

2017

**MODELO DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES
“ESTRUCTURACIÓN TÉCNICA DE LA PRIMERA LÍNEA DEL
METRO DE BOGOTÁ (PLMB)”, UBICADO EN EL ÁREA URBANA
DE BOGOTÁ, DEPARTAMENTO DE CUNDINAMARCA, PARA LA
EMPRESA INGETEC S.A.**



Imagen: Proyecto Estructuración Técnica de la Primera Línea del Metro de Bogotá

INGETEC
INGENIEROS CONSULTORES

**INGETEC S.A.
PRESENTADO A:**



**CONSULTOR:
K2 INGENIERÍA S.A.S.
SEPTIEMBRE 2017**

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. GENERALIDADES	2
2.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROYECTO	2
2.2 DESCRIPCIÓN DE LOS MÉTODOS CONSTRUCTIVOS	4
2.3 OPERACIONES DEL PROYECTO QUE PRODUCEN EMISIONES DE MATERIAL PARTICULADO.....	5
2.4 CONTAMINANTES EVALUADOS	6
2.4.1 Normas de Calidad del Aire	6
3. MODELACIÓN DE LA DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES AERMOD.....	8
3.1 DESCRIPCIÓN DEL MODELO AERMOD	8
3.2 VARIABLES METEOROLÓGICAS DE ENTRADA – MODELO AERMOD: 10	
3.2.1 Datos de entrada del modelo WRF.....	13
3.2.2 Variables de salida del modelo WRF	14
4. ANÁLISIS METEOROLÓGICO.....	15
4.1 TEMPERATURA	20
4.2 PRECIPITACIÓN	21
4.3 DIRECCIÓN Y VELOCIDAD DEL VIENTO	23
4.4 HUMEDAD RELATIVA.....	26
4.5 NUBOSIDAD	28
4.6 PRESIÓN BAROMÉTRICA	29
4.7 ALTURA DE MEZCLA.....	30
5. ANÁLISIS DE LA CALIDAD DEL AIRE EN LA ZONA	33
5.1 CONCENTRACIÓN DE MATERIAL PARTICULADO PM ₁₀	41
5.1.1 PM ₁₀ diaria vs. Norma	41
5.1.2 PM ₁₀ anual vs. Norma	44
5.2 CONCENTRACIÓN DE MATERIAL PARTICULADO PM _{2.5}	45
5.2.1 PM _{2.5} diaria vs. Norma	45

5.2.2	PM _{2.5} anual vs. Norma	48
5.3	CONCENTRACIÓN DE NO ₂	49
5.3.1	NO ₂ diaria vs. Norma	49
5.4	CONCENTRACIÓN DE SO ₂	51
5.4.1	SO ₂ diaria vs. Norma	51
5.5	CONCENTRACIÓN DE CO	53
5.5.1	CO diaria vs. Norma.....	53
5.5.2	CO octahoraria vs. Norma	55
5.6	VOC's EXPRESADOS COMO BTX	56
5.6.1	VOC's vs. Norma	58
6.	ESTIMACIÓN Y CÁLCULO DE EMISIONES	60
6.1	INVENTARIO DE EMISIONES – ESCENARIOS DE MODELACIÓN	60
6.1.1	Escenario 1: Línea Base (Año 2016)	60
6.1.2	Escenario 2: Construcción	60
6.1.3	Escenario 3: Operación del proyecto (Año 2042)	61
6.2	CÁLCULO DE EMISIONES	61
6.2.1	Factores de emisión	62
6.2.2	Eficiencia de los sistemas de control:	65
6.3	MANEJO DE MATERIALES.....	66
6.4	VARIABLES PARA EL CÁLCULO DE LA EMISIÓN	67
6.4.1	Escenarios línea Base y operación.....	67
6.4.2	Escenario Construcción.....	68
7.	RESULTADOS DEL INVENTARIO DE EMISIONES ATMOSFÉRICAS.....	71
7.1	EMISIONES DE GASES Y MATERIAL PARTICULADO PROYECTO PRIMERA LÍNEA DEL METRO DE BOGOTÁ	71
7.1.1	Línea Base y Operación	71
7.1.2	Construcción.....	75
8.	MODELACIÓN DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES EN LA ATMÓSFERA	81
8.1	IDEALIZACIÓN DE LAS FUENTES	81

8.1.1	Línea Base y Operación	81
8.1.2	Construcción.....	84
8.2	RECEPTORES Y TOPOGRAFÍA.....	87
8.2.1	Resolución y Definición del Dominio.....	87
8.3	TOPOGRAFÍA.....	90
9.	RESULTADOS DE MODELACIÓN AERMOD PARA PROYECTO ESTRUCTURACIÓN TÉCNICA DE LA PRIMERA LÍNEA DEL METRO DE BOGOTÁ (PLMB).....	91
9.1	ARCHIVOS DE ENTRADA AERMOD.....	91
9.2	ARCHIVOS DE SALIDA AERMOD	92
9.3	ESCENARIO LÍNEA BASE	93
9.3.1	Resultados de modelación – Material Particulado (PM ₁₀ y PM _{2.5}):	93
9.3.2	Resultados de modelación – Dióxido de nitrógeno (NO ₂).....	99
9.3.3	Resultados de modelación – Dióxido de azufre (SO ₂).....	103
9.3.4	Resultados de modelación – Monóxido de carbono (CO)	107
9.3.5	Resultados de modelación – Compuestos orgánicos volátiles (VOC) 111	
9.4	ESCENARIO CONSTRUCCIÓN.....	114
9.4.1	Resultados de modelación – Material Particulado (PM ₁₀ y PM _{2.5}): ..	114
9.4.2	Resultados de modelación – Dióxido de nitrógeno (NO ₂).....	119
9.4.3	Resultados de modelación – Dióxido de azufre (SO ₂).....	122
9.4.4	Resultados de modelación – Monóxido de carbono (CO)	125
9.4.5	Resultados de modelación – Compuestos orgánicos volátiles (VOC) 128	
9.5	ESCENARIO OPERACIÓN.....	131
9.5.1	Resultados de modelación – Material Particulado (PM ₁₀ y PM _{2.5}): ..	131
9.5.2	Resultados de modelación – Dióxido de nitrógeno (NO ₂).....	136
9.5.3	Resultados de modelación – Dióxido de azufre (SO ₂).....	140
9.5.4	Resultados de modelación – Monóxido de carbono (CO)	144
9.5.5	Resultados de modelación – Compuestos orgánicos volátiles (VOC) 148	
10.	APORTES DE MODELACIÓN CON CONCENTRACIONES DE FONDO....	152

10.1	ESCENARIO LÍNEA BASE	153
10.1.1	Material Particulado (PM ₁₀ y PM _{2.5}):	153
10.1.2	Dióxido de nitrógeno (NO ₂)	159
10.1.3	Dióxido de azufre (SO ₂).....	162
10.2	ESCENARIO CONSTRUCCIÓN.....	165
10.2.1	Material Particulado (PM ₁₀ y PM _{2.5}):	165
10.2.2	Dióxido de nitrógeno (NO ₂)	170
10.2.3	Dióxido de azufre (SO ₂).....	173
10.3	ESCENARIO OPERACIÓN	176
10.3.1	Material Particulado (PM ₁₀ y PM _{2.5}):	176
10.3.2	Dióxido de nitrógeno (NO ₂)	181
10.3.3	Dióxido de azufre (SO ₂).....	184
11.	INCERTIDUMBRE DEL MODELO	187
12.	OBSERVACIONES Y CONCLUSIONES.....	187
13.	REFERENCIAS	192
14.	ANEXOS.....	194

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Inventario de emisiones material particulado	5
Tabla 2. Límites de concentraciones establecidos en la norma colombiana.....	7
Tabla 3. Parámetros Modelo AERMOD	10
Tabla 4. Datos de entrada del Modelo ISC y AERMOD	11
Tabla 5. Parametrización AERMET.....	15
Tabla 6. Valores de Albedo, Bowen y Rugosidad	17
Tabla 7. Archivo Profile	18
Tabla 8. Archivo Surface	19
Tabla 9. Escala de Precipitación	23
Tabla 10. Distribución de la frecuencia de vientos	24
Tabla 11. Escala de velocidad del viento Beaufort.....	25
Tabla 12. Estaciones de monitoreo	33
Tabla 13. Estaciones de monitoreo	34
Tabla 14. Concentraciones diarias de PM ₁₀ vs. Norma	42
Tabla 15. Concentración anual de PM ₁₀ vs. Norma.....	44
Tabla 16. Concentraciones diarias de PM _{2.5} vs. Norma	46
Tabla 17. Concentración anual de PM _{2.5} vs. Norma	48
Tabla 18. Concentraciones diarias de NO ₂ vs. Norma	50
Tabla 19. Concentraciones diarias de SO ₂ vs. Norma.....	52
Tabla 20. Consolidado resultados BTX (µg/m ³)	56
Tabla 21. Comparativa indicativa de Benceno y Tolueno con la normatividad.....	58
Tabla 22. Factores de emisión para PM ₁₀ Escenario Línea Base y Operación.....	62
Tabla 23. Factores de emisión para PM ₁₀ Escenario construcción	62

Tabla 24. Factores de emisión para PM _{2.5} Escenario Línea Base y Operación	63
Tabla 25. Factores de emisión para PM _{2.5} Escenario Construcción	63
Tabla 26. Factores de emisión relacionados a otras actividades	65
Tabla 27. Estrategias de Control de Emisiones.....	65
Tabla 28. Descripción de movimiento de materiales por tramos	66
Tabla 29. Porcentaje de material por fuente.....	66
Tabla 30. Descripción de movimiento de materiales	66
Tabla 31. Descripción tramos línea base y operación.....	67
Tabla 32. Características de la flota vehicular	67
Tabla 33. Parámetros en vías de acceso	67
Tabla 34. Áreas de las fuentes evaluadas	68
Tabla 35. Parámetros para el cálculo de emisiones	69
Tabla 36. Equipos principales para la construcción	69
Tabla 37. Características Flota vehicular construcción	69
Tabla 38. Parámetros en vías de acceso en el transporte de materiales	70
Tabla 39. Parámetros en vías de acceso en el transporte vehicular	70
Tabla 40. Emisiones estimadas Línea Base.....	71
Tabla 41. Emisiones estimadas Operación	71
Tabla 42. Emisiones estimadas Construcción con control	75
Tabla 43. Emisiones estimadas construcción.....	76
Tabla 44. Idealización de fuentes.....	81
Tabla 45. Resumen Fuentes de volumen.....	83
Tabla 46. Resumen de los receptores.....	83
Tabla 47. Idealización de fuentes.....	84

Tabla 48. Resumen Fuentes de volumen.....	86
Tabla 49. Resumen Fuentes de Área.....	86
Tabla 50. Receptores discretos de modelación.....	87
Tabla 51. Resultados PM ₁₀ - PM _{2.5} 24 horas y anual. Escenario 1	93
Tabla 52. Aportes PM ₁₀ y PM _{2.5} anual. Escenario 1	94
Tabla 53. Resultados NO ₂ 24 horas y anual. Escenario 1	99
Tabla 54. Aportes NO ₂ anual. Escenario 1	100
Tabla 55. ResultadosSO ₂ 24 horas y anual. Escenario 1	103
Tabla 56. Aportes SO ₂ anual. Escenario 1	104
Tabla 57. Resultados CO 1 hora y 8 horas. Escenario 1	107
Tabla 58. Aportes CO 8 horas. Escenario 1	107
Tabla 59. Aportes VOC 24 horas y anual. Escenario 1	111
Tabla 60. Resultados PM ₁₀ - PM _{2.5} 24 horas y anual. Escenario 2	114
Tabla 61. Resultados NO ₂ 24 horas y anual. Escenario 2.....	119
Tabla 62. ResultadosSO ₂ 24 horas y anual. Escenario 2.....	122
Tabla 63. Resultados CO 1 hora y 8 horas. Escenario 2	125
Tabla 64. Aportes VOC 24 horas y anual. Escenario 2	128
Tabla 65. Resultados PM ₁₀ – PM _{2.5} 24 horas y anual. Escenario 3.....	131
Tabla 66. Porcentaje de incremento PM ₁₀ y PM _{2.5} anual. Escenario 3.....	132
Tabla 67. Resultados NO ₂ 24 horas y anual. Escenario 3.....	136
Tabla 68. Porcentaje de incremento NO ₂ anual. Escenario 3	137
Tabla 69. Aportes SO ₂ 24 horas y anual. Escenario 3.....	140
Tabla 70. Porcentaje incremento SO ₂ 24 horas y anual. Escenario 3	141
Tabla 71. Resultados CO 1 hora y 8 horas. Escenario 3	144

Tabla 72. Porcentaje incremento CO 8 Horas. Escenario 3	144
Tabla 73. Aportes VOC 24 horas y anual. Escenario 3	148
Tabla 74. Porcentaje incremento VOC 24 anual. Escenario 3.....	149
Tabla 75. Valores de fondo anual.....	152
Tabla 76. Valores de fondo 24 horas	153

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema general del tramo de la PLMB.....	2
Figura 2. Esquema de las estaciones de la PLMB	3
Figura 3. Esquema general de la PLMB.....	3
Figura 4. Esquema construcción de la PLMB.....	4
Figura 5. Esquema del sistema de modelación AERMOD	9
Figura 6. Diferencias entre el modelo digital de terreno del USGS (izquierda) y el IGAC (derecha).....	14
Figura 7. Información meteorológica sectorial WRF.....	16
Figura 8. Climograma de Gausсен.....	17
Figura 9. Temperatura promedio mensual	20
Figura 10. Perfil horario de temperaturas.....	21
Figura 11. Representación cualitativa de variación de temperatura – perfil horario	21
Figura 12. Precipitación acumulada mensual.....	22
Figura 13. Perfil horario de precipitaciones	22
Figura 14. Representación de la tendencia de ocurrencia de precipitaciones- perfil horario	23
Figura 15. Rosa de Vientos Bogotá 2017.....	24
Figura 16. Velocidad del viento promedio mensual.....	25
Figura 17. Perfil horario de velocidades	26
Figura 18. Representación cualitativa de variación de velocidad del viento- perfil horario	26
Figura 19. Humedad relativa promedio mensual.....	27
Figura 20. Perfil horario de humedad relativa.....	27

Figura 21. Representación cualitativa de variación de la humedad relativa- perfil horario	28
Figura 22. Nubosidad promedio mensual.....	28
Figura 23. Perfil horario de Nubosidad.....	29
Figura 24. Presión promedio mensual.....	29
Figura 25. Perfil horario de presión	30
Figura 26. Altura de mezcla mensual	31
Figura 27. Perfil horario de altura de mezcla.....	31
Figura 28. Representación cualitativa de variación de la altura de mezcla - perfil horario	32
Figura 29. Ubicación geográfica de las estaciones de monitoreo de calidad del aire	40
Figura 30. Concentraciones diarias de PM ₁₀ vs. Norma.....	43
Figura 31. Concentraciones promedio PM ₁₀ vs. Norma anual	45
Figura 32. Concentraciones diarias de PM _{2.5} vs. Norma.....	47
Figura 33. Concentraciones promedio PM _{2.5} vs. Norma anual.....	49
Figura 34. Concentraciones diarias de NO ₂ vs. Norma.....	51
Figura 35. Concentraciones diarias de SO ₂ vs. Norma	53
Figura 36. Concentraciones promedio horarias de CO vs. Norma	54
Figura 37. Media móvil octahoraria de CO vs. Norma.....	55
Figura 38. Resultados de VOC's expresados como BTX.....	57
Figura 39. Concentración de Benceno vs. Norma.....	59
Figura 40. Concentración de Tolueno vs. Norma.....	59
Figura 41. Emisiones PM ₁₀ por tramos.....	72
Figura 42. Emisiones PM _{2.5} por tramos	72
Figura 43. Emisiones NO ₂ por tramos	73

Figura 44. Emisiones SO ₂ por tramos	73
Figura 45. Emisiones CO por tramos.....	74
Figura 46. Emisiones VOC por tramos	74
Figura 47. Emisiones PM ₁₀ por actividades.....	77
Figura 48. Emisiones PM _{2.5} por actividades	78
Figura 49. Emisiones NO ₂ por actividades	79
Figura 50. Emisiones SO ₂ por actividades	79
Figura 51. Emisiones CO por actividades	80
Figura 52. Emisiones VOC por actividades.....	80
Figura 53. Idealización de Fuentes Proyecto PLMB. Línea Base y Operación	82
Figura 54. Idealización de Fuentes Proyecto PLMB. Construcción.....	85
Figura 55. Malla de receptores e idealización de fuentes utilizada en la definición del dominio de modelación Escenario 1 y 3.	88
Figura 56. Malla de receptores e idealización de fuentes utilizada en la definición del dominio de modelación Escenario 2.	89
Figura 57. Topografía de la zona	90
Figura 58. Aportes anuales PM ₁₀ . Escenario 1	95
Figura 59. Aportes anuales PM _{2.5} . Escenario 1	96
Figura 60. Isopleta anual PM ₁₀ proyecto PLMB. Escenario 1.....	97
Figura 61. Isopleta Anual PM _{2.5} proyecto PLMB. Escenario 1.....	98
Figura 62. Aportes anuales NO ₂ . Escenario 1	101
Figura 63. Isopleta anual NO ₂ proyecto PLMB. Escenario 1	102
Figura 64. Aportes anuales SO ₂ . Escenario 1	105
Figura 65. Isopleta anual SO ₂ proyecto PLMB. Escenario 1	106
Figura 66. Aportes 8 horas CO. Escenario 1	109

Figura 67. Isopleta CO 8 horas proyecto PLMB. Escenario 1	110
Figura 68. Aportes anuales VOC. Escenario 1	112
Figura 69. Isopleta anual VOC proyecto PLMB. Escenario 1	113
Figura 70. Aportes anuales PM ₁₀ . Escenario 2	115
Figura 71. Aportes anuales PM _{2.5} . Escenario 2.....	116
Figura 72. Isopleta anual PM ₁₀ proyecto PLMB. Escenario 2.....	117
Figura 73. Isopleta Anual PM _{2.5} proyecto PLMB. Escenario 2.....	118
Figura 74. Aportes anuales NO ₂ . Escenario 2.....	120
Figura 75. Isopleta anual NO ₂ proyecto PLMB. Escenario 2.....	121
Figura 76. Aportes anuales SO ₂ . Escenario 2	123
Figura 77. Isopleta anual SO ₂ proyecto PLMB. Escenario 2	124
Figura 78. Aportes 8 horas CO. Escenario 2.....	126
Figura 79. Isopleta CO 8 horas proyecto PLMB. Escenario 2	127
Figura 80. Aportes anuales VOC. Escenario 2.....	129
Figura 81. Isopleta anual VOC proyecto PLMB. Escenario 2	130
Figura 82. Aportes anuales PM ₁₀ . Escenario 3	133
Figura 83. Aportes anuales PM _{2.5} . Escenario 3.....	133
Figura 84. Isopleta anual PM ₁₀ proyecto PLMB. Escenario 3.....	134
Figura 85. Isopleta anual PM _{2.5} proyecto PLMB. Escenario 3	135
Figura 86. Aportes anuales NO ₂ . Escenario 3	138
Figura 87. Isopleta anual NO ₂ proyecto PLMB. Escenario 3.....	139
Figura 88. Aportes anuales SO ₂ . Escenario 3.....	142
Figura 89. Isopleta anual SO ₂ proyecto PLMB. Escenario 3	143
Figura 90. Aportes 8 horas CO. Escenario 3.....	146

Figura 91. Isopleta CO 8 horas proyecto PLMB. Escenario 3	147
Figura 92. Aportes anuales VOC. Escenario 3.....	150
Figura 93. Isopleta anual VOC proyecto PLMB. Escenario 3.....	151
Figura 94. Isopleta 24 horas PM ₁₀ proyecto PLMB + Fondos. Escenario 1	155
Figura 95. Isopleta anual PM ₁₀ proyecto PLMB + Fondos. Escenario 1.....	156
Figura 96. Isopleta 24 horas PM _{2.5} proyecto PLMB + Fondos. Escenario 1	157
Figura 97. Isopleta anual PM _{2.5} proyecto PLMB + Fondos. Escenario 1	158
Figura 98. Isopleta 24 horas NO ₂ proyecto PLMB + Fondos. Escenario 1	160
Figura 99. Isopleta anual NO ₂ proyecto PLMB + Fondos. Escenario 1	161
Figura 100. Isopleta 24 horas SO ₂ proyecto PLMB + Fondos. Escenario 1	163
Figura 101. Isopleta anual SO ₂ proyecto PLMB + Fondos. Escenario 1	164
Figura 102. Isopleta 24 horas PM ₁₀ proyecto PLMB + Fondos. Escenario 2	166
Figura 103. Isopleta anual PM ₁₀ proyecto PLMB + Fondos. Escenario 2.....	167
Figura 104. Isopleta 24 horas PM _{2.5} proyecto PLMB + Fondos. Escenario 2.....	168
Figura 105. Isopleta anual PM _{2.5} proyecto PLMB + Fondos. Escenario 2	169
Figura 106. Isopleta 24 horas NO ₂ proyecto PLMB + Fondos. Escenario 2.....	171
Figura 107. Isopleta anual NO ₂ proyecto PLMB + Fondos. Escenario 2	172
Figura 108. Isopleta 24 horas SO ₂ proyecto PLMB + Fondos. Escenario 2	174
Figura 109. Isopleta anual SO ₂ proyecto PLMB + Fondos. Escenario 2	175
Figura 110. Isopleta 24 horas PM ₁₀ proyecto PLMB + Fondos. Escenario 3	177
Figura 111. Isopleta anual PM ₁₀ proyecto PLMB + Fondos. Escenario 3.....	178
Figura 112. Isopleta 24 horas PM _{2.5} proyecto PLMB + Fondos. Escenario 3.....	179
Figura 113. Isopleta anual PM _{2.5} proyecto PLMB + Fondos. Escenario 3	180
Figura 114. Isopleta 24 horas NO ₂ proyecto PLMB + Fondos. Escenario 3.....	182

Figura 115. Isopleta anual NO ₂ proyecto PLMB + Fondos. Escenario 3	183
Figura 116. Isopleta 24 horas SO ₂ proyecto PLMB + Fondos. Escenario 3	185
Figura 117. Isopleta anual SO ₂ proyecto PLMB + Fondos. Escenario 3	186

LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 1.....	61
-----------------	----

ANEXOS

ANEXO 1. FIRMA CONSULTORA

ANEXO 2. MARCO TEÓRICO

ANEXO 3. ESTIMACIÓN DE EMISIONES DE CONTAMINANTES

ANEXO 4. PLANOS DE ISOPLETAS RESULTADOS DEL MODELO

ANEXOS DIGITALES

ANEXO AD-1. ARCHIVOS MODELACIÓN

- Archivos de entrada del modelo AERMOD
- Archivos de salida del Modelo
- Topografía de nivel para Modelación AERMOD

ANEXO AD-2. CARPETA SIG

ANEXO AD-3. FICHA TÉCNICA QUE ESPECIFICA LOS DATOS DE METEOROLOGÍA Y USO DE SUELO UTILIZADOS PARA LA GENERACIÓN DE LA INFORMACIÓN METEOROLÓGICA UTILIZADA EN ESTE MODELO.

1. INTRODUCCIÓN

El estudio efectuado presenta los resultados de la consultoría: “MODELO DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES “ESTRUCTURACIÓN TÉCNICA DE LA PRIMERA LÍNEA DEL METRO DE BOGOTÁ (PLMB)”, UBICADO EN EL ÁREA URBANA DE BOGOTÁ, DEPARTAMENTO DE CUNDINAMARCA, PARA LA EMPRESA INGETEC S.A.”, en este son cuantificados los niveles de inmisión de Partículas de diámetro aerodinámico inferior a 10 micras (PM_{10}), Partículas de diámetro aerodinámico inferior a 2.5 micras ($PM_{2.5}$), Óxidos de Nitrógeno (NO_2), Óxidos de Azufre (SO_2), Monóxido de Carbono (CO) y Compuestos Orgánicos Volátiles (VOC), producto de las operaciones desarrolladas por el proyecto durante las fases de: Línea base, construcción y operación.

El estudio está estructurado de la siguiente manera:

- 1) Análisis meteorológico a partir de modelación WRF (*Weather Research and Forecast*) del año 2016 en el área donde se ubica el proyecto, permitiendo conocer los patrones climatológicos que pueden afectar la dispersión de los contaminantes.
- 2) Análisis de los resultados de calidad del aire de la campaña de monitoreo realizada durante el año 2017, dichos resultados darán una idea de los niveles esperables en la zona evaluada.
- 3) Procesamiento de información cartográfica y topográfica, la cual definirá la ubicación e idealización de las fuentes de emisión.
- 4) Inventario de emisiones con la ayuda de factores de emisión del AP-42 de la U.S. EPA para las operaciones proyectadas.
- 5) Modelización de tres escenarios que comprenden la línea base (Escenario 1), Construcción (Escenario 2) y la Operación (Escenario 3).

El análisis e interacción de estos elementos permitirá tener una aproximación técnica de la influencia del proyecto en los receptores de interés de la zona.

2. GENERALIDADES

2.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROYECTO

El proyecto objeto de estudio, se desarrollará en la ciudad de Bogotá D.C., iniciando en la localidad de Bosa y finalizando en la localidad de Chapinero. La primera Línea del Metro de Bogotá (PLMB) tendrá una longitud de 25.29 kilómetros, la cual será en su totalidad elevada. El diseño de la Primera línea contempla la construcción de quince (15) estaciones incluidas las adecuaciones donde tiene transbordo de usuarios con las estaciones actuales de Transmilenio.

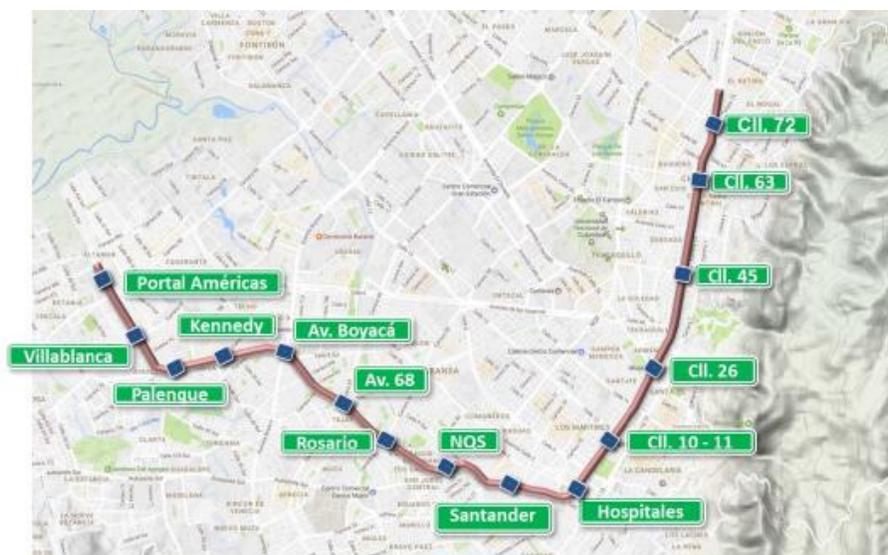


Figura 1. Esquema general del tramo de la PLMB

Fuente: INGETEC S.A.

La ubicación del Patio Taller se encuentra en el Predio El Corzo - Bogotá D.C, continuando con el tramo elevado o viaducto ferroviario denominado Ramal Técnico de conexión entre el Patio Taller y la estación Portal de Las Américas. El tramo irá desde el Portal de las Américas hasta la Avenida Caracas, a lo largo de la Avenida Villavicencio, Avenida Primero de Mayo y Calle 1, por donde girará hacia el norte hasta la Calle 72 y un tramo de maniobras de retorno en la Calle 76.

La Primera Línea del Metro de Bogotá (PLMB) ha sido concebida bajo parámetros de eficiencia energética y medio ambiental, operará con luz y ventilación natural, lo cual representa ahorros de gran importancia en las fases de obras y operación. Los trenes operaran con energías limpias, el sistema será ciento por ciento eléctrico. En la Figura 2, se presenta un esquema general de las estaciones de la PLMB.

**Figura 2. Esquema de las estaciones de la PLMB**

Fuente: Alcaldía Mayor de Bogotá D.C.

La estructura será sismorresistente, a una altura que irá entre los 7 y 13 metros según las condiciones de la vía y la infraestructura existente, donde surgirán millones de metros cuadrados de espacio público zonas verdes, andenes, plazoletas y ciclorutas, con iluminación natural (ver Figura 3).

**Figura 3. Esquema general de la PLMB**

Fuente: Alcaldía Mayor de Bogotá D.C.

2.2 DESCRIPCIÓN DE LOS MÉTODOS CONSTRUCTIVOS

El proceso constructivo que se desarrolla para el metro elevado, es similar a un viaducto convencional en concreto o estructura metálico. Por lo general el metro elevado se desarrolla con piezas prefabricadas que componen la subestructura y superestructura, una de las ventajas de este método es que no requiere túneles ni remoción de grandes volúmenes de material adicionalmente tampoco se presenta grandes interferencias con las redes de servicios públicos.

En la Figura 4 se puede apreciar el proceso de la construcción de la PLMB. La primera fase es la construcción de las columnas mediante llenado con moldes, se debe aplicar relleno prefabricado con el fin de estabilizar las estructuras y realizar la excavación en cada pila para posteriormente ser llenadas con concreto. La siguiente fase es el lanzamiento de las partes prefabricadas el cual consiste en la terminación de la estructura soporte por medio de grúas y el montaje de dovelas mediante viga lanzadora. Por último, la construcción de las estaciones.

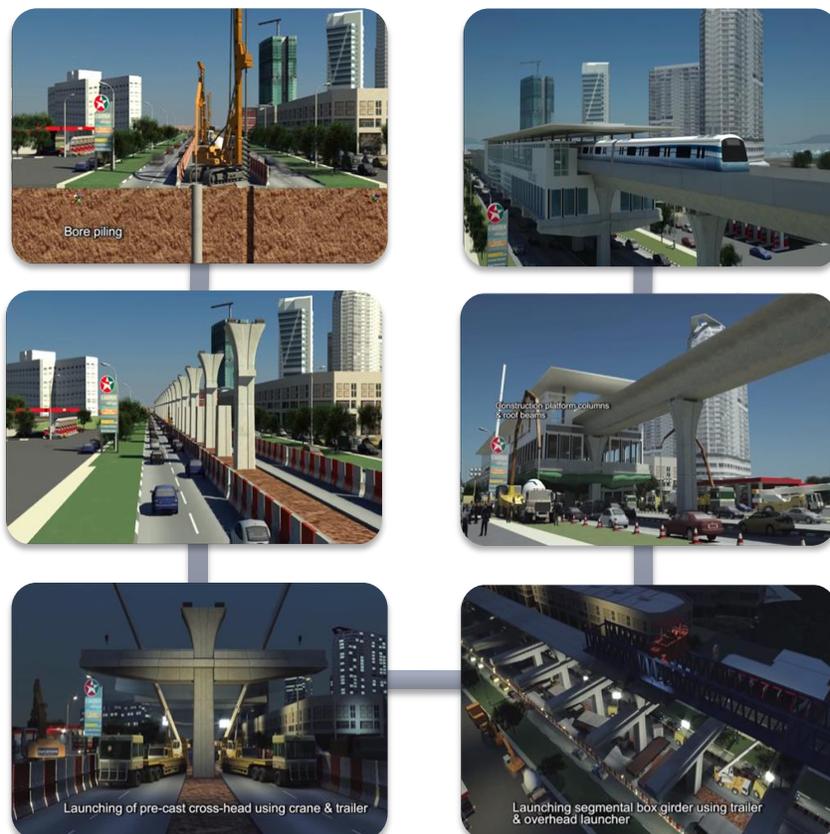


Figura 4. Esquema construcción de la PLMB

Fuente: Construction stages for elevated viaducts and stations.

2.3 OPERACIONES DEL PROYECTO QUE PRODUCEN EMISIONES DE MATERIAL PARTICULADO

A continuación se describen las principales actividades en las que están involucradas emisiones de material particulado en el proceso de construcción, debe tenerse en cuenta que no todas ellas se tomaron para el ejercicio de modelación bajo varias circunstancias descritas a continuación:

- Inexistencia de factores emisión aplicables.
- Limitaciones del modelo (en cuanto la introducción de algunas actividades demasiado dinámicas).

Tabla 1. Inventario de emisiones material particulado

	Actividad	Maquinaria	En Modelo
PATIO TALLER	Remoción de suelos Cargue de material Descargue de camiones de material (Nivelación, granular) Combustión interna equipos fuera de vías	Retroexcavadora Minicargador Vibrocompactador Retroexcavadora sobre orugas Moto niveladora Cargador Bulldozer Volquetas	<input checked="" type="checkbox"/>
COLUMNAS	Remoción de suelos Cargue de material Descargue de materiales (relleno, material granular y concretos) Perforación Combustión interna equipos fuera de vías	Retroexcavadora Retroexcavadora sobre orugas Motoniveladora Bulldozer Volquetas Martillo Neumático	<input checked="" type="checkbox"/>
CONSTRUCCIÓN DE VÍAS	Remoción de suelos Cargue de material Actividades de construcción de vías Combustión interna equipos fuera de vías Transporte de material	Retroexcavadora Retroexcavadora sobre orugas Grúa de brazo telescópico Benitin 120 Terminador de asfalto Viga lanzadora Motoniveladora Bulldozer Volquetas	<input checked="" type="checkbox"/>
ESTACIONES	Remoción de suelos Cargue de material Descargue de materiales (suelos, concreto) Tubo de escape equipos en vías	Retroexcavadora Retroexcavadora sobre orugas Moto niveladora Cargador Bulldozer Volquetas	<input checked="" type="checkbox"/>
VÍAS PUBLICAS	TRANSPORTE	Motos	<input checked="" type="checkbox"/>

	Actividad	Maquinaria	En Modelo
	Transporte de vehículos	Autos Buses Camiones	

Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

2.4 CONTAMINANTES EVALUADOS

En el estudio se evalúan los contaminantes regulados por la Resolución 610 de 2010 de MAVDT actualmente Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS).

Dados los efectos nocivos que se han demostrado del material particulado ($PM_{2.5}$ y PM_{10}) sobre la salud humana, este se ha convertido en el contaminante de mayor interés para las autoridades ambientales en Colombia, por lo tanto se evalúa en la modelación junto con otros contaminantes que se deben considerar en la construcción y operación del proyecto, a continuación se describen las siguientes fracciones:

- Material Particulado con diámetro aerodinámico inferior a $10 \mu m$ (PM_{10})
- Material Particulado con diámetro aerodinámico inferior a $2.5 \mu m$ ($PM_{2.5}$)
- Óxidos de Nitrógeno (NO_2)
- Óxidos de Azufre (SO_2)
- Monóxido de Carbono (CO)
- Compuestos Orgánicos Volátiles (VOC)

En el Anexo 2 (marco teórico) se describen las características del material particulado.

2.4.1 Normas de Calidad del Aire

El Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial en la Resolución 610 de 2010, establece la norma de calidad del aire o nivel de inmisión para todo el territorio nacional en condiciones de referencia, en dicha norma se desarrollan los máximos niveles permisibles de concentración de contaminantes en la atmósfera, los procedimientos para la medición de la calidad del aire, los programas de reducción de la contaminación del aire y los niveles de prevención, alerta y emergencia y las medidas generales para su mitigación. La norma es aplicable en todo el territorio nacional.

En el Artículo 2 de la Resolución 610 de 2010 se establecen los niveles máximos permisibles vigentes en condiciones de referencia para contaminantes criterio. Los niveles máximos se calcularán con el promedio aritmético para cada contaminante.

Tabla 2. Límites de concentraciones establecidos en la norma colombiana

Contaminante	Unidad	Límite Máximo Permisible	Tiempo de Exposición
PM ₁₀	(µg/m ³)	50	Anual
		100	24 horas
PM _{2.5}	(µg/m ³)	25	Anual
		50	24 horas
NO ₂	(µg/m ³)	100	Anual
		150	24 horas
		200	1 hora
SO ₂	(µg/m ³)	80	Anual
		250	24 horas
CO	(µg/m ³)	750	3 horas
		10,000	8 horas
		40,000	1 hora

Fuente: Resolución 610 de 2010 del MADS

3. MODELACIÓN DE LA DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES AERMOD

De todos los modelos actualmente disponibles son pocos los reconocidos por instituciones de prestigio y relevancia internacional. Por ejemplo, la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de Norteamérica (EPA, por sus siglas en inglés) al igual que la Autoridad Ambiental de Colombia muestran preferencia y recomiendan ampliamente el uso del modelo gaussiano AERMOD para describir la dispersión de fuentes fijas, área, volumen, etc. (U.S. EPA, 1998 y MADS, 2015).

Éste modelo tiene como ventajas que permite ingresar archivos de terreno y datos meteorológicos completos, los cuales influyen considerablemente en la dispersión de contaminantes, adicionalmente permite ingresar mallas de receptores con distancias amplias y crear tipos de receptores discretos. AERMOD es un modelo recomendado en la guía de modelaciones Colombiana y es aprobado por la US EPA. Por lo anterior se eligió este modelo para el presente estudio. Las desventajas que tienen los modelos es que representan una predicción de la realidad por lo que no serán totalmente exactos y si los datos de entrada no son los adecuados, los resultados se generarán con cierta incertidumbre.

Acorde a los datos de entrada disponibles para realizar las simulaciones, el modelo gaussiano (AERMOD) es el más adecuado para calcular los aportes de concentraciones. Modelos como CALPUFF, entre otros; requieren variables adicionales no disponibles para Colombia. AERMOD permite calcular la dispersión de contaminantes considerando la topografía del terreno y variables meteorológicas (WRF) de alta precisión avalada por la ANLA.

3.1 DESCRIPCIÓN DEL MODELO AERMOD

AERMOD (American Meteorology Society – E.P.A. Regulatory Model) es un modelo desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos. Es un modelo de pluma de estado estacionario que asume que las concentraciones en todas las distancias están gobernadas por la meteorología promedio de una hora (U.S. EPA, 1998). La Figura 5 muestra el diagrama de flujo para el procesamiento de información en el modelo de dispersión AERMOD. Este consiste de un módulo principal (AERMOD) y dos preprocesadores (AERMET y AERMAP).

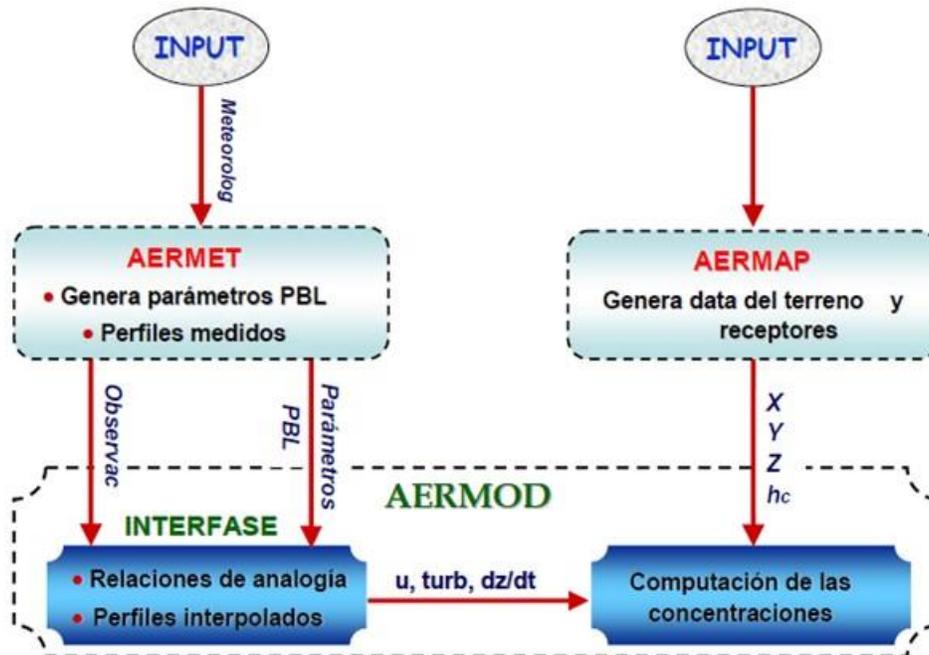


Figura 5. Esquema del sistema de modelación AERMOD

Fuente: Universidad Nacional Autónoma de México (Cabrera, 2008).

AERMET usa mediciones meteorológicas representativas del dominio de modelación para calcular parámetros de la capa límite (Caputo et al., 2003). La INTERFASE interna de AERMOD usa estos parámetros calculados para generar perfiles de viento, temperatura y turbulencia (U.S. EPA, 1998). La profundidad de la capa límite y la dispersión de los contaminantes dentro de ésta, están influenciadas a escala local por las características superficiales: rugosidad, albedo y radio de Bowen. Estas variables de superficie, junto con observaciones meteorológicas básicas (velocidad de viento, dirección de viento, temperatura y cobertura de nubes) son datos requeridos por AERMET para calcular los siguientes parámetros de la capa límite planetaria (PBL, por sus siglas en inglés) (U.S. EPA, 2004):

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

La estabilidad de la PBL está dada por el signo de H (convectivo para $H > 0$ y estable para $H < 0$). El preprocesador de terreno AERMAP emplea la información topográfica para calcular la influencia del terreno en la dispersión, obteniendo una mejor valoración del escalamiento de altura del terreno en la concentración del material dispersado (Caputo et al., 2003). AERMAP también es usado para crear

el mallado y las elevaciones de los receptores. Para cada receptor, el preprocesador AERMAP pasa la siguiente información hacia AERMOD: ubicación del receptor (xr, yr), altura sobre el nivel promedio del mar (zr) y la escala de altura del terreno para un receptor específico (hc) (U.S. EPA, 1998).

