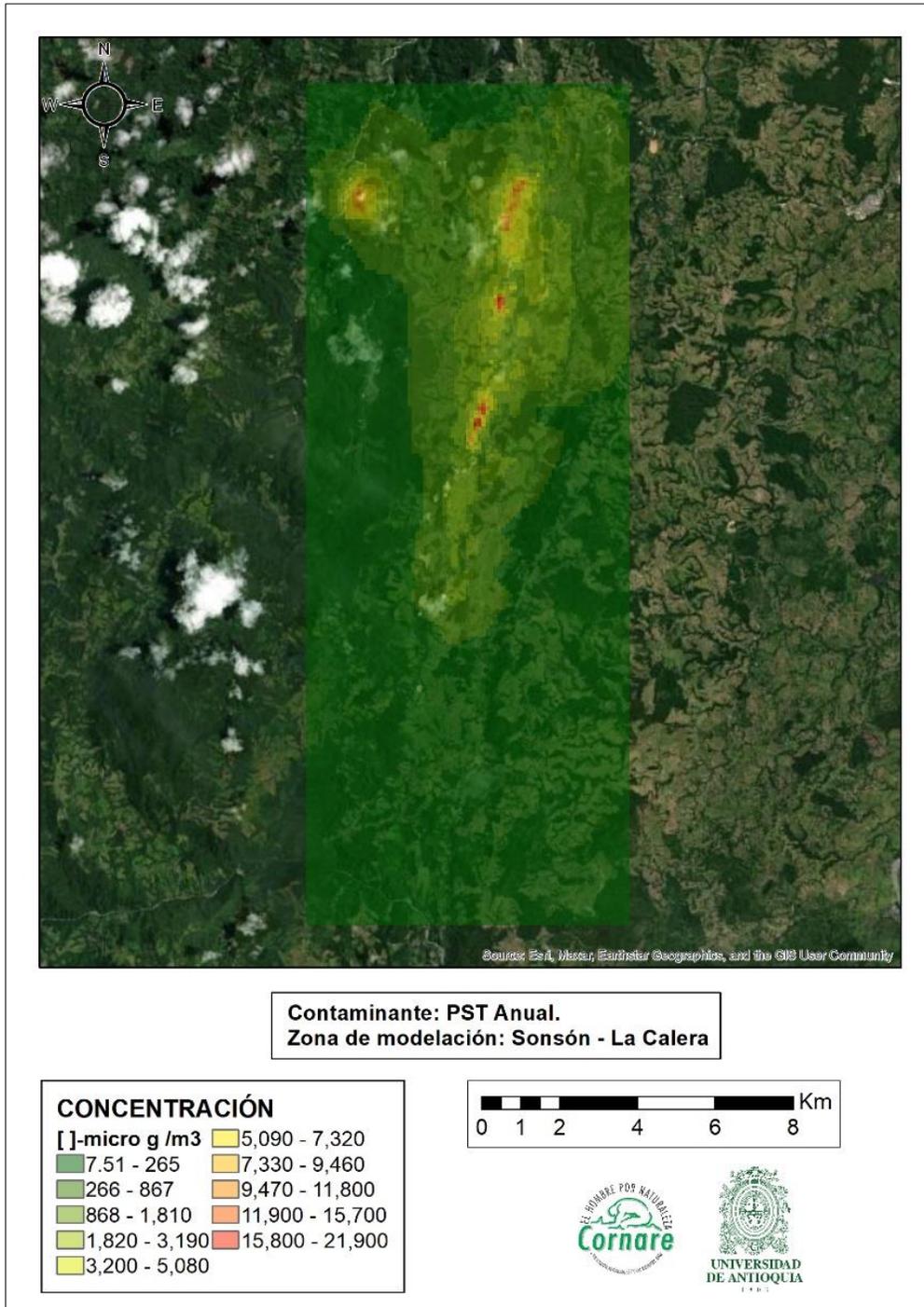
## **4.2 Dominio Zona La Calera**

Para abordar el análisis del dominio en cuestión, el modelo se ha dividido en tres partes distintas: una destinada a las fuentes fijas, otra a las fuentes de área, y un subdominio específico para la Danta cómo fuente líneal. Este enfoque ha resultado en la generación de tres secciones para todas las fracciones de material particulado, mientras que se ha mantenido una sola sección para los demás contaminantes. Con el propósito de proporcionar una visión detallada de la dispersión.

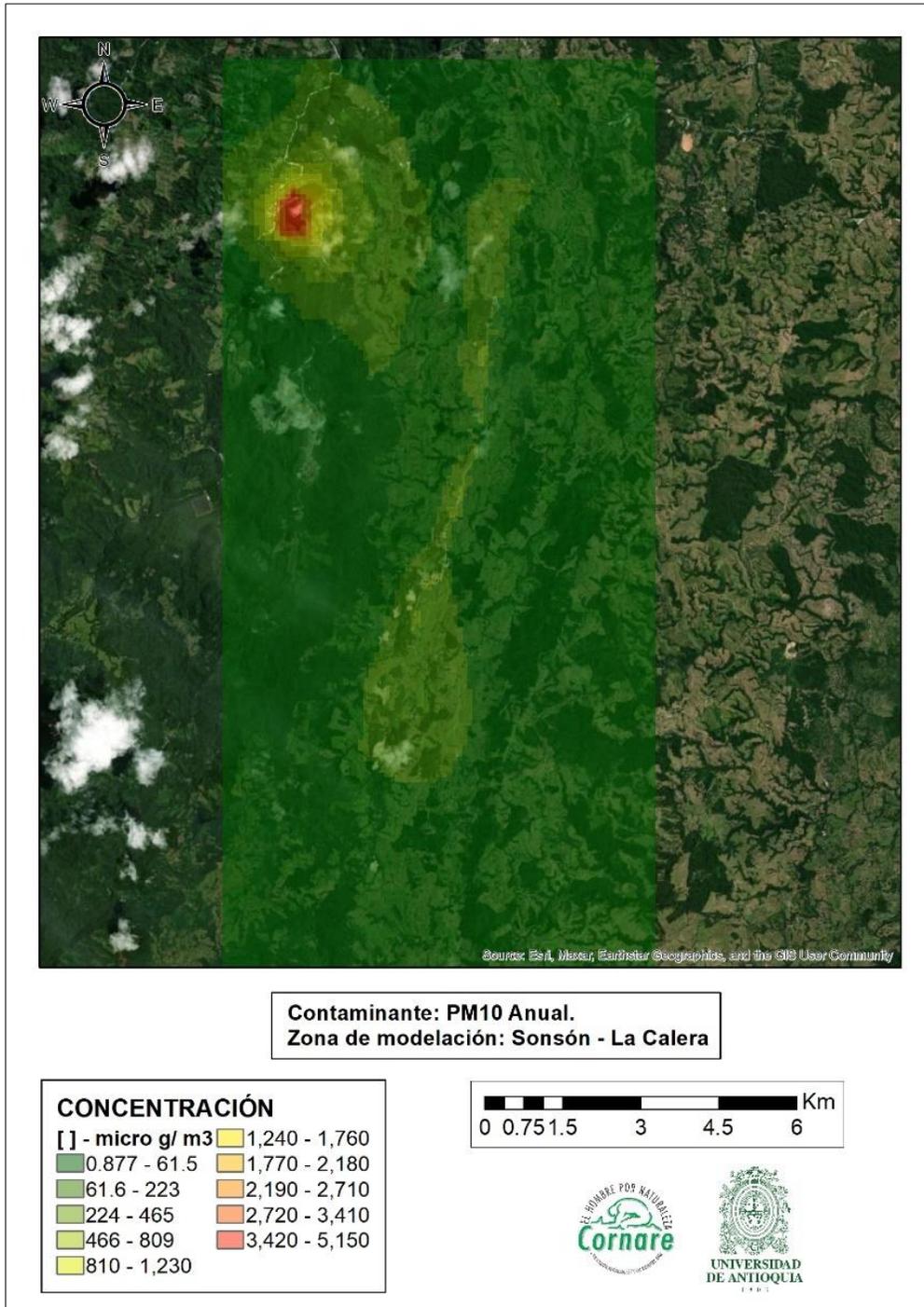
En la representación gráfica de los resultados, se observan las dispersiones de Material Particulado Suspendido Total (PST), Material Particulado de 10 micrómetros o menos ( $PM_{10}$ ) y Material Particulado de 2.5 micrómetros o menos ( $PM_{2.5}$ ). Cada sección del modelo exhibe sus propias características de dispersión, permitiendo una comprensión específica de la contribución de las fuentes fijas, las fuentes de área y el subdominio de la Danta a la presencia de estas partículas en la atmósfera. Es importante destacar, que para la representación de la dispersión del PST,  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  se realiza la suma de las partes en las cuales fue subdividida la modelación.

### **4.2.1 Dispersión de Material Particulado (PST, $PM_{10}$ y $PM_{2.5}$ )**

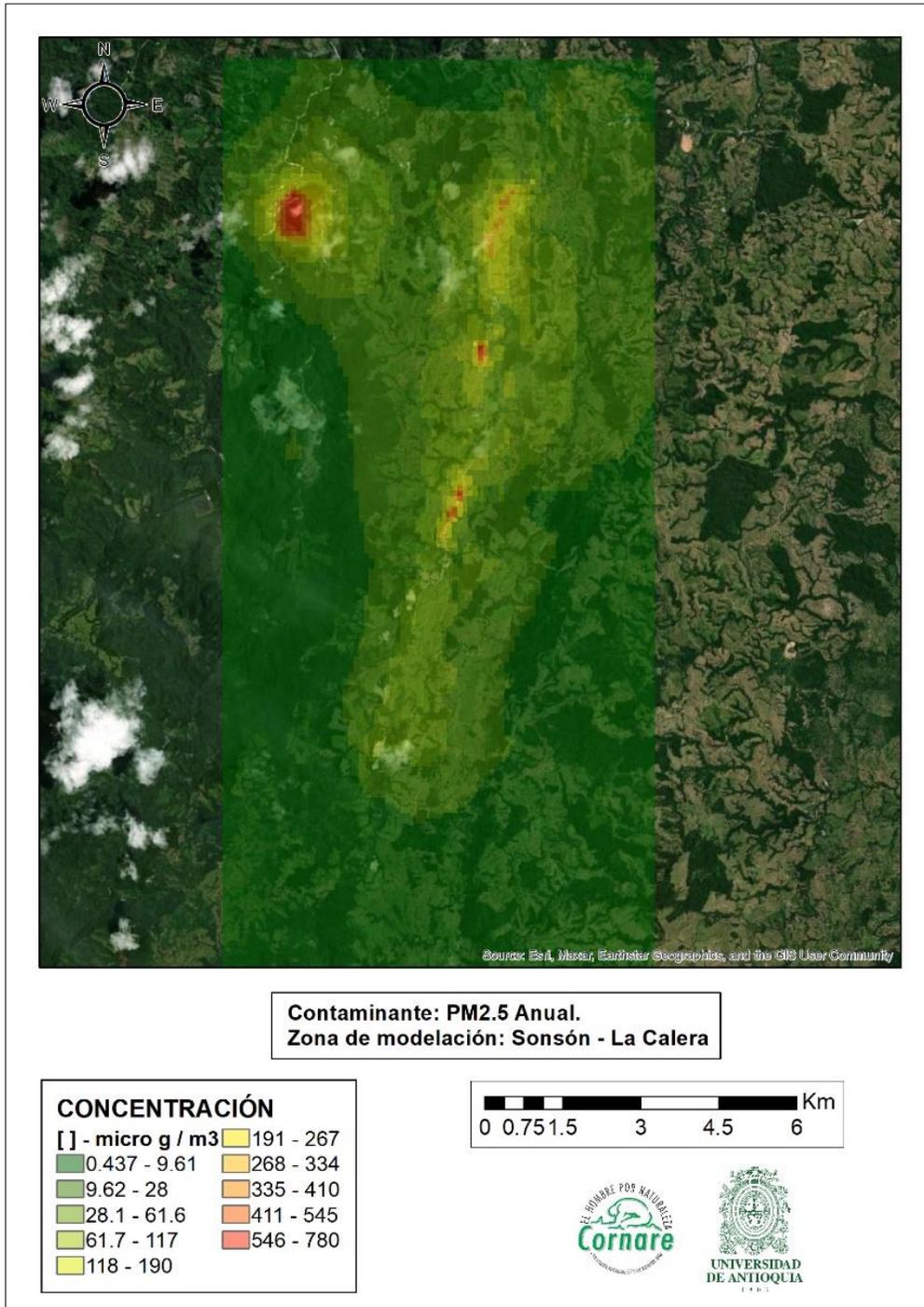
La Figura 95, Figura 96 y Figura 97 ofrecen una representación visual de la dispersión de PST,  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  para el tiempo de exposición promedio anual en el dominio de La Calera. En estas figuras, se destaca que las fuentes de área y la vía La Danta se identifican como los principales contribuyentes a la presencia de estas partículas en la atmósfera de la región.