Para terreno complejo, AERMOD incorpora el concepto de la línea divisora de corriente para condiciones establemente estratificadas. Dependiendo del caso, la pluma es modelada combinando dos posibles casos: pluma de estado horizontal y/o pluma de estado topográfico. En terreno plano los dos estados son equivalentes, pero cuando se incorpora el concepto de la línea divisora de corriente en terreno elevado, la concentración total es calculada como la suma ponderada de las concentraciones asociadas a estos dos estados de la pluma (U.S EPA, 1998). La ponderación de los dos estados depende de:

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

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

3.2 VARIABLES METEOROLÓGICAS DE ENTRADA – MODELO AERMOD:

En la Tabla 3 se presentan todas las variables meteorológicas que puede requerir AERMOD dependiendo de las opciones seleccionadas.

Tabla 3. Parámetros Modelo AERMOD

Tipo	Símbolo	Descripción
Terreno	ED	Elevación digital
	US	Uso de suelos
Meteorología	v	Velocidad del viento
	T	Temperatura ambiente
	Dv	Dirección del viento
	EA	Estabilidad Atmosférica
	Hrur	Altura de capa de mezcla rural
	Hurb	Altura de capa de mezcla urbana
	f v	Velocidad de fricción

Tipo	Símbolo	Descripción	
	LMO	Longitud de Monin Obhukov	
	R	Rugosidad	
	Pc	Código de Precipitación	
	Pr	Tasa de Precipitación	
	FC	Flujo de Calor Sensible	
	EV	Escala de velocidad convectiva	
	B	Parámetro de Bowen	
	A	Albedo de medio día	
	Radio sondeo	PRE	Presión
		DIFTRC	Diferencia con la temperatura de rocío
		ALT	Altura sondeo
	EMA	WSMDir	Dirección del viento más alto
		WSMK	Velocidad del viento más alto
		AvgRh	Humedad relativa promedio
		AvgSR	Radiación solar
	Observatorio	PRE24	Precipitación en las últimas 24 horas
		PRELAMP	Precipitación en el periodo
		PRETPO	Periodo de muestreo para precipitación
		TEMMAX	Temperatura máxima
		TEMAMB	Temperatura ambiente
		TEMMIN	Temperatura mínima
		TEMROC	Temperatura de rocío
		PRSMAR	Presión al nivel del mar
		NUBOCT	Nubosidad (Octas)
		NUBBAJ	Altura de las nubes más bajas

Fuente: MADS-ITESM, 2008

Tabla 4. Datos de entrada del Modelo ISC y AERMOD

Tipo	Símbolo	Descripción	ISC	AERMOD	
Meteorología	Parámetros primarios	V.V	Velocidad del viento	√	√
		T	Temperatura ambiente	√	√
		D.V	Dirección del viento	√	√
		R.S	Radiación solar	√	√
		EA	Estabilidad Atmosférica	√	√
	Parámetros secundarios	Hmix conv	Altura de capa de mezcla rural	√	√
		Hmix mec	Altura de capa de mezcla urbana	√	√
		u^*	Velocidad de fricción	√*	√
		L	Longitud de Monin Obhukov	√*	√
		Z _o	Rugosidad superficial	√*	√
		Pc	Código de Precipitación	√**	
		Pr	Tasa de Precipitación	√**	
		H _o	Flujo de Calor Sensible		√
		w _*	Escala de velocidad convectiva		√
		B	Parámetro de Bowen		√
		α	Albedo de medio día		√

Tipo	Símbolo	Descripción	ISC	AERMOD
	N	Nubosidad (Octas)	√	√

√* Si se desea cuantificar deposición seca y húmeda

√** Solo necesarios para cuantificar deposición húmeda

√Δ Para especificar altura en fuente y receptores

Fuente: MADS-ITESM, 2008

En el Anexo 2 son ampliados los conceptos sobre los modelos gaussianos y los datos de entrada utilizados.

Actualmente en el país no se dispone de los equipos para obtener todos los parámetros anteriores, se hace necesario estimar los secundarios por medio de las formulaciones recomendadas en la literatura. La metodología de Sozzi¹ es ampliamente recomendada por el IDEAM, adicionalmente ha sido usada en modelaciones de proyectos mineros en Colombia por el MADS (Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible). Otra opción con respecto a estas limitaciones, es el modelo regional de simulación atmosférica WRF (*Weather Research and Forecast*)² que es desarrollado y mantenido por el NCAR (*National Center for Atmospheric Research*) con contribuciones de la comunidad científica internacional. El modelo WRF es altamente adaptable a diferentes zonas geográficas y aplicaciones, ya que cuenta con más de 280 parámetros de configuración. De igual manera, el modelo de simulación atmosférica WRF de última generación supera el antiguo modelo MM5 en precisión y desempeño, ajustado y calibrado especialmente para el territorio colombiano.

Los cálculos que se implementan de variables especializadas dentro del modelo WRF-Meteocolombia, cuenta con las siguientes especificaciones:

- Resolución espacial de 6km (distancia horizontal entre puntos de grilla) para todo el territorio nacional incluido San Andrés y Providencia.
- 28 niveles desde superficie hasta 50mb con una densidad máxima en superficie.
- Simulación explícita de las nubes con 5 tipos de hidrometeoros (vapor, agua líquida, nieve, hielo y granizo suave).
- Simulación de la radiación de onda corta y larga separada por once y dieciséis bandas respectivamente.
- Capa límite según teoría de similitud.
- Cálculo del balance hídrico en superficie, suelo y canopy.

¹ Sozzi, Roberto. 1997. La turbulencia de la atmósfera y la dispersión de los contaminantes.

² Skamarock W.C. et al, 2008: *A Description of the Advanced Research WRF Version* NCAR Technical Note NCAR/TN-475+STR

3.2.1 Datos de entrada del modelo WRF

Por ser un modelo regional se requiere de datos de entrada atmosféricos provenientes de un modelo global, más las condiciones de frontera en superficie como los datos de topografía, uso de suelo, suelos y temperatura superficial del mar.

- **Datos atmosféricos**

Las condiciones atmosféricas iniciales y de frontera se extraen de los datos prestados por el proyecto CFSV2 (*Climate Forecast System Version 2*)³. Únicamente se usan los datos que han sido puestos en coherencia con las observaciones reportadas por la red mundial de estaciones meteorológicas, los llamados datos de análisis. El conjunto de datos incluye la temperatura superficial del mar actualizado. A diferencia con los datos de Re análisis que se producen sobre una grilla T62 (resolución en el ecuador de aprox. 270 km), los datos CFSV2 se prestan a una resolución espacial de 0.5° (aprox. 55 km) por lo cual se minimizan los errores de interpolación. El intervalo de tiempo de los datos de frontera es de 6 horas.

- **Datos de superficie**

Debido a que los datos de topografía prestados para el modelo WRF del servicio geológico de los Estados Unidos (USGS), no han sido validados para el territorio colombiano, la versión del modelo usa el modelo digital de elevación elaborado por el IGAC y validado en campo. Los datos de uso de suelo provienen del sensor MODIS a una resolución de 500 m. con fecha de actualización de 2011. Estos datos muestran el territorio colombiano con un gran detalle y una alta fidelidad.

³ Saha S.et al., 2013: The NCEP Climate Forecast System Version 2. J.Climate, in press

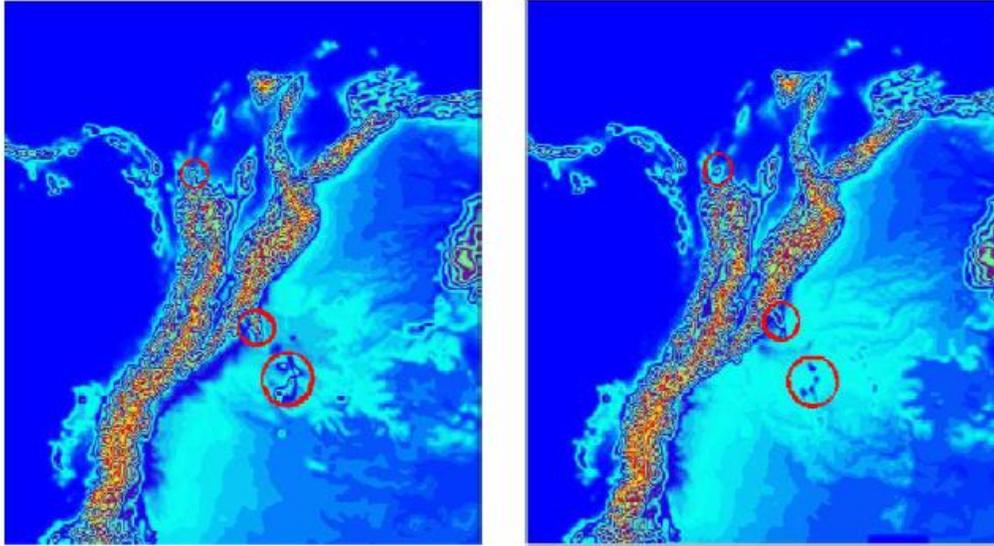


Figura 6. Diferencias entre el modelo digital de terreno del USGS (izquierda) y el IGAC (derecha).

Fuente: Meteocolombia

3.2.2 Variables de salida del modelo WRF

La climatología simulada para los años 2011 al 2016 consta de 137 variables meteorológicas e hidrológicas. Entre estas existen variables genéricas que han sido implementadas mediante cambios y adiciones en el código del modelo, por parte de expertos en el modelo WRF, en Colombia.

4. ANÁLISIS METEOROLÓGICO

Para el análisis de dispersión de emisiones se utilizó el modelo de simulación de última generación WRF (Weather Research and Forecasting), por no encontrarse una estación meteorológica de altura en cercanía de las fuentes de emisión evaluadas en este estudio, que presente los parámetros y datos necesarios para modelación con AERMOD. La resolución temporal de los parámetros evaluados está dada por las condiciones topográficas y uso del suelo de la zona. Toda la información empleada en este capítulo corresponde a datos meteorológicos entre el 1 de enero y el 31 de diciembre de 2016.

Se debe tener presente que la información meteorológica que se muestra en esta sección difiere de los resultados de los monitoreos realizados en campo. La meteorología WRF corresponde a un modelamiento de datos de un año completo, mientras la meteorología de los monitoreos comprende datos puntuales de superficie con intervalos de tiempo más cortos. AERMOD requiere datos de 8760 horas (un año completo como mínimo) de variables meteorológicas que no son posibles medir con equipos localizados en superficies, como por ejemplo, la altura de mezcla de la troposfera.

En este capítulo se certifica la calidad de los datos, en cuanto al funcionamiento en el procesador AERMET. Los datos fueron procesados en las tres etapas de AERMET v 15181, el cual fue publicado el 30 de junio de 2015 en la página oficial de la US-EPA. Los archivos entregados son “BOGOTA.SFC” y “BOGOTA.PFL”, generados a partir de los archivos “K2_BogotaCund.sam” y “K2_BogotaCund.ua”, según la siguiente parametrización en AERMET.

Tabla 5. Parametrización AERMET

ETAPA 1: Extracción	
Upper Air: Intervalo de tiempo (yy/mm/dd): Ubicación de la estación (Grados decimales): Ajuste de tiempo a hora local (ajuste positivo en coord. Oeste):	16/01/01 a 16/12/31 74.119W 4.6N 5
Surface: Intervalo de tiempo (yy/mm/dd): Ubicación de la estación (Grados decimales): Ajuste de tiempo a hora local (ajuste positivo en coord. Oeste):	16/01/01 a 16/12/31 74.119W 4.6N 0
ETAPA 2: Compilación	
Merge: Intervalo de tiempo (yy/mm/dd):	16/01/01 a 16/12/31
ETAPA 3: Preparación de Datos para AERMOD	
Sectores: Numero de sectores: Periodo de sectores:	1 Mensual

Fuente: Meteocolombia

La información meteorológica sectorial utilizada contempla la clasificación del uso de suelo a 3 km a la redonda del punto de origen (ubicación de la estación):

Sector 1 (Rojo): Segmento comprendido entre 0° a 360°, uso de suelos predominantemente residencial de alta intensidad.

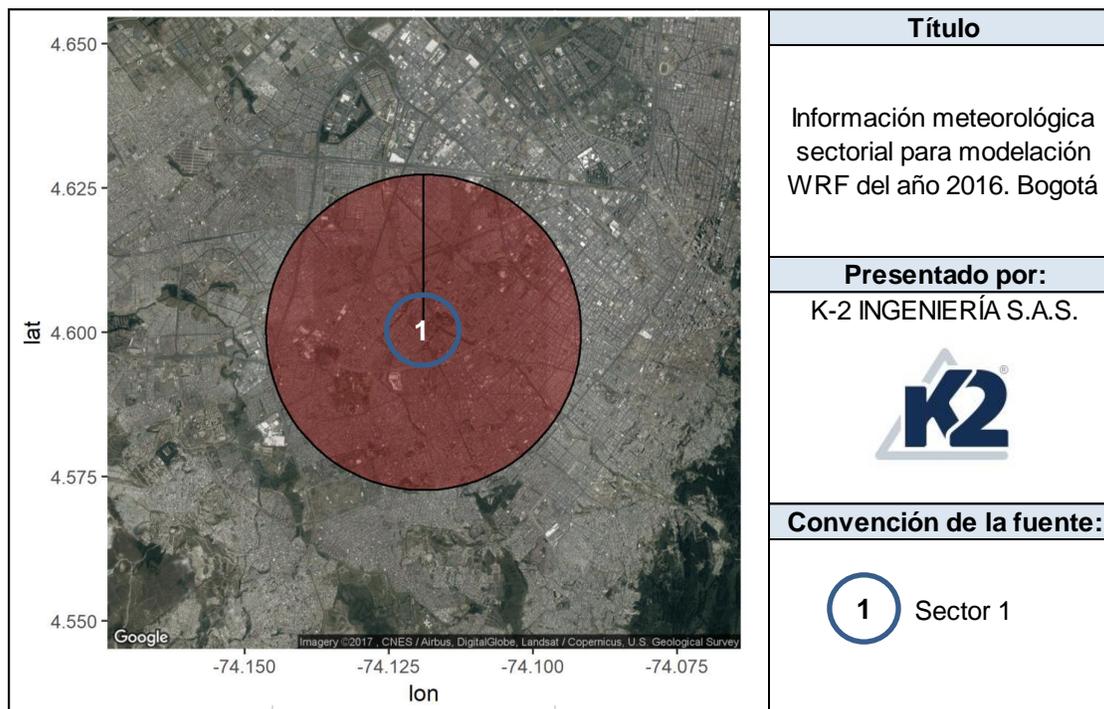


Figura 7. Información meteorológica sectorial WRF

Fuente: Meteocolombia

Para la caracterización del Albedo, Bowen y Rugosidad, se realizó el Climograma de Gausson (ver Figura 8) para determinar si el mes corresponde a un mes seco o a un mes húmedo.

El climograma relaciona la precipitación mensual y la temperatura promedio mensual, donde si la precipitación es menor a dos veces la temperatura, se considera un mes seco. Según dicho climograma, todos los meses se consideraron húmedos, por lo cual se parametrizó AERMET únicamente con condiciones de la temporada húmeda.

Los valores de albedo, Bowen y Rugosidad fueron tomados del manual de AERSURFACE, de la US-EPA⁴.

⁴ Manual disponible en: http://www.epa.gov/scram001/7thconf/aermod/aersurface_userguide.pdf

Tabla 6. Valores de Albedo, Bowen y Rugosidad

Mes	Sector 1		
	Albedo	Bowen	Rugosidad
1	0.18	1.5	1
2	0.18	1.5	1
3	0.18	1.5	1
4	0.18	1.5	1
5	0.18	1.5	1
6	0.18	1.5	1
7	0.18	1.5	1
8	0.18	1.5	1
9	0.18	1.5	1
10	0.18	1.5	1
11	0.18	1.5	1
12	0.18	1.5	1

Fuente: Meteocolombia

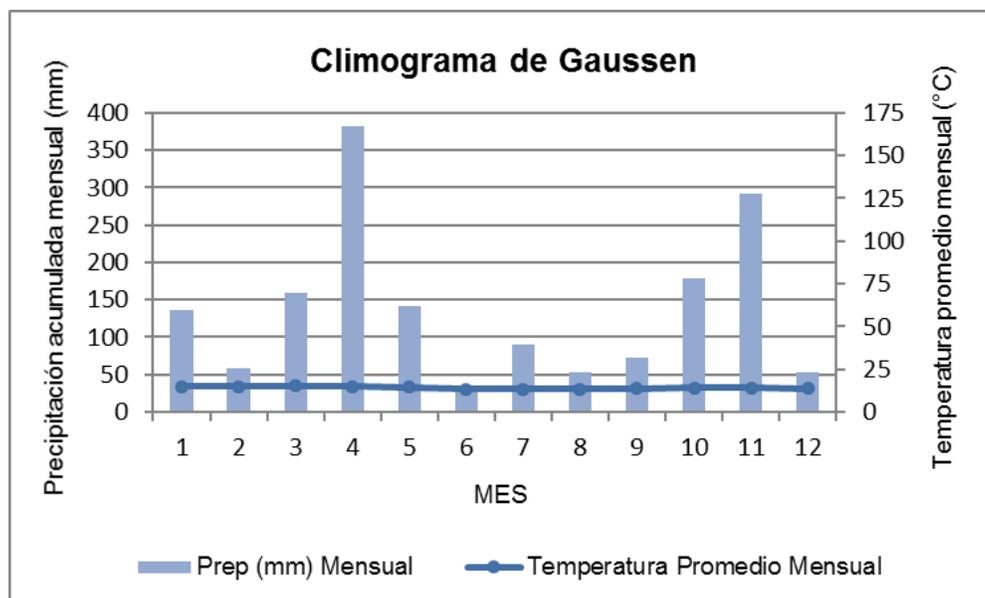


Figura 8. Climograma de Gausson

Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

A partir de modelación WRF para el área descrita anteriormente, se obtienen dos archivos meteorológicos necesarios para modelación AERMOD (SFL y PFL), los cuales se presentan a continuación:

El Anexo Digital AD-1 de Modelación contiene los dos archivos con toda la información utilizada en las simulaciones. En el anexo digital AD-3 se presenta una ficha técnica que especifica los inputs y el tipo de procesamiento realizado, los cuales permitieron generar la información meteorológica utilizada en los modelos.

Tabla 7. Archivo Profile

Year	Month	Day	Hr	Zref	Flanco	Wind Dir. (deg)	Wind Speed (m/s)	Temp (°C)	Vn DS	Des wind
16	1	1	1	10	1	130	8.2	12.6	99	99
16	1	1	2	10	1	130	8.2	12.3	99	99
16	1	1	3	10	1	140	8.2	12.1	99	99
16	1	1	4	10	1	130	7.7	12	99	99
16	1	1	5	10	1	130	7.7	11.8	99	99
16	1	1	6	10	1	130	8.2	11.7	99	99
16	1	1	7	10	1	130	9.3	12.7	99	99
16	1	1	8	10	1	130	8.7	13.9	99	99
16	1	1	9	10	1	130	9.8	15.3	99	99
16	1	1	10	10	1	130	9.8	16.5	99	99
16	1	1	11	10	1	130	9.3	17.4	99	99
16	1	1	12	10	1	130	8.2	17.9	99	99
16	1	1	13	10	1	130	7.7	18.6	99	99
16	1	1	14	10	1	130	7.2	18.5	99	99
16	1	1	15	10	1	140	6.7	18.2	99	99
16	1	1	16	10	1	140	6.7	17.3	99	99
16	1	1	17	10	1	140	6.7	16.2	99	99
16	1	1	18	10	1	140	7.2	14.9	99	99
16	1	1	19	10	1	140	5.1	14.3	99	99
16	1	1	20	10	1	150	4.1	14.1	99	99
16	1	1	21	10	1	140	4.1	13.7	99	99
16	1	1	22	10	1	140	3.1	13.3	99	99
16	1	1	23	10	1	140	2.6	13.4	99	99
16	1	1	24	10	1	140	2.1	13.3	99	99
16	1	2	1	10	1	130	2.6	13.3	99	99
16	1	2	2	10	1	130	3.6	13.1	99	99
16	1	2	3	10	1	130	5.1	13.1	99	99
16	1	2	4	10	1	140	5.1	12.9	99	99

Fuente: Meteocolombia

Tabla 8. Archivo Surface

Jul. Day	Hr	Sensible Heat Flux (W/m ²)	Friction Velocity (m/s)	Conv. Vel. Scale (m/s)	Vert. Pot. Temp. Grad. (K/m)	Conv. Mix. Hgt. (m)	Mech. Mix. Hgt. (m)	Monin-Obukov Lng. (m)	Surface Rough. (m)	Bowen Ratio	Albedo	Wind Speed (m/s)	Wind Dir. (deg)	Wind Ref.Hgt. (m)	Temp. (K)	Temp. Ref.Hgt. (m)	Precip. Rate (mm/hr)	Relative Humidity (%)	Station Pressure (mb)	Cloud Cover (tenths)
92	1	-64	1.414	-9	-9	-999	4000	2914.5	1	1.5	1	8.2	130	10	285.8	2	0	79	740	0
92	1	-0.9	0.043	-9	-9	-999	27	5.8	1	1.5	1	0.5	20	10	286.2	2	0	85	743	1
92	2	-8.5	0.13	-9	-9	-999	113	17.3	1	1.5	1	1.5	340	10	285.5	2	0	91	743	1
92	3	-2.7	0.087	-9	-9	-999	62	16.3	1	1.5	1	1	210	10	285.8	2	0	90	743	10
92	4	-2.7	0.087	-9	-9	-999	61	16.3	1	1.5	1	1	330	10	285.5	2	0	91	743	10
92	5	-0.7	0.043	-9	-9	-999	22	8.1	1	1.5	1	0.5	320	10	285.4	2	0.25	94	744	10
92	6	-0.7	0.043	-9	-9	-999	22	8.1	1	1.5	1	0.5	300	10	285.5	2	0	92	743	10
92	7	-0.6	0.043	-9	-9	-999	22	9.5	1	1.5	0.45	0.5	320	10	285.9	2	0	90	743	1
92	8	18.3	0.137	0.547	0.006	236	122	-9.4	1	1.5	0.24	0.5	20	10	285.9	2	0	91	743	10
92	9	42.3	0.154	0.858	0.006	395	144	-5.7	1	1.5	0.19	0.5	90	10	286.9	2	0.51	83	742	10
92	10	62.2	0.161	1.072	0.006	525	155	-4.5	1	1.5	0.18	0.5	350	10	289.9	2	0	65	743	10
92	11	309	0.39	2.215	0.007	933	585	-12.7	1	1.5	0.18	1.5	320	10	291.2	2	0	58	741	0
92	12	82.2	0.428	1.464	0.007	1012	671	-62.9	1	1.5	0.18	2.1	130	10	290.6	2	0	65	742	10
92	13	83.1	0.257	1.495	0.006	1065	335	-13.5	1	1.5	0.18	1	140	10	292.2	2	0	58	741	10
92	14	74.8	0.253	1.46	0.006	1103	306	-14.4	1	1.5	0.18	1	70	10	288.9	2	7.62	85	742	10
92	15	61.8	0.495	1.385	0.005	1138	836	-129.7	1	1.5	0.18	2.6	260	10	288.6	2	9.4	84	741	10
92	16	43.1	0.486	1.237	0.005	1161	813	-175.7	1	1.5	0.19	2.6	290	10	288.2	2	27.69	88	741	10
92	17	19.4	0.552	0.951	0.005	1171	984	-573	1	1.5	0.24	3.1	200	10	288	2	10.67	83	741	10
92	18	-0.5	0.043	-9	-9	-999	722	11.2	1	1.5	0.45	0.5	320	10	288.4	2	0.25	70	741	10
92	19	-31	0.382	-9	-9	-999	570	119	1	1.5	1	2.6	190	10	286.5	2	0	80	743	1
92	20	-0.7	0.043	-9	-9	-999	339	8.1	1	1.5	1	0.5	190	10	285.8	2	4.06	88	742	10
92	21	-13.2	0.323	-9	-9	-999	441	169.4	1	1.5	1	2.1	110	10	285.9	2	6.6	87	742	10
92	22	-7	0.13	-9	-9	-999	152	21	1	1.5	1	1.5	150	10	285.9	2	2.54	83	742	8
92	23	-0.7	0.043	-9	-9	-999	38	8.1	1	1.5	1	0.5	160	10	286.1	2	0.51	81	742	10
92	24	-0.9	0.043	-9	-9	-999	22	6.4	1	1.5	1	0.5	70	10	285.6	2	1.02	84	743	6

Fuente: Meteocolombia

4.1 TEMPERATURA

La Figura 9 muestra el comportamiento de la temperatura promedio mensual. A nivel general, se observa que la temperatura media del periodo evaluado es de 14.18 °C con una variación mensual de ± 1.2 °C. La temperatura máxima promedio mensual estimada se presentó durante el mes de marzo de 2016, alcanzando los 15.31 °C; y el registro promedio mínimo mensual fue determinado para el mes de julio con un valor de 13.21 °C.

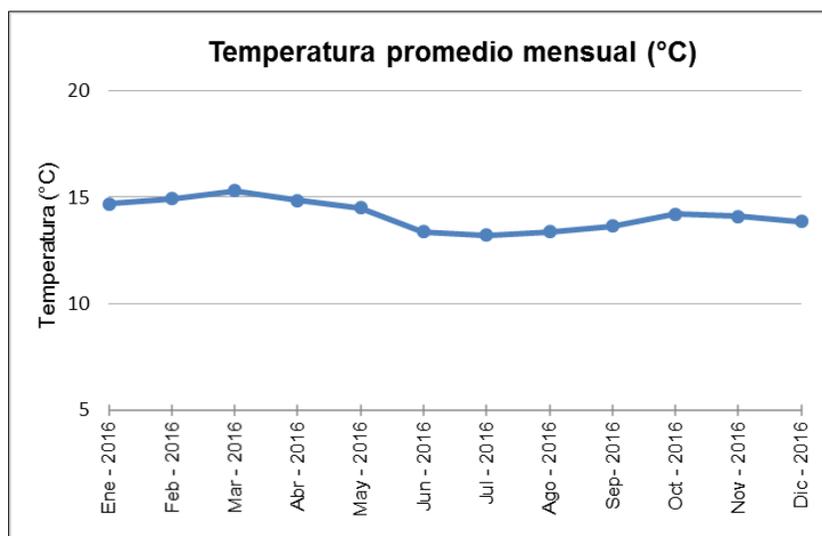


Figura 9. Temperatura promedio mensual

Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

El perfil de temperatura horario (Figura 10) presenta sus mayores promedios entre las 12 y 15 horas, durante este mismo periodo se esperan valores de radiación solar más elevados.

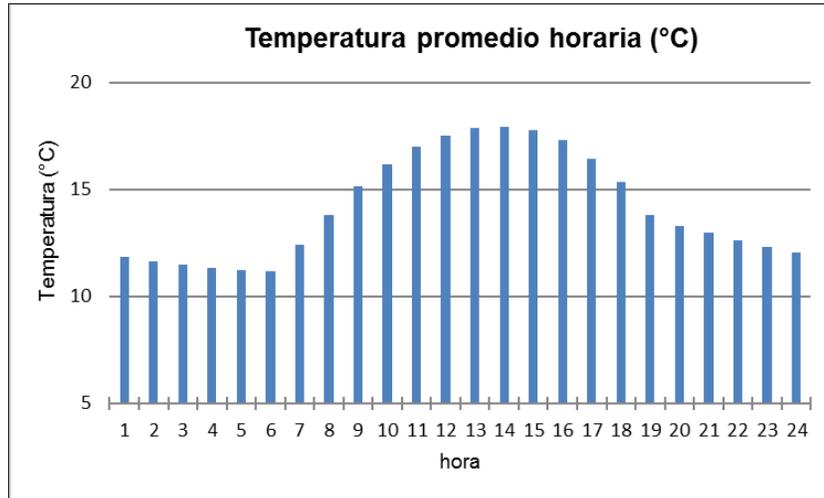


Figura 10. Perfil horario de temperaturas

Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

La variación del perfil horario de la temperatura se observa en la Figura 11. Las celdas con tonos más fuertes correspondieron a las horas con temperaturas más altas, las cuales oscilaron desde los 10.35 °C hasta 19.34 °C. La dispersión de contaminantes se genera con mayor facilidad cuando se presentan temperaturas altas asociadas a máximas alturas de mezcla.

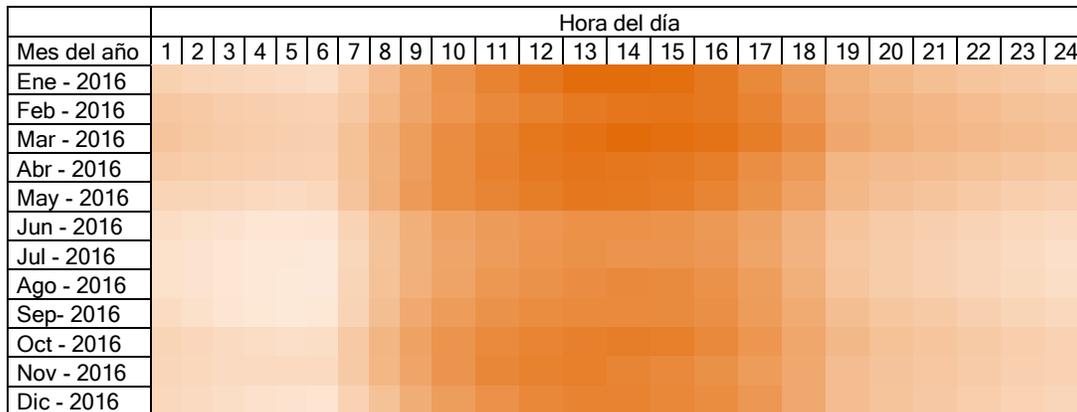


Figura 11. Representación cualitativa de variación de temperatura – perfil horario

Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

4.2 PRECIPITACIÓN

En la Figura 12 se presenta el análisis climatológico mensual para el año 2016 de la variable precipitación, cómo se mencionó anteriormente no se presentan meses secos a lo largo del año. Durante los meses de abril y noviembre se registran las mayores precipitaciones, en abril se aprecia una precipitación acumulada cercana

a los 381.95 mm/mes. En los meses con mayores precipitaciones se espera mayor remoción húmeda de material particulado del ambiente.

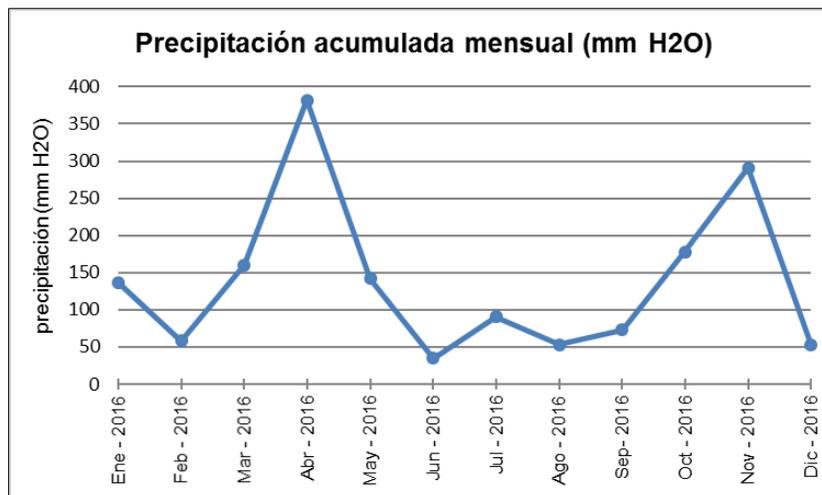


Figura 12. Precipitación acumulada mensual

Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

La Figura 13 contiene las precipitaciones acumuladas horarias para el año 2016. Se indica la tendencia de las lluvias en cada hora del día, siendo la hora 19 en la que se presentaron las mayores precipitaciones, donde se puede observar una tendencia respecto a la ocurrencia de presentarse las mayores precipitaciones en horas de la noche.

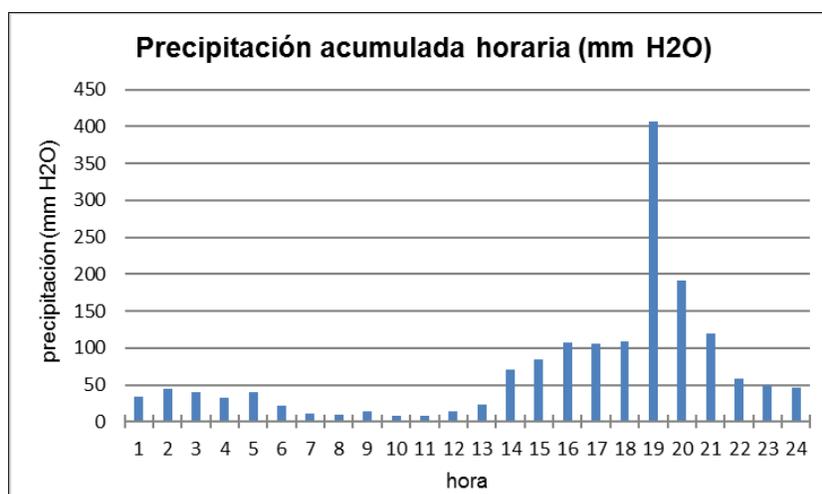


Figura 13. Perfil horario de precipitaciones

Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

En la Figura 14 se puede detallar la tendencia de ocurrencia de precipitación por mes y hora. La máxima precipitación fue de 406.9 mm de H2O. Las celdas con

tonos oscuros indican las horas con mayor precipitación las cuales se presentaron en las horas de la noche.

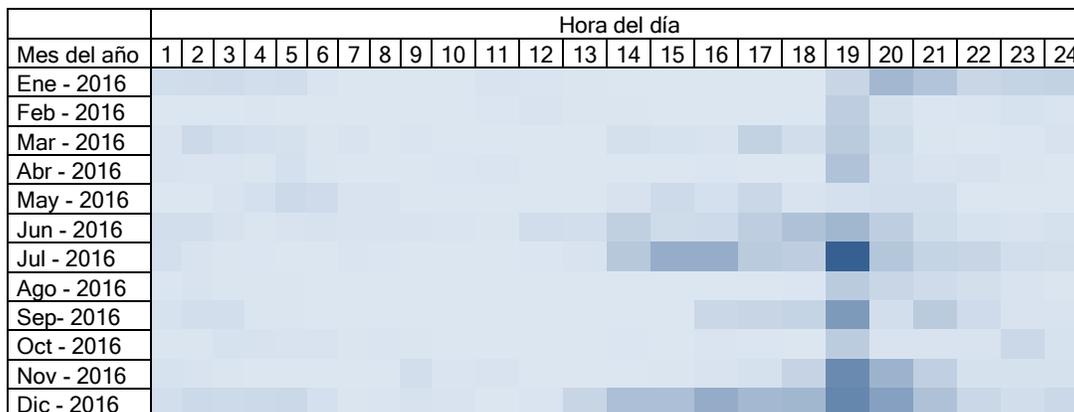


Figura 14. Representación de la tendencia de ocurrencia de precipitaciones- perfil horario

Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

En la Tabla 9 se presenta una escala para dimensionar los niveles de precipitación mensuales registrados.

Tabla 9. Escala de Precipitación

Denominación	Precipitación Mensual (mm)
Escasa	0 – 20
Ligera	21 - 40
Moderada	41 - 80
Fuerte	81 - 200
Muy Fuerte	201 - 280
Intensa	>281

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

4.3 DIRECCIÓN Y VELOCIDAD DEL VIENTO

En la Figura 15 se presenta la rosa de vientos para el periodo de estudio. El programa procesador, no tiene en cuenta velocidades con valores de cero (0) reportados por la modelación meteorológicas WRF, ya que para velocidades cero, no se obtiene dirección.

Se aprecia un componente mayoritario proveniente de la dirección sureste (SE), con un porcentaje de registros de 51.4%. El registro horario de velocidad máxima para el año 2016 fue de 4.53 m/s.

En el periodo evaluado el promedio anual de velocidad del viento es de 3.45 m/s con una variación de ± 1.5 m/s. Existe una marcada predominancia de los vientos catalogados como Brisa suave con el 32.1% de los registros, seguido por aire ligero - 27.7%. Los periodos de calma representan el 1.3% de los registros.

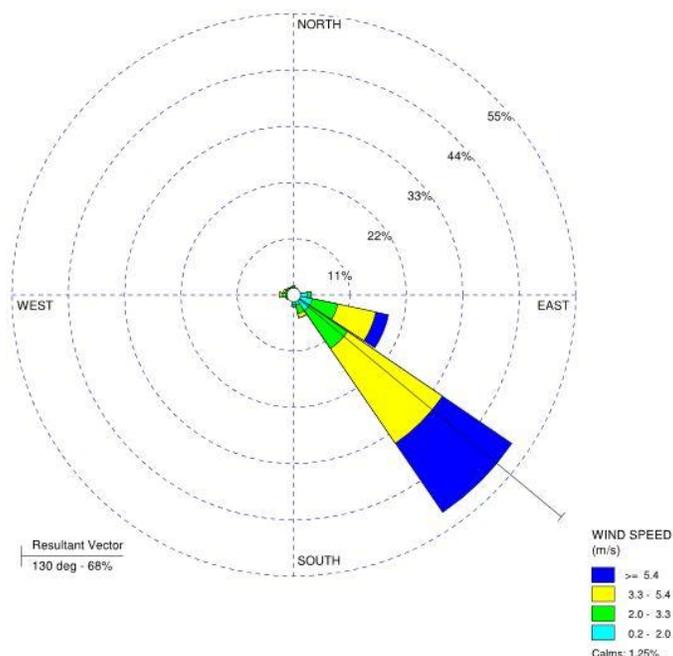


Figura 15. Rosa de Vientos Bogotá 2017

Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

Tabla 10. Distribución de la frecuencia de vientos

Dirección Viento	Aire Ligero	Brisa Ligera	Brisa Suave	Brisa Moderada	Brisa Fresca	Brisa Fuerte	Viento Fuerte	Temporal	Temporal Fuerte	Total Dirección
	0.2 - 2	2 - 3.3	3.3 - 5.4	5.4 - 7.9	7.9 - 10.8	10.8 - 13.8	13.8 - 16.9	16.9 - 20.5	20.5 - 24.4	
N	1.6%	0.2%	0.0%	0.0%	0%	0%	0%	0%	0%	1.8%
NNE	1.3%	0.1%	0.0%	0.0%	0%	0%	0%	0%	0%	1.5%
NE	1.0%	0.1%	0.0%	0.0%	0%	0%	0%	0%	0%	1.1%
ENE	1.2%	0.1%	0.0%	0.0%	0%	0%	0%	0%	0%	1.3%
E	2.7%	0.6%	0.1%	0.0%	0%	0%	0%	0%	0%	3.5%
ESE	3.7%	5.1%	7.5%	2.5%	0%	0%	0%	0%	0%	18.9%
SE	3.7%	9.0%	22.4%	16.4%	0%	0%	0%	0%	0%	51.4%
SSE	2.1%	1.7%	0.8%	0.1%	0%	0%	0%	0%	0%	4.6%
S	1.9%	0.3%	0.0%	0.0%	0%	0%	0%	0%	0%	2.3%
SSW	0.9%	0.1%	0.1%	0.0%	0%	0%	0%	0%	0%	1.1%
SW	0.9%	0.2%	0.1%	0.0%	0%	0%	0%	0%	0%	1.2%
WSW	1.1%	0.4%	0.1%	0.0%	0%	0%	0%	0%	0%	1.6%
W	1.5%	0.8%	0.5%	0.0%	0%	0%	0%	0%	0%	2.8%
WNW	1.3%	0.5%	0.4%	0.0%	0%	0%	0%	0%	0%	2.2%
NW	1.2%	0.4%	0.1%	0.0%	0%	0%	0%	0%	0%	1.8%
NNW	1.4%	0.3%	0.0%	0.0%	0%	0%	0%	0%	0%	1.7%
Total Frec.	27.7%	20.0%	32.1%	19.0%	0%	0%	0%	0%	0%	98.7%
Calmas										1.3%
Perdidos										0%
Total										100%

Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

La Tabla 11 detalla la escala de Beaufort que clasifica y dimensiona los valores de velocidad de viento obtenidos por WRF.

Tabla 11. Escala de velocidad del viento Beaufort

Denominación	Velocidad del viento (m/s)		
Calma	0.0	-	0.2
Ventolina	0.3	-	1.5
Brisa suave	1.6	-	3.3
Brisa leve	3.4	-	5.4
Brisa moderada	5.5	-	7.9
Brisa fresca	8.0	-	10.8
Brisa fuerte	10.9	-	13.8
Viento fuerte	13.9	-	16.9
Viento duro	17.0	-	20.5
Muy duro	20.6	-	24.1
Temporal	24.2	-	28.3
Borrasca	28.4	-	32.6
Huracán	32.7	-	-

Fuente: Universidad de Buenos Aires, Departamento de Geografía. La Observación meteorológica.

En la Figura 16 se muestra el comportamiento de la velocidad promedio mensual para el área del proyecto. Las velocidades más altas se presentan en febrero (4.5 m/s) y los meses de mitad de año (4.1-4.53 m/s), mientras los promedios más bajos se observan entre octubre (2.51 m/s) y noviembre (2.16 m/s).