**Figura 95. Concentración promedio anual de PST dominio Zona de las Caleras**

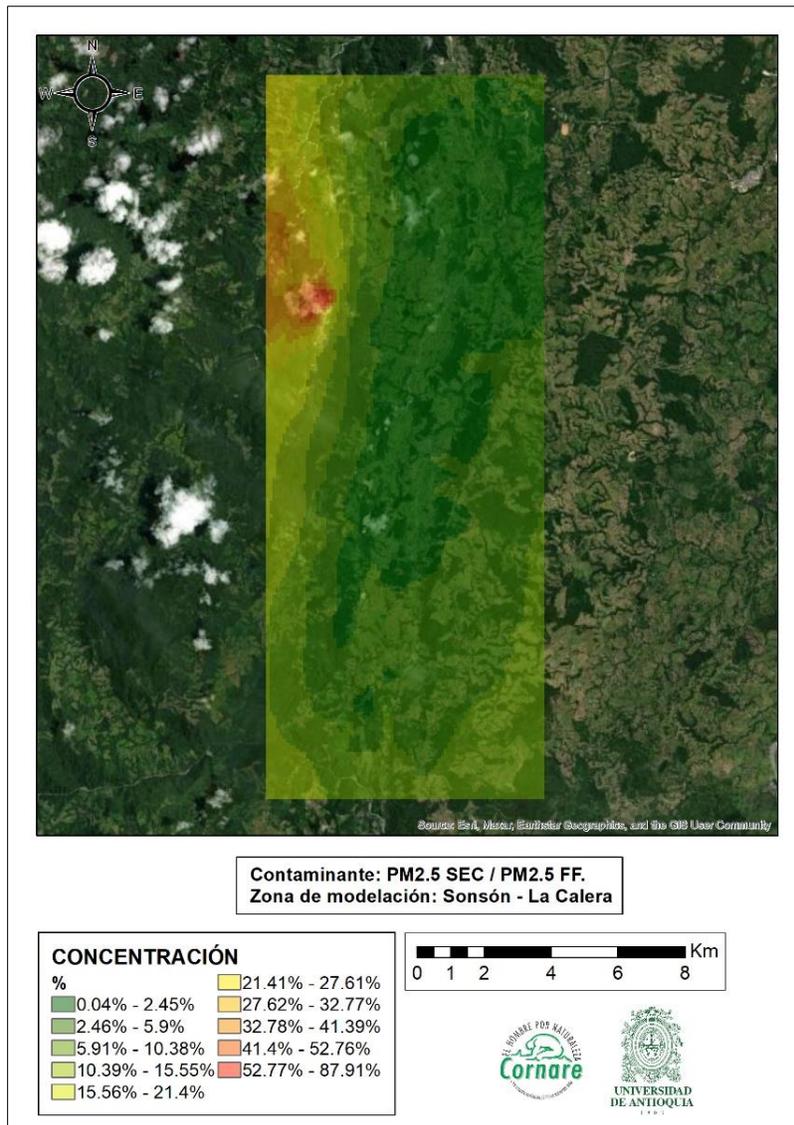


**Figura 96. Concentración promedio anual de PM10 dominio Zona de las Caleras**

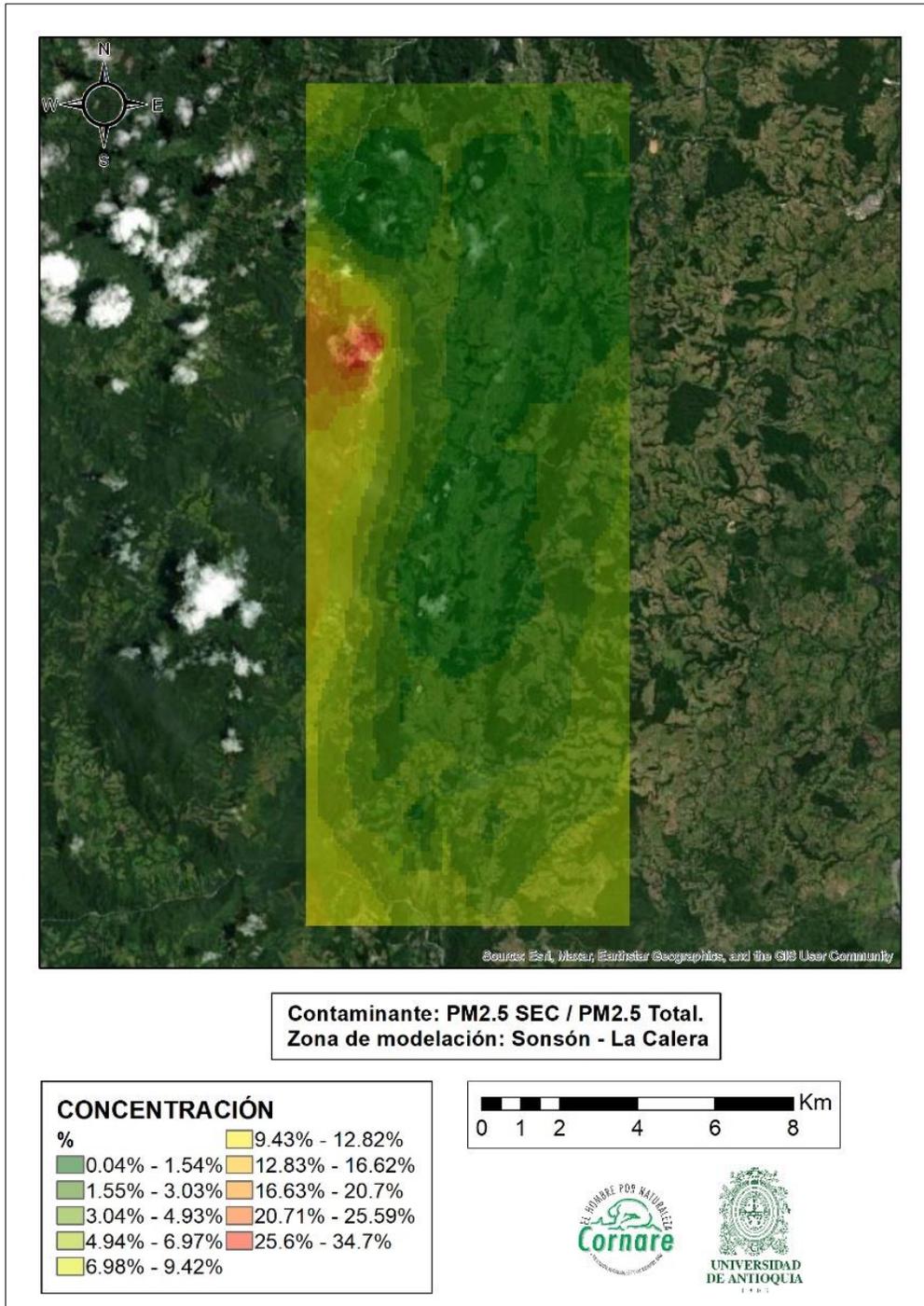


**Figura 97. Concentración promedio anual de PM2.5 dominio Zona de las Caleras**

Dado que el modelo fue configurado para incluir parametrizaciones de química de la atmosfera, las emisiones totales de PM2.5 lo incluyen, en la Figura 98 y Figura 99 se presentan la razón de PM2.5 secundario sobre el PM2.5 emitido por fuentes fijas y sobre el total respectivamente, es de notar como, cerca de las fuentes fijas el aporte de PM2.5 secundario puede llegar a