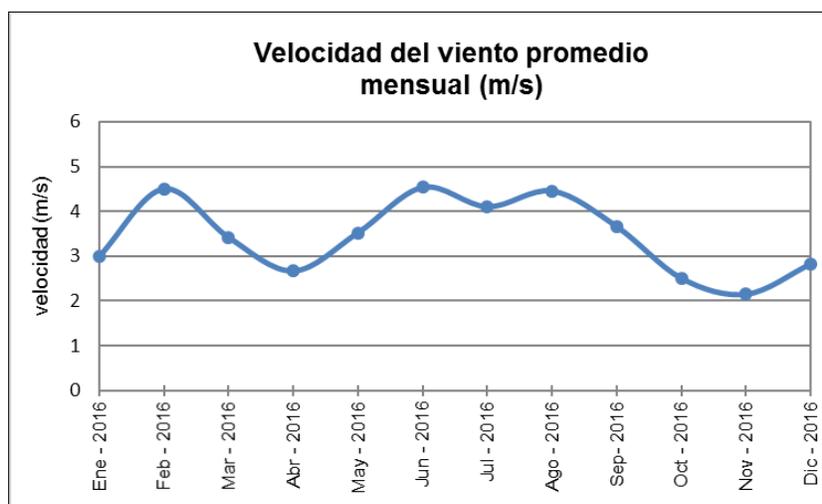


Figura 16. Velocidad del viento promedio mensual

Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

La tendencia de vientos horaria presenta las más altas velocidades entre las horas 9 a 17 (9:00 A.M – 5:00 P.M), con velocidades superiores a 4 m/s. Esta condición hace posible el arrastre de los contaminantes, cuanto mayor sea la velocidad del viento mayor será la dispersión de los contaminantes. Por otra parte, los límites

inferiores (velocidades por debajo de 3 m/s) se establecen alrededor de las 21 a 6 horas (9:00 P.M – 6:00 A.M).

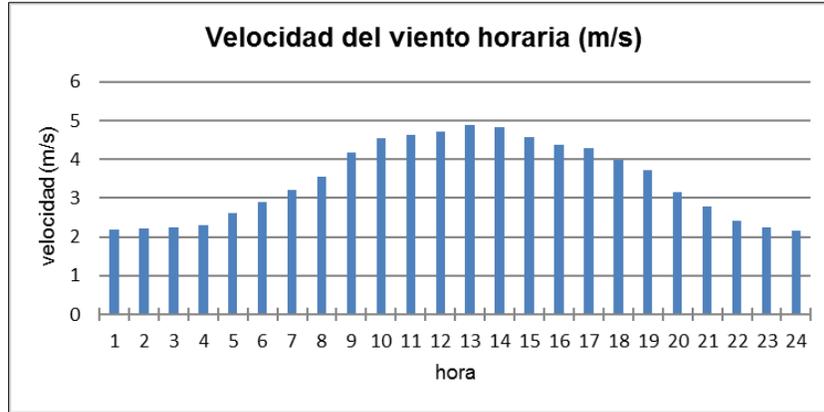


Figura 17. Perfil horario de velocidades
Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

La variación de la velocidad del viento como perfil horario por mes se muestra en la Figura 18 . Las velocidades se presentaron en un rango de 1.19 m/s hasta 6.52 m/s, siendo las velocidades más altas las representadas con tonos de celda más fuertes. Con relación a esta gráfica, en el mes de febrero y junio se presentaron los valores más altos de velocidades del viento.

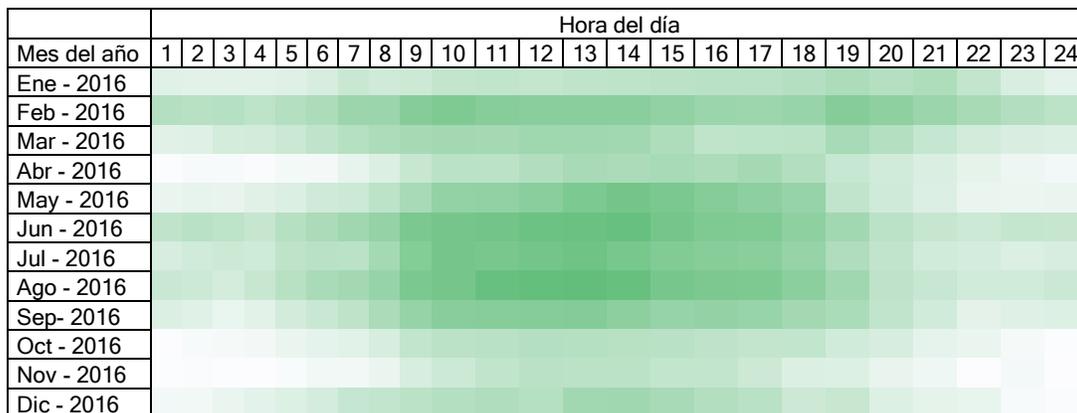


Figura 18. Representación cualitativa de variación de velocidad del viento- perfil horario
Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

4.4 HUMEDAD RELATIVA

La humedad relativa mensual vario entre 68.38 % hasta 75.32% presentándose en el mes de enero el porcentaje de humedad más bajo. (Ver Figura 19).

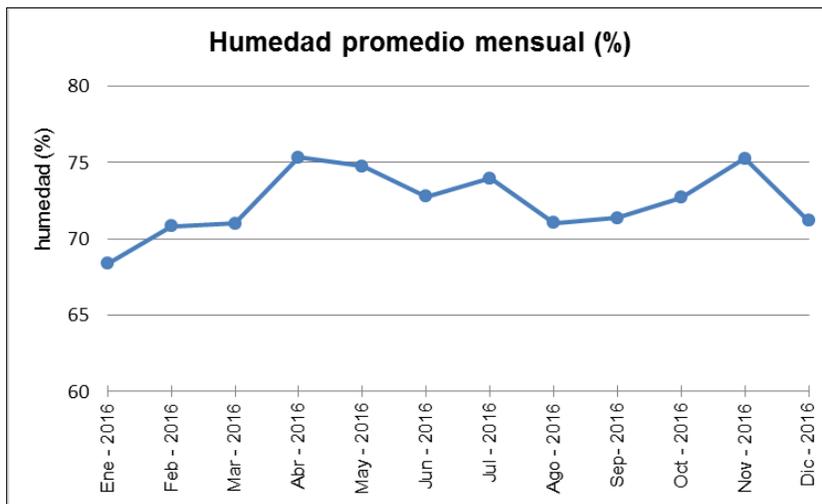


Figura 19. Humedad relativa promedio mensual

Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

El perfil horario de humedad relativa presenta los valores de menor valor desde la hora 10 hasta la 16 debido a que en este rango de tiempo se obtienen los valores de temperaturas más altos. Por el contrario, los valores más altos se presentaron en las horas de la noche hasta la hora 6 (6:00 A.M), con un valor máximo de 85.45% en la hora 4 (4:00 A.M). (Ver Figura 20).

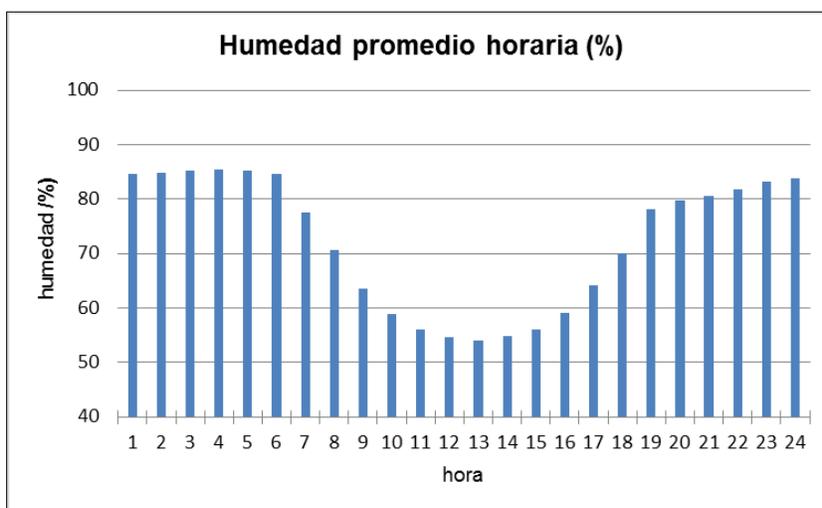


Figura 20. Perfil horario de humedad relativa

Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

En la Figura 21 muestra de manera gráfica la variación de la humedad relativa teniendo en cuenta el perfil horario por mes. Los valores más bajos corresponden a las celdas con todos más claros y los más oscuros a las a los valores de mayor humedad.



Figura 21. Representación cualitativa de variación de la humedad relativa- perfil horario
Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

4.5 NUBOSIDAD

Los meses en que se presentó mayor nubosidad fueron abril/2016 (4.04 octas) y noviembre/2016 (3.85 octas), para el resto de meses la nubosidad fue menor a 3 octas, como se puede ver en la Figura 22. Se presentó nubosidad superior entre las horas 20 y 23 (8:00 P.M. – 11:00 P.M.) mientras que el resto de horas presentaron nubosidad menor a 3 octas, ver Figura 23.

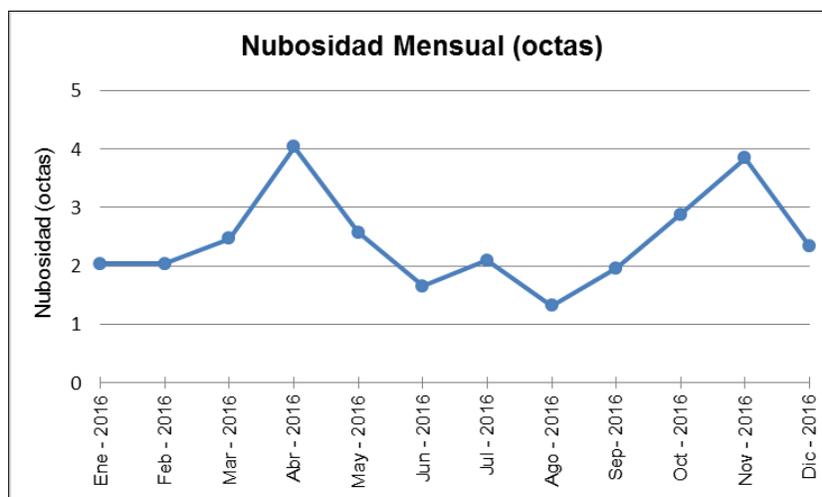


Figura 22. Nubosidad promedio mensual
Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

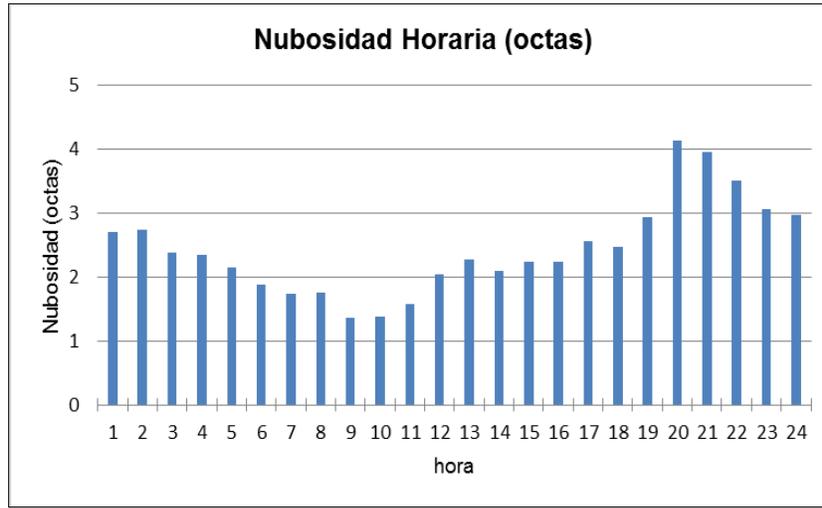


Figura 23. Perfil horario de Nubosidad

Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

Para tener mayor idea de lo que representa esta unidad (octas), se debe tener presente que 8 octas corresponde a cielo totalmente nublado y que a mayor nubosidad se presenta menor radiación solar.

4.6 PRESIÓN BAROMÉTRICA

La presión barométrica registrada durante este periodo de medición estuvo entre los 740.12 mmHg y 741.74 mmHg. Estos valores muestran que no se presentaron grandes cambios en esta variable meteorológica, dejando en claro un comportamiento constante ya que las diferencias entre un día y otro no fueron mayores a los 2 mmHg.

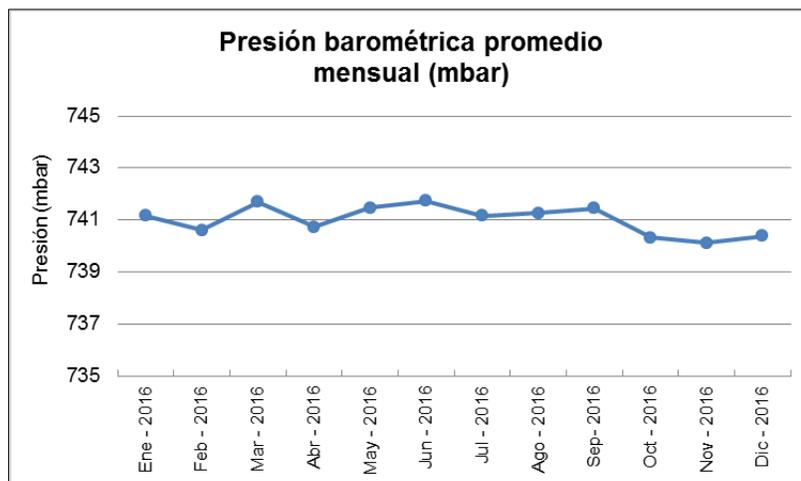


Figura 24. Presión promedio mensual

Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

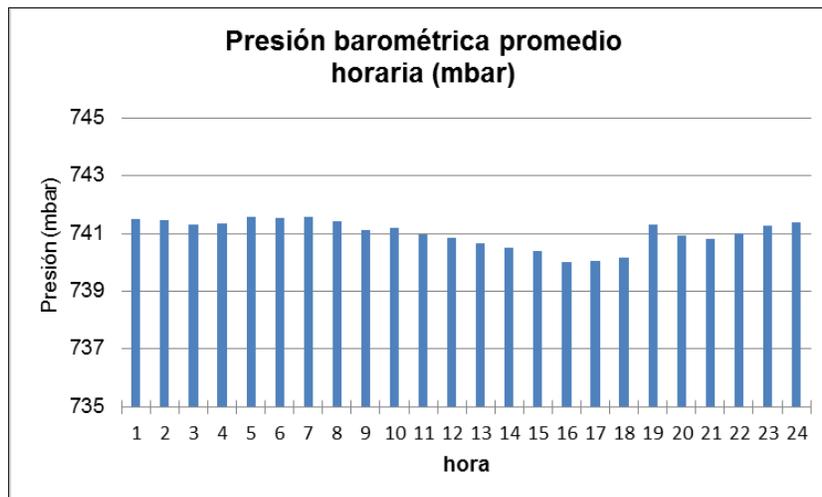


Figura 25. Perfil horario de presión

Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

4.7 ALTURA DE MEZCLA

La altura de la capa de mezcla constituye un parámetro básico en la modelación de la dispersión de los contaminantes atmosféricos, por cuanto es la zona inferior de la atmósfera donde ocurre fundamentalmente el transporte turbulento de masa y energía y donde los contaminantes se trasladan e interaccionan.

Se define la altura de la capa de mezcla es la altura de la capa adyacente a la tierra en la que los contaminantes se dispersan verticalmente por convección o por turbulencia mecánica en un período de aproximadamente una hora, es decir, la elevación sobre la superficie hasta la cual se considera que ocurre un mezclado vertical vigoroso de los gases en la atmósfera.

En otras palabras, la altura de la capa de mezcla representa el grado de dispersión de los contaminantes. En este sentido, entre mayor sea la altura de mezcla mayor será la dispersión de los contaminantes. En la Figura 26 y Figura 27 se presenta la altura de mezcla calculada a partir de la modelación meteorológica WRF para el año 2016; como puede observarse en la figura en las últimas horas de la tarde se alcanzan las mayores alturas de mezcla y en las horas de noche y madrugada las más bajas, es donde se presenta la mayor estabilidad atmosférica, donde los valores de mezcla son bajos.

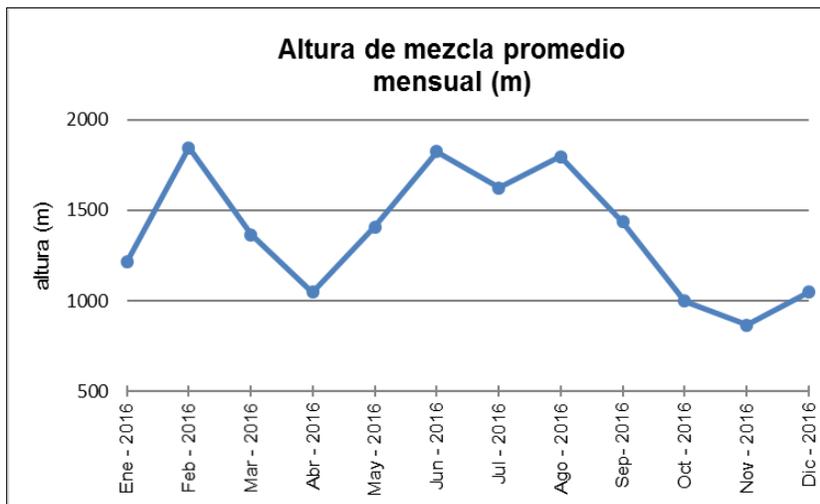


Figura 26. Altura de mezcla mensual

Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

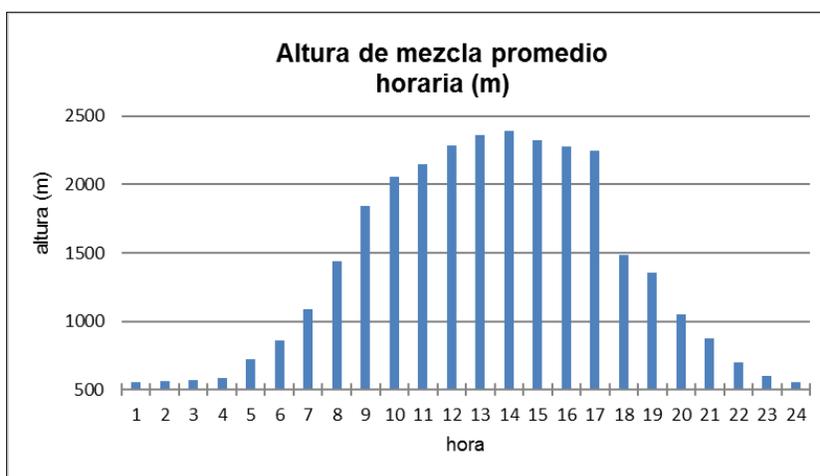


Figura 27. Perfil horario de altura de mezcla

Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

Después de la puesta de sol, la superficie terrestre no recibe irradiación solar, pero sí emite irradiación en onda larga, consecuentemente, el suelo y el aire en contacto con él, así como las capas más bajas de la atmósfera, se van enfriando más rápidamente que el aire en las capas más altas. De esta forma se obtiene un aumento de la temperatura con la altura y, por tanto, una capa térmicamente estable en la parte inferior de la atmósfera donde el aire con estratificación estable tiende a suprimir la turbulencia (Rodríguez, 2014). En el horario diurno ocurre el proceso inverso, en las primeras horas de la mañana la altura de la capa de mezcla comienza a crecer, debido al aumento gradual de la temperatura y de la turbulencia atmosférica, provocado por la irradiación solar, alcanzando su máximo valor muy próximo a los 2,391.14 m a las 14 horas.

En la Figura 28 se observa la variación de la altura de mezcla, siendo las celdas con tono de color más oscuro las que corresponden a las horas en que se presentaron las mayores alturas de capa de mezcla y mejor dispersión de los contaminantes. La altura de mezcla comprendió valores desde 121.43 m hasta 3,066 m, notando que los valores más altos se dieron en la mayoría de los meses del año entre las 09:00 A.M. hasta las 05:00 P.M.

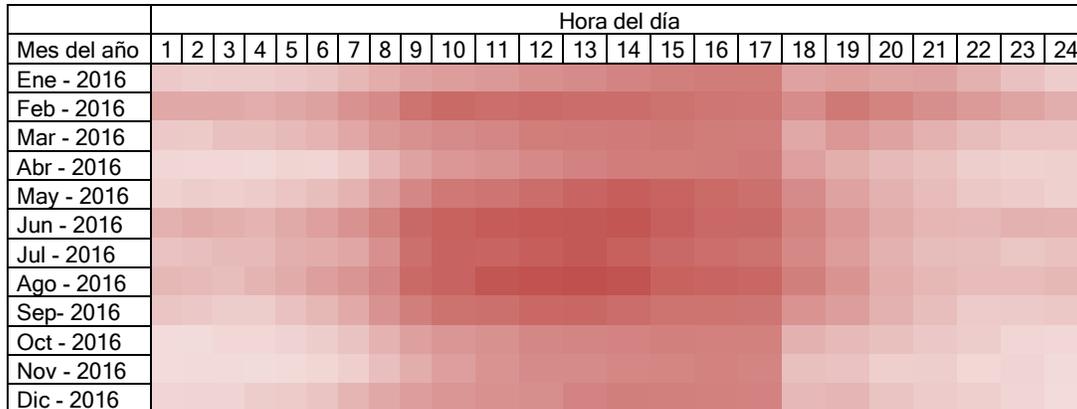


Figura 28. Representación cualitativa de variación de la altura de mezcla - perfil horario

Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

5. ANÁLISIS DE LA CALIDAD DEL AIRE EN LA ZONA

En el presente capítulo se realiza un análisis de la calidad del aire, tomando como base los registros de concentración de material particulado de la campaña de monitoreo realizada durante el año 2017 (01 – 20 de agosto)⁵, se incluirán las estaciones cercanas o que podrían estar influenciadas por el proyecto. Seguidamente se relacionan las estaciones, el periodo de monitoreo y sus respectiva ubicación.

Tabla 12. Estaciones de monitoreo

Estación	Periodo de monitoreo (dd/mm/aaaa)	Coordenadas Geográficas		Elevación (msnm)
		N	W	
Patio Taller	01/08/2017 - 20/08/2017	04°38'41.7"	74°11'57.5"	2556
Portal Américas		04°37'45.4"	74°10'15.7"	2562
Villa Blanca		04°37'14.2"	74°10'02.4"	2554
Kennedy		04°36'59.3"	74°09'30.7"	2560
Palenque		04°36'58.7"	74°09'04.5"	2560
Avenida Boyacá		04°37'09.8"	74°08'25.2"	2563
Avenida 68		04°36'29.4"	74°07'42.8"	2562
Rosario		04°36'08.6"	74°07'21.9"	2574
NQS		04°35'49.4"	74°06'47.8"	2568
Santander		04°35'32.2"	74°05'44.2"	2604
Hospitales		04°35'36.0"	74°05'16.5"	2614
Calle 10-11		04°35'56.2"	74°04'46.02"	2626
Calle 26		04°36'43.2"	74°04'22.3"	2642
Calle 45		04°38'0.7"	74°04'02.4"	2610
Calle 52		04°38'29.9"	74°03'56.5"	2594
Calle 63		04°39'2.8"	74°03'56.6"	2587
Calle 72	04°39'22.7"	74°03'50.2"	2582	
Calle 76	04°39'51.3"	74°03'32.1"	2589	

Fuente: Estudio de Calidad del aire. Año 2017.

Los contaminantes analizados en el monitoreo de calidad del aire son: Material Particulado PM₁₀ (partículas con diámetro aerodinámico menor a 10 µm), Material Particulado PM_{2.5} (partículas con diámetro aerodinámico menor a 2.5 µm), Dióxido de Nitrógeno (NO₂), Dióxido de Azufre (SO₂), Monóxido de Carbono (CO) y Compuestos Orgánicos Volátiles (COV) expresado como BTX. Los procedimientos de muestreo y tratamiento de muestras en laboratorio se realizaron teniendo en cuenta las recomendaciones de la U.S. E.P.A. y los acreditados por el IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia) y la

⁵ Informe Técnico "Monitoreo de calidad del aire en el área de influencia del proyecto: Construcción del metro de Bogotá, ubicado en el área urbana de Bogotá, departamento de Cundinamarca para la empresa INGETEC S.A.", K2 INGENIERÍA S.A.S.

normatividad actual vigente, empleando equipos de muestreo de tecnología manual y automática.

En la Tabla 13 se describen las estaciones definidas, ubicadas y puestas en operación para el monitoreo de calidad del aire, especificando su georeferenciación en coordenadas geográficas WGS84 y coordenadas planas MAGNA Sirgas Colombia Bogotá⁶, un registro fotográfico, descripción de la ubicación, equipos utilizados, periodo de medición y contaminantes monitoreados.

Tabla 13. Estaciones de monitoreo

Estación 1	Nombre	Patio Taller
	Coordenadas:	N: 04°38'41.7" - W: 74°11'57.5" X: 986485.77 - Y: 1005388.28
	Altitud:	2,556 msnm
	Equipos:	Low-Vol VFC PM _{2.5} , Hi-Vol VFC PM ₁₀ , RAC 3 Gases, Tubos Pasivos BTX, Analizador Infrarrojo CO.
	Contaminantes:	PM _{2.5} , PM ₁₀ , SO ₂ , NO ₂ , CO, BTX.
	Fuentes del Entorno:	Estación ubicada en la Finca Cañavalejo cercana al acueducto, en el sector El Corzo. Como fuente del entorno se evidencia el tráfico de vehículos pesados por vía destapada.
	Periodo de medición:	2017/08/01-2017/08/20
Estación 2	Nombre	Portal Américas
	Coordenadas:	N: 04°37'45.4" - W: 74°10'15.7" X: 989623.15 - Y: 1003658.43
	Altitud:	2,562 msnm
	Equipos:	Low-Vol VFC PM _{2.5} , Hi-Vol VFC PM ₁₀ , RAC 3 Gases, Tubos Pasivos BTX, Analizador Infrarrojo CO.
	Contaminantes:	PM _{2.5} , PM ₁₀ , SO ₂ , NO ₂ , CO, BTX.
	Fuentes del Entorno:	Estación ubicada en un parqueadero y Centro de Lavado de la Av. Villavicencio con 86A. Se evidencia tráfico vehicular en el entorno.
	Periodo de medición:	2017/08/01-2017/08/20

⁶ En cumplimiento a la Resolución 1415 de 2012 y la Resolución 0188 de 2013 ambas expedidas por el actual MADS.

Estación 3	Nombre	Villa Blanca
	Coordenadas:	N: 04°37'14.2" - W: 74°10'02.4" X: 990032.96 - Y: 1002700
	Altitud:	2,554 msnm
	Equipos:	Low-Vol VFC PM _{2.5} , Hi-Vol VFC PM ₁₀ , RAC 3 Gases, Tubos Pasivos BTX, Analizador Infrarrojo CO.
	Contaminantes:	PM _{2.5} , PM ₁₀ , SO ₂ , NO ₂ , CO, BTX.
	Fuentes del Entorno:	Estación ubicada en la Carrera 80 con Calle 43. Como fuente del entorno se identifica el tráfico vehicular.
	Periodo de medición:	2017/08/01-2017/08/20
Estación 4	Nombre	Kennedy
	Coordenadas:	N: 04°36'59.3" - W: 74°09'30.7" X: 991009.97 - Y: 1002242.2
	Altitud:	2,560 msnm
	Equipos:	Low-Vol VFC PM _{2.5} , Hi-Vol VFC PM ₁₀ , RAC 3 Gases, Tubos Pasivos BTX, Analizador Infrarrojo CO.
	Contaminantes:	PM _{2.5} , PM ₁₀ , SO ₂ , NO ₂ , CO, BTX.
	Fuentes del Entorno:	Estación ubicada en la Calle 41C-Sur # 78-36. No se evidencian fuentes importantes de emisión en el entorno.
	Periodo de medición:	2017/08/01-2017/08/20
Estación 5	Nombre	Palenque
	Coordenadas:	N: 04°36'58.7" - W: 74°09'04.5" X: 991817.52 - Y: 1002223.68
	Altitud:	2,560 msnm
	Equipos:	Low-Vol VFC PM _{2.5} , Hi-Vol VFC PM ₁₀ , RAC 3 Gases, Tubos Pasivos BTX, Analizador Infrarrojo CO.
	Contaminantes:	PM _{2.5} , PM ₁₀ , SO ₂ , NO ₂ , CO, BTX.
	Fuentes del Entorno:	Estación ubicada en la Calle 39A # 73C-29 Sur. Predomina el tráfico vehicular normal en el entorno.
	Periodo de medición:	2017/08/01-2017/08/20

Estación 6	Nombre	Av Boyaca
	Coordenadas:	N: 04°37'09.8" - W: 74°08'25.2" X: 993028.87 - Y: 1002564.52
	Altitud:	2,563 msnm
	Equipos:	Low-Vol VFC PM _{2.5} , Hi-Vol VFC PM ₁₀ , RAC 3 Gases, Tubos Pasivos BTX, Analizador Infrarrojo CO.
	Contaminantes:	PM _{2.5} , PM ₁₀ , SO ₂ , NO ₂ , CO, BTX.
	Fuentes del Entorno:	Estación ubicada en la Calle 6 Sur # 72-39. Se evidencia como fuente en el entorno el tráfico de vehículos livianos.
	Periodo de medición:	2017/08/01-2017/08/20
Estación 7	Nombre	Avenida 68
	Coordenadas:	N: 04°36'29.4" - W: 74°07'42.8" X: 994335.65 - Y: 1001323.45
	Altitud:	2,562 msnm
	Equipos:	Low-Vol VFC PM _{2.5} , Hi-Vol VFC PM ₁₀ , RAC 3 Gases, Tubos Pasivos BTX, Analizador Infrarrojo CO.
	Contaminantes:	PM _{2.5} , PM ₁₀ , SO ₂ , NO ₂ , CO, BTX.
	Fuentes del Entorno:	Punto ubicado en la Calle 27 Sur # 54-08. En el entorno se evidencia tráfico vehicular leve.
	Periodo de medición:	2017/08/01-2017/08/20
Estación 8	Nombre	Rosario
	Coordenadas:	N: 04°36'08.6" - W: 74°07'21.9" X: 994979.81 - Y: 1000684.49
	Altitud:	2,574 msnm
	Equipos:	Low-Vol VFC PM _{2.5} , Hi-Vol VFC PM ₁₀ , RAC 3 Gases, Tubos Pasivos BTX, Analizador Infrarrojo CO.
	Contaminantes:	PM _{2.5} , PM ₁₀ , SO ₂ , NO ₂ , CO, BTX.
	Fuentes del Entorno:	Estación ubicada en la Cra 50B # 29-31- Presencia de tráfico vehicular en el entorno.
	Periodo de medición:	2017/08/01-2017/08/20

Estación 9	Nombre	Nqs
	Coordenadas:	N: 04°35'49.4" - W: 74°06'47.8" X: 996030.84 - Y: 1000094.66
	Altitud:	2,568 msnm
	Equipos:	Low-Vol VFC PM _{2.5} , Hi-Vol VFC PM ₁₀ , RAC 3 Gases, Tubos Pasivos BTX, Analizador Infrarrojo CO.
	Contaminantes:	PM _{2.5} , PM ₁₀ , SO ₂ , NO ₂ , CO, BTX.
	Fuentes del Entorno:	Estación ubicada en la Calle 18 Sur # 34C-04. En el entorno hay presencia importante de tráfico vehicular de la Av. 1º de Mayo.
	Periodo de medición:	2017/08/01-2017/08/20
Estación 10	Nombre	Santander
	Coordenadas:	N: 04°35'32.2" - W: 74°05'44.2" X: 997991.19 - Y: 999566.25
	Altitud:	2,604 msnm
	Equipos:	Low-Vol VFC PM _{2.5} , Hi-Vol VFC PM ₁₀ , RAC 3 Gases, Tubos Pasivos BTX, Analizador Infrarrojo CO.
	Contaminantes:	PM _{2.5} , PM ₁₀ , SO ₂ , NO ₂ , CO, BTX.
	Fuentes del Entorno:	Estación ubicada en la casa del señor Diego Meneses. Las fuentes de emisión del entorno son el tráfico vehicular y algunas industrias.
	Periodo de medición:	2017/08/01-2017/08/20
Estación 11	Nombre	Hospitales
	Coordenadas:	N: 04°35'36.0" - W: 74°05'16.5" X: 998845 - Y: 999682.96
	Altitud:	2,614 msnm
	Equipos:	Low-Vol VFC PM _{2.5} , Hi-Vol VFC PM ₁₀ , RAC 3 Gases, Tubos Pasivos BTX, Analizador Infrarrojo CO.
	Contaminantes:	PM _{2.5} , PM ₁₀ , SO ₂ , NO ₂ , CO, BTX.
	Fuentes del Entorno:	Estación ubicada en la portería principal del Hospital La Misericordia. La principal fuente del entorno es el tráfico vehicular de la Av. Caracas con Calle 1ª.
	Periodo de medición:	2017/08/01-2017/08/20

Estación 12	Nombre	Calle 10-11
	Coordenadas:	N: 04°35'56.2" - W: 74°04'46.02" X: 999784.5 - Y: 1000303.44
	Altitud:	2,626 msnm
	Equipos:	Low-Vol VFC PM _{2.5} , Hi-Vol VFC PM ₁₀ , RAC 3 Gases, Tubos Pasivos BTX, Analizador Infrarrojo CO.
	Contaminantes:	PM _{2.5} , PM ₁₀ , SO ₂ , NO ₂ , CO, BTX.
	Fuentes del Entorno:	Estación ubicada en la azotea del Centro Comercial El Gran San. Calle 10 con Carrera 10. La principal fuente del entorno es el tráfico vehicular en las zonas aledañas.
	Periodo de medición:	2017/08/01-2017/08/20
Estación 13	Nombre	Calle 26
	Coordenadas:	N: 04°36'43.2" - W: 74°04'22.3" X: 1000515.62 - Y: 1001747.14
	Altitud:	2,642 msnm
	Equipos:	Low-Vol VFC PM _{2.5} , Hi-Vol VFC PM ₁₀ , RAC 3 Gases, Tubos Pasivos BTX, Analizador Infrarrojo CO.
	Contaminantes:	PM _{2.5} , PM ₁₀ , SO ₂ , NO ₂ , CO, BTX.
	Fuentes del Entorno:	Estación ubicada en la terraza de la Universidad Inca de Colombia. La principal fuente del entorno es el tráfico vehicular de la Calle 26.
	Periodo de medición:	2017/08/01-2017/08/20
Estación 14	Nombre	Calle 45
	Coordenadas:	N: 04°38'0.7" - W: 74°04'02.4" X: 1001128.95 - Y: 1004127.72
	Altitud:	2,610 msnm
	Equipos:	Low-Vol VFC PM _{2.5} , Hi-Vol VFC PM ₁₀ , RAC 3 Gases, Tubos Pasivos BTX, Analizador Infrarrojo CO.
	Contaminantes:	PM _{2.5} , PM ₁₀ , SO ₂ , NO ₂ , CO, BTX.
	Fuentes del Entorno:	Estación ubicada en la terraza del nuevo Edificio de Psicología de la Universidad Católica. La fuente más relevante del entorno es el tráfico vehicular de la Av. Caracas con Calle 46.
	Periodo de medición:	2017/08/01-2017/08/20

Estación 15	Nombre	Calle 52
	Coordenadas:	N: 04°38'29.9" - W: 74°03'56.5" X: 1001310.79 - Y: 1005024.66
	Altitud:	2,594 msnm
	Equipos:	Low-Vol VFC PM _{2.5} , Hi-Vol VFC PM ₁₀ , RAC 3 Gases, Tubos Pasivos BTX, Analizador Infrarrojo CO.
	Contaminantes:	PM _{2.5} , PM ₁₀ , SO ₂ , NO ₂ , CO, BTX.
	Fuentes del Entorno:	Estación ubicada en la terraza de la Secretaría Distrital de Ambiente. En el entorno se destaca el tráfico vehicular de la zona.
	Periodo de medición:	2017/08/01-2017/08/20
Estación 16	Nombre	Calle 63
	Coordenadas:	N: 04°39'2.8" - W: 74°03'56.6" X: 1001307.69 - Y: 1006035.26
	Altitud:	2.587 msnm
	Equipos:	Low-Vol VFC PM _{2.5} , Hi-Vol VFC PM ₁₀ , RAC 3 Gases, Tubos Pasivos BTX, Analizador Infrarrojo CO.
	Contaminantes:	PM _{2.5} , PM ₁₀ , SO ₂ , NO ₂ , CO, BTX.
	Fuentes del Entorno:	Estación ubicada en la Calle 63A # 15-15. Como fuentes del entorno se destacan el tráfico vehicular de la zona y la remodelación de un edificio ubicado a 80 m aproximadamente.
Periodo de medición:	2017/08/01-2017/08/20	
Estación 17	Nombre	Calle 72
	Coordenadas:	N: 04°39'22.7" - W: 74°03'50.2" X: 1001504.93 - Y: 1006646.53
	Altitud:	2.582 msnm
	Equipos:	Low-Vol VFC PM _{2.5} , Hi-Vol VFC PM ₁₀ , RAC 3 Gases, Tubos Pasivos BTX, Analizador Infrarrojo CO.
	Contaminantes:	PM _{2.5} , PM ₁₀ , SO ₂ , NO ₂ , CO, BTX.
	Fuentes del Entorno:	Estación ubicada en el la Calle 15 # 68-86, que corresponde a un parqueadero en construcción. Se evidencia en el entorno tráfico vehicular.
Periodo de medición:	2017/08/01-2017/08/20	

Estación 18	Nombre:	Calle 76
	Coordenadas:	N: 04°39'51.3" - W: 74°03'32.1" X: 1002062.76 - Y: 1007525.05
	Altitud:	2,589 msnm
	Equipos:	Low-Vol VFC PM _{2.5} , Hi-Vol VFC PM ₁₀ , RAC 3 Gases, Tubos Pasivos BTX, Analizador Infrarrojo CO.
	Contaminantes:	PM _{2.5} , PM ₁₀ , SO ₂ , NO ₂ , CO, BTX.
	Fuentes del Entorno:	Estación ubicada en la terraza del Centro Comercial de Alta Tecnología, en la Carrera 15 # 77-05. Predomina tráfico vehicular en la zona.
	Periodo de medición:	2017/08/01-2017/08/20

Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

La Figura 29 muestra el mapa con la localización geográfica de las dieciocho (18) estaciones de monitoreo de calidad del aire.

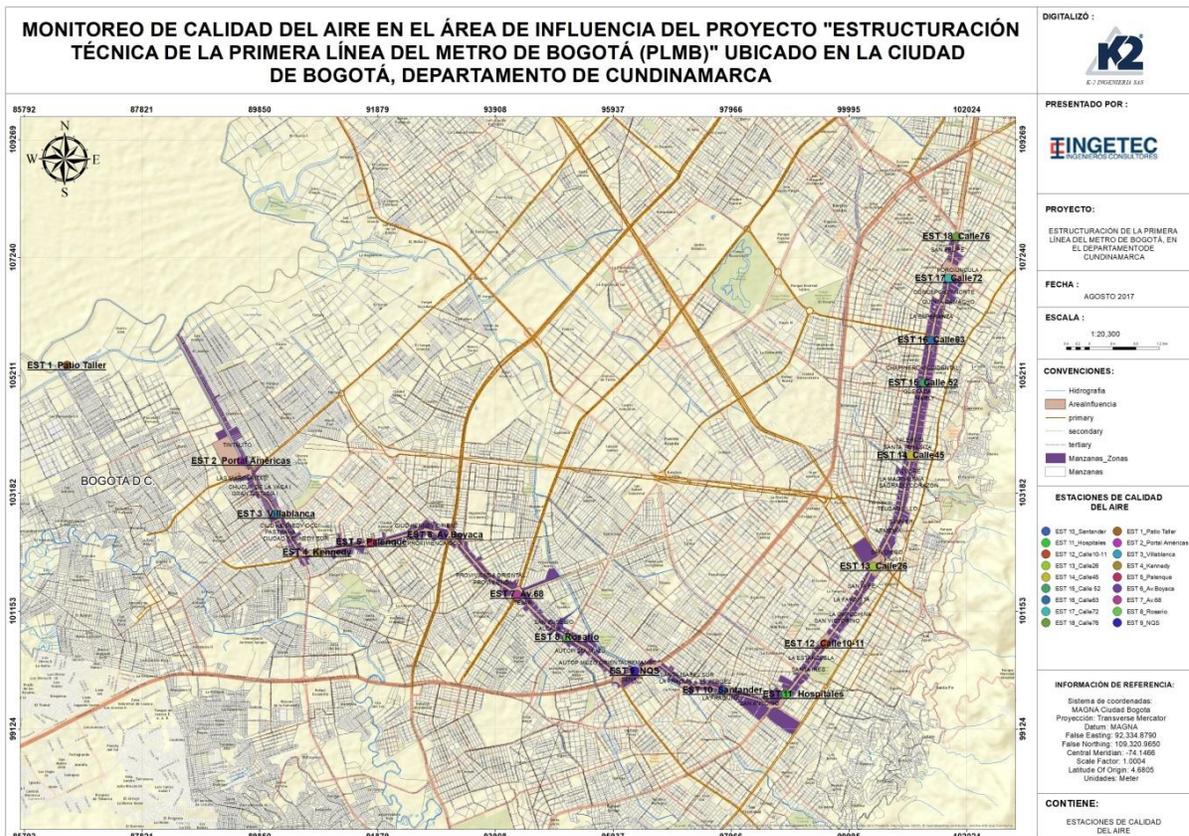


Figura 29. Ubicación geográfica de las estaciones de monitoreo de calidad del aire

Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

A continuación se analizan los resultados del monitoreo de calidad del aire, realizado durante el periodo comprendido entre los días 01 y 20 de agosto de 2017, en el área de influencia del proyecto “Construcción Metro de Bogotá”, ubicado en el área urbana de Bogotá, departamento de Cundinamarca.

Una vez tomadas las muestras de campo, analizadas en el laboratorio y posteriormente aprobadas por el Supervisor de Calidad, se determina si las muestras cumplen con todos los requerimientos para ser validadas y tenidas en cuenta en el tratamiento estadístico. Todos los resultados de concentración presentados en esta sección se muestran a CONDICIONES DE REFERENCIA DE 25 °C Y 760 mm-Hg.

Los monitoreos de calidad del aire se realizaron mediante la ubicación de dieciocho (18) estaciones en la zona de influencia del proyecto por un periodo de 18 días continuos.