ser hasta del 50% del valor de emitido por fuentes fijas y hasta un 30% el total lo cual es considerable.



**Figura 98. Razón Conc. PM2.5 secundario sobre Conc. PM2.5 por emisión de fuentes fijas**



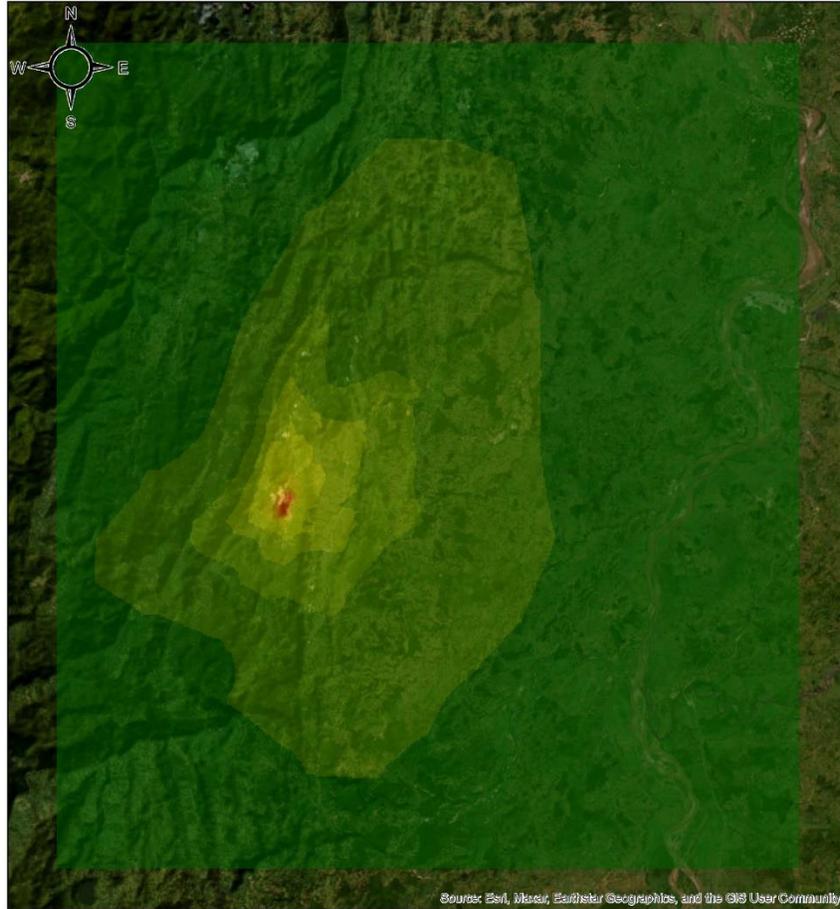
**Figura 99. Razón Conc. PM2.5 secundario sobre Conc. PM2.5 total (FF+FA+Sec)**

#### 4.2.1 Dispersión de Dióxido de Nitrógeno (NO<sub>2</sub>)

Los resultados derivados de la modelación de la dispersión del dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) en la zona de La Calera revelan que las áreas con concentraciones más elevadas de NO<sub>2</sub> coinciden con la presencia de fuentes fijas puntuales, especialmente en el municipio de Sonsón.

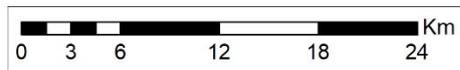
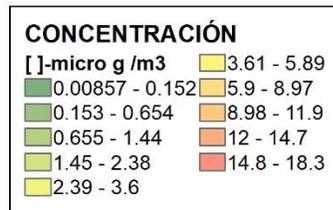
Los resultados de la dispersión muestran valores de concentración de NO<sub>2</sub> que varían entre 0.009 µg/m<sup>3</sup> y 18.3 µg/m<sup>3</sup>. Es importante destacar que, en el marco normativo colombiano, la norma anual para este contaminante se establece en 60 µg/m<sup>3</sup>. En este contexto, los valores obtenidos sugieren que es poco probable que esta zona experimente excedencias en la norma de calidad del aire asociada a NO<sub>2</sub>. Esto indica un escenario favorable en términos de cumplimiento normativo.

No obstante, es esencial continuar monitoreando la calidad del aire y realizar evaluaciones periódicas para asegurar que la situación se mantenga dentro de los límites aceptables. Además, es importante considerar la posible evolución de las fuentes de emisión en la zona y tomar medidas preventivas si se prevé un aumento significativo en las emisiones de NO<sub>2</sub> en el futuro.



Source: Esri, Maxar, Earthstar Geographics, and the GIS User Community

**Contaminante: NO2 Anual.**  
**Zona de modelación: Sonsón - La Calera**



**Figura 100. Concentración promedio anual de NO<sub>2</sub> dominio Subdominio la Calera**

#### **4.2.1 Dispersión de Monóxido de Carbono**

Los resultados obtenidos en la modelación del monóxido de carbono (CO) en el subdominio de La Calera en un análisis octohorario presentan un rango de concentraciones de isopletras que varían entre 1,01 y 495  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Estos valores se sitúan por debajo de la norma octohoraria para el CO, establecida en la resolución 2257 del año 2017, que fija un límite máximo permisible para CO con un tiempo de exposición de 8 horas en 5000  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . De otro lado, al analizar la modelación del monóxido de carbono con un tiempo de exposición más corto de una hora, se observan rangos de dispersión de emisiones que van desde 2,63 hasta 1320  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . En este caso, también se verifica que no se supera la norma horaria establecida para este contaminante, la cual se encuentra en 35000  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Estos resultados indican que, para la zona de La Calera, no parece haber problemáticas significativas asociadas a la acumulación de CO que puedan generar afectaciones en la salud de las personas. La concentración de este contaminante se mantiene dentro de los límites establecidos por las normativas vigentes, tanto en el marco de exposición octohoraria como horaria. Estos hallazgos son esenciales para evaluar la calidad del aire en la región.