5.1 CONCENTRACIÓN DE MATERIAL PARTICULADO PM₁₀

Las muestras de PM₁₀ fueron recolectadas mediante equipos Hi-Vol VFC PM₁₀. Los datos reportados cuentan con los criterios de aceptación de calidad establecidos por el Protocolo de Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire desarrollado por el MADS, el cual se llevaron a cabo en periodos de 24±1 horas⁷. No se presentaron datos inválidos durante el periodo de monitoreo.

5.1.1 PM₁₀ diaria vs. Norma

En la Tabla 14 se presenta el consolidado de los resultados para PM₁₀ diarios obtenidos de las dieciocho (18) estaciones evaluadas durante el periodo de monitoreo.

Durante la campaña de monitoreo realizada se observa que los valores de concentración de material particulado – PM₁₀ no presentan excedencias respecto a la norma diaria de calidad del aire establecida en la Resolución 610 de 2010 (100 µg/m³) del MAVTD hoy MADS. En la Figura 30 se observa que los niveles más elevados de concentración registrados entre las dieciocho estaciones se presentaron los días: cuatro (4) en la estación Calle 45 (99.80 µg/m³), diez (10) en la estación NQS (99.65 µg/m³), y uno (1) en la estación Portal Américas (97.16 µg/m³).

⁷ Resolución 2154 del 2010 // Protocolo de monitoreo y seguimiento de la Calidad del Aire.

Tabla 14. Concentraciones diarias de PM₁₀ vs. Norma

	Patio Taller	Portal Américas	Villa Blanca	Kennedy	Palenque	Avenida Boyacá	Avenida 68	Rosario	NQS	Santander	Hospitales	Calle 10-11	Calle 26	Calle 45	Calle 52	Calle 63	Calle 72	Calle 76	Norma Diaria (µg/m ³)
Día 1	66.19	97.16	85.97	51.18	72.24	55.68	48.76	68.34	10.86	50.82	90.89	54.91	51.72	40.69	77.51	68.87	77.02	69.48	100
Día 2	57.22	82.55	90.16	68.78	33.08	68.00	55.05	57.03	76.10	38.33	92.79	62.68	51.31	48.09	59.98	58.78	59.55	58.42	100
Día 3	58.60	90.09	46.02	46.73	30.77	74.46	35.28	31.40	61.45	33.45	68.04	52.86	50.64	20.61	48.10	45.17	47.86	50.76	100
Día 4	47.80	79.13	38.53	46.52	33.03	73.90	37.55	29.58	40.87	37.54	61.23	50.18	45.70	99.80	45.56	36.94	45.16	46.60	100
Día 5	45.91	83.55	46.61	30.44	40.41	54.09	32.01	32.48	19.72	43.31	64.71	53.92	48.79	65.77	48.89	46.11	48.56	44.95	100
Día 6	68.45	94.68	94.25	37.10	40.10	51.94	35.58	30.22	61.99	37.15	60.47	47.98	51.93	65.22	50.37	50.75	50.16	30.00	100
Día 7	49.66	78.21	47.99	43.66	29.68	57.16	38.65	30.97	17.53	36.15	40.91	36.60	32.90	95.09	38.43	38.02	38.23	33.04	100
Día 8	57.31	84.76	37.01	38.69	53.22	57.98	32.57	27.20	62.20	26.16	54.14	40.95	32.35	47.01	34.64	36.96	34.49	28.35	100
Día 9	43.05	79.22	64.97	62.65	70.23	73.89	54.48	40.37	64.40	32.44	46.15	49.54	38.83	54.78	41.47	41.71	41.21	34.93	100
Día 10	48.63	70.45	68.39	55.17	40.23	85.42	48.68	56.90	98.65	46.72	59.96	53.86	40.39	28.58	41.85	35.49	41.50	24.24	100
Día 11	40.69	61.52	48.72	46.90	37.12	60.46	24.89	25.91	59.50	28.77	42.38	41.00	27.36	19.36	26.92	28.58	26.74	19.34	100
Día 12	37.56	69.21	44.86	23.02	30.38	43.10	33.51	21.80	72.39	24.27	37.88	32.16	23.27	28.24	24.96	25.78	24.75	11.65	100
Día 13	30.27	83.87	46.73	46.08	39.63	49.55	27.38	23.84	15.34	22.94	26.38	25.46	23.75	15.29	30.91	28.89	30.68	33.34	100
Día 14	53.27	87.86	66.71	65.53	56.18	68.66	48.50	43.15	52.03	31.57	40.91	16.26	28.51	17.76	44.47	40.23	44.21	35.82	100
Día 15	53.37	72.98	62.83	41.94	43.84	47.55	34.42	27.52	51.73	28.21	38.22	31.89	17.71	51.29	37.79	33.55	37.49	39.50	100
Día 16	50.11	84.23	65.73	44.84	69.22	57.51	44.77	35.20	20.24	32.63	47.02	37.80	32.73	38.34	44.75	43.02	44.59	44.43	100
Día 17	71.60	53.14	63.16	38.81	61.36	44.64	42.90	33.87	68.43	34.26	69.76	35.70	45.83	24.53	83.55	69.50	83.33	38.99	100
Día 18	46.42	57.21	39.98	40.38	36.46	45.95	37.65	29.17	24.10	36.65	16.96	34.14	34.63	21.38	40.93	45.82	40.72	25.53	100

Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

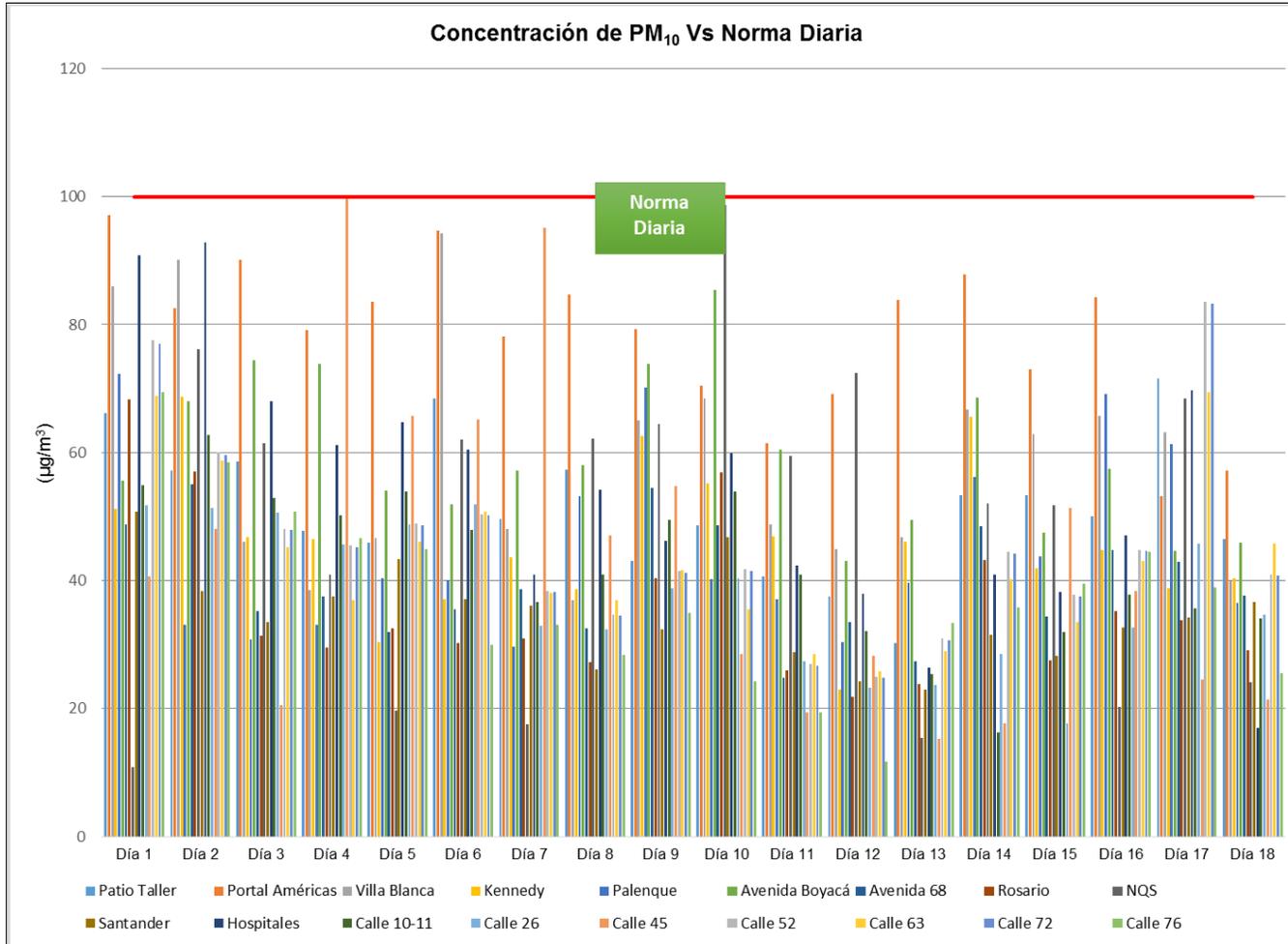


Figura 30. Concentraciones diarias de PM₁₀ vs. Norma
Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

5.1.2 PM₁₀ anual vs. Norma

La Resolución 610/2010, en sus lineamientos respecto al nivel máximo permisible de exposición anual para PM₁₀ establece una concentración de 50 µg/m³. En la Tabla 15 se registran las concentraciones promedio obtenidas por las estaciones de monitoreo durante la campaña.

Tabla 15. Concentración anual de PM₁₀ vs. Norma

	Estación	Promedio PM ₁₀ * (µg/m ³)	Norma Anual (µg/m ³)	Porcentaje con Respecto a la Norma
1	Patio Taller	51.45	50	102.90%
2	Portal Américas	78.32	50	156.65%
3	Villa Blanca	58.81	50	117.62%
4	Kennedy	46.02	50	92.05%
5	Palenque	45.40	50	90.80%
6	Avenida Boyacá	59.44	50	118.88%
7	Avenida 68	39.59	50	79.18%
8	Rosario	35.83	50	71.66%
9	NQS	48.75	50	97.50%
10	Santander	34.52	50	69.04%
11	Hospitales	53.27	50	106.53%
12	Calle 10-11	42.10	50	84.21%
13	Calle 26	37.69	50	75.37%
14	Calle 45	43.44	50	86.87%
15	Calle 52	45.62	50	91.23%
16	Calle 63	43.01	50	86.02%
17	Calle 72	45.35	50	90.70%
18	Calle 76	45.35	50	90.70%

*Promedio aritmético

Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

Así mismo la Figura 31 presenta de manera gráfica los valores promedio del consolidado de datos obtenidos y al comparar con la norma anual de 50 µg/m³, se puede detectar que cinco (5) de las dieciocho (18) estaciones superan el límite permisible anual; no obstante, es preciso destacar que estas concentraciones se comparan solo de *forma indicativa*, para establecer una tendencia de la calidad del aire durante el periodo del año considerado y determinar el porcentaje de reducción o aumento con respecto a la norma.

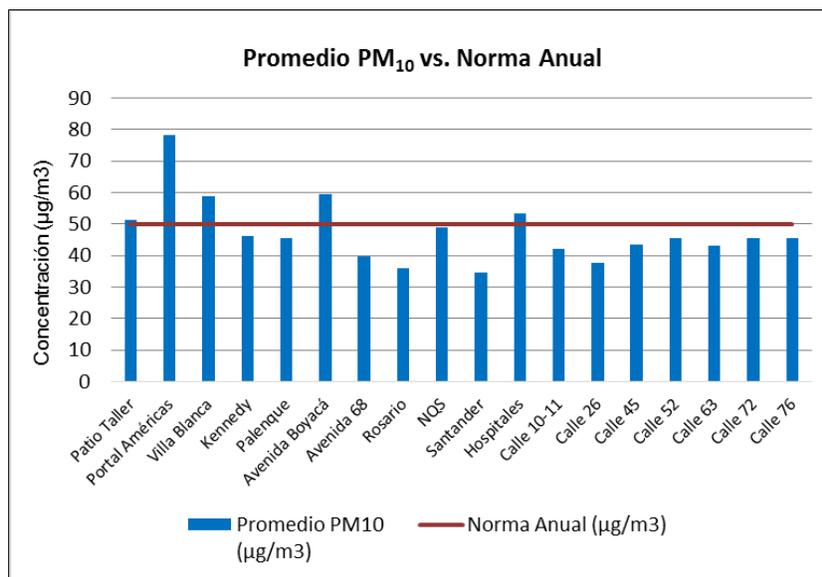


Figura 31. Concentraciones promedio PM₁₀ vs. Norma anual
Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

5.2 CONCENTRACIÓN DE MATERIAL PARTICULADO PM_{2.5}

Los equipos cumplieron con el tiempo requerido para las mediciones de PM_{2.5}, en tanto que estas se llevaron a cabo en periodos de 24±1 hora, cumpliendo así con lo establecido en el Protocolo para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire. No se presentaron datos inválidos durante el periodo de monitoreo.

5.2.1 PM_{2.5} diaria vs. Norma

En la Tabla 16 se presenta el consolidado de los resultados para PM_{2.5} diarios obtenidos de las dieciocho (18) estaciones evaluadas durante el periodo de monitoreo.

Durante la campaña de monitoreo realizada se observa que el 98.8% de los valores de concentración de material particulado - PM_{2.5} no presentan excedencias respecto a la norma diaria de calidad del aire establecida en la Resolución 610 de 2010 (50 µg/m³) del MAVTD hoy MADS. Sólo cuatro (4) valores (1.2%) exceden la norma y se hallan registrados en las estaciones Portal Américas (75.78 µg/m³ en el día 1), NQS (57.65 µg/m³ en el día 10) y Hospitales (57.80 µg/m³ y 58.99 µg/m³ en los días 1 y 2 respectivamente), (Figura 32).

Tabla 16. Concentraciones diarias de PM_{2.5} vs. Norma

	Patio Taller	Portal Américas	Villa Blanca	Kennedy	Palenque	Avenida Boyacá	Avenida 68	Rosario	NQS	Santander	Hospitales	Calle 10-11	Calle 26	Calle 45	Calle 52	Calle 63	Calle 72	Calle 76	Norma Diaria (µg/m ³)
Día 1	41.93	75.78	22.03	35.19	30.37	29.94	24.53	48.83	8.67	37.45	57.80	28.45	24.19	26.04	24.70	40.66	49.06	43.46	50
Día 2	37.53	40.38	-	42.54	14.55	47.83	23.02	22.02	16.33	19.05	58.99	38.51	27.68	25.57	46.10	32.45	29.95	25.46	50
Día 3	37.19	28.41	13.06	36.43	24.57	48.31	11.33	19.93	39.51	18.85	25.54	21.95	22.38	16.04	28.88	23.69	17.07	39.74	50
Día 4	36.98	47.61	-	27.60	21.57	17.46	16.47	21.88	26.85	19.05	34.94	37.97	13.84	37.72	29.72	15.11	19.53	18.80	50
Día 5	40.65	42.01	24.13	20.62	25.80	19.93	18.63	17.22	11.24	22.96	38.69	23.54	15.76	25.56	14.11	27.68	20.16	18.47	50
Día 6	36.58	30.86	12.14	18.23	22.43	31.91	16.02	15.43	36.53	20.81	37.64	25.78	25.58	46.56	32.46	32.09	29.48	12.14	50
Día 7	42.70	47.43	47.16	25.06	13.28	23.04	19.47	15.00	13.60	18.07	28.45	17.98	12.33	32.02	19.01	15.49	20.00	14.34	50
Día 8	41.83	24.33	17.93	17.04	15.59	27.50	19.72	13.42	37.35	10.67	39.17	20.38	13.53	20.42	15.57	22.83	13.59	16.03	50
Día 9	17.11	17.68	21.32	45.10	47.69	30.75	29.45	25.97	32.52	22.44	35.74	27.28	17.68	37.57	26.25	22.50	26.46	15.19	50
Día 10	17.57	52.83	17.30	24.92	28.09	27.47	24.02	21.20	57.65	26.93	44.97	27.52	22.16	13.09	19.30	17.07	28.94	13.06	50
Día 11	25.74	17.27	24.67	24.66	16.83	27.38	15.52	12.93	31.85	13.06	26.94	27.43	11.46	12.22	13.25	16.35	10.37	12.82	50
Día 12	17.21	28.26	21.41	17.12	15.50	28.32	16.42	12.18	42.04	12.51	17.89	17.52	9.98	17.68	12.23	12.48	15.35	9.66	50
Día 13	11.93	30.97	18.65	35.57	29.75	34.93	13.01	12.98	11.69	10.84	13.96	13.87	12.93	10.42	18.73	16.66	17.37	17.96	50
Día 14	30.89	27.72	24.37	35.67	20.36	29.24	21.82	19.99	36.81	18.52	29.74	10.98	13.97	12.43	24.40	27.22	20.23	14.30	50
Día 15	27.50	48.33	25.19	32.86	34.54	26.93	17.41	15.12	31.46	12.56	26.76	24.66	11.03	25.27	15.33	12.76	11.70	17.97	50
Día 16	26.42	37.33	13.29	29.35	21.39	24.26	24.95	21.55	11.77	18.72	27.49	26.38	13.61	16.17	21.41	26.45	11.35	27.93	50
Día 17	37.20	49.78	34.81	18.81	23.62	18.17	20.33	20.67	32.01	19.66	39.75	24.77	10.38	13.16	28.41	42.33	46.02	19.68	50
Día 18	36.09	25.49	16.99	21.03	17.94	20.33	19.51	12.47	16.94	23.01	10.98	21.81	15.18	14.59	28.20	28.40	13.54	12.84	50

Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

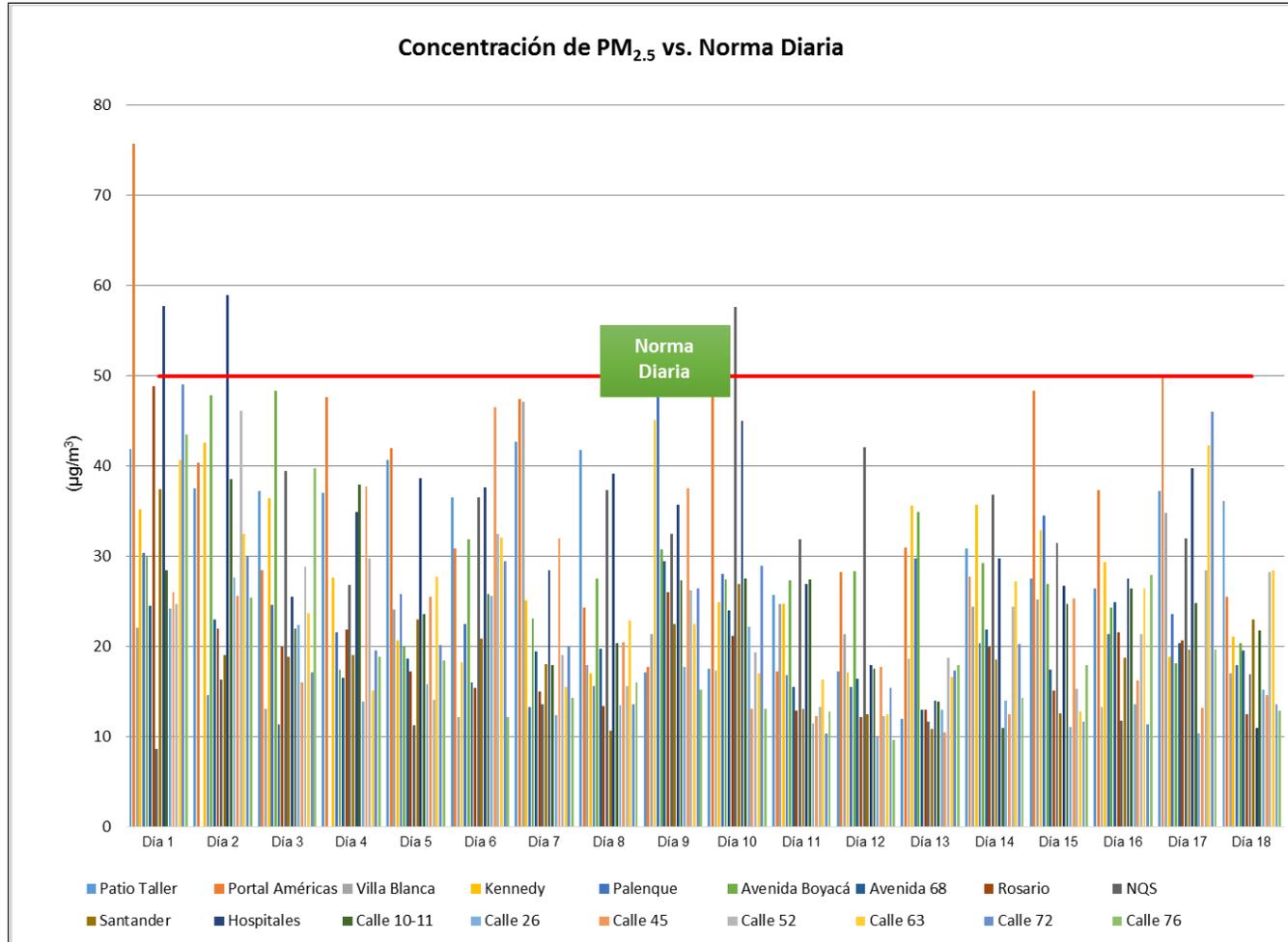


Figura 32. Concentraciones diarias de PM_{2,5} vs. Norma
Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

5.2.2 PM_{2.5} anual vs. Norma

La Resolución 610/2010, en sus lineamientos respecto al nivel máximo permisible de exposición anual para PM_{2.5} establece una concentración de 25 µg/m³. En la Tabla 17 se registran las concentraciones promedio obtenidas por las estaciones de monitoreo durante la campaña.

Tabla 17. Concentración anual de PM_{2.5} vs. Norma

	Estación	Promedio PM _{2.5} * (µg/m ³)	Norma Anual (µg/m ³)	Porcentaje con Respecto a la Norma
1	Patio Taller	31.00	25	123.99%
2	Portal Américas	38.06	25	152.23%
3	Villa Blanca	22.50	25	89.99%
4	Kennedy	28.63	25	114.54%
5	Palenque	23.88	25	95.52%
6	Avenida Boyacá	29.02	25	116.08%
7	Avenida 68	19.54	25	78.16%
8	Rosario	19.78	25	79.13%
9	NQS	28.11	25	112.44%
10	Santander	18.95	25	75.81%
11	Hospitales	34.38	25	137.52%
12	Calle 10-11	24.41	25	97.65%
13	Calle 26	16.38	25	65.53%
14	Calle 45	22.82	25	91.28%
15	Calle 52	22.93	25	91.73%
16	Calle 63	23.75	25	95.02%
17	Calle 72	22.74	25	90.98%
18	Calle 76	19.82	25	79.30%

*Promedio aritmético

Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

La Figura 33, presenta los valores promedio del consolidado de datos obtenidos. Al comparar con la concentración definida para la norma anual (25 µg/m³), se evidencia que en seis (6) de las dieciocho (18) estaciones de monitoreo superan el límite permisible anual. Estas estaciones son: Patio Taller (31.00 µg/m³), Portal Américas (38.06 µg/m³), Kennedy (28.63 µg/m³), Avenida Boyacá (29.02 µg/m³), NQS (28.11 µg/m³) y Hospitales (34.38 µg/m³). Sin embargo, estas concentraciones se comparan solo de *forma indicativa*, para establecer una tendencia de la calidad del aire durante el periodo del año considerado y determinar el porcentaje de reducción o aumento con respecto a la norma.

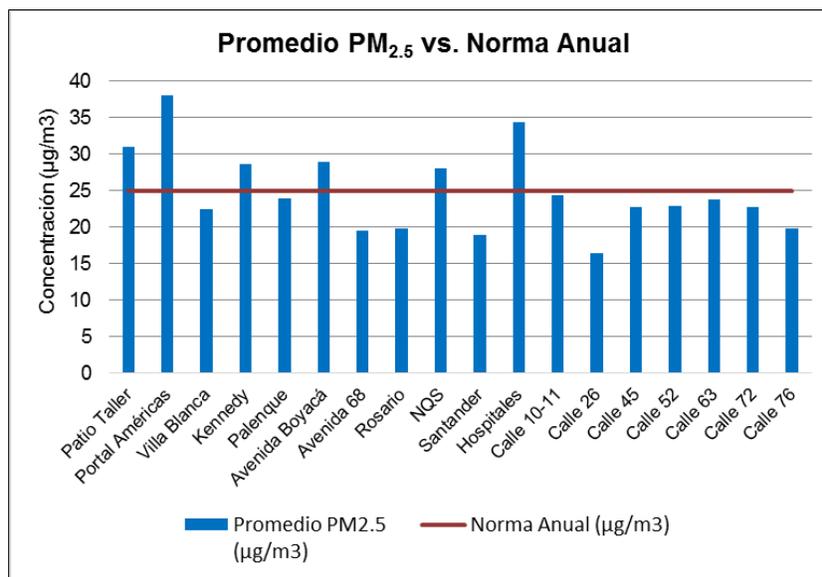


Figura 33. Concentraciones promedio PM_{2.5} vs. Norma anual
Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

5.3 CONCENTRACIÓN DE NO₂

Las muestras de NO₂ fueron recolectadas mediante equipos RAC 3 gases en las dieciocho (18) estaciones de calidad el aire. Los datos reportados cuentan con los criterios de aceptación de calidad establecidos por el Protocolo de Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire desarrollado por el MADS, el cual establece un tiempo mínimo de 23 horas de monitoreo⁸.

5.3.1 NO₂ diaria vs. Norma

En la Tabla 18 se presentan los resultados de NO₂ obtenidos en cada estación durante el periodo de monitoreo.

Los valores de concentración reportados con asterisco (*) se calcularon con el valor mínimo detectable del método (LCM NO₂ = 0.05 µg/ml de Solución), lo cual indica que estas concentraciones se encuentran en niveles muy bajos o en su defecto no se presenta concentración alguna de este parámetro. Los demás valores reportados superan el mínimo detectable, más no la norma diaria para NO₂ que es de 150 µg/m³ dado por la Resolución 610 de 2010 del MAVDT actual MADS. En consecuencia todas las concentraciones reportadas no exceden la norma diaria y cumplen con lo establecido en dicha Resolución, (Ver Figura 34).

⁸ Resolución 2154 del 2010 // Protocolo de monitoreo y seguimiento de la Calidad del Aire.

Tabla 18. Concentraciones diarias de NO₂ vs. Norma

	Patio Taller	Portal Américas	Villa Blanca	Kennedy	Palenque	Avenida Boyacá	Avenida 68	Rosario	NQS	Santander	Hospitales	Calle 10-11	Calle 26	Calle 45	Calle 52	Calle 63	Calle 72	Calle 76	Norma Diaria (µg/m ³)
Día 1	15.70*	15.50*	16.10*	25.6	30.6	15.60*	44.2	16.30*	42.6	12.60*	29.9	15.00*	14.60*	13.50*	13.60*	13.70*	25.1	16	150
Día 2	36	13.90*	15.80*	19.8	15.10*	149.2	18	26.9	12.20*	14.60*	61.7	15.00*	22.1	13.20*	15.50*	12.60*	16.20*	16.7	150
Día 3	10.90*	23	14.70*	13.90*	26.7	14.10*	36.1	15.80*	15.70*	14.00*	36.6	13.80*	13.80*	12.40*	34.5	14.70*	16.20*	14.10*	150
Día 4	15.7	15.70*	15.8	15.20*	11.5	44.6	14.30*	15.10*	31.5	14.10*	25.7	15.00*	39.6	12.80*	17.8	14.50*	15.90*	14.40*	150
Día 5	14.60*	14.70*	27.4	14.80*	13.60*	46.7	26.4	18.6	16.9	13.70*	33.9	15.00*	14.00*	12.60*	23.4	16.4	16.20*	15.70*	150
Día 6	14.80*	15.60*	16.1	14.60*	14.20*	13.10*	19.1	15.50*	21.7	13.10*	32.5	15.00*	13.60*	28.2	15.7	15.30*	15.60*	14.10*	150
Día 7	14.90*	15.50*	25.3	17.1	23.9	15.6	13.40*	16.10*	15.50*	13.80*	31	15.10*	14.30*	19.8	15.80*	18.5	16.00*	13.50*	150
Día 8	15.60*	15.70*	33.9	18	20.9	22.1	14.90*	14.00*	32.8	13.80*	49.9	15.10*	14.00*	12.9	15.80*	14.90*	16.70*	13.80*	150
Día 9	11.00*	16.30*	18.3	22.8	18.6	14.10*	22.4	15.70*	15.50*	13.20*	57.8	13.80*	13.30*	19	15.80*	15.20*	16.20*	15.40*	150
Día 10	16.30*	15.00*	22.7	13.70*	15.70*	15.60*	21.6	15.70*	45.4	14.20*	61	15.10*	13.00*	23.2	15.60*	15.40*	15.60*	14.40*	150
Día 11	14.20*	15.70*	19.6	15.30*	15.90*	12.80*	24.6	16.20*	31.6	14.70*	43.5	15.10*	13.70*	15.80*	28.1	14.80*	16.10*	14.10*	150
Día 12	14.00*	15.60*	15.20*	15.00*	14.50*	21	13.20*	15.80*	25.8	13.70*	55.6	15.10*	13.00*	15.80*	17.3	15.40*	15.90*	13.50*	150
Día 13	13.80*	15.70*	18.2	15.60*	15.50*	13.80*	15.30*	14.80*	26.6	14.00*	32.5	15.10*	13.00*	26.7	15.70*	15.30*	14.30*	16.00*	150
Día 14	13.80*	15.00*	29.2	15.30*	15.80*	12.60*	15.10*	11.90*	17.6	13.30*	34.8	14.20*	13.00*	15.80*	20.9	15.10*	16.30*	14.20*	150
Día 15	14.00*	15.70*	19.6	23.7	13.90*	24.3	19.2	14.70*	16.3	13.60*	41.9	15.10*	14.10*	25.8	15.60*	13.50*	16.30*	13.50*	150
Día 16	13.50*	15.70*	16.6	30.7	13.50*	14.80*	32.3	15.80*	30.2	14.90*	48.3	15.20*	13.40*	30.1	20.6	15.40*	15.70*	13.50*	150
Día 17	14.20*	15.70*	14.20*	23.5	13.20*	14.50*	14.30*	15.70*	13.30*	14.30*	57.3	15.20*	13.10*	15.50*	15.90*	15.40*	16.30*	14.50*	150
Día 18	15.40*	15.60*	14.80*	21.1	15.70*	31.6	15.20*	15.70*	15.80*	14.30*	60.5	15.10*	13.70*	15.80*	24.7	14.80*	15.60*	14.50*	150
Geomét	14.93	15.78	18.96	18.11	16.56	20.78	19.71	15.92	21.89	13.87	42.45	14.88	14.82	17.46	18.41	15	16.35	14.52	150
Aritmét	15.47	15.87	19.64	18.65	17.16	27.56	21.09	16.13	23.72	13.88	44.13	14.89	15.52	18.27	19.02	15.05	16.46	14.55	150

*Concentraciones calculadas con el valor mínimo detectable para (LCM NO₂ = 0.05 µg/ml de Solución)

Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

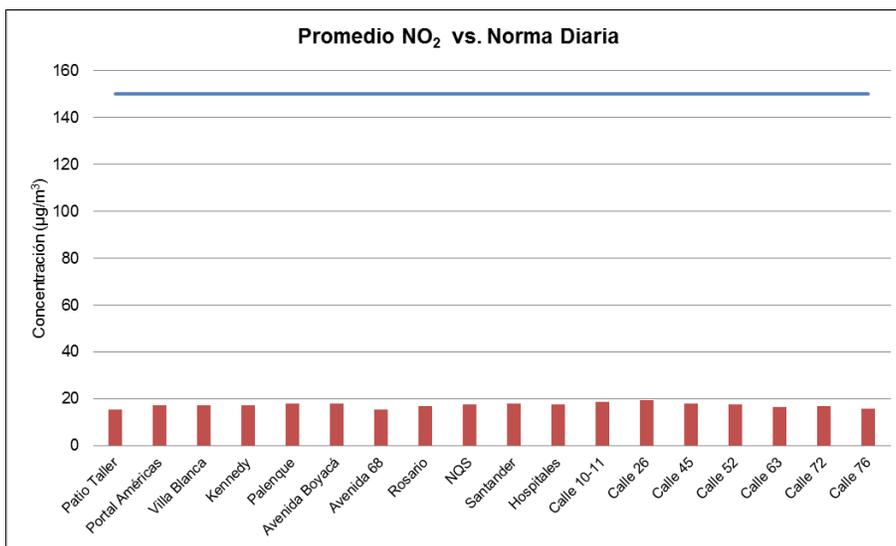


Figura 34. Concentraciones diarias de NO₂ vs. Norma

Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

5.4 CONCENTRACIÓN DE SO₂

Al igual que para NO₂, las muestras de SO₂ fueron recolectadas mediante equipos RAC 3 gases y cuentan con los criterios de aceptación de calidad establecidos por el Protocolo de Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire desarrollado por el MADS, el cual establece un tiempo mínimo de 23 horas de monitoreo.

5.4.1 SO₂ diaria vs. Norma

En la Tabla 19 se presentan los resultados de SO₂ obtenidos en cada estación durante el periodo de monitoreo.

Los valores de concentración reportados con asterisco (*) se calcularon con el valor mínimo detectable del método (LCM SO₂ = 0.77 µg/10 ml de Solución), lo cual indica que estas concentraciones se encuentran en niveles muy bajos o en su defecto no se presenta concentración alguna de este parámetro. Los demás valores reportados superan el mínimo detectable, más no la norma diaria para SO₂ que es de 250 µg/m³ dado por la Resolución 610 de 2010 del MAVDT actual MADS. En consecuencia todas las concentraciones reportadas no exceden la norma diaria y cumplen con lo establecido en dicha Resolución, (Ver Figura 35).

Tabla 19. Concentraciones diarias de SO₂ vs. Norma

	Patio Taller	Portal Américas	Villa Blanca	Kennedy	Palenque	Avenida Boyacá	Avenida 68	Rosario	NQS	Santander	Hospitales	Calle 10-11	Calle 26	Calle 45	Calle 52	Calle 63	Calle 72	Calle 76	Norma Diaria (µg/m ³)
Día 1	18.3	16.30*	18.00*	15.70*	14.30*	17.60*	15.80*	16.30*	23	17.70*	17.20*	24.2	52.1	17.50*	17.50*	15.50*	14.00*	16.10*	250
Día 2	17.90*	15.60*	17.70*	15.80*	18.60*	17.70*	14.50*	13.70*	17.10*	15.60*	16.90*	17.80*	16.9	14.80*	15.90*	17.30*	17.20*	17.60*	250
Día 3	42.2	17.40*	17.40*	18.40*	18.60*	17.70*	17.30*	16.80*	17.50*	18.70*	16.80*	17.90*	14.50*	18.00*	17.70*	16.30*	16.50*	15.20*	250
Día 4	18.5	17.60*	16.50*	18.00*	22.9	17.60*	13.30*	12.80*	17.50*	18.80*	16.90*	17.50*	42.9	24.8	17.60*	16.30*	17.20*	15.50*	250
Día 5	17.2	17.50*	16.60*	18.30*	18.20*	17.60*	14.40*	13.70*	17.10*	18.60*	17.30*	18.7	19	18.30*	17.70*	14.90*	15.50*	14.80*	250
Día 6	47.9	17.50*	17.30*	17.30*	22.7	17.90*	15.60*	17.60*	17.50*	18.00*	16.90*	17.90*	18.4	17.70*	18.00*	17.10*	17.20*	14.80*	250
Día 7	16.3	17.30*	17.10*	17.50*	17.70*	37.5	12.50*	18.30*	17.60*	16.70*	16.60*	18.7	17.2	17.70*	17.70*	16.40*	17.30*	14.10*	250
Día 8	17	17.20*	16.60*	16.70*	18.00*	17.50*	14.90*	17.00*	18.2	17.80*	17.40*	18.7	15.20*	17.70*	17.30*	16.90*	14.20*	14.90*	250
Día 9	18.7	18.30*	16.90*	16.80*	16.80*	17.70*	16.80*	17.80*	17.60*	17.80*	17.60*	30.3	21.1	17.60*	17.60*	17.20*	17.20*	17.60*	250
Día 10	17.6	16.90*	17.60*	14.60*	16.60*	17.70*	14.40*	17.70*	17.50*	18.20*	17.60*	17.70*	17	17.60*	17.50*	16.80*	17.20*	15.50*	250
Día 11	16.40*	17.20*	17.60*	17.90*	18.40*	15.30*	16.50*	18.40*	17.50*	18.40*	17.70*	17.80*	13.90*	17.70*	17.30*	16.00*	17.00*	16.20*	250
Día 12	16.60*	17.40*	17.70*	17.70*	16.80*	15.30*	13.30*	17.90*	17.10*	18.00*	17.90*	16.20*	14.20*	17.60*	17.30*	15.60*	17.20*	14.50*	250
Día 13	16.20*	17.50*	17.10*	17.40*	18.00*	15.30*	12.50*	17.60*	17.50*	17.60*	17.60*	17.60*	13.80*	18.00*	17.60*	16.70*	17.30*	17.60*	250
Día 14	16.40*	17.40*	17.40*	17.20*	18.20*	15.70*	17.50*	17.50*	17.60*	17.20*	17.70*	17.80*	14.30*	17.70*	18.00*	15.70*	17.20*	16.30*	250
Día 15	16.50*	17.20*	17.10*	18.20*	17.40*	16.30*	16.70*	16.70*	17.10*	17.50*	17.70*	16.30*	15.00*	17.70*	18.10*	15.70*	17.30*	14.80*	250
Día 16	15.80*	17.60*	17.00*	18.20*	17.30*	17.10*	15.60*	18.10*	17.60*	17.50*	17.90*	17.80*	13.90*	17.70*	17.70*	16.80*	17.30*	14.50*	250
Día 17	16.10*	17.50*	17.20*	17.50*	15.80*	16.00*	16.00*	17.90*	14.00*	18.60*	17.60*	16.40*	14.20*	17.70*	17.70*	16.80*	17.20*	14.20*	250
Día 18	17.50*	17.40*	16.80*	17.50*	18.30*	15.30*	15.70*	16.80*	17.50*	18.60*	17.70*	17.00*	14.90*	17.60*	17.60*	18.20*	17.10*	15.50*	250
Geomét	18.98	17.26	17.2	17.23	17.93	17.52	15.11	16.72	17.52	17.83	17.38	18.46	17.76	17.89	17.54	16.44	16.69	15.5	250
Aritmét	20.17	17.27	17.2	17.26	18.03	17.93	15.18	16.81	17.58	17.85	17.39	18.68	19.36	17.97	17.54	16.46	16.73	15.54	250

*Concentraciones calculadas con el valor mínimo detectable para (LCM NO₂ = 0.05 µg/ml de Solución)

Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

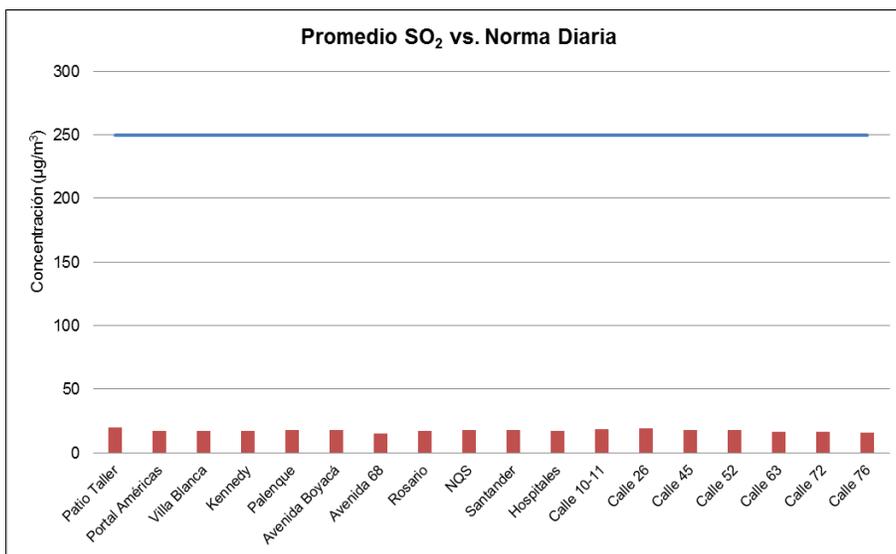


Figura 35. Concentraciones diarias de SO₂ vs. Norma

Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

5.5 CONCENTRACIÓN DE CO

Las muestras en las dieciocho (18) estaciones evaluadas fueron recolectadas mediante un equipo automático (Analizador infrarrojo no dispersivo), el cual fue rotado por cada una de las estaciones para obtener el mínimo número de días que fueran representativos para cada estación y cuentan con los criterios de aceptación de calidad establecidos por el Protocolo de Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire desarrollado por el MADS, el cual, establece un tiempo mínimo de monitoreo de 24 horas⁹ en cada estación.

5.5.1 CO diaria vs. Norma

En la Figura 36 se presenta gráficamente el comportamiento de las concentraciones promedio horarias de CO obtenidas en cada una de las dieciocho estaciones. Se evidencia que ninguno de los valores promedios máximos exceden la norma horaria de 40,000 µg/m³, establecida para CO en la Resolución 610 de 2010.

⁹ Resolución 2154 del 2010 // Protocolo de monitoreo y seguimiento de la Calidad del Aire.