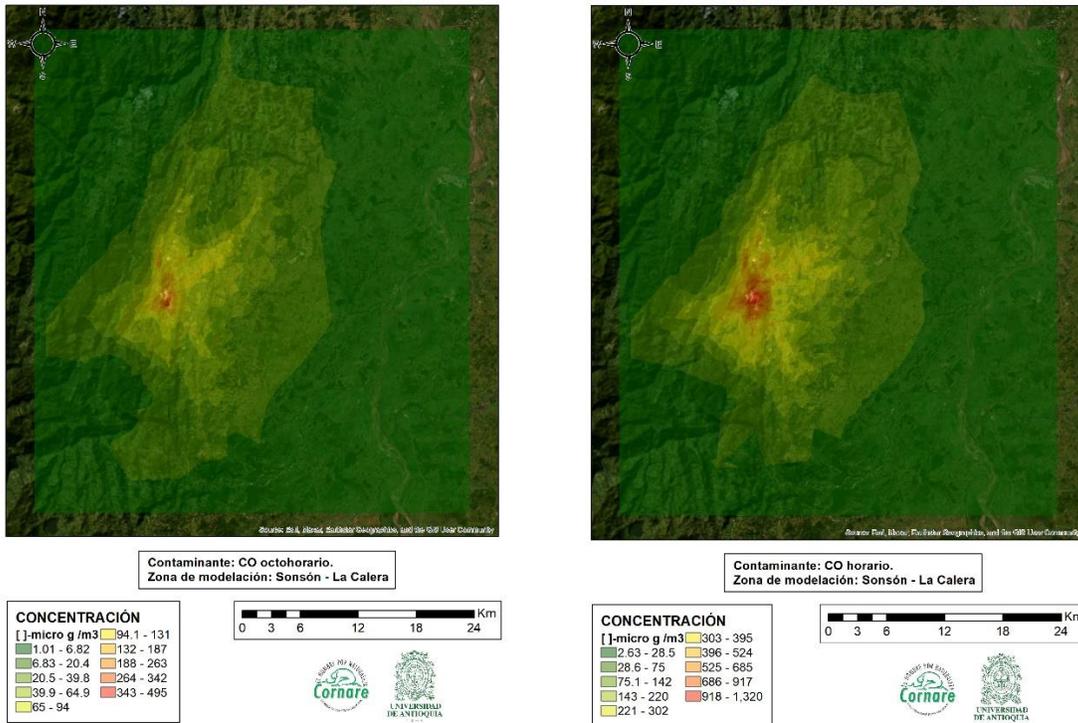


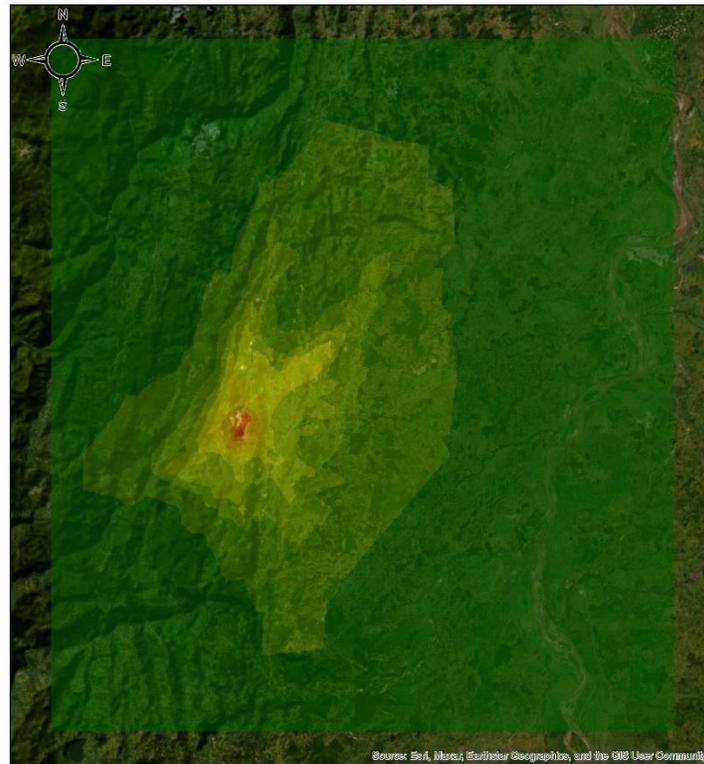
Figura 101. Concentración octohoraria y horaria de CO dominio Subdominio la Calera

#### 4.2.1 Dispersión de Dióxido de azufre

Los resultados derivados de la modelación de la dispersión diaria de dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) en el subdominio de La Calera muestran concentraciones elevadas de este contaminante, las cuales superan la norma de calidad diaria establecida en 50 µg/m<sup>3</sup>. Esta observación se alinea con los hallazgos del inventario de emisiones atmosféricas llevado a cabo en la jurisdicción de CORNARE, donde se identificó que el municipio de Sonsón es el principal emisor de SO<sub>2</sub> de la subregión bosques con una descarga total de 3031,19 toneladas por año. Este fenómeno se atribuye al elevado número de fuentes ubicadas en la Subregión bosques, concentradas principalmente en este municipio.

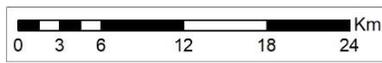
Considerando esta situación, es evidente que en las zonas cercanas a las emisiones de estos contaminantes se están produciendo excedencias de la norma, lo cual puede derivar en impactos adversos para la salud de las personas. En consecuencia, se hace imperativo establecer medidas efectivas que permitan la reducción de las emisiones de SO<sub>2</sub> en esta área específica.

La implementación de acciones dirigidas a mitigar las emisiones de SO<sub>2</sub>, especialmente en el municipio de Sonsón y sus zonas circundantes, se presenta como una medida crítica para salvaguardar la salud pública y mejorar la calidad del aire en la región. La adopción de estrategias focalizadas en la reducción de emisiones por parte de las fuentes identificadas en el inventario resulta esencial para abordar este problema y garantizar un entorno más saludable para la comunidad.



Contaminante: SO<sub>2</sub> Diario.  
 Zona de modelación: Sonsón - La Calera

CONCENTRACIÓN	
[ ]-micro g /m <sup>3</sup>	
0.309 - 7.79	106 - 152
7.8 - 25.2	153 - 230
25.3 - 47.7	231 - 337
47.8 - 72.6	338 - 459
72.7 - 105	460 - 636



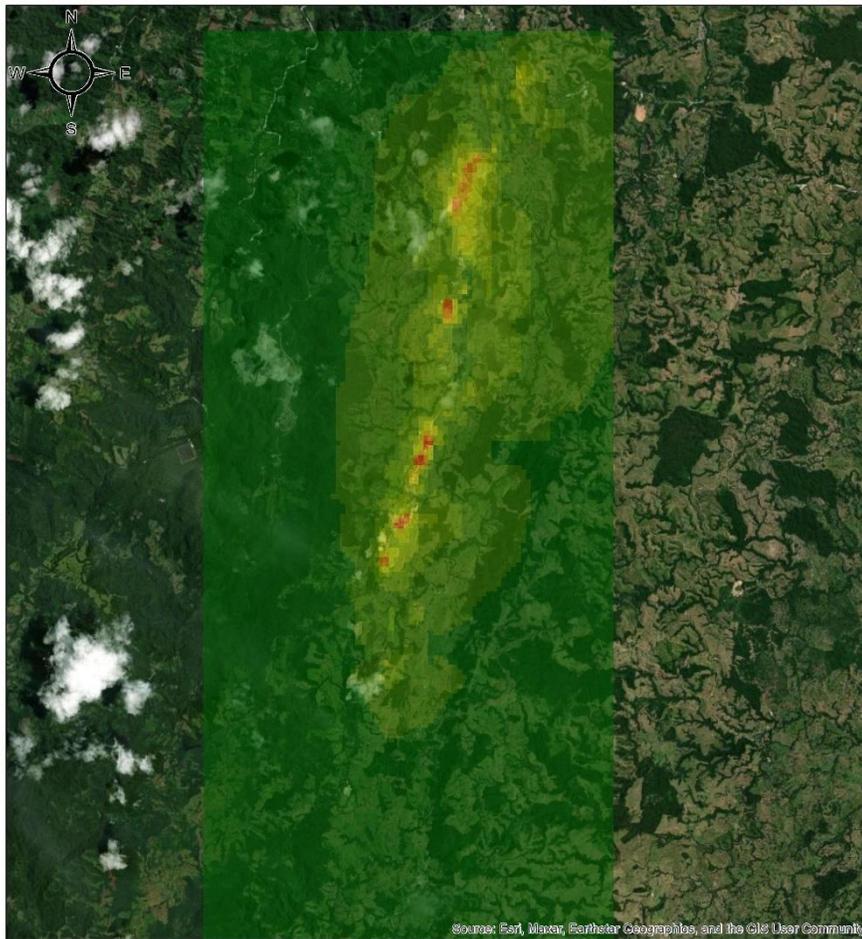
**Figura 102. Concentración octohoraria y horaria de CO dominio Subdominio la Calera**

#### **4.3 Subdominio La Danta**

Los resultados obtenidos en el subdominio de La Danta, que incluye la vía intensivamente utilizada por las empresas de caliza en la vereda del mismo nombre, muestran la dispersión de Partículas Suspendidas Totales (PST), Material Particulado de Diámetro Menor a 10 micrómetros ( $PM_{10}$ ) y Material Particulado de Diámetro Menor a 2.5 micrómetros ( $PM_{2.5}$ ) durante el tiempo de exposición promedio anual, como se ilustra en la Figura 103, Figura 104 y Figura 105.

Los resultados del modelo indican que el uso de esta vía puede tener un impacto significativo en la calidad del aire de la zona, sobre todo sobre el centro poblado de La Danta, evidenciado por concentraciones máximas de aporte de esta vía al  $PM_{10}$  que superan los  $300 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y de  $PM_{2.5}$  que superan los  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en promedio anual. Estas concentraciones exceden los estándares permisibles y representan un riesgo para la salud de las personas.

La presencia de concentraciones elevadas de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  sugiere la emisión de partículas finas y gruesas que pueden tener efectos perjudiciales para la salud respiratoria. Ante esta situación, es crucial implementar medidas efectivas para reducir las emisiones contaminantes en la vía y mitigar así el impacto negativo en la calidad del aire de la zona. Además, se recomienda una evaluación detallada de las fuentes de emisión a lo largo de la vía y la implementación de estrategias específicas para controlar y reducir estas emisiones, con el objetivo de salvaguardar la salud de la comunidad local.

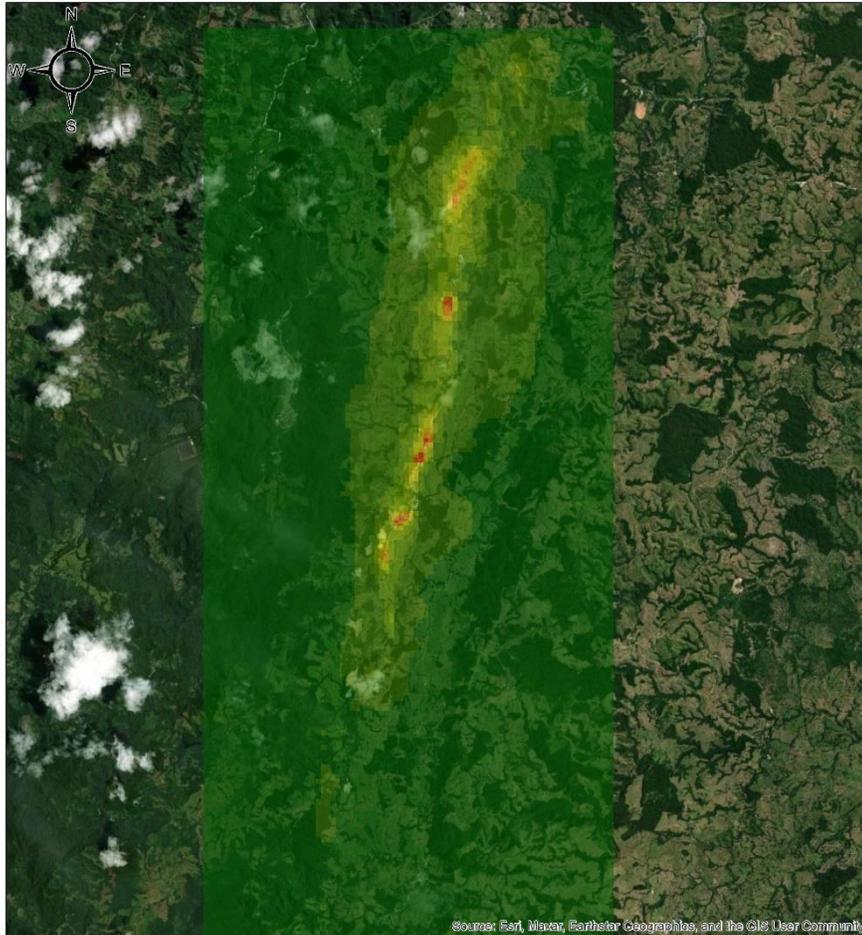


**Contaminante: PST Anual**  
**Zona de modelación: Sonsón - C. La Danta**

CONCENTRACIÓN	
[ ]-micro g /m3	1,150 - 1,690
1.47 - 51.1	1,700 - 2,230
51.2 - 200	2,240 - 2,930
201 - 398	2,940 - 4,320
399 - 696	4,330 - 6,330
697 - 1,140	