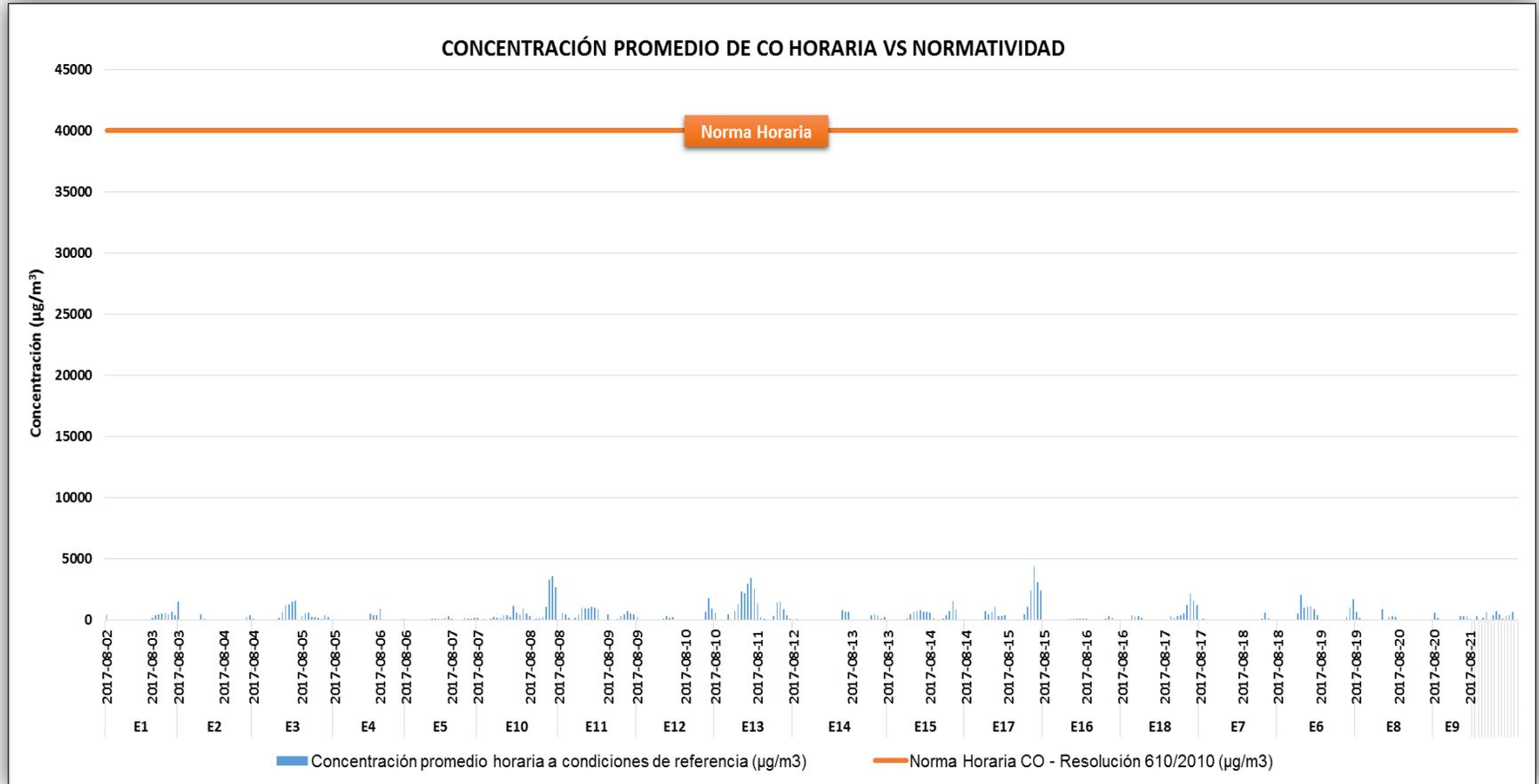


Figura 36. Concentraciones promedio horarias de CO vs. Norma
Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

5.5.2 CO octahoraria vs. Norma

Para realizar el promedio octahorario horario, se determina la media móvil para cada estación durante los días de medición. En la Figura 37 se presenta el comportamiento de la media móvil calculada para cada estación.

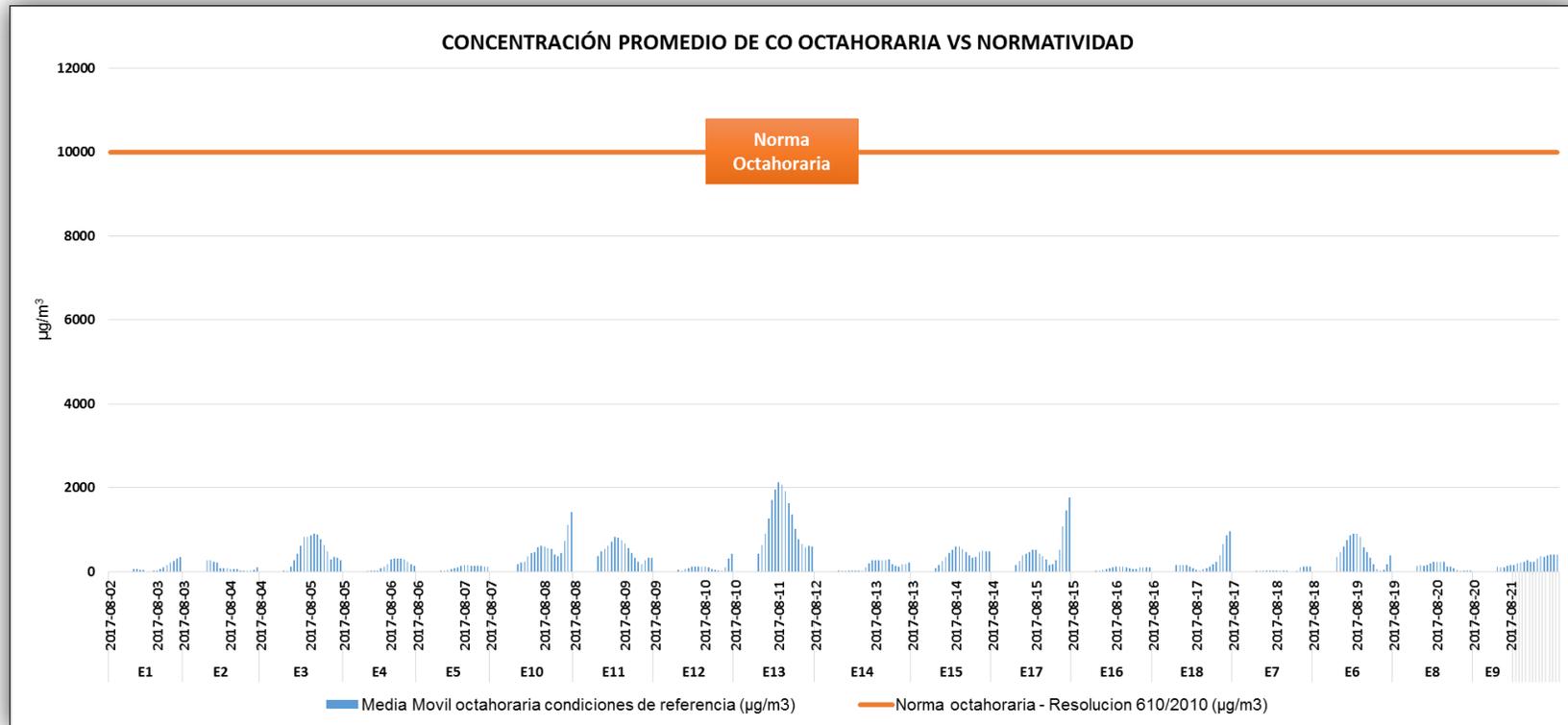


Figura 37. Media móvil octahoraria de CO vs. Norma

Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

5.6 VOC's EXPRESADOS COMO BTX

En la Tabla 20 se consolidan los resultados promedio para cada punto de medición. El tiempo de exposición correspondió a 18 días para cada determinación realizada en cada punto, los promedios han sido corregidos a condiciones de referencia de 25°C y 760 mmHg como lo establece la normatividad.

Tabla 20. Consolidado resultados BTX ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Punto	Nombre	Fecha Inicio	Fecha Final	Benceno	Tolueno	Etilbenzeno	p-xileno	m-xileno	o-xileno
1	Patio Taller	31/07/2017	19/08/2017	1.30	6.55	1.29	1.24	2.63	1.12
2	Portal Américas	31/07/2017	19/08/2017	4.59	25.31	5.06	4.95	11.78	4.48
3	Villa Blanca	31/07/2017	19/08/2017	3.84	20.78	3.45	3.53	8.26	2.94
4	Kennedy	31/07/2017	19/08/2017	2.42	10.63	2.47	2.51	5.67	2.26
5	Palenque	31/07/2017	19/08/2017	1.82	9.68	2.05	2.14	4.48	1.64
6	Avenida Boyacá	31/07/2017	19/08/2017	3.74	14.40	3.20	2.97	7.17	2.91
7	Avenida 68	31/07/2017	19/08/2017	2.31	13.95	3.20	2.96	6.52	2.52
8	Rosario	31/07/2017	19/08/2017	2.19	13.73	2.45	2.55	5.75	2.06
9	NQS	31/07/2017	19/08/2017	3.04	26.72	8.78	9.67	22.91	6.20
10	Santander	01/08/2017	19/08/2017	1.97	17.17	2.48	2.38	5.18	2.06
11	Hospitales	01/08/2017	19/08/2017	5.55	26.90	5.35	4.96	11.59	5.38
12	Calle 10-11	01/08/2017	19/08/2017	1.68	24.58	2.27	2.32	5.51	2.00
13	Calle 26	01/08/2017	19/08/2017	1.92	14.03	2.30	2.32	5.04	1.98
14	Calle 45	01/08/2017	19/08/2017	2.19	7.22	1.83	1.56	3.38	1.72
15	Calle 52	01/08/2017	19/08/2017	1.82	8.22	1.75	1.69	3.29	1.39
16	Calle 63	01/08/2017	19/08/2017	1.76	14.39	2.49	2.32	5.17	2.02
17	Calle 72	01/08/2017	19/08/2017	1.89	13.15	3.42	3.35	7.75	2.67
18	Calle 76	01/08/2017	19/08/2017	2.12	13.39	2.33	2.06	4.79	2.07

Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S. con información de Passam Ltd.

La Figura 38 muestra los resultados de los hidrocarburos totales expresados como BTX, (Benceno, Tolueno, Etilbenzeno, p-xileno, m-xileno y o-xileno). Se puede evidenciar las mayores concentraciones de los contaminantes no convencionales, se reportan en las estaciones NQS, Hospitales y Portal Américas.

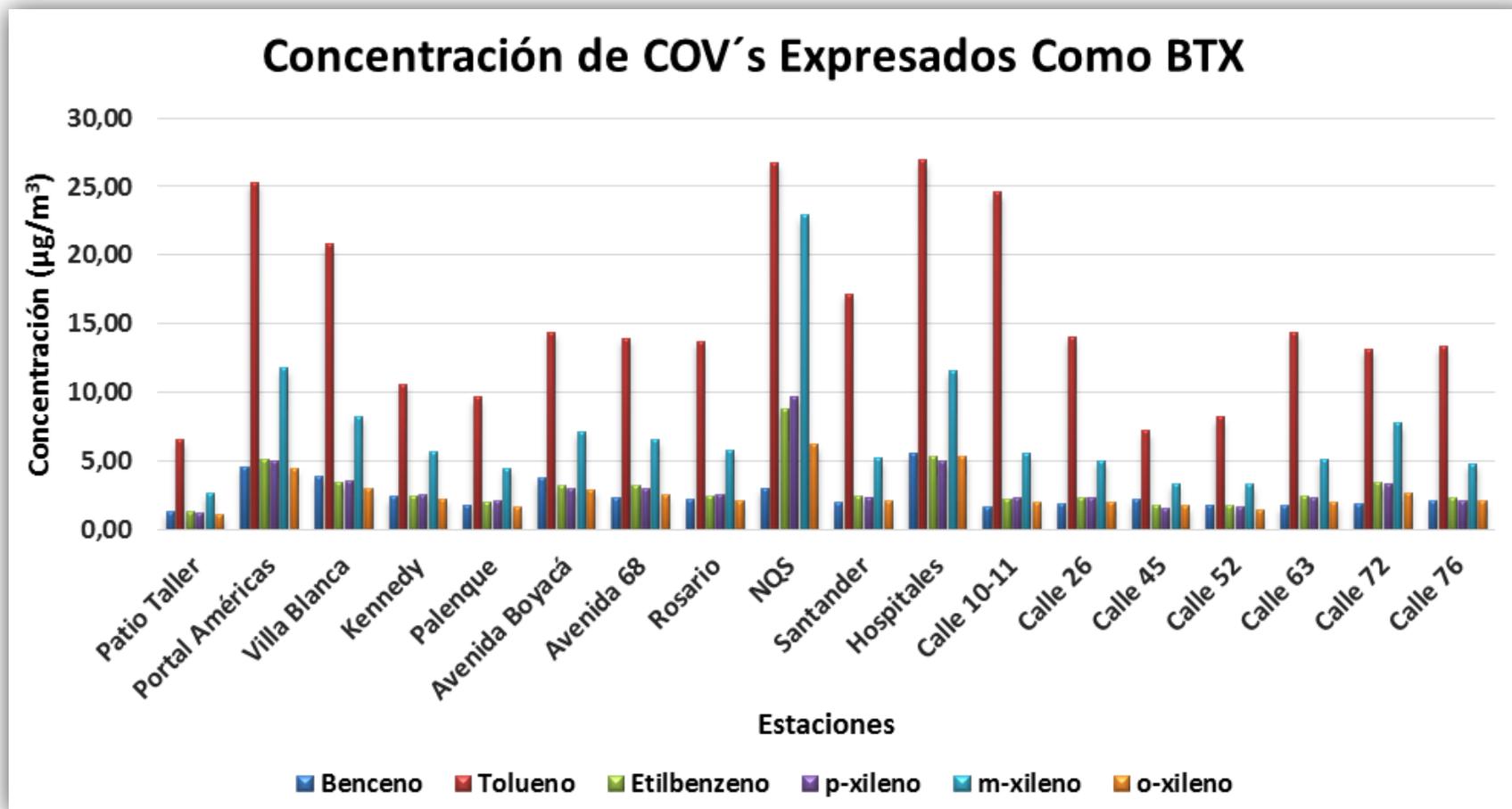


Figura 38. Resultados de VOC's expresados como BTX

Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S. con información de Passam Ltd.

5.6.1 VOC's vs. Norma

La Resolución 610 de 2010, en sus lineamientos respecto al nivel máximo permisible de exposición para el Benceno establece una concentración de 5.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y para el Tolueno de 260 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Los demás contaminantes analizados, no se encuentran regulados por la normatividad colombiana. En la Tabla 21 se presentan los valores de concentración promedio de Benceno y Tolueno obtenidos en las dieciocho estaciones durante el periodo de monitoreo (18 días) y una comparación *indicativa* con los estándares de la Resolución 610 de 2010. No es posible realizar un comparación absoluta de los resultados obtenidos con la normatividad, porque la resolución de medición del monitoreo de calidad del aire de este informe (18 días) no coincide con la resolución establecida para los estándares definidos en la normatividad del Benceno y el Tolueno. Por lo anterior, las comparaciones, así como lo establece el *Protocolo Para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire en el Manual de Diseño* en su sección 4.4.4., son *indicativas y no concluyentes*.

Tabla 21. Comparativa indicativa de Benceno y Tolueno con la normatividad.

Estación	Benceno [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	Tolueno [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	Norma Para Benceno [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]*	Norma Para Tolueno [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]**
Patio Taller	1.30	6.55	5.0	260
Portal Américas	4.59	25.31	5.0	260
Villa Blanca	3.84	20.78	5.0	260
Kennedy	2.42	10.63	5.0	260
Palenque	1.82	9.68	5.0	260
Avenida Boyacá	3.74	14.40	5.0	260
Avenida 68	2.31	13.95	5.0	260
Rosario	2.19	13.73	5.0	260
NQS	3.04	26.72	5.0	260
Santander	1.97	17.17	5.0	260
Hospitales	5.55	26.90	5.0	260
Calle 10-11	1.68	24.58	5.0	260
Calle 26	1.92	14.03	5.0	260
Calle 45	2.19	7.22	5.0	260
Calle 52	1.82	8.22	5.0	260
Calle 63	1.76	14.39	5.0	260
Calle 72	1.89	13.15	5.0	260
Calle 76	2.12	13.39	5.0	260

*Norma para tiempo de exposición anual. **Norma para tiempo de exposición semanal

Fuente: INGENIERÍA K2 S.A.S. con información de Passam Ltd.

Al comparar indicativamente los valores de concentración reportados durante los días de monitoreo con el nivel máximo permisible de 260 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para el Tolueno

(semanal) establecido por la Resolución 610 de 2010 del MAVDT actual MADS, se evidencia que cumplen con la normatividad. Con respecto a las concentraciones de Benceno, en la estación Hospitales se reporta una concentración ($5.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$) que excede el máximo permisible, las demás concentraciones cumplen con la norma. En la Figura 39 y Figura 40 se presenta de manera gráfica la comparación indicativa mencionada.

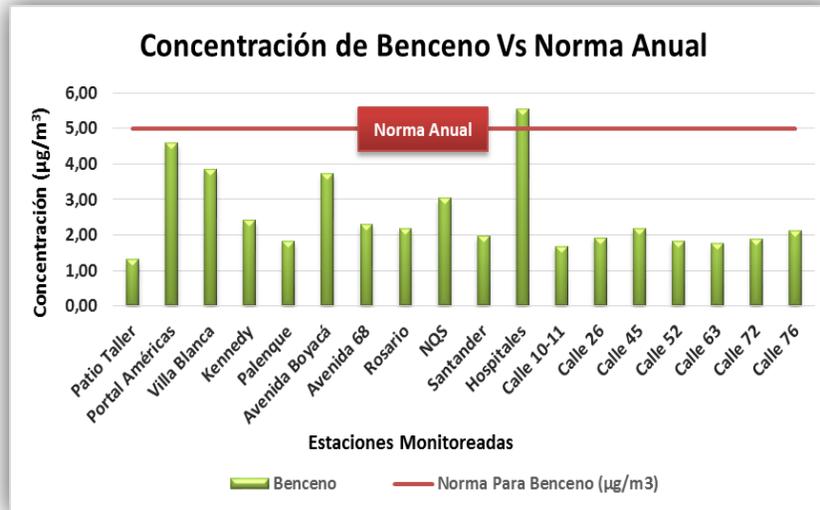


Figura 39. Concentración de Benceno vs. Norma
Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S. con información de Passam Ltd.

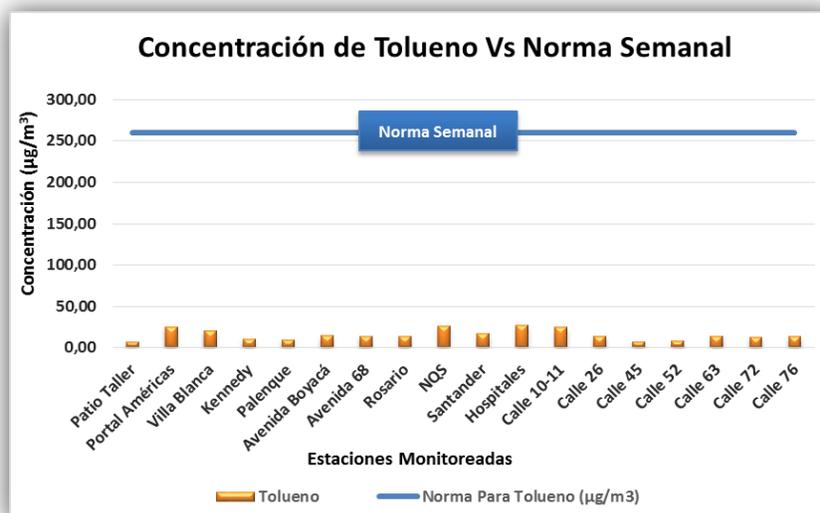


Figura 40. Concentración de Tolueno vs. Norma
Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S. con información de Passam Ltd.

6. ESTIMACIÓN Y CÁLCULO DE EMISIONES

A continuación se presenta el desarrollo del modelo de dispersión de contaminantes – PM₁₀, PM_{2.5}, NO₂, SO₂, CO y VOC para el proyecto “MODELO DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES “ESTRUCTURACIÓN TÉCNICA DE LA PRIMERA LÍNEA DEL METRO DE BOGOTÁ (PLMB)”, UBICADO EN EL ÁREA URBANA DE BOGOTÁ, DEPARTAMENTO DE CUNDINAMARCA, PARA LA EMPRESA INGETEC S.A”. El Anexo 3 contiene todos los datos de entrada utilizados para el cálculo de emisiones por escenario para los contaminantes mencionados. Adicionalmente en esta sección se expone la metodología utilizada para la idealización de fuentes y definición de parámetros (datos de entrada) del modelo de dispersión de contaminantes AERMOD.

6.1 INVENTARIO DE EMISIONES – ESCENARIOS DE MODELACIÓN

Para realizar la estimación de emisiones originadas por las obras del proyecto se hace necesario consolidar un inventario de emisiones en el que se identifiquen las principales fuentes de emisión de contaminantes, estas son descritas a continuación:

6.1.1 Escenario 1: Línea Base (Año 2016)

Este escenario se realizará con el objetivo de determinar el aporte a la calidad del aire en el área del proyecto y poder comparar las emisiones en las diferentes etapas de la PLMB, para este escenario se tuvo en cuenta solo tráfico rodado; posteriormente se adiciona la concentración de fondo para cada receptor. Es importante resaltar que las estaciones del monitoreo presentan aportes de todas las fuentes de la zona (actividades antropogénicas, industriales, tráfico rodado entre otras) y el desarrollo de la modelación de la línea base presenta la estimación de las emisiones por tráfico vehicular en las vías de los corredores de la PLMB.

6.1.2 Escenario 2: Construcción

Durante el desarrollo de esta etapa incluyen actividades propias de construcción pesada (remoción, excavación, cargue, descargue, entre otras), las cuales se presentaron en mayor detalle en la sección 2.2. En este escenario se estiman las emisiones generadas por las actividades de construcción en las siguientes zonas:

- Patio taller
- Tramo 1: Columnas, estaciones y vías.
- Tramo 2: Columnas, estaciones y vías.

6.1.3 Escenario 3: Operación del proyecto (Año 2042)

Teniendo en cuenta que el sistema de funcionamiento del metro es eléctrico, este no genera ningún tipo de emisiones atmosféricas, este escenario se plantea con el fin de estimar el impacto en las emisiones de contaminantes en los corredores; especialmente sobre la Avenida Caracas, en la cual se tiene proyectado reducir el tráfico vehicular para el año 2042.

6.2 CÁLCULO DE EMISIONES

Para el cálculo de las emisiones de las principales fuentes y actividades consideradas se tomaron las disposiciones establecidas en el *AP-42 Compilation of Air Pollutant Emission Factors. Volume I: Stationary Point and Area Sources*. En el AP-42 se establece la ecuación que determinará el factor de emisión para actividades específicas.

Un factor de emisión es un valor representativo que intenta relacionar la cantidad de un contaminante emitido a la atmósfera con un valor de actividad asociada con la descarga de ese contaminante, así mismo, estos factores se expresan normalmente como el peso del contaminante dividido por una unidad de peso. Volumen, distancia o la duración de la actividad de emisión de contaminante. Estos factores facilitan la estimación de las emisiones de las diversas fuentes de contaminación al aire. La ecuación general para la estimación de las emisiones es:

$$E = A * EF * \left(1 - \frac{ER}{100}\right)$$

Ecuación 1
Fuente: AP 42

Dónde:

E= emisión. A= tasa de actividad. ER= factor de emisión y ER= % de eficiencia de reducción global de emisiones.

De forma complementaria se usaron los siguientes documentos del AP-42 y NPI:

- Capítulo 3 Sección 3.3 Gasoline and Diesel Industrial Engines
- Capítulo 11 Sección 11.9 Western Surface Coal Mining
- Capítulo 13 Sección 13.2.1 *Paved Roads*
- Capítulo 13 Sección 13.2.3 Heavy Construction Operations
- Capítulo 13 Sección 13.2.4. *Aggregate Handling and Storage Piles*.
- *National Pollutant Inventory (NPI) Emission Technique manual for Mining. EIQ Form 2.8. Storage Pile Worksheet Instructions for form 780-1446.*

- EPA420-P-04-009 *Exhaust and Crankcase Emission Factors for Nonroad Engine Modeling – Compression Ignition.*
- EPA68-D7-0068 *Estimating Particulate Matter Emissions from construction operations*

En el anexo 3 se presentan los cálculos de las emisiones.

6.2.1 Factores de emisión

Los factores de emisión que se utilizaron para el cálculo de emisiones de material particulado PM₁₀ en las diferentes actividades se relacionan en la Tabla 22 para los escenarios 1 y 3, mientras los factores de emisión del escenario 2 (construcción) se presentan en la tabla Tabla 23.

Tabla 22. Factores de emisión para PM₁₀ Escenario Línea Base y Operación

Operación	Actividad	Factor de Emisión	Unidades
Transporte de Autos, buses, camiones y motos	Transporte en vías pavimentadas	$k'(sL)^{0.91}(W)^{1.02}\left(1 - \frac{P}{4N}\right)^*$	kg PM ₁₀ /VKT

Fuente: AP-42. Compilation of Air Pollutant Emission Factors y National Pollutant Inventory - NPI

Tabla 23. Factores de emisión para PM₁₀ Escenario construcción

Operación	Actividad	Factor de Emisión	Unidades
Manejo de Materiales	Remoción o empuje (Bulldozing)	$0.75 \times 0.45 \times \left[\frac{(s)^{1.5}}{(M)^{1.4}} \right]$	kg PM10/h
	Cargue y descargue	$k \times 0.0016 \times \left[\frac{(U/2.2)^{1.3}}{(M/2)^{1.4}} \right]$	kg PM ₁₀ /Mg
	Perforación	0.31	Kg PM10/Hoyos
Transporte de materiales	Transporte de materiales vías	$k'(sL)^{0.91}W\left(1 - \frac{P}{4N}\right)^*$	kg PM ₁₀ /VKT
Actividades de construcción de vías	Construcción de Vías	0.42	kg PM ₁₀ /acres/mes

Fuente: AP-42. Compilation of Air Pollutant Emission Factors y National Pollutant Inventory - NPI

Dónde:

a. b. c. d. k: Constantes Empíricas (ad).

b': Días de almacenamiento o exposición del material (días).

c': Días secos en el año (días).

- C: Factor de emisión en flota vehicular para: escape, uso de frenos y desgaste de neumáticos (lb/VMT).
- CE: Eficiencia de control de polvo en vías no pavimentadas. (%).
- d': Altura media de descarga. (m).
- e: % de tiempo con viento >5.33 m/s. (%).
- k': Multiplicador de tamaño de partícula (ad).
- M: Contenido de humedad del material manejado. (%).
- p: Número de días en el año con mínimo 0.254 mm de lluvia (días).
- s: Contenido de finos (pasa malla 200) del material manejado o de la superficie de las vías. (%).
- S: Velocidad promedio del vehículo (km/h).
- sL: Carga de finos (pasa malla 200) del material manejado o de la superficie de las vías. (g/m²).
- U: Velocidad del viento (m/s).
- W: Peso promedio de los vehículos (toneladas cortas).
- PM₁₀: Material Particulado con diámetro aerodinámico inferior a 10 µm.
- VKT: Kilómetros viajados por un vehículo (km).
- *: Se utiliza un factor multiplicador de 2.8185x10⁻¹ para convertir de lb/VMT a kg/VKT
- ** : Se utiliza un factor multiplicador de 1.1219x10⁻⁴ para convertir de lb/Acre a kg/m²

Los valores de cada una de estas variables se encuentran detallados en el anexo 3 y en las secciones 6.4. En la sección 6.2.2 se encuentran detallados los porcentajes de eficiencia de los sistemas de control de emisiones de material particulado utilizados; la aplicación de estos porcentajes sobre los valores de emisiones sin control nos permite obtener los valores presentados como “emisiones con control”.

La Tabla 25 presenta los factores de emisión utilizados en el cálculo de emisiones de material particulado PM_{2.5} en las diferentes actividades de los escenarios 1 y 3. En la Tabla 25 se observan los factores de emisión del escenario 2.

Tabla 24. Factores de emisión para PM_{2.5} Escenario Línea Base y Operación

Operación	Actividad	Factor de Emisión	Unidades
Transporte de Autos, buses, camiones y motos	Transporte en vías pavimentadas	$k'(sL)^{0.91}(W)^{1.02}\left(1 - \frac{P}{4N}\right)^*$	kg PM ₁₀ /VKT

Fuente: AP-42. Compilation of Air Pollutant Emission Factors y National Pollutant Inventory - NPI

Tabla 25. Factores de emisión para PM_{2.5} Escenario Construcción

Operación	Actividad	Factor de Emisión	Unidades
Manejo de Materiales	Remoción empuje (Bulldozing) o	$0.75 \times 0.45 \times \left[\frac{(s)^{1.5}}{(M)^{1.4}} \right]$	kg PM _{2.5} /h
	Cargue descargue y	$k' \times 0.0016 \times \left[\frac{(U/2.2)^{1.3}}{(M/2)^{1.4}} \right]$	kg PM _{2.5} /Mg

	Perforación	0.1643	Kg PM _{2.5} /Hoyos
Transporte de materiales	Transporte de materiales vías	$k'(sL)^{0.91} W \left(1 - \frac{P}{4N}\right)^*$	kg PM _{2.5} /VKT
Actividades de construcción de vías	Construcción de Vías	0.22	kg PM _{2.5} /acres/mes

Fuente: AP-42. Compilation of Air Pollutant Emission Factors y National Pollutant Inventory - NPI

Dónde:

- a. b. c. d. k:* Constantes Empíricas (ad).
- b'*: Días de almacenamiento o exposición del material (días).
- c'*: Días secos en el año (días).
- C:* Factor de emisión en flota vehicular para: escape. Uso de frenos y desgaste de neumáticos (lb/VMT).
- CE:* Eficiencia de control de polvo en vías no pavimentadas. (%).
- d'*: Altura media de descarga. (m).
- k'*: Multiplicador de tamaño de partícula (ad).
- M:* Contenido de humedad del material manejado. (%).
- p:* Número de días en el año con mínimo 0.254 mm de lluvia (días).
- s:* Contenido de finos (pasa malla 200) del material manejado o de la superficie de las vías. (%).
- S:* Velocidad promedio del vehículo (km/h).
- sL:* Carga de finos (pasa malla 200) del material manejado o de la superficie de las vías. (g/m²).
- U:* Velocidad del viento. (m/s).
- W:* Peso promedio de los vehículos (toneladas cortas).
- PST:* Partículas suspendidas totales, llamadas también TSP por su sigla en inglés.
- VKT:* Kilómetros viajados por un vehículo (km).
- **: Se utiliza un factor multiplicador de 2.8185×10^{-1} para convertir de lb/VMT a kg/VKT
- **:* Se utiliza un factor multiplicador de 1.1219×10^{-4} para convertir de lb/Acre a kg/m²

Los valores de cada una de estas variables para el escenario de modelación, se encuentran en el anexo 3. En la sección 6.2.2 se encuentran detallados los porcentajes de eficiencia de los sistemas de control de emisiones que se utilizan para mitigar las emisiones de material, estos valores son utilizados para estimar los valores presentados como emisiones “con control”. En la Tabla 26 se presentan factores de emisión relacionados a otras actividades tanto para material particulado como para NO₂, SO₂, CO y VOC, es importante aclarar que las emisiones de VOC en los equipos fuera de vía se calcularon como HC (hidrocarburos totales) debido a la inexistencia del factor de emisión para esta actividad.

Tabla 26. Factores de emisión relacionados a otras actividades

Actividad	Factor de Emisión	Unidades
Tubo de escape equipos en vías	Software Mobile 6.2	g/Vehículo-milla
Combustión interna equipos fuera de vías	$(BSFC*(1-soxcnv)-HC)*soxds!^2 *$	g/hp-h
	$LF*P*EF **$	g/h

Fuente: AP-42. Compilation of Air Pollutant Emission Factors y National Pollutant Inventory - NPI

Dónde:

BSFC: Consumo ajustado de combustible, lb/hp-h

soxcnv: Fracción de azufre en el diésel convertida de forma directa a PM.

soxds!: Máximo porcentaje en peso de azufre en combustible diésel permitido en Colombia, 50 ppm (Ley 1205. 14 de julio de 2008 – 47.050 Diario oficial).

HC: Emisiones de hidrocarburo ajustadas, (g/hp-h)

LF: Factor de carga, (%).

P: Potencia del motor, (hp).

EF: Factor de emisión, (g/hp-h).

* Ecuación aplica sólo para estimación de emisiones de SO₂.

** Ecuación aplica para estimación de emisiones de PM₁₀, NO₂ y CO.

Los valores de cada una de estas variables para el escenario de modelación, se encuentran detallados en el anexo 3, y en la sección 6.4 .

6.2.2 Eficiencia de los sistemas de control:

El control de polvo es indispensable para preservar la calidad del aire ambiental, es por esta razón que INGETEC S.A. propende por garantizar la aplicación eficaz de agua mediante riego y humectación permanente en áreas de manejo de materiales.

Los porcentajes de control de emisiones según la actividad fueron tomados del NPI (*National Pollutant Inventory*) con referencia a actividades de construcción ajustando lo descrito en el programa de manejo de emisiones atmosféricas, ver Tabla 27.

Tabla 27. Estrategias de Control de Emisiones

Actividad	Eficiencia Media Del Control De Emisiones	Descripción
1. OPERACIONES DE MANEJO DE MATERIALES		
1.1 Remoción y empuje (bulldozing)	40%	Humectación del material de forma natural o artificial
1.2 Descargue	50%	Rociadores de agua

Fuente: AP-42: Compilation of Air Pollutant Emission Factors y National Pollutant Inventory – NPI.

6.3 MANEJO DE MATERIALES

Dada la orientación del estudio hacia la evaluación de la incidencia sobre la calidad del aire del entorno de emisiones que tendrían lugar durante la etapa de construcción de la PLMB – Sección 6.1.2. Se estimaron concentraciones para los contaminantes PM₁₀, PM_{2.5}, CO, NO₂, SO₂ y COV. En la Tabla 28 se presenta el movimiento total de materiales en los seis (6) tramos designados para escenario 2.

Tabla 28. Descripción de movimiento de materiales por tramos

Volúmenes de materiales por año (m ³)						
Actividad	Tramo 1_Sección 1	Tramo 1_Sección 2	Tramo 1_Sección 3	Tramo 1_Sección 4	Tramo 2_Sección 1	Tramo 2_Sección 2
Excavaciones	111,977.12	98,925.07	103,758.66	122,427.69	88,325.69	82,699.05
Descapote	17,830.20	15,751.91	16,521.57	19,494.25	14,064.16	13,168.23
Demolición	11,500.00	10,159.56	10,655.97	12,573.27	9,071.01	8,493.16
Relleno Material Granular	35,659.79	31,503.28	33,042.57	38,987.83	28,127.85	26,336.01
Concretos	43,715.27	38,619.82	40,506.82	47,795.11	34,481.87	32,285.26
Asfaltos	4,424.27	3,908.58	4,099.55	4,837.18	3,489.79	3,267.48
TOTAL	225,106.65	198,868.22	208,585.14	246,115.34	177,560.38	166,249.19

Fuente: INGETEC S.A.

El material a utilizar en las actividades mencionadas anteriormente será distribuido en tres fuentes (estaciones, vías y columnas) conforme a los porcentajes de la Tabla 29.

Tabla 29. Porcentaje de material por fuente

Porcentaje de Volumen (m ³)						
Fuente	Tramo 1_Sección 1	Tramo 1_Sección 2	Tramo 1_Sección 3	Tramo 1_Sección 4	Tramo 2_Sección 1	Tramo 2_Sección 2
Estaciones	10	40	35	45	32	45
Vías	68	35	38	25	47	36
Columnas	22	25	27	30	21	19

Fuente: INGETEC S.A.

En la Tabla 30 se especifica el movimiento de materiales en el Patio taller.

Tabla 30. Descripción de movimiento de materiales

Volúmenes Patio Taller [m ³]	
Descapote	60,000
Demolición	181,129.2
Relleno Nivelación	2,340,000
Relleno Material Granular	180,000

Fuente: INGETEC S.A.

6.4 VARIABLES PARA EL CÁLCULO DE LA EMISIÓN

6.4.1 Escenarios línea Base y operación

Se presenta la descripción de los tramos usados para los escenarios línea base y operación de acuerdo a la información suministrada por Ingetec S.A, ver Tabla 31.

Tabla 31. Descripción tramos línea base y operación

Tramo	Descripción
Tramo 1	AV VILLAVICENCIO (ALO - AV PRIMERO DE MAYO)
Tramo 2	AV PRIMERO DE MAYO (AV VILLAVICENCIO - AV BOYACA)
Tramo 3	AV PRIMERO DE MAYO (AV BOYACA - AV NQS)
Tramo 4	AV NQS (AV PRIMERO DE MAYO - AV CALLE 1)
Tramo 5	AV CALLE 1 (AV CALLE 8 SUR - AV CARACAS)
Tramo 6	AV CARACAS (AV CALLE 1 - AV CALLE 26)
Tramo 7	AV CARACAS (AV CALLE 53 - AV CALLE 76)

Fuente: INGETEC S.A.

En la Tabla 32 se presentan las características de los vehículos que circulan en las diferentes vías del proyecto. La velocidad promedio se aproxima a 25 km/h, de acuerdo a estudios de movilidad realizados en la ciudad. (Bogotá Como Vamos)

Tabla 32. Características de la flota vehicular

Tipo de vehículo	Peso Promedio (short ton)	Velocidad promedio (km/h)
Buses	16.25	25
Camiones	18.74	25
Autos	1.14	25
Motos	0.15	25

Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

La Tabla 33, presenta el flujo vehicular diario en los diferentes tramos para el escenario línea base y la proyección para el escenario operación del proyecto PLMB.

Tabla 33. Parámetros en vías de acceso

Tramo	Carga de limos de la superficie (g/m ²)*	Longitud vía (km)	Línea Base	Operación
			Flujo Vehicular (Número de vehículos por tramo)	
Tramo 1	0.03	3.75	48,627	107,026

Tramo	Carga de limos de la superficie (g/m ²)*	Longitud vía (km)	Línea Base	Operación
			Flujo Vehicular (Número de vehículos por tramo)	
Tramo 2	0.03	2.64	87,652	192,913
Tramo 3	0.03	4.59	88,288	194,318
Tramo 4	0.03	2.39	169,468	388,969
Tramo 5	0.03	3.16	112,370	292,194
Tramo 6	0.03	2.88	65,443	56,755
Tramo 7	0.03	2.99	64,423	74,241

*Tomado de: AP-42, Capítulo 13 Sección 13.2.1 *Paved Roads*

Fuente: INGETEC S.A.

6.4.2 Escenario Construcción

En la Tabla 34 y Tabla 35 se presentan datos y características para la etapa de construcción y se integra la información relevante utilizada en la estimación de emisiones de material particulado y gases generadas por los diferentes procesos que componen la operación.

Tabla 34. Áreas de las fuentes evaluadas

Datos De Área	Unidades	Valor
Area Patio taller	m ²	313,767
Área estaciones tramo 1 sección 1		15,648.29
Área estaciones tramo 1 sección 2		92,142.28
Área estaciones tramo 1 sección 3		18,289.85
Área estaciones tramo 1 sección 4		48,807.53
Área estaciones tramo 2 sección 1		22,958.61
Área estaciones tramo 2 sección 2		52,705.44
Área vías tramo 1 sección 1		37,540.16
Área vías tramo 1 sección 2		43,098.57
Área vías tramo 1 sección 3		45,354.57
Área vías tramo 1 sección 4		53,495.61
Área vías tramo 2 sección 1		28,876.57
Área vías tramo 2 sección 2		31,453.97
Área Columnas tramo 1 sección 1		107.45
Área Columnas tramo 1 sección 2		122.1
Área Columnas tramo 1 sección 3		131.87
Área Columnas tramo 1 sección 4		146.52
Área Columnas tramo 2 sección 1		102.56
Área Columnas tramo 2 sección 2		92.8

Fuente: INGETEC S.A.

Tabla 35. Parámetros para el cálculo de emisiones

Datos De Actividades Y Materiales	Unidades	Valor
Densidad	g/cm ³	2.17
Contenido de limos de los materiales (S)	%	6.9
Contenido de humedad de materiales	%	32.59
Días de lluvia con precipitación mayor a 0.254 mm	días/periodo	198
Velocidad promedio del viento	m/s	3.45
Porcentaje de tiempo con velocidad del viento mayor a 5.36 m/s	%	19.02
Número de días de trabajo	Días/periodo	264
Número de meses modelados	Meses/periodo	12
Horas trabajadas en el periodo	Horas	2112

Fuente: INGETEC S.A.

En la Tabla 36 y Tabla 37 se presentan las características de los vehículos que transportarán los diferentes materiales y equipos usados en la etapa de construcción del proyecto.

Tabla 36. Equipos principales para la construcción

Equipos	Potencia (KW)	Potencia (HP)
RETROCARGADOR	68.6	92
RETROEXCAVADORA SOBRE ORUGAS	131.98	177
Grúa autopropulsada de brazo telescópico con una capacidad de elevación de 30 t y 27 m de altura máxima de trabajo	209.98	281.6
MOTONIVELADORA	141.68	190
BENITIN120	59.9	80.46
TERMINADORA DE ASFALTO	118.99	159.58
COMPACTADOR DE LLANTAS	97.99	131.42
MINICARGADOR	52.19	70
VIBROCOMPACTADOR PATECABRA	96.94	130
VIBROCOMPACTADOR	74.56	100
COMPRESOR	36.54	49
FRESADO DE PAVIMENTO	428.78	575
MARTILLO NEUMÁTICO 60 LB	58.16	78
VIGA LANZADORA	410.88	551

Nota: Se consideraron los principales vehículos y maquinaria fuera de vía que utilizan como combustible Diesel, por lo cual fueron asociados con las emisiones estándar del grupo TIER3.