**Figura 103. Concentración promedio anual de PST dominio Subdominio la Danta**



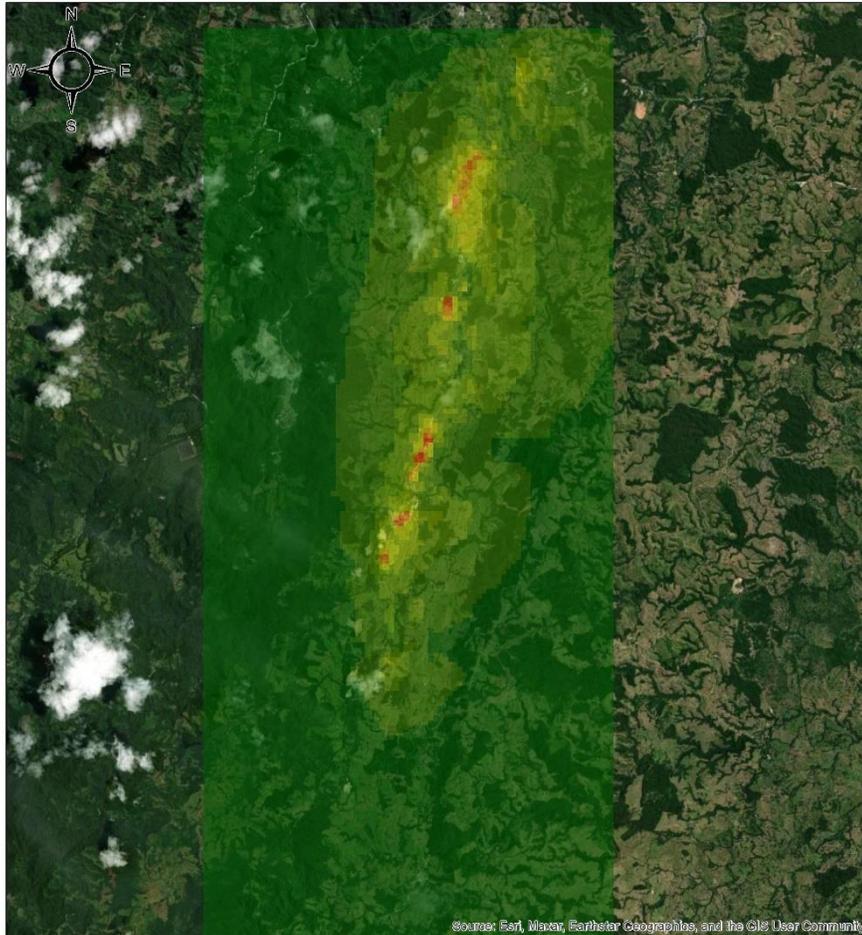
Source: Feri, Maxar, Earthstar Geographics, and the GIS User Community

**Contaminante: PM10 Anual**  
**Zona de modelación: Sonsón - C. La Danta**

CONCENTRACIÓN	
[ ]-micro g /m3	129 - 193
0.104 - 5.77	194 - 281
5.78 - 22.8	282 - 394
22.9 - 45.4	395 - 533
45.5 - 76.6	534 - 722
76.7 - 128	



**Figura 104. Concentración promedio anual de PM10 dominio Subdominio la Danta**



Contaminante: PM2.5 Anual  
Zona de modelación: Sonsón - C. La Danta

CONCENTRACIÓN	
[ ]-micro g /m3	31.3 - 46.4
0.0413 - 1.43	46.5 - 62.4
1.44 - 4.89	62.5 - 81.7
4.9 - 10.4	81.8 - 121
10.5 - 18.7	122 - 177
18.8 - 31.2	



**Figura 105. Concentración promedio anual de PM2.5 dominio Subdominio la Danta**

## **5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

- El dominio del Valle de San Nicolas y la Zona de La Calera presentan comportamientos diferenciados, en el dominio del Valle de San Nicolas las concentraciones más altas están dominadas por las fuentes fijas, mientras que en el dominio de la Zona de La Calera las concentraciones más altas están dominadas por la vía la danta y las fuentes de área.
- Para la zona de las Caleras las principales fuentes aportantes de material particulado corresponden a las fuentes de área asociadas a la minería, con contribuciones altas cerca de las fuentes, mientras que las fuentes fijas presentan contribuciones menores, sin embargo, estas últimas pueden presentar aportes a largas distancias mientras que los aportes de las fuentes de área decaen rápidamente cerca de las fuentes.
- Los datos de aportes de la Vía La Danta son altos y pueden estar generando problemas de calidad del aire dado que los valores de concentración predichos por el modelo muestran aportes que sin inclusión de concentración de fondo son mayores a los estándares máximos permisibles.
- Al respecto de la producción de PM2.5 secundario este tiene aportes anuales bajos comparados con los aportes de emisión directo de las fuentes fijas y las fuentes de área, se recomienda mantener el análisis de este en la medida que se tomen controles sobre las fuentes y el PM2.5 secundario se revista de relevancia debido a las disminuciones de aportes del emitido directamente.
- Se evidencia en las rosas de vientos, y por la topografía accidentada, que se presentan variaciones espaciales de la dirección del viento por lo tanto se recomienda mantener el modelo Calpuff en las actualizaciones de este estudio.
- Se recomienda para próximos estudios o actualizaciones de este, separar las fuentes por actividad económica a fin de identificar los aportes de cada una a la calidad del aire, sin embargo, el inventario de emisiones puede dar una idea de los aportes de estas.
- Se recomienda realizar un análisis de concentraciones de fondo e identificar si estas tienen comportamientos variables en los dominios, si tienen variabilidad temporal o si son constantes en el tiempo a fin de incluir las concentraciones de fondo y realizar análisis de la acumulación del impacto.
- Dado que para el modelo las emisiones de fuentes área asociadas a minería fueron incluidas en todo el título minero, se recomienda actualizar las coberturas

y asociar las emisiones no al título minero sino a las coberturas asociadas con minería o tierras desnudas dentro del título.

- Se recomienda tomar acciones en la vía La Danta tendientes a disminuir las emisiones, estas pueden ir encaminadas a la pavimentación de la vía, riego, placa huellas, u otras estrategias de control, en el caso de que se opte por la pavimentación es de tenerse en cuenta que como los principales aportantes son vehículos pesados de transporte de minerales la vía podría ensuciarse, aumentando la carga de finos y sin un plan de limpieza de la vía los problemas de calidad del aire podrían no solucionarse.
- Se recomienda imponer obligaciones a los usuarios industriales de la vía La Danta que permitan una mejor caracterización de la vía, tales como aforos diferenciados, muestreos del contenido de finos, planes de riego de la vía, entre otros, según el aporte de cada uno de los usuarios al TPD.
- La implementación de acciones dirigidas a mitigar las emisiones de SO<sub>2</sub>, especialmente en el municipio de Sonsón y sus zonas circundantes, se presenta como una medida crítica para salvaguardar la salud pública y mejorar la calidad del aire en la región.

## **6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

Envioware. (6 de Abril de 2019). *Envioware - CALPUFF*. Obtenido de <https://www.envioware.com/calpuff/>