Fuente: INGETEC S.A.

Tabla 37. Características Flota vehicular construcción

Flota para Transporte	Tipo	Peso (short ton)		Capacidad de carga (m ³)
		Vacío	Lleno	
Materiales	Volqueta	7	13.9	7
	Mixer	13	35	7

Nota: Se asumió que la flota vehicular utiliza como combustible Diesel

Fuente: INGETEC S.A.

La Tabla 38, presenta el flujo vehicular del transporte de materiales en los diferentes tramos, mientras que en la Tabla 39 se puede apreciar el flujo vehicular diario en los carriles habilitados en la etapa constructiva.

Tabla 38. Parámetros en vías de acceso en el transporte de materiales

Tramo	Carga de limos de la superficie (g/m ²)*	Longitud vía (km)	Transporte de Materiales
			Flujo Vehicular (Número de vehículos por tramo)
Tramo 1 sección 1	0.6	4.88	477,381
Tramo 1 sección 2	0.2	4.31	25,840
Tramo 1 sección 3	0.2	4.52	27,102
Tramo 1 sección 4	0.2	5.34	31,979
Tramo 2 sección 1	0.2	2.89	23,071
Tramo 2 sección 2	0.2	2.7	21,602

*Tomado de: AP-42, Capítulo 13 Sección 13.2.1 *Paved Roads*

Fuente: INGETEC S.A.

Tabla 39. Parámetros en vías de acceso en el transporte vehicular

Tramo	Carga de limos de la superficie (g/m ²)*	Longitud vía (km)	Flujo Vehicular (Número de vehículos por tramo)
Tramo 1 sección 1	0.03	4.88	57,754
Tramo 1 sección 2	0.03	4.31	104,102
Tramo 1 sección 3	0.03	4.52	104,861
Tramo 1 sección 4	0.03	5.34	202,312
Tramo 2 sección 1	0.03	2.89	29,559
Tramo 2 sección 2	0.03	2.7	26,581

*Tomado de: AP-42, Capítulo 13 Sección 13.2.1 *Paved Roads*

Fuente: INGETEC S.A.

Es importante aclarar que para la estimación de emisiones por transporte de materiales se consideró lo siguiente:

- Los materiales se van a transportar sobre los mismos tramos del proyecto, por esta razón la distancia que el vehículo tiene que recorrer es la de cada tramo en particular. Ver Tabla 38.
- Las emisiones por el transporte de materiales del patio taller fueron asignadas al Tramo1 sección 1.

En el anexo 3 se presenta el cálculo de emisiones.

7. RESULTADOS DEL INVENTARIO DE EMISIONES ATMOSFÉRICAS

En este capítulo se presentan las emisiones calculadas para las operaciones del proyecto “MODELO DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES “ESTRUCTURACIÓN TÉCNICA DE LA PRIMERA LÍNEA DEL METRO DE BOGOTÁ (PLMB)”, UBICADO EN EL ÁREA URBANA DE BOGOTÁ, DEPARTAMENTO DE CUNDINAMARCA, PARA LA EMPRESA INGETEC S.A.”.

7.1 EMISIONES DE GASES Y MATERIAL PARTICULADO PROYECTO PRIMERA LÍNEA DEL METRO DE BOGOTÁ

A continuación se presenta el inventario de emisiones estimadas para los escenarios: Línea base, construcción y operación.

7.1.1 Línea Base y Operación

Las emisiones de gases de interés (NO_2 , SO_2 , CO y VOC) y material particulado – PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$, relacionadas en la Tabla 40 y Tabla 41, fueron determinadas a partir de los tramos del proyecto durante la etapa de operación y línea base, descritos en la Tabla 31, en las cuales se tuvo en cuenta emisiones por resuspensión de material en vía pavimentada y emisiones por tubos de escape.

Tabla 40. Emisiones estimadas Línea Base

Tramo	Emisiones Estimadas (Flota vehicular) [Ton/año]					
	PM_{10}	$\text{PM}_{2.5}$	NO_2	SO_2	CO	VOC
Tramo 1	1.25	0.68	5.31	0.66	98.08	3.96
Tramo 2	1.30	0.59	5.43	0.60	117.11	4.36
Tramo 3	2.27	1.03	9.50	1.06	204.92	7.63
Tramo 4	2.79	1.52	11.82	1.47	218.33	8.81
Tramo 5	1.99	0.90	8.33	0.93	179.69	6.69
Tramo 6	1.30	0.71	5.50	0.68	101.53	4.10
Tramo 7	1.33	0.72	5.62	0.70	103.81	4.19

Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

Tabla 41. Emisiones estimadas Operación

Tramo	Emisiones Estimadas (Flota vehicular) [Ton/año]					
	PM_{10}	$\text{PM}_{2.5}$	NO_2	SO_2	CO	VOC
Tramo 1	2.76	1.50	11.69	1.45	215.88	8.71
Tramo 2	2.86	1.30	11.95	1.33	257.75	9.60
Tramo 3	5.00	2.27	20.92	2.33	451.03	16.80

Tramo	Emisiones Estimadas (Flota vehicular) [Ton/año]					
Tramo 4	6.41	3.49	27.13	3.36	501.13	20.23
Tramo 5	5.18	2.35	21.67	2.41	467.25	17.41
Tramo 6	1.13	0.61	4.77	0.59	88.05	3.55
Tramo 7	1.53	0.83	6.48	0.80	119.63	4.83

Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

En la Figura 41 a Figura 46 son expuestas las emisiones por tramos para los diferentes contaminantes evaluados.

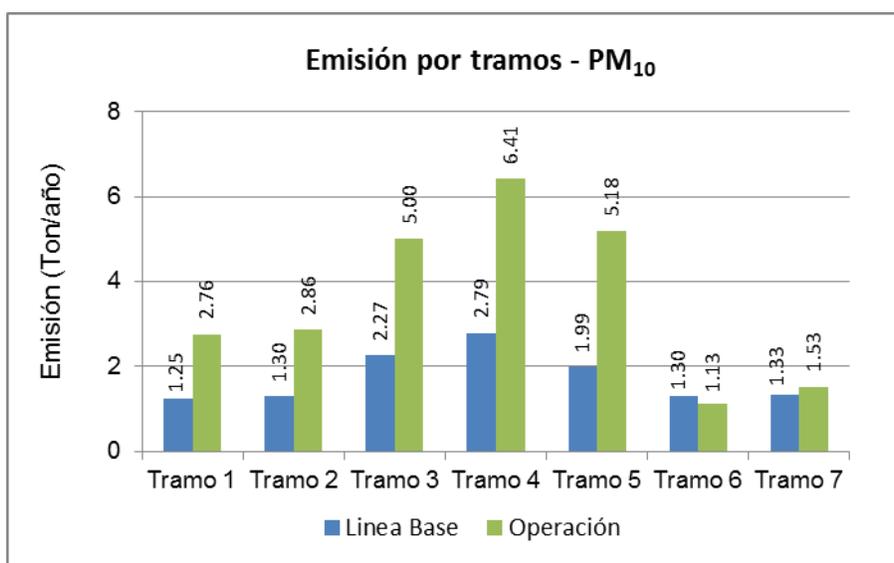


Figura 41. Emisiones PM₁₀ por tramos

Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

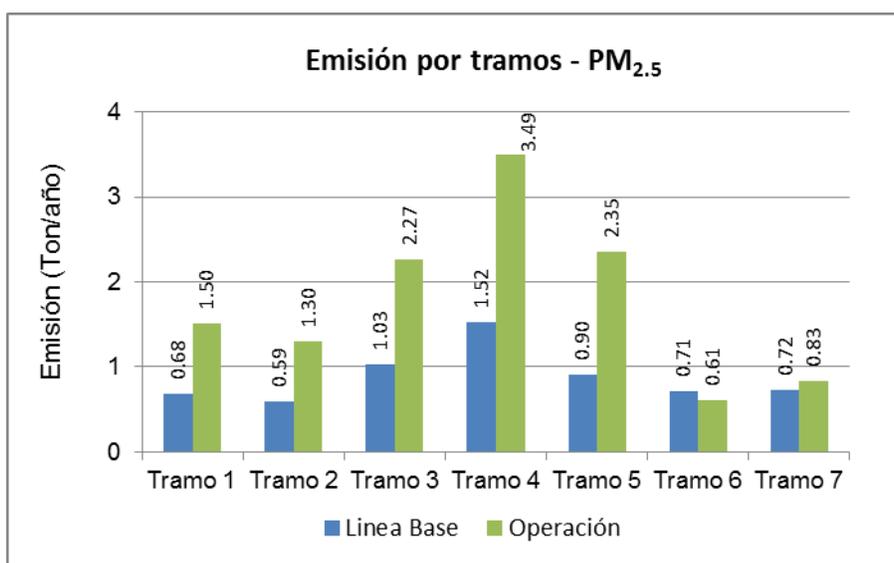


Figura 42. Emisiones PM_{2.5} por tramos

Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

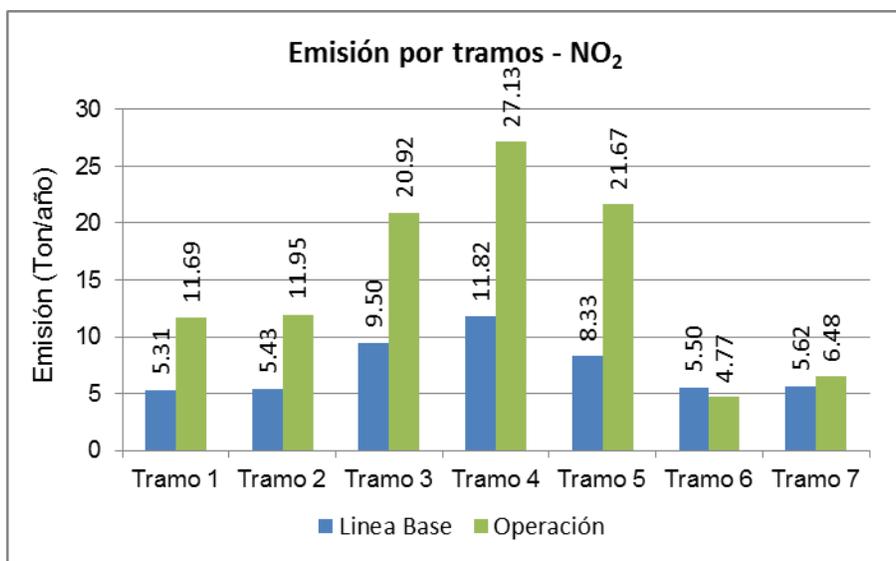


Figura 43. Emisiones NO₂ por tramos

Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

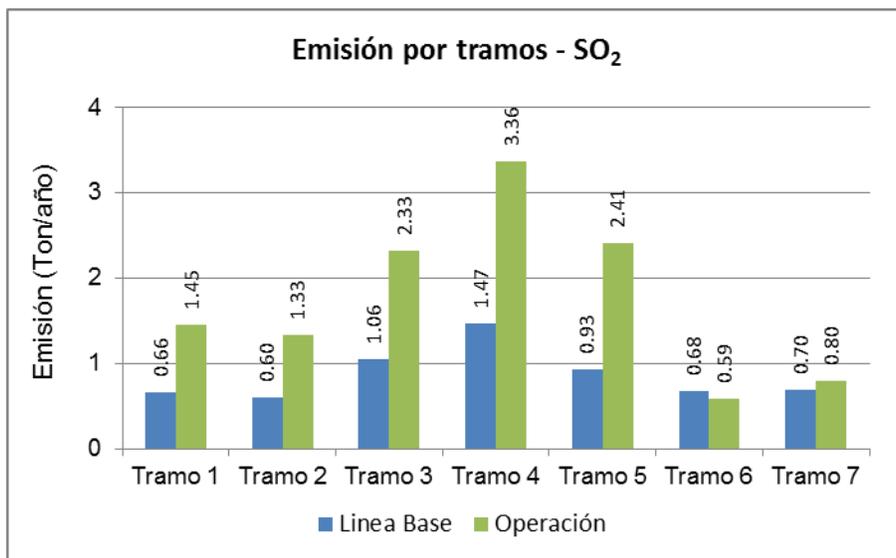


Figura 44. Emisiones SO₂ por tramos

Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

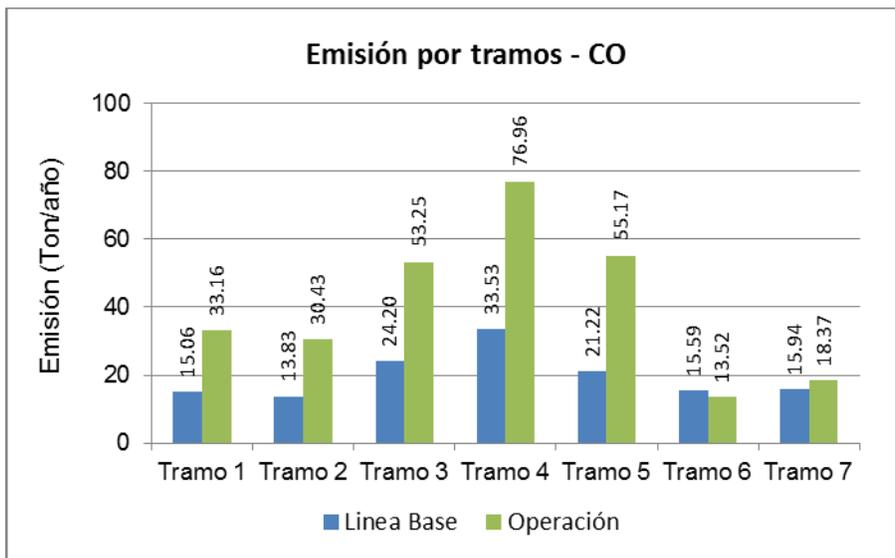


Figura 45. Emisiones CO por tramos

Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

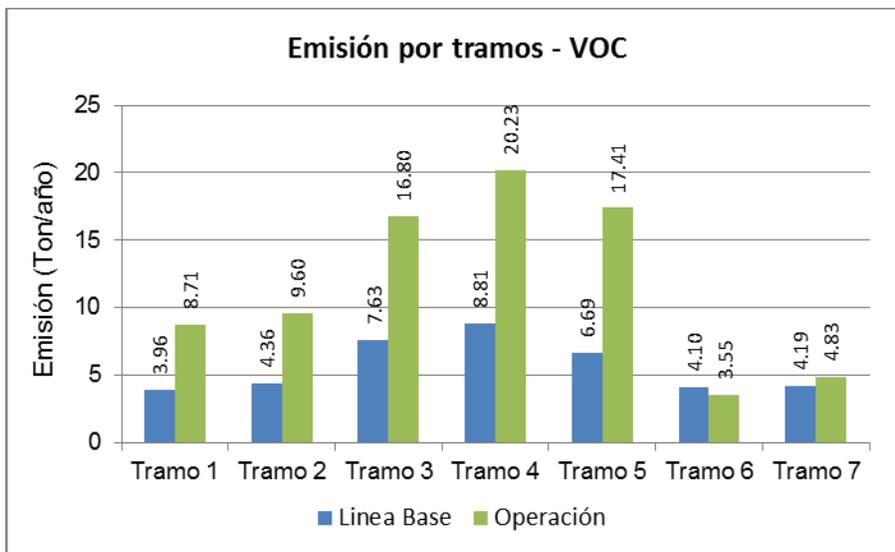


Figura 46. Emisiones VOC por tramos

Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

Respecto a los escenarios 1 (Línea Base) y escenario 3 (operación), es posible apreciar que durante la etapa de operación se presentará un incremento de contaminantes, donde los tramos 3, 4 y 5 muestran las emisiones más elevadas, en el tramo 6 se reducen y en el tramo 7 se conservan.

7.1.2 Construcción

Las emisiones de gases de interés (NO₂, SO₂, CO y VOC) y material particulado – PM₁₀ y PM_{2.5}, relacionadas en la Tabla 42, fueron determinadas a partir de las actividades del proyecto durante la etapa de construcción en las áreas Patio taller, Columnas, Construcción de vías y Construcción de Estaciones.

Tabla 42. Emisiones estimadas Construcción con control

Área	Grupos de Actividad	Contaminante (Ton/año)					
		PM ₁₀	PM _{2.5}	CO	NO ₂	SO ₂	VOC
Patio Taller	1. Remoción de suelos (Bulldozing)	0.12	0.06	N/A	N/A	N/A	N/A
	2. Cargue de material	0.15	0.02	N/A	N/A	N/A	N/A
	3. Descargue de material	0.81	0.12	N/A	N/A	N/A	N/A
	4. Tubo de escape maquinaria fuera de vía	0.14	0.07	0.94	1.70	0.04	0.11
Columnas	1. Remoción de suelos (Bulldozing)	0.71	0.38	N/A	N/A	N/A	N/A
	2. Cargue de material	0.12	0.02	N/A	N/A	N/A	N/A
	3. Descargue de concreto	0.04	0.01	N/A	N/A	N/A	N/A
	4. Descargue de material	0.02	0.002	N/A	N/A	N/A	N/A
	5. Perforación	0.38	0.20	N/A	N/A	N/A	N/A
	6. Tubo de escape maquinaria fuera de vía	3.65	1.93	28.03	37.00	0.09	2.29
Construcción de vías	1. Remoción de suelos (Bulldozing)	0.71	0.38	N/A	N/A	N/A	N/A
	2. Cargue de material	0.20	0.03	N/A	N/A	N/A	N/A
	3. Actividades de construcción de vías	239.11	126.73	N/A	N/A	N/A	N/A
	4. Tubo de escape maquinaria fuera de vía	3.19	1.69	19.22	53.26	0.29	3.61
	5. Transporte	12.90	3.20	1.13	1.73	0.03	1.39
Construcción de Estaciones	1. Remoción de suelos (Bulldozing)	1.42	0.75	N/A	N/A	N/A	N/A
	2. Cargue de material	0.17	0.03	N/A	N/A	N/A	N/A
	3. Descargue de material	0.02	0.003	N/A	N/A	N/A	N/A
	4. Descargue de concreto	0.05	0.01	N/A	N/A	N/A	N/A
	5. Tubo de escape maquinaria fuera de vía	0.46	0.24	3.65	6.20	0.11	0.41

Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

Con el fin de ampliar la información sobre las actividades generadoras de emisiones y su contribución en el inventario de emisiones se presenta la Figura 47 a Figura 52.

Cabe destacar que la principal fuente de material particulado para las dos fracciones evaluadas (PM_{10} y $PM_{2.5}$) para el escenario 2 son las actividades de construcción de vías, los aportes porcentuales para PM_{10} es del 90.45% respecto a la totalidad de las emisiones; por otra parte, el aporte porcentual de esta actividad sobre las emisiones de $PM_{2.5}$ alcanza el 93.27%. En el caso de los gases se presentan como fuentes principales las actividades de Tubo de escape de maquinaria fuera de vías y el transporte de materiales.

Las emisiones de gases de interés (NO_2 , SO_2 , CO y VOC) y material particulado – PM_{10} y $PM_{2.5}$, relacionadas en la Tabla 43, en las cuales se tuvo en cuenta emisiones por resuspensión de material en vía pavimentada y emisiones por tubos de escape de los vehículos que transitarán en los carriles habilitados en la etapa de construcción.

Tabla 43. Emisiones estimadas construcción

Tramo	Emisiones Estimadas (Flota vehicular) [Ton/año]					
	PM_{10}	$PM_{2.5}$	NO_2	SO_2	CO	VOC
Tramo 1 sección 1	9.441	2.317	1.412	0.027	0.924	1.135
Tramo 1 sección 2	9.285	2.279	0.068	0.001	0.044	0.054
Tramo 1 sección 3	16.187	3.973	0.074	0.001	0.049	0.060
Tramo 1 sección 4	22.818	5.601	0.103	0.002	0.068	0.083
Tramo 2 sección 1	1.741	0.427	0.040	0.001	0.026	0.032
Tramo 2 sección 2	1.842	0.452	0.035	0.001	0.023	0.028

Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

En el Anexo 3 de estimación de emisiones de material particulado y gases se presentan las emisiones calculadas para los escenarios objeto de estudio.

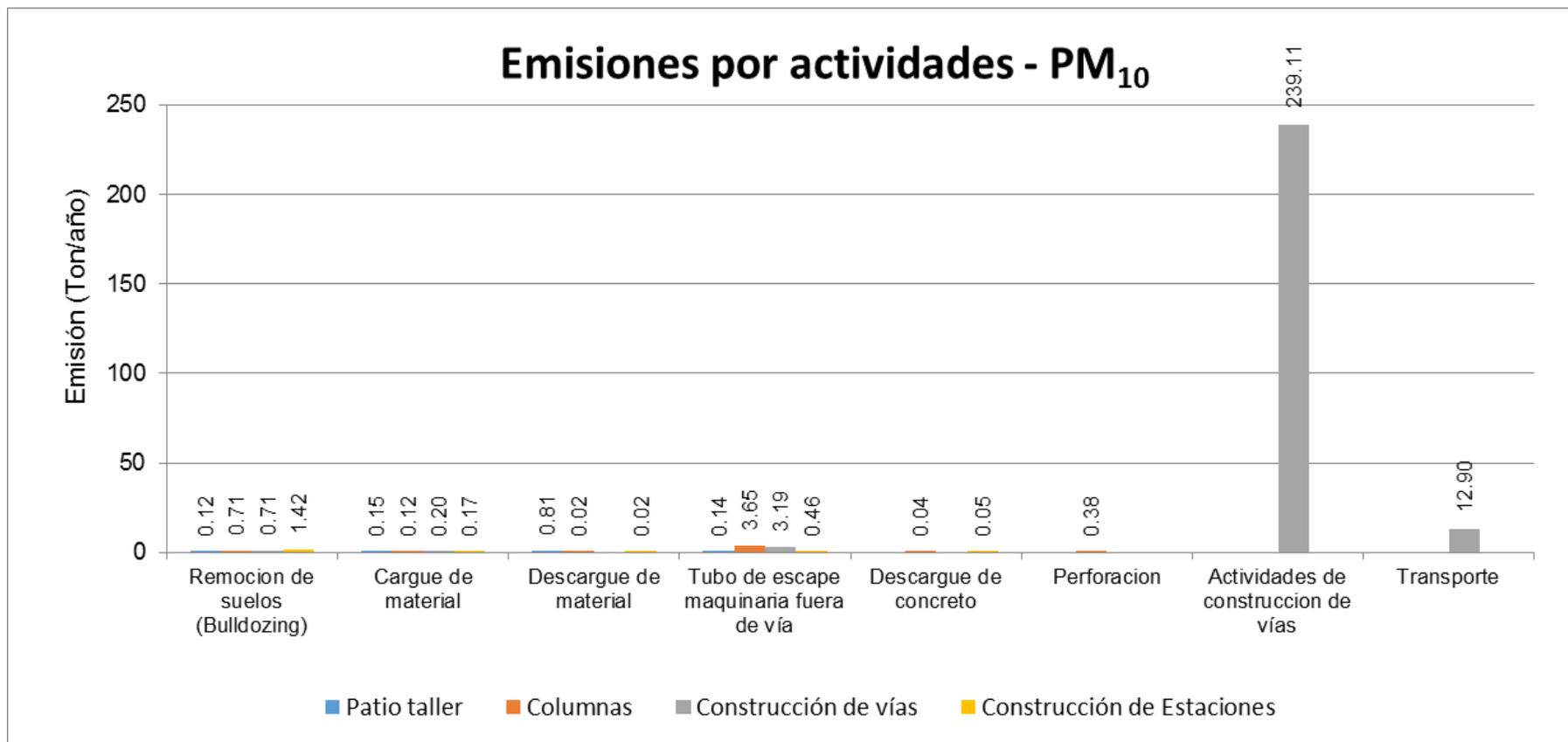


Figura 47. Emisiones PM₁₀ por actividades

Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

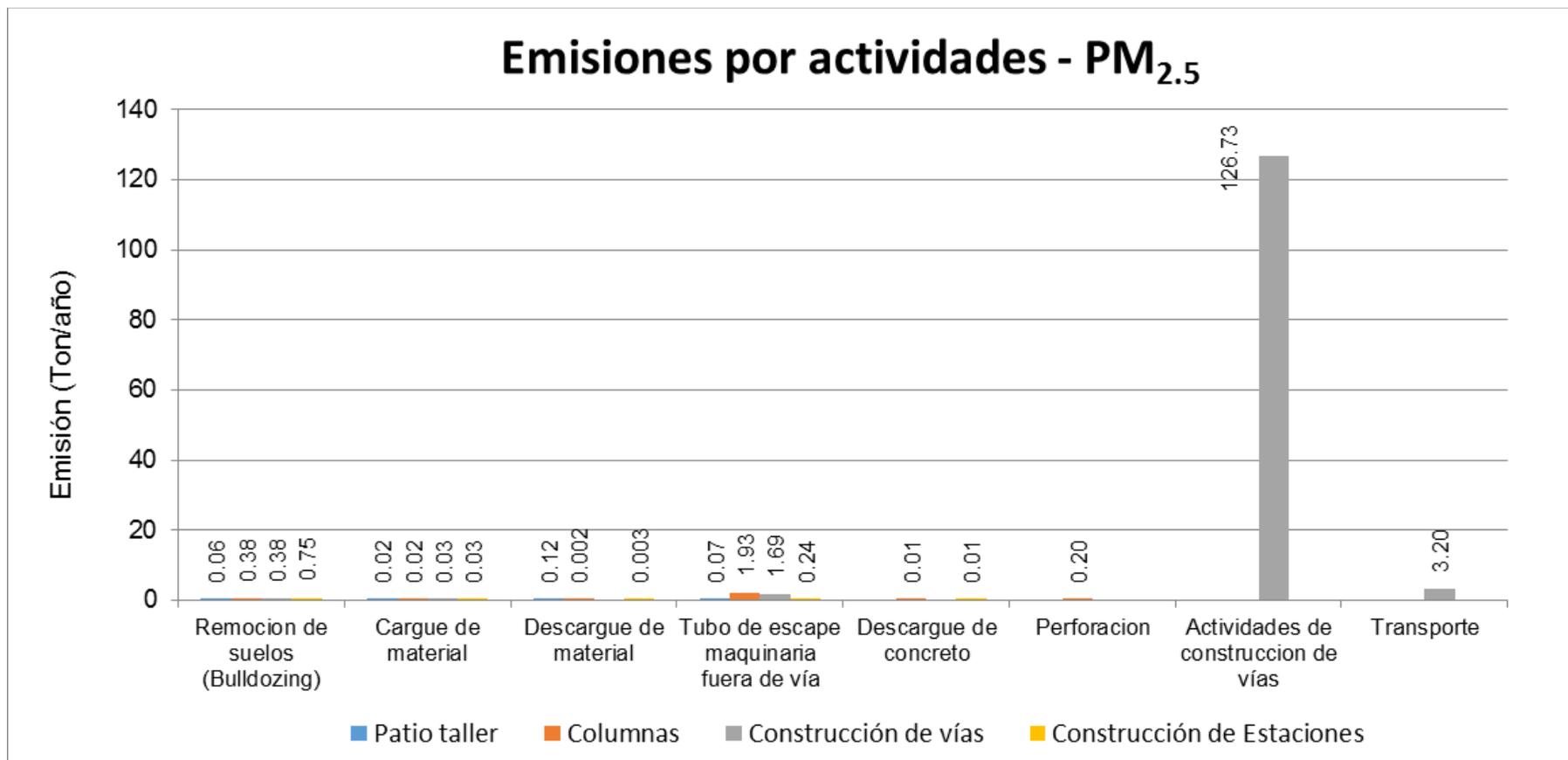


Figura 48. Emisiones PM_{2.5} por actividades

Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

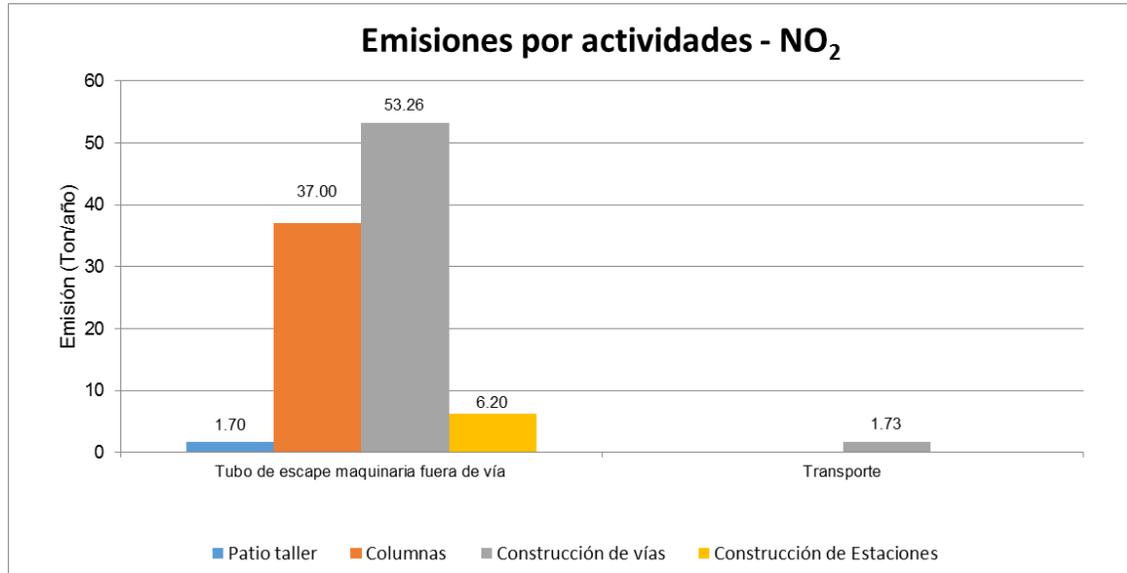


Figura 49. Emisiones NO₂ por actividades

Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

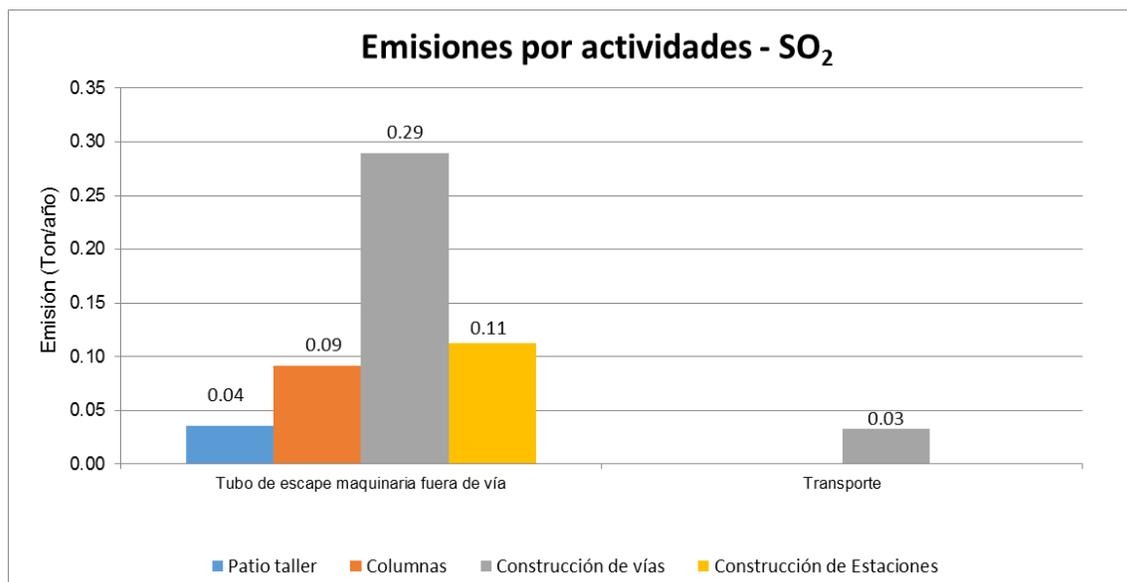


Figura 50. Emisiones SO₂ por actividades

Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

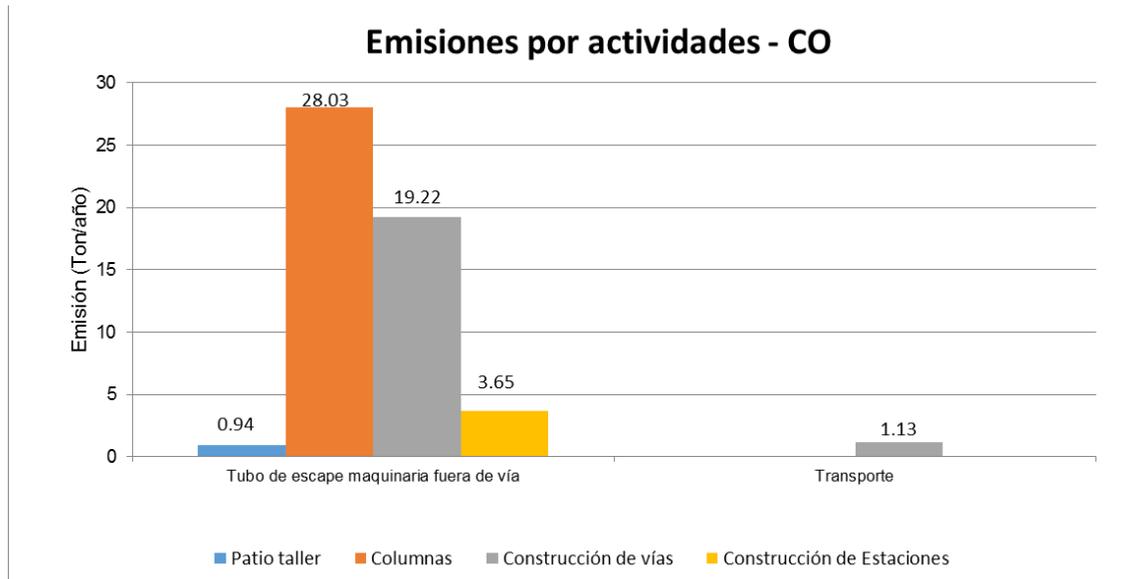


Figura 51. Emisiones CO por actividades

Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

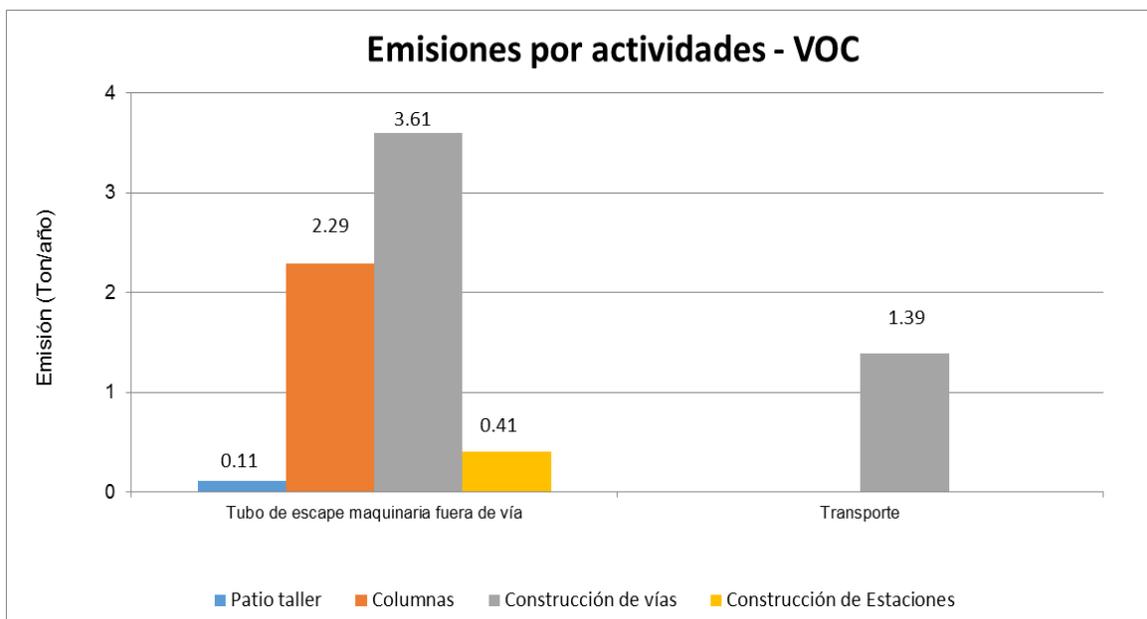


Figura 52. Emisiones VOC por actividades

Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

8. MODELACIÓN DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES EN LA ATMÓSFERA

Con el fin de estimar el comportamiento de las emisiones generadas antes del inicio de obras, durante la construcción y en la operación del proyecto “ESTRUCTURACIÓN TÉCNICA DE LA PRIMERA LÍNEA DEL METRO DE BOGOTÁ (PLMB)”, fue aplicado el modelo de dispersión AERMOD de tipo gaussiano, idealizando las fuentes de emisión según la topografía y coordenadas Magna Sirgas Bogotá de cada fuente.

8.1 IDEALIZACIÓN DE LAS FUENTES

8.1.1 Línea Base y Operación

Se idealizaron las fuentes de emisión para vías como fuentes de volumen, según el tramo (ver Tabla 31). La Tabla 44 presenta la forma como fueron idealizadas las fuentes de emisión al momento de introducirlas al modelo.

Tabla 44. Idealización de fuentes

Actividad	Tipo De Fuente	Comentarios
3. OPERACIONES DE TRANSPORTE		
3.1 Transporte de vehículos	Volumen	Se utilizaron fuentes de volumen de acuerdo a la conformación de las vías.

Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

Los datos básicos sobre las fuentes incluyen:

- Localización de la fuente a través de sus coordenadas Magna Sirgas Colombia Bogotá X (Este). Y (Norte).
- Alturas sobre el nivel del mar de la base de la fuente. es decir la altura del terreno.
- Altura de la fuente sobre el nivel del terreno
- Características geométricas de las fuentes.

La Figura 53, la Tabla 45 y Tabla 46 muestran la idealización de las fuentes cargadas en el modelo AERMOD y el resumen con la codificación específica para cada una de ellas.

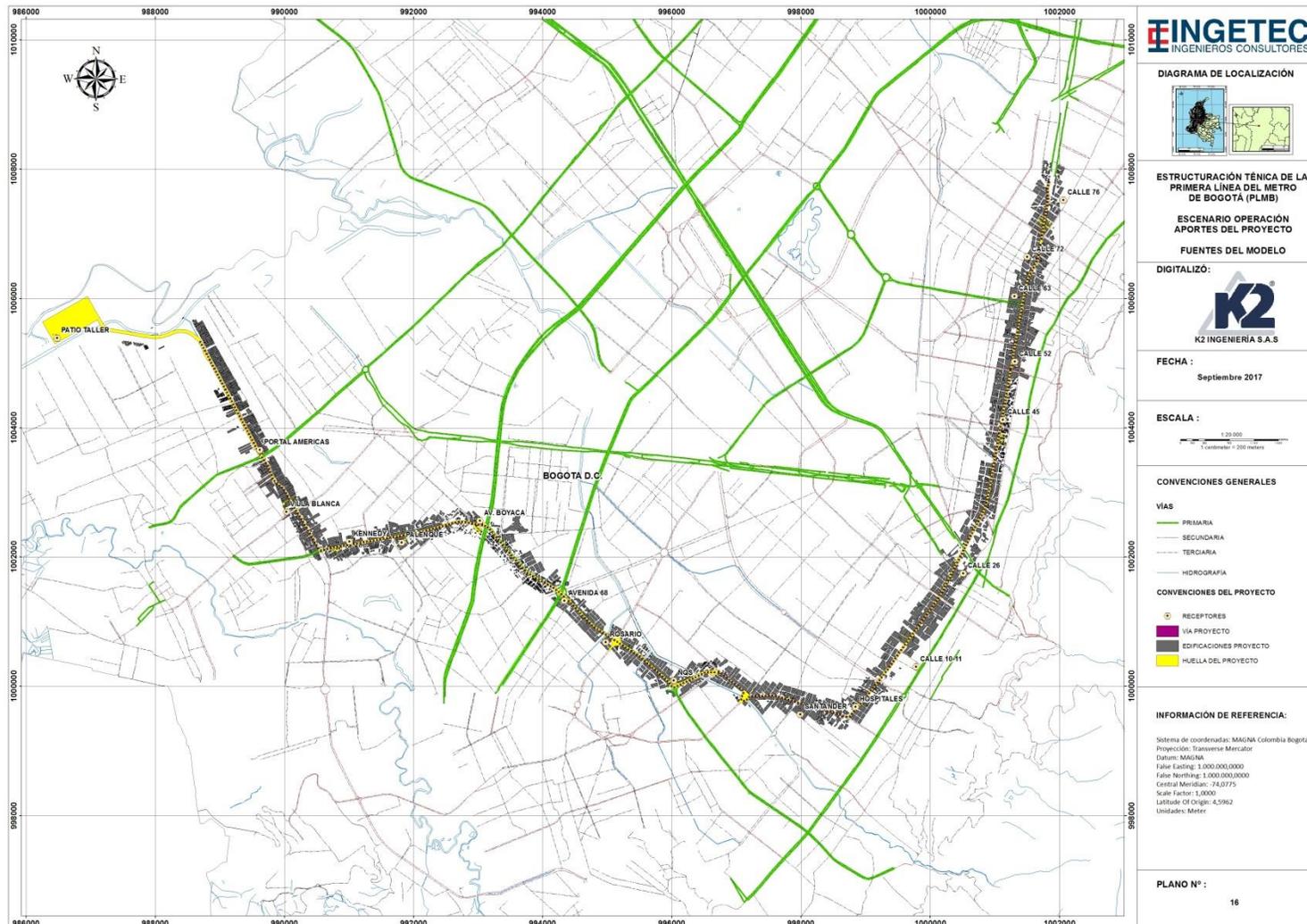


Figura 53. Idealización de Fuentes Proyecto PLMB. Línea Base y Operación
Fuente: K2 INGENIERÍA

Informe Modelo de dispersión de contaminantes, 2017

Tabla 45. Resumen Fuentes de volumen.

Index	ID	Description	X coordinate	Y coordinate	Elevation	Emission rate	Release height	Init. lat. dim.	Init. vert. dim.
			m	m	meters	g/s	meters	meters	meters
1	1 HZ8KY002	Tramo_1	988695.1	1005329.2	2528.49	0.000251	1.8	24.18605	1.674419
2	2 HZ8KY003	Tramo_1	988719.4	1005283.3	2532.65	0.000251	1.8	24.18605	1.674419
3	3 HZ8KY004	Tramo_1	988743.8	1005237.3	2537.29	0.000251	1.8	24.18605	1.674419
4	4 HZ8KY005	Tramo_1	988768.1	1005191.4	2527.52	0.000251	1.8	24.18605	1.674419
5	5 HZ8KY006	Tramo_1	988792.4	1005145.4	2525.4	0.000251	1.8	24.18605	1.674419
6	6 HZ8KY007	Tramo_1	988816.8	1005099.4	2522.46	0.000251	1.8	24.18605	1.674419
7	7 HZ8KY008	Tramo_1	988841.1	1005053.5	2524.04	0.000251	1.8	24.18605	1.674419
8	8 HZ8KY009	Tramo_1	988865.4	1005007.5	2521.94	0.000251	1.8	24.18605	1.674419
9	9 HZ8KY00A	Tramo_1	988889.7	1004961.6	2517.7	0.000251	1.8	24.18605	1.674419
10	10 HZ8KY00B	Tramo_1	988914.1	1004915.6	2519.76	0.000251	1.8	24.18605	1.674419
11	11 HZ8KY00C	Tramo_1	988938.4	1004869.7	2523.51	0.000251	1.8	24.18605	1.674419
12	12 HZ8KY00D	Tramo_1	988962.7	1004823.7	2522.47	0.000251	1.8	24.18605	1.674419
13	13 HZ8KY00E	Tramo_1	988987.1	1004777.7	2530.77	0.000251	1.8	24.18605	1.674419
14	14 HZ8KY00F	Tramo_1	989011.4	1004731.8	2533.35	0.000251	1.8	24.18605	1.674419
15	15 HZ8KY00G	Tramo_1	989035.7	1004685.8	2528.56	0.000251	1.8	24.18605	1.674419
16	16 HZ8KY00H	Tramo_1	989060.1	1004639.9	2530.79	0.000251	1.8	24.18605	1.674419
17	17 HZ8KY00I	Tramo_1	989084.4	1004593.9	2532.28	0.000251	1.8	24.18605	1.674419
18	18 HZ8KY00J	Tramo_1	989108.7	1004548	2535.53	0.000251	1.8	24.18605	1.674419
19	19 HZ8KY00K	Tramo_1	989133.1	1004502	2533.78	0.000251	1.8	24.18605	1.674419
20	20 HZ8KY00L	Tramo_1	989157.4	1004456.1	2535.89	0.000251	1.8	24.18605	1.674419
21	21 HZ8KY00M	Tramo_1	989181.8	1004410.1	2538.51	0.000251	1.8	24.18605	1.674419
22	22 HZ8KY00N	Tramo_1	989206.2	1004364.2	2536.63	0.000251	1.8	24.18605	1.674419
23	23 HZ8KY00O	Tramo_1	989230.5	1004318.3	2536.02	0.000251	1.8	24.18605	1.674419
24	24 HZ8KY00P	Tramo_1	989254.9	1004272.3	2535.67	0.000251	1.8	24.18605	1.674419
25	25 HZ8KY00Q	Tramo_1	989279.3	1004226.4	2537.98	0.000251	1.8	24.18605	1.674419
26	26 HZ8KY00R	Tramo_1	989303.6	1004180.4	2535.44	0.000251	1.8	24.18605	1.674419
27	27 HZ8KY00S	Tramo_1	989328	1004134.5	2522.63	0.000251	1.8	24.18605	1.674419
28	28 HZ8KY00T	Tramo_1	989352.4	1004088.6	2521.98	0.000251	1.8	24.18605	1.674419
29	29 HZ8KY00U	Tramo_1	989376.8	1004042.6	2519.09	0.000251	1.8	24.18605	1.674419

Nota: Todas las fuentes se pueden ver con mayor detalle en el anexo AD-1.

Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S

Tabla 46. Resumen de los receptores.

Index	ID	Description	X coordinate	Y coordinate	Elevation	Hill height scale	Sensitive
			m	m	meters	meters	
1	1 D1	P_TALLER	986485.77	1005388.28	2544.51	2544.51	0
2	2 D2	PORTAL AMERICAS	989623.15	1003658.43	2536.56	2565	0
3	3 D3	Villa Blanca	990032.96	1002700	2559.17	2568	0
4	4 D4	KENNEDY	991009.97	1002242.2	2556.36	2582	0
5	5 D5	PALENQUE	991817.52	1002223.68	2565.45	2569	0
6	6 D6	AV BOYACA	993028.87	1002564.52	2541.28	2595	0
7	7 D7	AVENIDA 68	994335.65	1001323.45	2567.77	3507	0
8	8 D8	ROSARIO	994979.81	1000684.49	2562.41	3644	0
9	9 D9	NQS	996030.84	1000094.66	2570.52	3748	0
10	10 D10	SANTANDER	997991.19	999566.25	2583.27	3748	0
11	11 D11	HOSPITALES	998845	999682.96	2583.7	3748	0
12	12 D12	CALLE 10-11	999784.5	1000303.44	2610.38	3748	0
13	13 D13	CALLE 26	1000515.62	1001747.14	2641.63	3748	0
14	14 D14	CALLE 45	1001128.95	1004127.72	2604.02	3661	0
15	15 D15	CALLE 52	1001310.79	1005024.66	2593.47	3661	0
16	16 D16	CALLE 63	1001307.69	1006035.26	2581.32	3661	0
17	17 D17	CALLE 72	1001504.93	1006646.53	2581.77	3644	0
18	18 D18	CALLE 76	1002062.76	1007525.05	2582.31	3368	0

Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

8.1.2 Construcción

Se idealizaron las fuentes de emisión para Patio Taller, vías de tráfico vehicular (volúmenes) y vías de ejecución de obras (áreas) y estaciones, como fuentes de área y/o volumen, según la actividad. Para minimizar el tiempo de operación del Software, los cálculos de emisiones de las columnas fueron incluidos en las emisiones de las vías. La Tabla 47 presenta la forma como fueron idealizadas las fuentes de emisión al momento de introducirlas al modelo.

Tabla 47. Idealización de fuentes

Actividad	Tipo De Fuente	Comentarios
1. OPERACIONES DE MANEJO DE MATERIALES		
1.1 Remoción de suelos por Tractor (Bulldozing)	Área	Un único nivel
1.2 Cargue de material	Área	Un único nivel
1.3 Descargue de material	Área	Un único nivel
2. CONSTRUCCIÓN		
2.1 Construcción de infraestructura. Vías	Área	Un único nivel
2.1 Construcción de estaciones		
3. OPERACIONES DE TRANSPORTE		
3.1 Flujo vehicular de la ciudad en vías pavimentadas	Volumen	Se utilizaron fuentes de volumen de acuerdo a la conformación de las vías.
3.2 Flujo de vehículos de transporte de materiales	Área	Las emisiones generadas por esta actividad se incluyeron a la construcción de vías.

Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

Los datos básicos sobre las fuentes incluyen:

- Localización de la fuente a través de sus coordenadas Magna Colombia Bogotá X (Este). Y (Norte).
- Alturas sobre el nivel del mar de la base de la fuente. es decir la altura del terreno.
- Altura de la fuente sobre el nivel del terreno
- Características geométricas de las fuentes.

Las siguientes figuras y tablas muestran la idealización de las fuentes cargadas en el modelo AERMOD y el resumen con la codificación específica para cada una de ellas.

Los receptores para el escenario 2 (Construcción) son los mismos para cada escenario, los cuales son las dieciocho (18) estaciones de calidad del aire, como se puede apreciar en la Tabla 46.

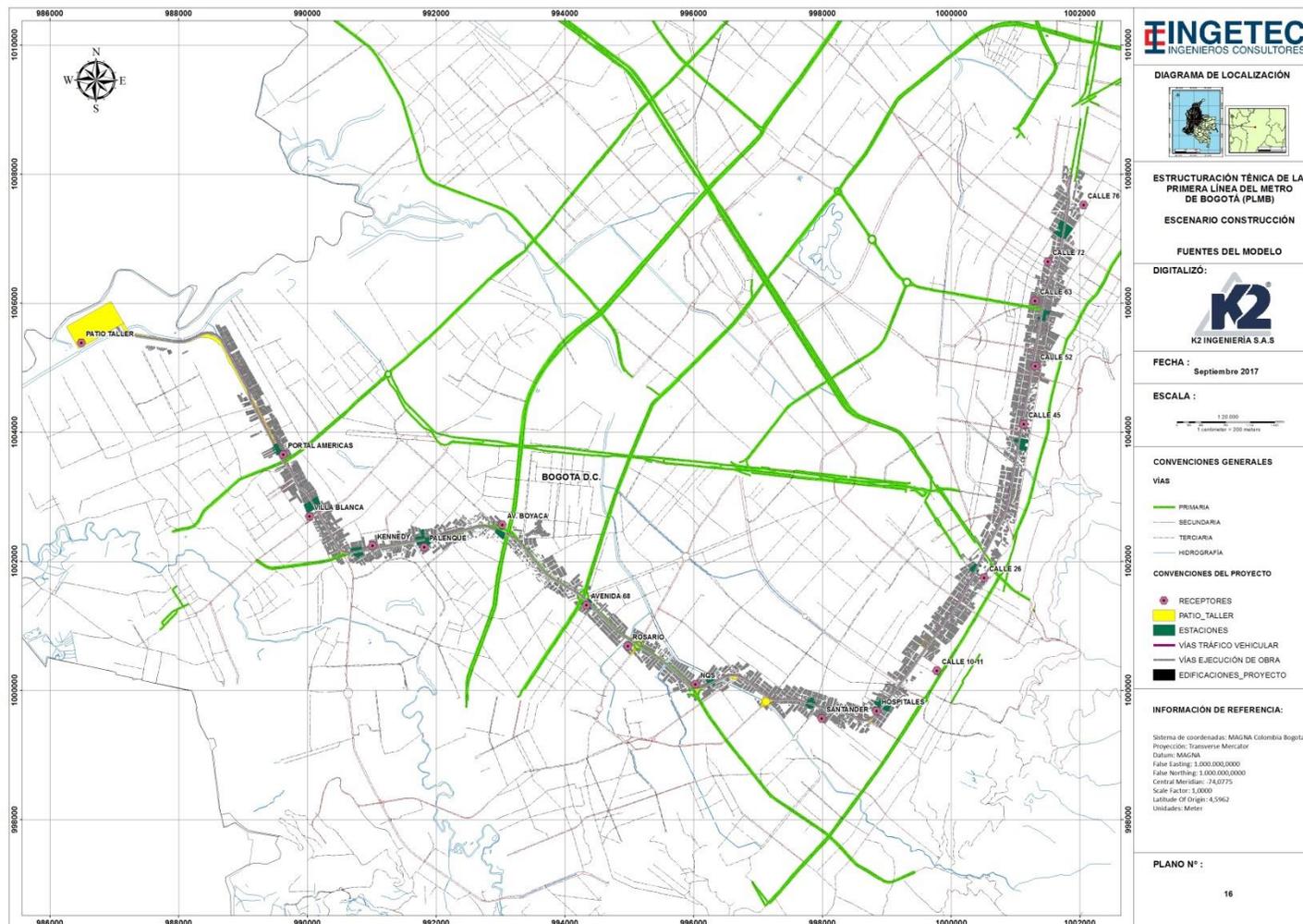


Figura 54. Idealización de Fuentes Proyecto PLMB. Construcción
K2 INGENIERÍA S.A.S

Informe Modelo de dispersión de contaminantes, 2017

Tabla 48. Resumen Fuentes de volumen.

Index	ID	Description	X coordinate m	Y coordinate m	Elevation meters	Emission rate g/s	Release height meters	Init. lat. dim. meters	Init. vert. dim. meters
1	1 K2PZK0G1	VIA TRAM01_SC1	987055.5	1005617.2	2545.36	0.000187	1.8	11.16279	1.674419
2	2 K2PZK0G2	VIA TRAM01_SC1	987069.1	1005597.5	2550.33	0.000187	1.8	11.16279	1.674419
3	3 K2PZK0G3	VIA TRAM01_SC1	987084.5	1005579.1	2552.55	0.000187	1.8	11.16279	1.674419
4	4 K2PZK0G4	VIA TRAM01_SC1	987102.3	1005563.1	2551.93	0.000187	1.8	11.16279	1.674419
5	5 K2PZK0G5	VIA TRAM01_SC1	987122.2	1005549.7	2551.39	0.000187	1.8	11.16279	1.674419
6	6 K2PZK0G6	VIA TRAM01_SC1	987143.1	1005538	2549.19	0.000187	1.8	11.16279	1.674419
7	7 K2PZK0G7	VIA TRAM01_SC1	987165.6	1005529.7	2545.19	0.000187	1.8	11.16279	1.674419
8	8 K2PZK0G8	VIA TRAM01_SC1	987188.9	1005524.3	2539.63	0.000187	1.8	11.16279	1.674419
9	9 K2PZK0G9	VIA TRAM01_SC1	987212.5	1005520	2534.92	0.000187	1.8	11.16279	1.674419
10	10 K2PZK0GA	VIA TRAM01_SC1	987236.3	1005516.4	2523.94	0.000187	1.8	11.16279	1.674419
11	11 K2PZK0GB	VIA TRAM01_SC1	987260	1005512.8	2522.23	0.000187	1.8	11.16279	1.674419
12	12 K2PZK0GC	VIA TRAM01_SC1	987283.7	1005509.3	2524.45	0.000187	1.8	11.16279	1.674419
13	13 K2PZK0GD	VIA TRAM01_SC1	987307.4	1005505.7	2524.67	0.000187	1.8	11.16279	1.674419
14	14 K2PZK0GE	VIA TRAM01_SC1	987331.2	1005502.1	2526.64	0.000187	1.8	11.16279	1.674419
15	15 K2PZK0GF	VIA TRAM01_SC1	987354.9	1005498.5	2528.74	0.000187	1.8	11.16279	1.674419
16	16 K2PZK0GG	VIA TRAM01_SC1	987378.6	1005494.9	2530.44	0.000187	1.8	11.16279	1.674419
17	17 K2PZK0GH	VIA TRAM01_SC1	987402.4	1005491.3	2532.62	0.000187	1.8	11.16279	1.674419
18	18 K2PZK0GI	VIA TRAM01_SC1	987426.1	1005487.7	2536.7	0.000187	1.8	11.16279	1.674419
19	19 K2PZK0GJ	VIA TRAM01_SC1	987449.8	1005484.1	2538.83	0.000187	1.8	11.16279	1.674419
20	20 K2PZK0GK	VIA TRAM01_SC1	987473.6	1005480.6	2541.05	0.000187	1.8	11.16279	1.674419
21	21 K2PZK0GL	VIA TRAM01_SC1	987497.3	1005477	2542.25	0.000187	1.8	11.16279	1.674419
22	22 K2PZK0GM	VIA TRAM01_SC1	987521	1005473.4	2542.5	0.000187	1.8	11.16279	1.674419
23	23 K2PZK0GN	VIA TRAM01_SC1	987544.8	1005469.8	2540.09	0.000187	1.8	11.16279	1.674419
24	24 K2PZK0GO	VIA TRAM01_SC1	987568.5	1005466.2	2537.99	0.000187	1.8	11.16279	1.674419
25	25 K2PZK0GP	VIA TRAM01_SC1	987592.2	1005462.6	2536.67	0.000187	1.8	11.16279	1.674419
26	26 K2PZK0GQ	VIA TRAM01_SC1	987615.9	1005459	2536.52	0.000187	1.8	11.16279	1.674419
27	27 K2PZK0GR	VIA TRAM01_SC1	987639.7	1005455.4	2534.83	0.000187	1.8	11.16279	1.674419
28	28 K2PZK0GS	VIA TRAM01_SC1	987663.4	1005451.9	2532.43	0.000187	1.8	11.16279	1.674419
29	29 K2PZK0GT	VIA TRAM01_SC1	987687.1	1005448.3	2531.09	0.000187	1.8	11.16279	1.674419

Nota: Todas las fuentes se pueden ver con mayor detalle en el anexo AD-1.

Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

Tabla 49. Resumen Fuentes de Área.

Index	ID	Description	X coordinate m	Y coordinate m	Elevation meters	Emission rate g/(s·m ²)	Release height meters	Init. vert. dim. meters
6	6 EST_6	Tr1_Sc2_Est_4_a	991681.049	1002331.456	2555.39	6.74737E-09	2.5	1.16
7	7 EST_7	Tr1_Sc2_Est_4_b	991753.9882	1002492.155	2560.45	4.75261E-09	2.5	1.16
8	8 EST_8	Tr1_Sc2_Est_4_c	991694.1414	1002289.963	2551.72	1.47993E-08	2.5	1.16
9	9 EST_9	Tr1_Sc2_Est_5	992913.9068	1002449.816	2547.36	1.25571E-08	2.5	1.16
10	10 EST_10	Tr1_Sc3_Est_6_a	994299.4787	1001333.244	2572.72	1.12988E-07	2.5	1.16
11	11 EST_11	Tr1_Sc3_Est_6_b	994354.8037	1001408.443	2556.97	5.40727E-08	2.5	1.16
12	12 EST_12	Tr1_Sc3_Est_7_a	996215.524	1000050.916	2582.88	2.37958E-08	2.5	1.16
13	13 EST_13	Tr1_Sc3_Est_7_b	996295.1048	1000090.718	2581.41	2.38257E-08	2.5	1.16
14	14 EST_14	Tr1_Sc3_Est_7_c	996194.9572	1000154.475	2575.45	1.94851E-07	2.5	1.16
15	15 EST_15	Tr1_Sc4_Est_8_a	997737.802	999768.3644	2574.37	2.11439E-08	2.5	1.16
16	16 EST_16	Tr1_Sc4_Est_8_b	997762.2514	999828.0048	2584.66	2.68575E-08	2.5	1.16
17	17 EST_17	Tr1_Sc4_Est_9_a	998936.8868	999721.6102	2583.02	3.43278E-08	2.5	1.16
18	18 EST_18	Tr1_Sc4_Est_9_b	998802.5594	999801.8125	2586.38	4.78622E-08	2.5	1.16
19	19 EST_19	Tr1_Sc4_Est_10_ε	1000393.429	1001848.253	2612.73	3.49524E-09	2.5	1.16
20	20 EST_20	Tr1_Sc4_Est_10_t	1000435.914	1001930.844	2602.74	3.49898E-09	2.5	1.16
21	21 EST_21	Tr1_Sc4_Est_10_c	1000281.685	1001874.802	2598.76	3.04306E-08	2.5	1.16
22	22 EST_22	Tr2_Sc1_Est_11_ε	1000977.785	1003851.28	2592.19	4.82751E-08	2.5	1.16
23	23 EST_23	Tr2_Sc1_Est_11_t	1001057.533	1003742.1	2598.27	2.6508E-07	2.5	1.16
24	24 EST_24	Tr2_Sc2_Est_12_ε	1001376.3	1005739.839	2575.66	5.25512E-09	2.5	1.16
25	25 EST_25	Tr2_Sc2_Est_12_t	1001413.016	1005743.342	2578.94	3.1573E-08	2.5	1.16
26	26 EST_26	Tr2_Sc2_Est_13_ε	1001752.011	1007014.969	2564.11	4.69968E-08	2.5	1.16
27	27 EST_27	Tr2_Sc2_Est_13_t	1001586.292	1007099.258	2575.94	5.89191E-08	2.5	1.16
28	28 P_TALL	Patio Taller	986946.9122	1006033.45	2520.13	1.23E-07	2	0.9302
29	29 VIA_1	VIA_TR1_SC_1	989615.7777	1003548.915	2538.66	1.97E-05	1	0.47
30	30 VIA_6	VIA_TR2_SC2	1001437.879	1005954.92	2590.73	2.15059E-06	1	0.47
31	31 VIA_5	VIA_TR2_SC1	1001246.901	1004882.129	2592.67	2.44671E-06	1	0.47
32	32 VIA_4	VIA_TR1_SC4	1000517.504	1002108.371	2625.4	1.92412E-06	1	0.47
33	33 VIA_2	VIA_TR1_SC2	993096.0091	1002412.157	2551.08	1.75709E-06	1	0.47
34	34 VIA_3	VIA_TR1_SC3	996697.0313	1000221.53	2588.95	1.77866E-06	1	0.47

Nota: Todas las fuentes se pueden ver con mayor detalle en el anexo AD-1.

Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

8.2 RECEPTORES Y TOPOGRAFÍA

8.2.1 Resolución y Definición del Dominio

Se introdujeron receptores discretos en los dieciocho (18) puntos de la campaña de monitoreo de calidad del aire realizada por la empresa K2 INGENIERÍA S.A.S. durante el año 2017¹⁰ en la vecindad del proyecto, lo anterior con el fin de establecer una comparación entre los resultados de concentración de los diferentes contaminantes obtenidos mediante la campaña de monitoreo del periodo y los resultados de la modelación AERMOD. Los receptores utilizados en la modelación se presentan en la siguiente tabla (coordenadas Magna Sirgas Colombia Bogotá):

Tabla 50. Receptores discretos de modelación

Receptor	Coordenada X	Coordenada Y
Patio taller	986,485.77	1,005,388.28
Portal Américas	989,623.15	1,003,658.43
Villa Blanca	990,032.96	1,002,700
Kennedy	991,009.97	1,002,242.2
Palenque	991,817.52	1,002,223.68
Av Boyaca	993,028.87	1,002,564.52
Avenida 68	994,335.65	1,001,323.45
Rosario	994,979.81	1,000,684.49
NQS	996,030.84	1,000,094.66
Santander	997,991.19	999,566.25
Hospitales	998,845	999,682.96
Calle 10-11	999,784.5	1,000,303.44
Calle 26	1,000,515.62	1,001,747.14
Calle 45	1,001,128.95	1,004,127.72
Calle 52	1,001,310.79	1,005,024.66
Calle 63	1,001,307.69	1,006,035.26
Calle 72	1,001,504.93	1,006,646.53
Calle 76	1,002,062.76	1,007,525.05

Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

8.2.1.1 Línea Base y Operación

Para la modelación del escenario 1 (línea base) y escenario 3 (operación) se utilizaron dos mallas de receptores, la primera y más extensa se proyectó 39 km en dirección Este y 31 km en dirección Norte con espaciado de 1 km y extensión

¹⁰ Informe Técnico “Monitoreo de calidad del aire en el área de influencia del proyecto: Construcción del metro de Bogotá, ubicado en el área urbana de Bogotá, departamento de Cundinamarca para la empresa INGETEC S.A.”, K2 INGENIERÍA S.A.S.

en área de 1209 km²; el origen de esta malla de receptores comprendió las siguientes coordenadas: 975,603.8 m. al Este y 988,244.5 m. al Norte.

La segunda malla se encuentra dentro de la primera y su origen correspondió a las siguientes coordenadas: 986,074 m. al Este y 998,529.4 m. al Norte, la cual se proyectó 17 km en dirección Este y 10.4 km en dirección Norte. Se establecieron celdas espaciadas cada 200 metros. El dominio de modelación es de 176.8 km². El sistema de referencia de las anteriores coordenadas es Magna Sirga Colombia Bogotá.

En la Figura 55 se pueden observar la malla utilizada, la idealización de las fuentes y los receptores discretos escogidos para la modelación.

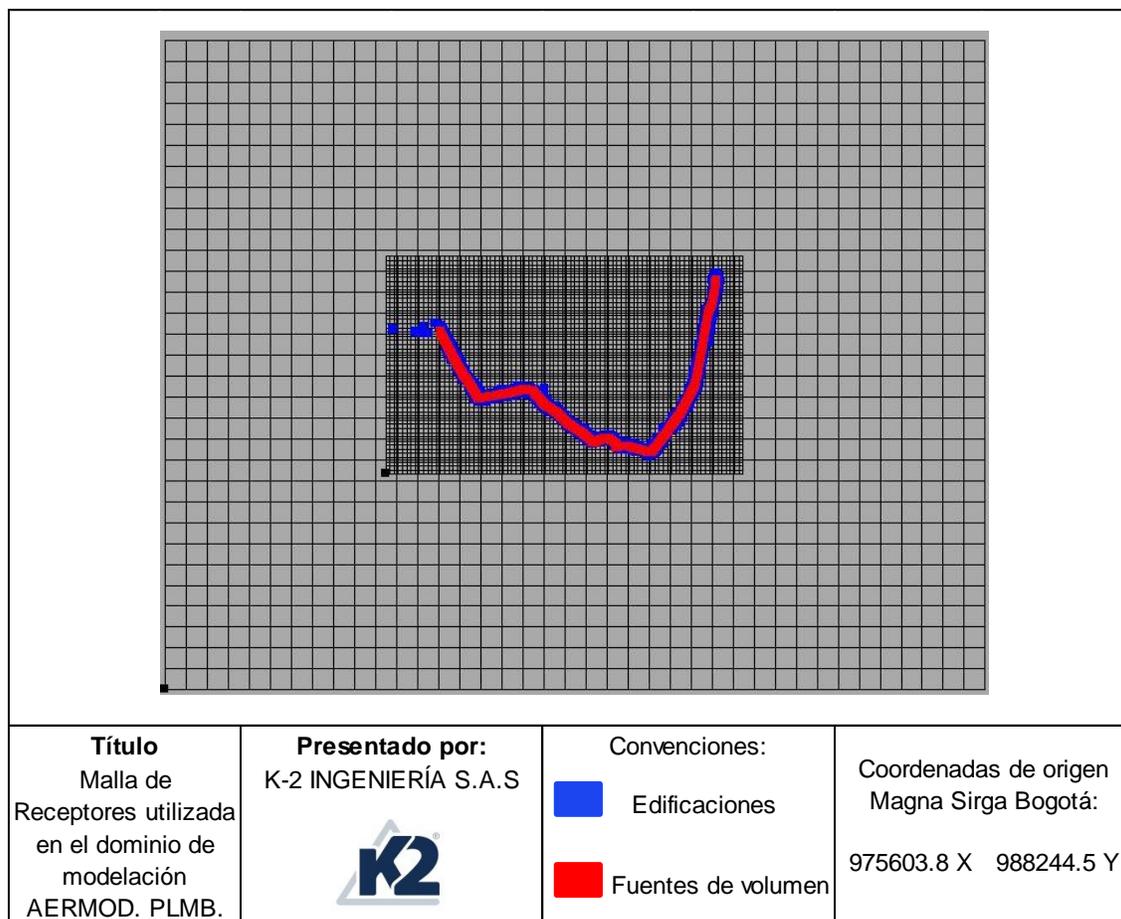


Figura 55. Malla de receptores e idealización de fuentes utilizada en la definición del dominio de modelación Escenario 1 y 3.
Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

8.2.1.2 Construcción

Para la modelación del escenario 2 (construcción) se utilizaron dos mallas de receptores, la primera y más extensa se proyectó 33 km en dirección Este y 27 km en dirección Norte con espaciado de 1.5 km y extensión en área de 891 km²; el origen de esta malla de receptores comprendió las siguientes coordenadas: 978,559.2 m. al Este y 991,286.1 m. al Norte.

La segunda malla se encuentra dentro de la primera y es una malla tipo buffer de receptores con espaciado de 350 m en X y Y.

En la se pueden observar la malla utilizada, la idealización de las fuentes y los receptores discretos escogidos para la modelación.

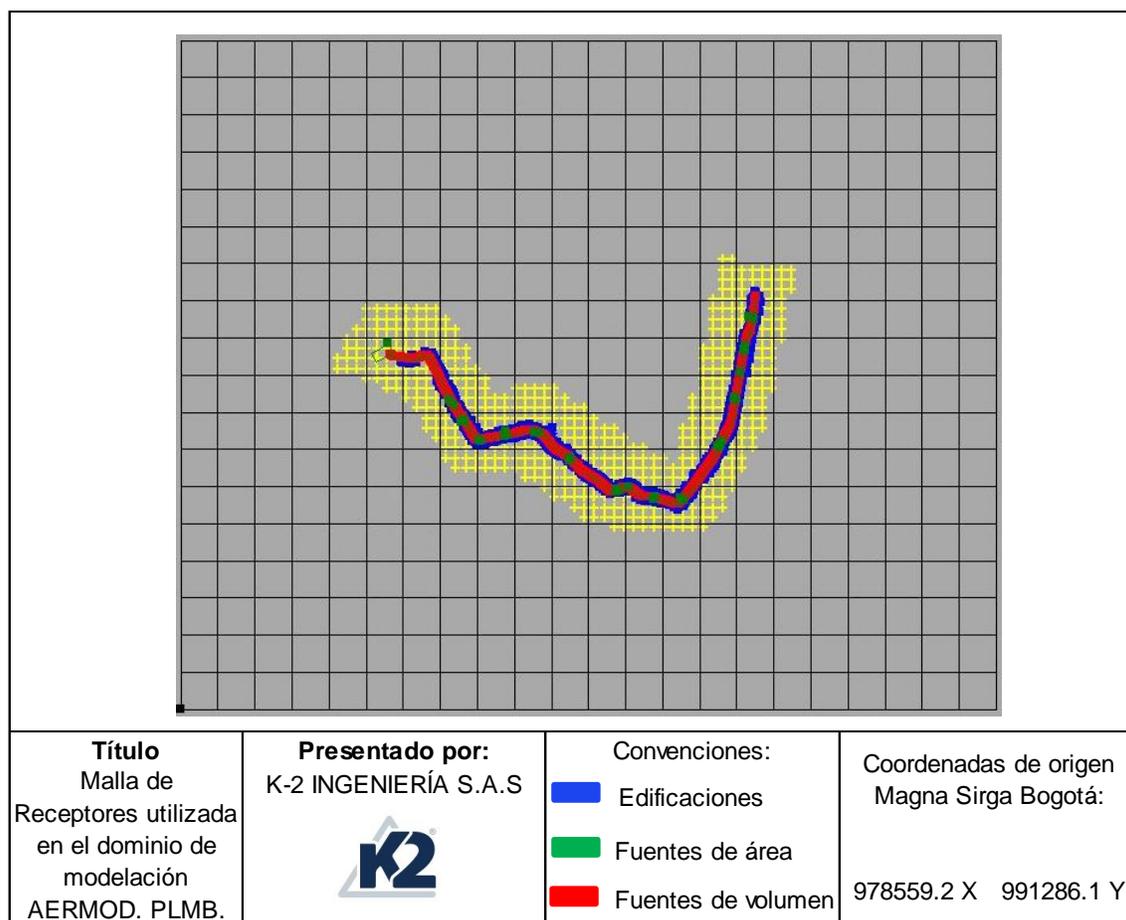


Figura 56. Malla de receptores e idealización de fuentes utilizada en la definición del dominio de modelación Escenario 2.

Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

8.3 TOPOGRAFÍA

En el modelo de dispersión objeto de estudio, se tuvo en cuenta el relieve de la zona del proyecto, elevaciones tanto para los receptores como para todas las fuentes simuladas, reproduciendo de esta manera las condiciones topográficas en el dominio de interés. Esta topografía fue generada e incluida en el modelo para tener en cuenta emisiones a nivel.

Para el proyecto se usó como base la topografía pública del proyecto STRM de la NASA con resolución de 3 segundos de arco. En la siguiente figura se observa la topografía del proyecto para los escenarios simulados.

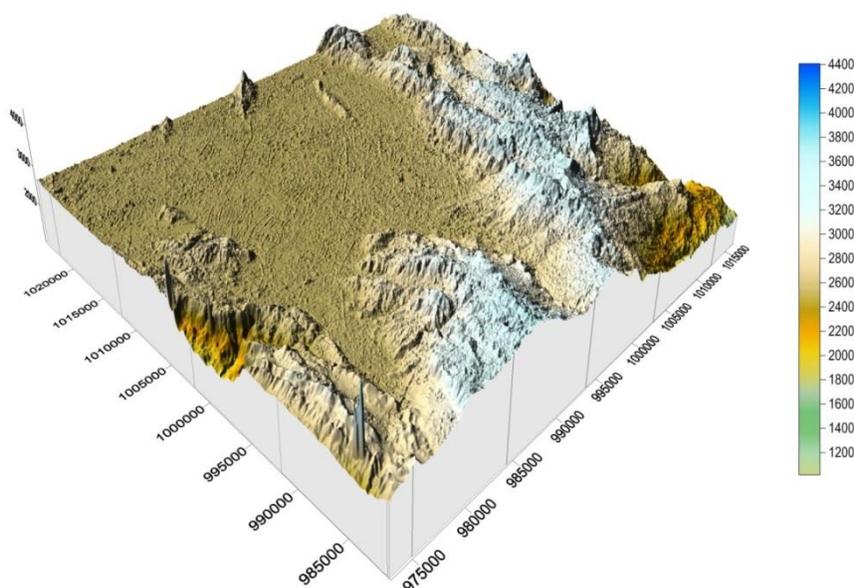


Figura 57. Topografía de la zona

Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

A partir del modelo digital de elevación y el campo de viento, el modelo AERMOD puede estimar el transporte y la dispersión de los contaminantes emitidos por los focos, teniendo en cuenta los efectos del terreno complejo (distribución espacial de las características propias de la zona de estudio) en todas las fuentes.

Por tanto, los niveles de inmisión obtenidos en AERMOD son función de los parámetros de emisión, de los campos de viento (datos meteorológicos) y de la topografía de la zona, dicha sinergia debe aproximarse al objeto real para que la dispersión de los contaminantes y en general los resultados permitan la traducción de las propiedades del modelo a la realidad.

9. RESULTADOS DE MODELACIÓN AERMOD PARA PROYECTO ESTRUCTURACIÓN TÉCNICA DE LA PRIMERA LÍNEA DEL METRO DE BOGOTÁ (PLMB)

El modelo AERMOD es un modelo de dispersión atmosférica que se puede utilizar para evaluar la concentración de contaminantes emitidos desde diferentes tipos de fuentes, este modelo simula el transporte y la dispersión atmosférica de contaminantes emitidos desde fuentes de área y volumétricas. AERMOD es un modelo refinado que utiliza datos meteorológicos horarios procesados secuencialmente con el objetivo de calcular las concentraciones de contaminantes en aire para diferentes escalas temporales de promedio desde una hora hasta un año.

9.1 ARCHIVOS DE ENTRADA AERMOD

Para la implementación y corrida de Modelación AERMOD se requiere información de entrada que se describe a continuación:

- a) Datos de las fuentes: tipo de fuente. ubicación. altura. áreas. volúmenes y elevación del terreno en donde están ubicadas las fuentes. así como la geometría de la fuente.
- b) Contaminantes a evaluar: Se seleccionan los contaminantes de interés para el proyecto que corresponden a: monóxido de carbono (CO), material particulado específicamente PM_{10} y $PM_{2.5}$, dióxido de nitrógeno (NO_2), dióxido de azufre (SO_2) y compuestos orgánicos volátiles (VOC).
- c) Datos de Modelo digital de elevación: Esta información describe la altimetría de una zona mediante un conjunto de datos acotados.
- d) Datos meteorológicos: Se requiere como datos de entrada las características de la superficie. incluyendo el parámetro de rugosidad de la superficie (z_0). la relación de Bowen y el albedo. así como datos horarios de velocidad y dirección del viento. etc. Dos archivos de entrada son producidos para modelación AERMOD. el archivo de superficie (SFC) contiene las variables horarias calculadas. El archivo de los perfiles (PFL) contiene los datos calculados en cada nivel por modelación meteorológica WRF.
- e) Datos de los receptores: coordenadas. elevación. altura respecto de la superficie y la escala de la altura de las elevaciones del terreno que son generadas por el procesador de terreno para ingresar a AERMOD.
- f) Datos de emisión: Se requiere como dato de entrada las emisiones calculadas en unidades de g/s de cada una de las fuentes idealizadas.

Según la geometría de la fuente. el dato de emisión a incluir se determinará en $g/s \cdot m^2$ o en unidades que dependerá de la elección de la forma espacial.

9.2 ARCHIVOS DE SALIDA AERMOD

Los archivos de salida del modelo AERMOD incluye la información de entrada, tablas resúmenes de las concentraciones más altas por receptor y para tiempos específicos promedios, tablas resúmenes de las concentraciones máximas y de los valores concurrentes por receptor para cada hora o día procesado.

El modelo se ejecutó para los siguientes resultados:

- Promedio del período (año): Resultado de promediar los valores de concentración de cada uno de los receptores del escenario para todo el periodo evaluado. No aplica para el contaminante monóxido de carbono (CO).
- Promedio de 24 horas: Arroja los datos máximos para cada receptor. No aplica para el contaminante monóxido de carbono (CO).
- Promedio de 8 horas: Arroja el dato más elevado para cada receptor, aplicable específicamente para el contaminante monóxido de carbono (CO)
- Promedio de 3 horas: Arroja el dato más elevado para cada receptor, aplicable específicamente para el contaminante dióxido de azufre (SO₂)
- Promedio de 1 hora: Arroja el dato más elevado para cada receptor, aplicable para los contaminantes: monóxido de carbono (CO) y dióxido de nitrógeno (NO₂).

En el Anexo digital de modelación (Anexo AD-1) se encuentran los archivos¹¹ de entrada y salida del modelo, que forman parte integral de este informe:

- Archivo de datos: AMI. (Entrada)
- Archivo meteorológico: SFC. PFL. (Entrada)
- Archivo topográfico: DEM. (Entrada)
- Archivo geográfico/planos: JPG y DXF. (Entrada)
- Archivos de datos: AML y AMZ. (Salida)
- Carpeta Geodatabase SIG (Salida)

¹¹Un archivo por escenario y contaminante

9.3 ESCENARIO LÍNEA BASE

Esta sección contiene los resultados de la modelación de dispersión (MD) de las emisiones de contaminantes: CO, PM₁₀, PM_{2.5}, NO₂, SO₂ y COV, asociadas al escenario línea base del proyecto Primera Línea del Metro de Bogotá ubicado en la ciudad de Bogotá, departamento de Cundinamarca. Para el escenario 1 (línea base) los resultados corresponden al tráfico vehicular presentado en el año 2016. Los archivos ejecutables de los escenarios simulados se encuentran en el anexo AD-1 y las curvas de concentración – isopletras en el anexo 4.

Se realizó una relación entre el resultado de las mediciones directas (CA) en cada estación y el resultado de la modelación (MD) de cada contaminante para conocer el porcentaje de aporte en los tramos de la Primera Línea del Metro de Bogotá sobre el monitoreo de calidad del aire donde se tiene el aporte de todas las fuentes.

Es importante resaltar que la relación mencionada anteriormente depende de diferentes factores como la altura a la cual se ubica la estación de monitoreo ya que entre más elevada se encuentra, mayor área de influencia, lo anterior indica aportes de fuentes diferentes a la vía; de acuerdo a la literatura, el radio de influencia puede estar entre 300 y 500 metros, otro factor importante es la distancia a la vía, debido a que entre más lejos se encuentre, menor será el aporte brindado por el proyecto y se verá afectado por otras vías que se localicen alrededor.

En el presente estudio no se contempló la calidad del combustible, año de fabricación, el estado de los vehículos, paradas en frío y en caliente, entre otras, que pueden influir en los resultados. Si bien estos modelos han sido de gran ayuda para la toma de decisiones en lugares que no cuentan

9.3.1 Resultados de modelación – Material Particulado (PM₁₀ y PM_{2.5}):

En la Tabla 51 se presenta la contribución estimada de las concentraciones de material particulado PM₁₀ y PM_{2.5} en los receptores discretos.

Tabla 51. Resultados PM₁₀ - PM_{2.5} 24 horas y anual. Escenario 1

Estación	PM ₁₀ (µg/m ³) MD		PM _{2.5} (µg/m ³) MD	
	24 horas*	Anual	24 horas*	Anual
Patio Taller	0.6	0.2	0.2	0.1
Portal Américas	8.1	2.3	2.4	0.7
Villa Blanca	3.0	1.2	0.9	0.3
Kennedy	9.8	3.3	2.8	1.0

Estación	PM ₁₀ (µg/m ³) MD		PM _{2.5} (µg/m ³) MD	
	24 horas*	Anual	24 horas*	Anual
Palenque	8.2	2.4	2.4	0.7
Avenida Boyacá	13.0	4.6	3.7	1.3
Avenida 68	11.3	4.2	3.1	1.2
Rosario	14.3	4.5	4.0	1.2
NQS	18.6	6.2	5.2	1.7
Santander	13.7	3.7	4.3	1.2
Hospitales	14.1	4.3	4.2	1.3
Calle 10-11	4.7	1.0	1.4	0.3
Calle 26	2.7	0.4	0.8	0.1
Calle 45	6.6	2.2	2.0	0.7
Calle 52	5.4	1.7	1.6	0.5
Calle 63	5.9	1.9	1.8	0.6
Calle 72	5.6	1.8	1.7	0.6
Calle 76	2.4	0.7	0.7	0.2

*Corresponde al valor máximo de concentración estimado mediante modelación para cada receptor
Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

De acuerdo a la Tabla 51, los resultados anuales arrojados mediante la simulación no superan los 7 µg/m³ de material particulado, siendo el valor más alto la estación NQS de 6.2 µg/m³ y 1.7 µg/m³ para PM₁₀ y PM_{2.5}, respectivamente, mientras los valores más bajos se presentaron en Patio Taller y Calle 26 con resultados de menores a 0.5 µg/m³. Las concentraciones de material particulado- PM₁₀ y PM_{2.5} no presentan valores superiores a la norma anual de calidad del aire, 50 µg/m³ para PM₁₀ y de 25 µg/m³ para PM_{2.5}.

Tabla 52. Aportes PM₁₀ y PM_{2.5} anual. Escenario 1

Estación	PM ₁₀ anual			PM _{2.5} anual		
	CA (µg/m ³)	MD (µg/m ³)	Relación MD/CA	CA (µg/m ³)	MD (µg/m ³)	Relación MD/CA
Patio Taller	51.5	0.2	0.4%	31.0	0.1	0.2%
Portal Américas	78.3	2.3	2.9%	38.1	0.7	1.8%
Villa Blanca	58.8	1.2	2.0%	22.5	0.3	1.5%
Kennedy	46.0	3.3	7.1%	28.6	1.0	3.3%
Palenque	45.4	2.4	5.3%	23.9	0.7	2.9%
Avenida Boyacá	59.4	4.6	7.8%	29.0	1.3	4.5%
Avenida 68	39.6	4.2	10.7%	19.5	1.2	6.0%
Rosario	35.8	4.5	12.4%	19.8	1.2	6.2%
NQS	48.8	6.2	12.7%	28.1	1.7	6.1%
Santander	34.5	3.7	10.7%	19.0	1.2	6.1%
Hospitales	53.3	4.3	8.0%	34.4	1.3	3.7%

Estación	PM ₁₀ anual			PM _{2.5} anual		
	CA (µg/m ³)	MD (µg/m ³)	Relación MD/CA	CA (µg/m ³)	MD (µg/m ³)	Relación MD/CA
Calle 10-11	42.1	1.0	2.4%	24.4	0.3	1.2%
Calle 26	37.7	0.4	1.1%	16.4	0.1	0.8%
Calle 45	43.4	2.2	5.0%	22.8	0.7	2.9%
Calle 52	45.6	1.7	3.6%	22.9	0.5	2.2%
Calle 63	43.0	1.9	4.4%	23.8	0.6	2.5%
Calle 72	45.4	1.8	4.0%	22.7	0.6	2.4%
Calle 76	45.4	0.7	1.4%	19.8	0.2	1.0%

Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

Las estaciones con la relación más alta son Rosario y NQS con valores de 12.4% y 12.7%, respectivamente. Y las estaciones con los valores más bajos, que no superan un 1.1% son Patio Taller y Calle 26.

La Figura 58 y Figura 59 representan los resultados anuales en los receptores discretos. Donde se puede apreciar que el receptor con mayores concentraciones de material particulado es NQS.

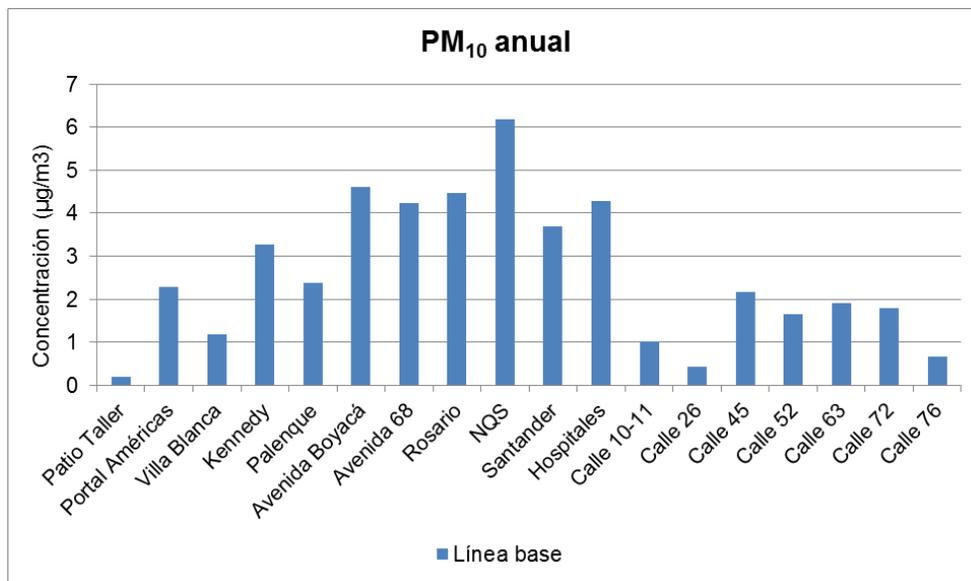


Figura 58. Aportes anuales PM₁₀. Escenario 1

Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

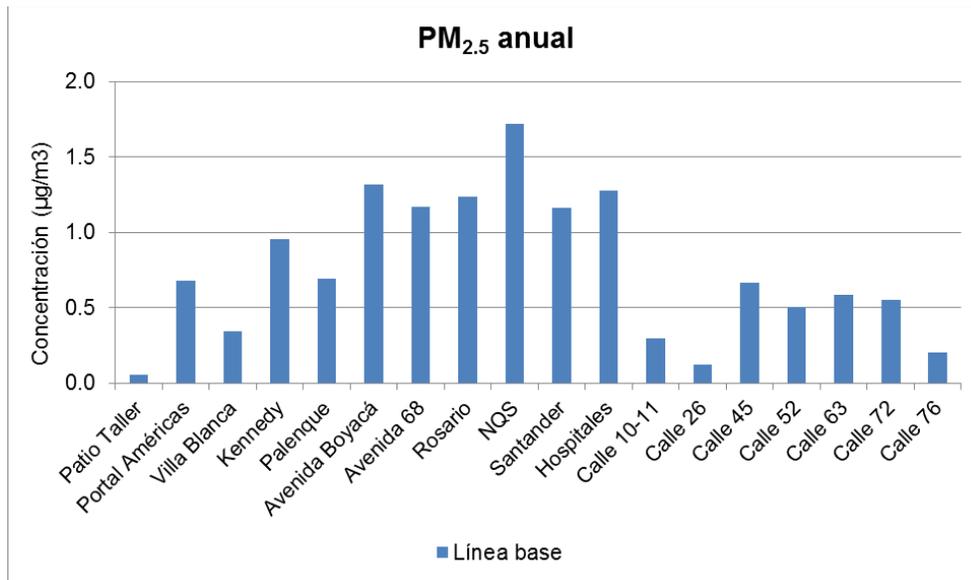


Figura 59. Aportes anuales PM_{2.5}. Escenario 1

Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

A continuación se muestra la distribución de curvas de concentración – Isopletras para PM₁₀ y PM_{2.5} estimadas para el escenario de línea base en el periodo anual, como resultado de la modelación.



Figura 60. Isopleta anual PM₁₀ proyecto PLMB. Escenario 1
Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

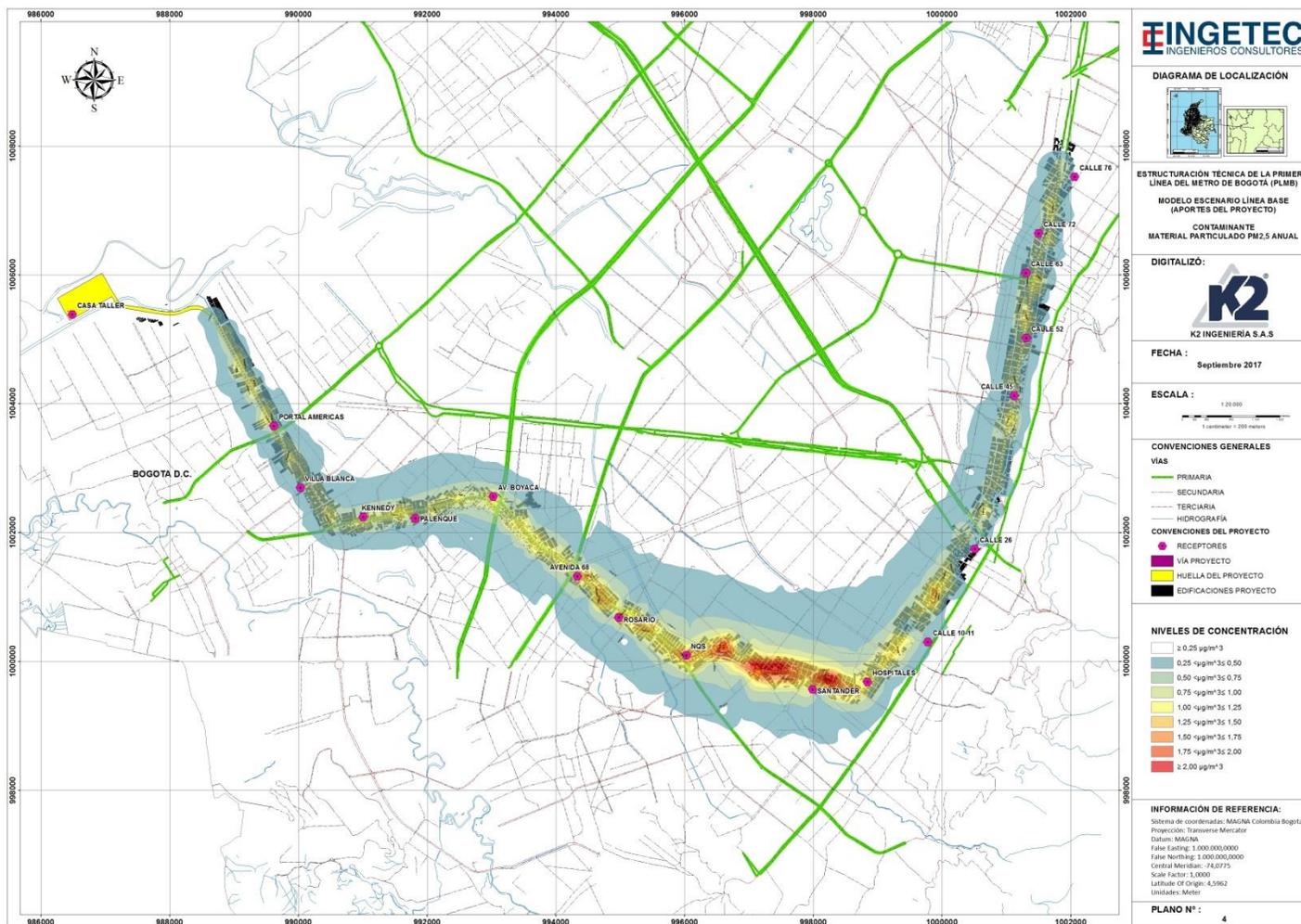


Figura 61. Isopleta Anual PM_{2.5} proyecto PLMB. Escenario 1
Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

Para PM₁₀, la isopleta presenta un rango de concentración de 0.7 – 5.6 µg/m³, se presentan las mayores concentraciones entre el sector NQS y Hospitales. Como puede apreciarse en las curvas de concentración de PM_{2.5}, los mayores aportes se presentan entre el sector NQS hasta la Santander, con un rango de concentración de 0.25 a 2 µg/m³.

La dispersión de material particulado se visualiza uniforme en el área de influencia del proyecto, en el cual se tuvo en cuenta edificaciones, topografía de la zona de estudio, factores meteorológicos, como campos de viento y alturas de mezcla que inciden directamente en la dispersión de la pluma gaussiana, con componentes predominantes provenientes del Sureste (SE), tal como se observó en los mapas de dispersión (Figura 60 a Figura 61).

9.3.2 Resultados de modelación – Dióxido de nitrógeno (NO₂)

Los resultados del modelo de dispersión atmosférico para dióxido de nitrógeno (NO₂) es expuesto en las siguientes tablas; los periodos de tiempo utilizados en la modelación se tomaron con base a lo establecido en la Resolución 610 de 2010 para dióxido de nitrógeno (NO₂), 24 horas y anual. La Tabla 53 presenta los resultados 24 horas y anuales del Dióxido de Nitrógeno.

Tabla 53. Resultados NO₂ 24 horas y anual. Escenario 1

Estación	NO ₂ (µg/m ³) MD	
	24 horas*	Anual
Patio Taller	0.5	0.1
Portal Américas	5.9	1.7
Villa Blanca	2.3	0.9
Kennedy	8.4	2.9
Palenque	7.1	2.1
Avenida Boyacá	10.3	3.6
Avenida 68	7.0	2.6
Rosario	8.8	2.7
NQS	11.8	3.9
Santander	13.6	3.7
Hospitales	13.1	4.0
Calle 10-11	4.1	0.9
Calle 26	2.4	0.4
Calle 45	5.9	1.9
Calle 52	4.8	1.5
Calle 63	5.3	1.7
Calle 72	5.0	1.6

Informe Modelo de dispersión de contaminantes, 2017

Estación	NO ₂ (µg/m ³) MD	
	24 horas*	Anual
Calle 76	2.1	0.6

*Corresponde al valor máximo de concentración estimado mediante modelación para cada receptor
Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

Se puede apreciar que los valores anuales no superan los 5 µg/m³. Los niveles de concentración diario (máximo) y anual (promedio), evaluados en el presente estudio producto del modelo de dispersión, resultan ser inferiores a los umbrales establecidos en la legislación de calidad del aire para NO₂ (100 µg/m³ por año). El receptor que potencialmente recibiría los mayores aportes es Hospitales, con valor de 4 µg/m³.

En la Tabla 54 se puede observar los resultados de la calidad del aire, de la modelación y la relación entre ambos.

Tabla 54. Aportes NO₂ anual. Escenario 1

Estación	NO ₂ anual		
	CA (µg/m ³)	MD (µg/m ³)	Relación MD/CA
Patio Taller	15.5	0.1	0.9%
Portal Américas	15.9	1.7	10.5%
Villa Blanca	19.6	0.9	4.6%
Kennedy	18.7	2.9	15.3%
Palenque	17.2	2.1	12.0%
Avenida Boyacá	27.6	3.6	13.2%
Avenida 68	21.1	2.6	12.3%
Rosario	16.1	2.7	17.0%
NQS	23.7	3.9	16.4%
Santander	13.9	3.7	26.8%
Hospitales	44.1	4.0	9.1%
Calle 10-11	14.9	0.9	6.2%
Calle 26	15.5	0.4	2.4%
Calle 45	18.3	1.9	10.6%
Calle 52	19.0	1.5	7.7%
Calle 63	15.1	1.7	11.3%
Calle 72	16.5	1.6	9.7%
Calle 76	14.6	0.6	4.0%

Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

La relación entre la modelación y calidad el aire se presenta en un rango de hasta 27%, donde la estación Santander presenta 26.8% de similitud. Mientras que

existe un valor que no supera el 1% como es: Patio Taller. La Figura 62 presenta los aportes anuales de NO₂, donde se observa que las estaciones con concentraciones más elevadas son NQS, Santander y Hospitales.

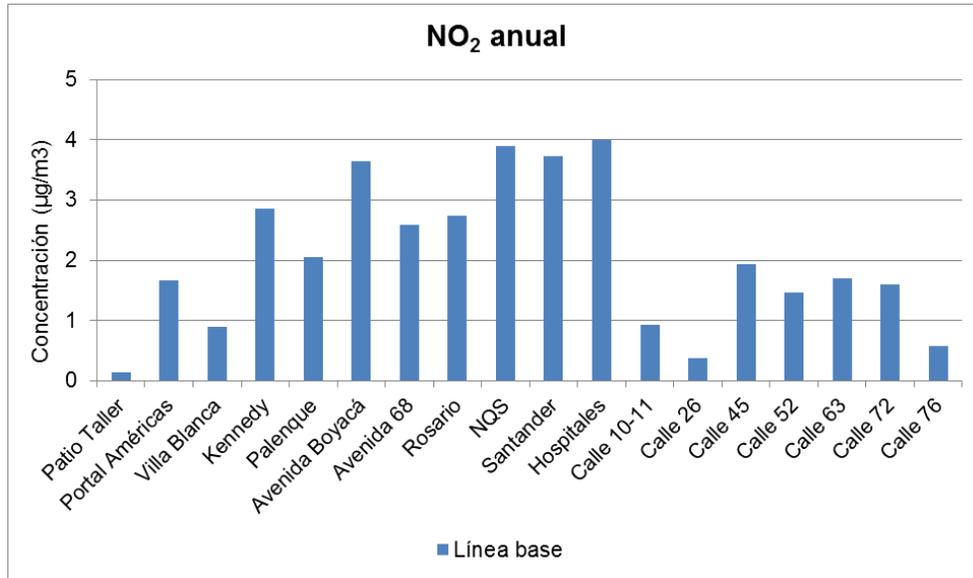


Figura 62. Aportes anuales NO₂. Escenario 1

Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

En la Figura 63 se observa la isopleta de concentración anual de NO₂, se obtiene un rango de concentración anual de 0.9 – 7.2 µg/m³, la isopleta no excede la norma anual de 100 µg/m³. Se puede observar que las mayores concentraciones se presentan entre NQS y Hospitales.

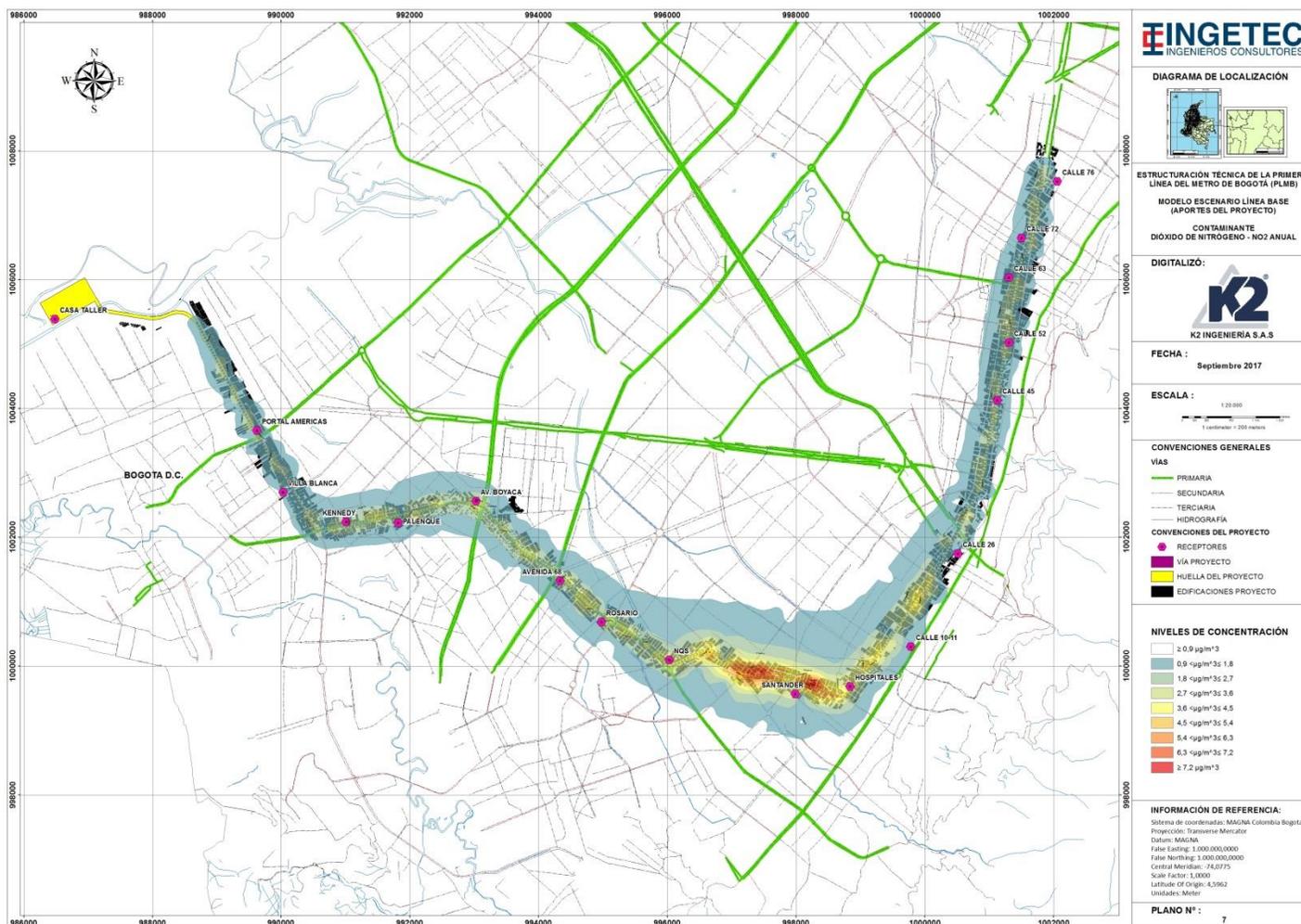


Figura 63. Isopleta anual NO₂ proyecto PLMB. Escenario 1
Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S

9.3.3 Resultados de modelación – Dióxido de azufre (SO₂)

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para los casos de estudio del dióxido de azufre, los valores de inmisión de SO₂ en los receptores de calidad del aire calculados mediante la modelación se encuentran consolidados en la Tabla 55. La resolución temporal de modelación se tomó con base a lo aplicable en la Resolución 610 de 2010, esto es, 24 h y anual.

Tabla 55. Resultados SO₂ 24 horas y anual. Escenario 1

Estación	SO ₂ (µg/m ³) MD	
	24 horas*	Anual
Patio Taller	0.06	0.02
Portal Américas	0.73	0.21
Villa Blanca	0.28	0.11
Kennedy	0.95	0.32
Palenque	0.80	0.23
Avenida Boyacá	1.15	0.41
Avenida 68	0.78	0.29
Rosario	0.99	0.31
NQS	1.33	0.44
Santander	1.67	0.46
Hospitales	1.52	0.46
Calle 10-11	0.47	0.10
Calle 26	0.27	0.04
Calle 45	0.72	0.24
Calle 52	0.59	0.18
Calle 63	0.65	0.21
Calle 72	0.62	0.20
Calle 76	0.26	0.07

*Corresponde al valor máximo de concentración estimado mediante modelación para cada receptor
Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

Los niveles de concentración anuales de SO₂ estimados sobre los receptores discretos no representan una concentración mayor a 1 µg/m³, al comparar el valor con los límites anuales establecidos en la legislación vigente – Resolución 610 de 2010 (80 µg/m³, véase sección 2.4.1) se observa que no se presentan excedencias de la normativa.

La Tabla 56 presenta los aportes del modelo en relación con la calidad del aire, donde el aporte más alto es del sector Hospitales con 2.66% y el menor con 0.08% en Patio Taller.

Tabla 56. Aportes SO₂ anual. Escenario 1

Estación	SO ₂ anual		
	CA (µg/m ³)	MD (µg/m ³)	Relación MD/CA
Patio Taller	20.17	0.02	0.08%
Portal Américas	17.27	0.21	1.19%
Villa Blanca	17.20	0.11	0.62%
Kennedy	17.26	0.32	1.86%
Palenque	18.03	0.23	1.28%
Avenida Boyacá	17.93	0.41	2.27%
Avenida 68	15.18	0.29	1.91%
Rosario	16.81	0.31	1.83%
NQS	17.58	0.44	2.50%
Santander	17.85	0.46	2.56%
Hospitales	17.39	0.46	2.66%
Calle 10-11	18.68	0.10	0.56%
Calle 26	19.36	0.04	0.22%
Calle 45	17.97	0.24	1.33%
Calle 52	17.54	0.18	1.03%
Calle 63	16.46	0.21	1.28%
Calle 72	16.73	0.20	1.18%
Calle 76	15.54	0.07	0.46%

Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

La Figura 64 es una representación de los datos anuales de la Tabla 55, donde se puede observar que los receptores con mayores aportes son NQS, Santander y Hospitales. Mientras que los que presentan las menores concentraciones son: Patio Taller y Calle 26.

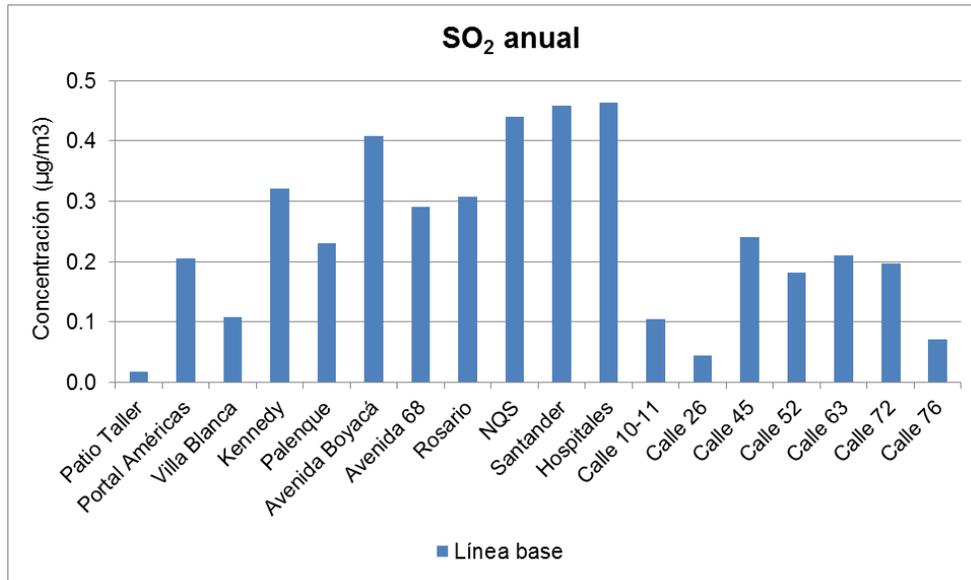


Figura 64. Aportes anuales SO2. Escenario 1

Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

La Isopleta para SO₂ se presenta a continuación para el periodo anual, presenta un rango de concentración de 0.11 – 0.88 µg/m³. No se excede la norma anual de 80 µg/m³. Se puede observar que las mayores concentraciones se obtienen entre NQS y Hospitales.

El Anexo 4 contiene los mapas de dispersión de SO₂ (mejorando el nivel de detalle) reportados para el periodo anual, 24 horas y de 3 horas

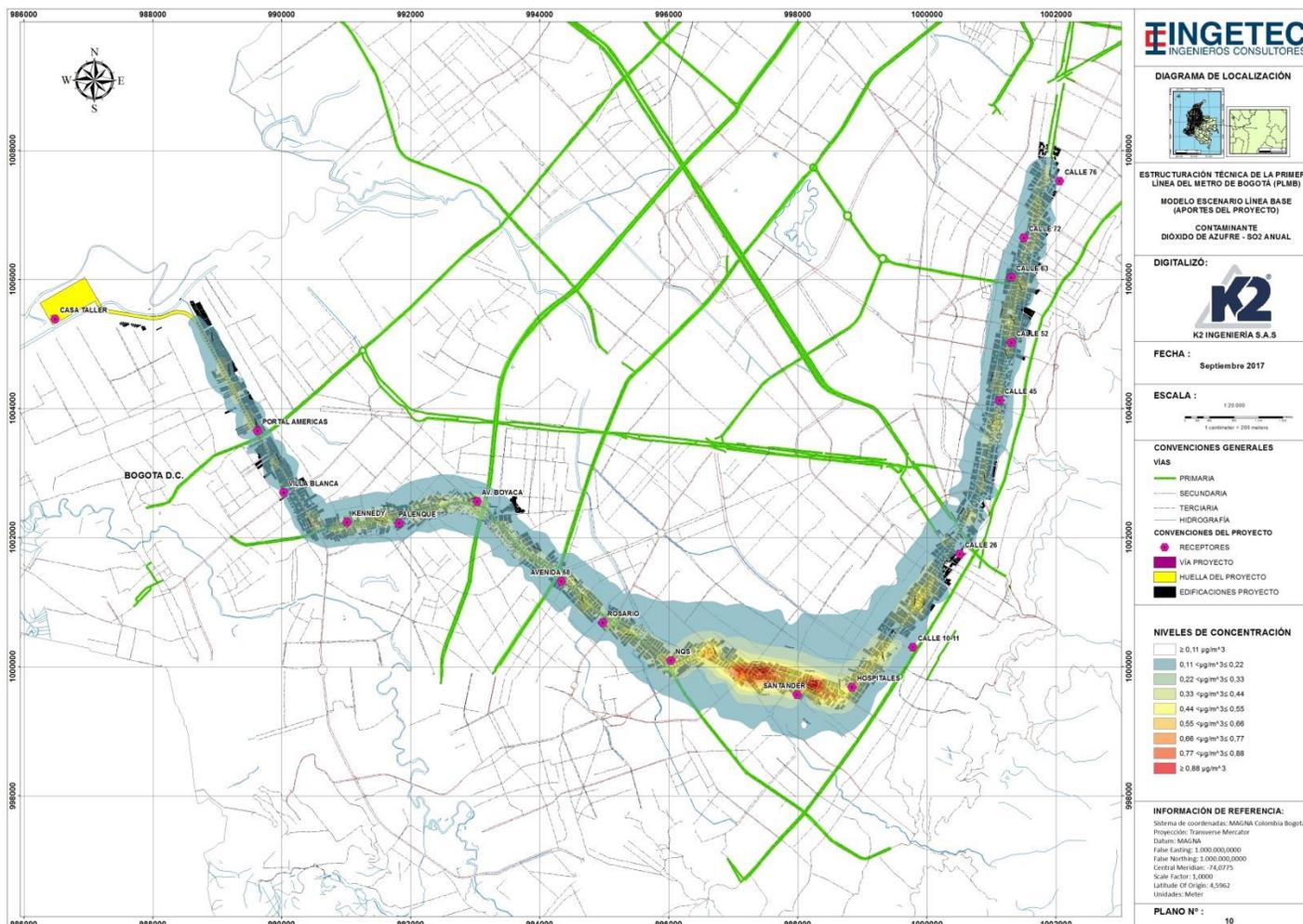


Figura 65. Isopleta anual SO₂ proyecto PLMB. Escenario 1
Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S

9.3.4 Resultados de modelación – Monóxido de carbono (CO)

En la Tabla 57 se presentan las concentraciones máximas obtenidas mediante simulación de dispersión de monóxido de carbono en los receptores discretos para periodos horario y octahorario.

Tabla 57. Resultados CO 1 hora y 8 horas. Escenario 1

Estación	CO (µg/m ³) MD	
	1 hora*	8 horas*
Patio Taller	7.5	3.1
Portal Américas	54.6	28.5
Villa Blanca	27.1	12.8
Kennedy	66.0	42.4
Palenque	51.6	35.0
Avenida Boyacá	68.7	49.7
Avenida 68	61.0	31.6
Rosario	66.0	42.6
NQS	89.7	59.0
Santander	128.8	74.0
Hospitales	104.4	66.4
Calle 10-11	55.8	21.7
Calle 26	31.4	13.8
Calle 45	82.7	35.9
Calle 52	59.5	27.1
Calle 63	46.8	29.0
Calle 72	47.4	28.2
Calle 76	20.6	11.7

*Corresponde al valor máximo de concentración estimado mediante modelación para cada receptor
Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

Los niveles de concentración 8 horas de CO estimados sobre los receptores discretos no superan los 74 µg/m³, al comparar el valor con los límites establecidos en la legislación vigente – Resolución 610 de 2010 (10,000 µg/m³, véase sección 2.4.1) se observa que no se presentan excedencias de la normativa. En la Tabla 58 se consolidan las concentraciones anuales de calidad del aire y modelación, así como su relación entre ellas.

Tabla 58. Aportes CO 8 horas. Escenario 1

Estación	CO 8 horas		
	CA (µg/m ³)	MD* (µg/m ³)	Relación MD/CA
Patio Taller	110.6	3.1	2.8%

Estación	CO 8 horas		
	CA ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	MD* ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Relación MD/CA
Portal Américas	100.6	28.5	28.4%
Villa Blanca	493.1	12.8	2.6%
Kennedy	161.7	42.4	26.2%
Palenque	103.5	35.0	33.8%
Avenida Boyacá	462.3	49.7	10.7%
Avenida 68	33.5	31.6	94.2%
Rosario	120.9	42.6	35.2%
NQS	249.0	59.0	23.7%
Santander	543.5	74.0	13.6%
Hospitales	494.4	66.4	13.4%
Calle 10-11	105.2	21.7	20.6%
Calle 26	1189.4	13.8	1.2%
Calle 45	136.6	35.9	26.3%
Calle 52	410.1	27.1	6.6%
Calle 63	539.8	29.0	5.4%
Calle 72	80.9	28.2	34.8%
Calle 76	257.3	11.7	4.6%

*Corresponde al valor máximo de concentración estimado mediante modelación para cada receptor
Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

El aporte más alto se presenta en la Avenida 68 con 94.2% con relación a la calidad del aire y el menor valor se encuentra en Calle 26 con 1.2%.

Los resultados de concentración 8 horas se pueden apreciar en la Figura 66, donde los receptores con mayores aportes fueron Santander y Hospitales con 74 y 66.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente

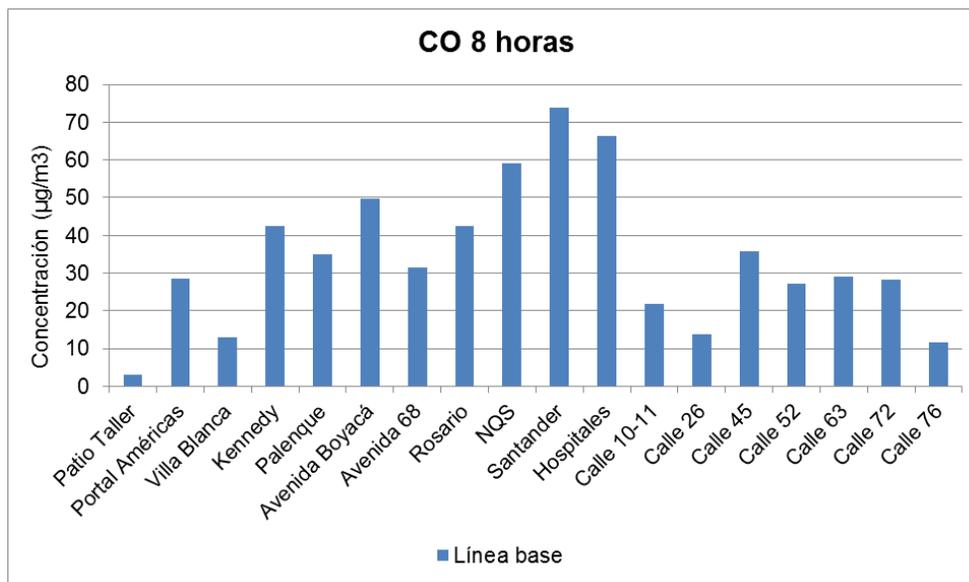


Figura 66. Aportes 8 horas CO. Escenario 1

Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S

En la Figura 67 se observa la isopleta de concentración octahoraria para el escenario modelado, el rango de concentración es de 13.75 – 110 µg/m³. No se excede la norma anual de 10,000 µg/m³, las mayores concentraciones se observan entre el sector NQS y Hospitales

En el Anexo 4 se incluyen los mapas de dispersión de CO con un mejor nivel de detalle, para los periodos horarios y octahorarias como resultado de la modelación.

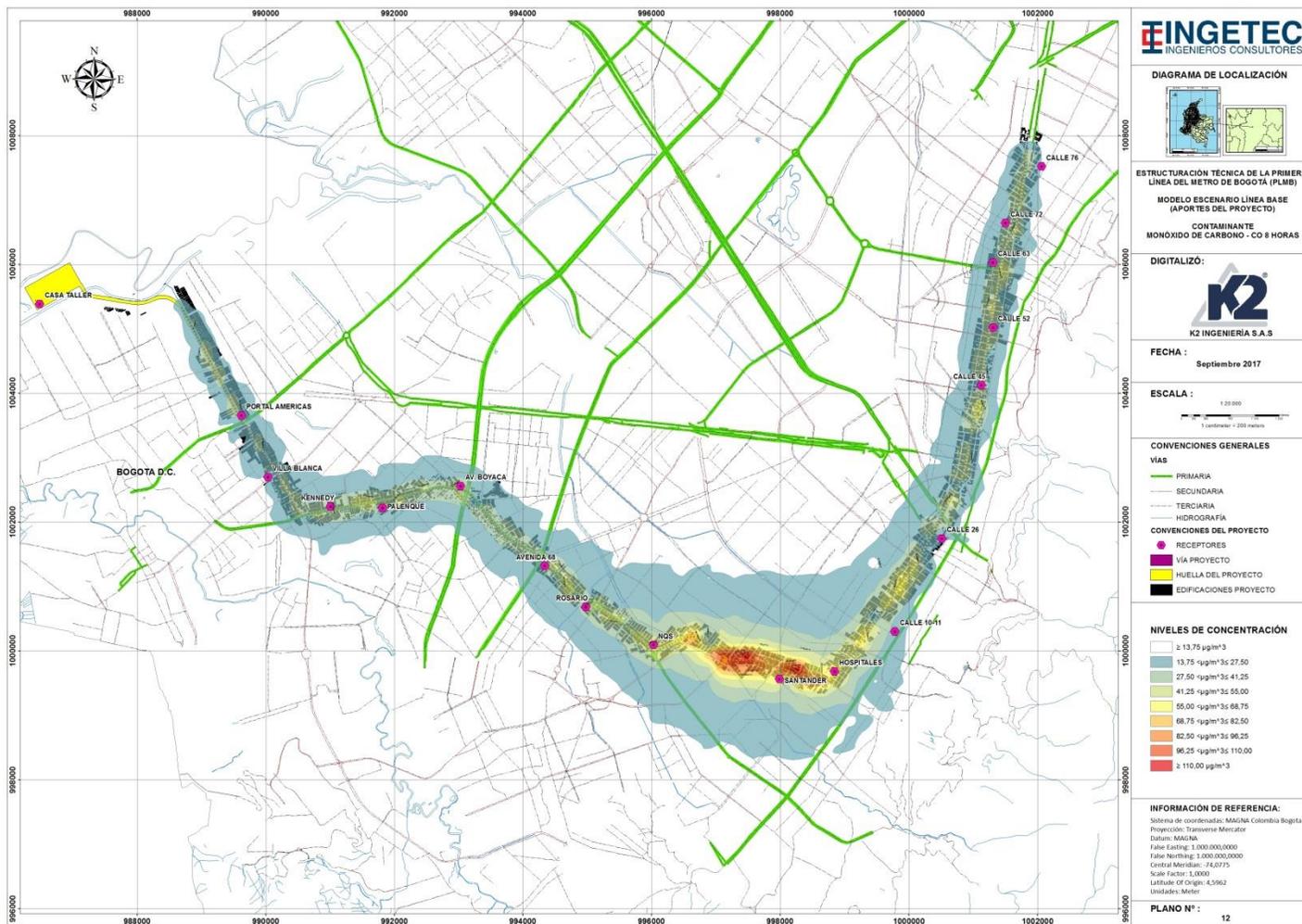


Figura 67. Isopleta CO 8 horas proyecto PLMB. Escenario 1
Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

9.3.5 Resultados de modelación – Compuestos orgánicos volátiles (VOC)

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para el caso de estudio. Los valores de inmisión de los compuestos orgánicos volátiles (VOC) en los receptores de calidad del aire calculados mediante la modelación se encuentran consolidados en la Tabla 59.

Tabla 59. Aportes VOC 24 horas y anual. Escenario 1

Estación	VOC (µg/m3) MD	
	24 horas*	Anual
Patio Taller	0.4	0.1
Portal Américas	4.4	1.3
Villa Blanca	1.8	0.7
Kennedy	6.7	2.3
Palenque	5.7	1.6
Avenida Boyacá	8.3	2.9
Avenida 68	5.6	2.1
Rosario	7.0	2.2
NQS	9.4	3.1
Santander	10.3	2.8
Hospitales	10.3	3.1
Calle 10-11	3.3	0.7
Calle 26	1.9	0.3
Calle 45	4.4	1.5
Calle 52	3.6	1.1
Calle 63	3.9	1.3
Calle 72	3.7	1.2
Calle 76	1.6	0.4

*Corresponde al valor máximo de concentración estimado mediante modelación para cada receptor
Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

En la Figura 68 se puede apreciar los aportes de los compuestos orgánicos volátiles en las estaciones de calidad del aire.

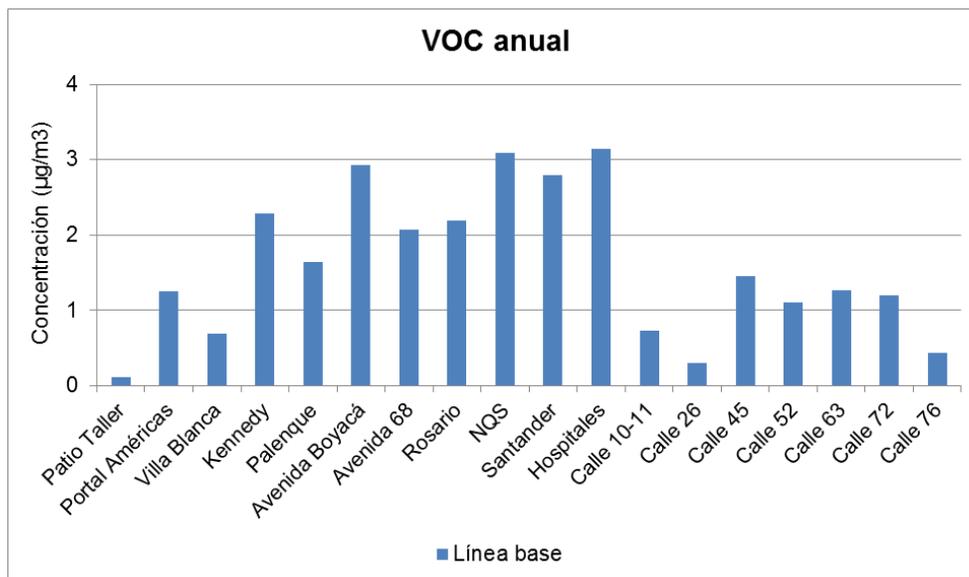


Figura 68. Aportes anuales VOC. Escenario 1

Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

Los niveles de concentración anual de VOC estimados sobre los receptores discretos no representan un incremento de más de $4 \mu\text{g}/\text{m}^3$. En el caso de los compuestos orgánicos volátiles no es posible comparar con la Resolución 610 de 2010, ya que no está regulado el nivel máximo permisible de concentración de VOC.

La isopleta anual para VOC se presenta a continuación, posee un rango de concentración de $0.65 - 5.20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de los compuestos orgánicos volátiles, las mayores concentraciones se observan entre el sector NQS y Hospitales.

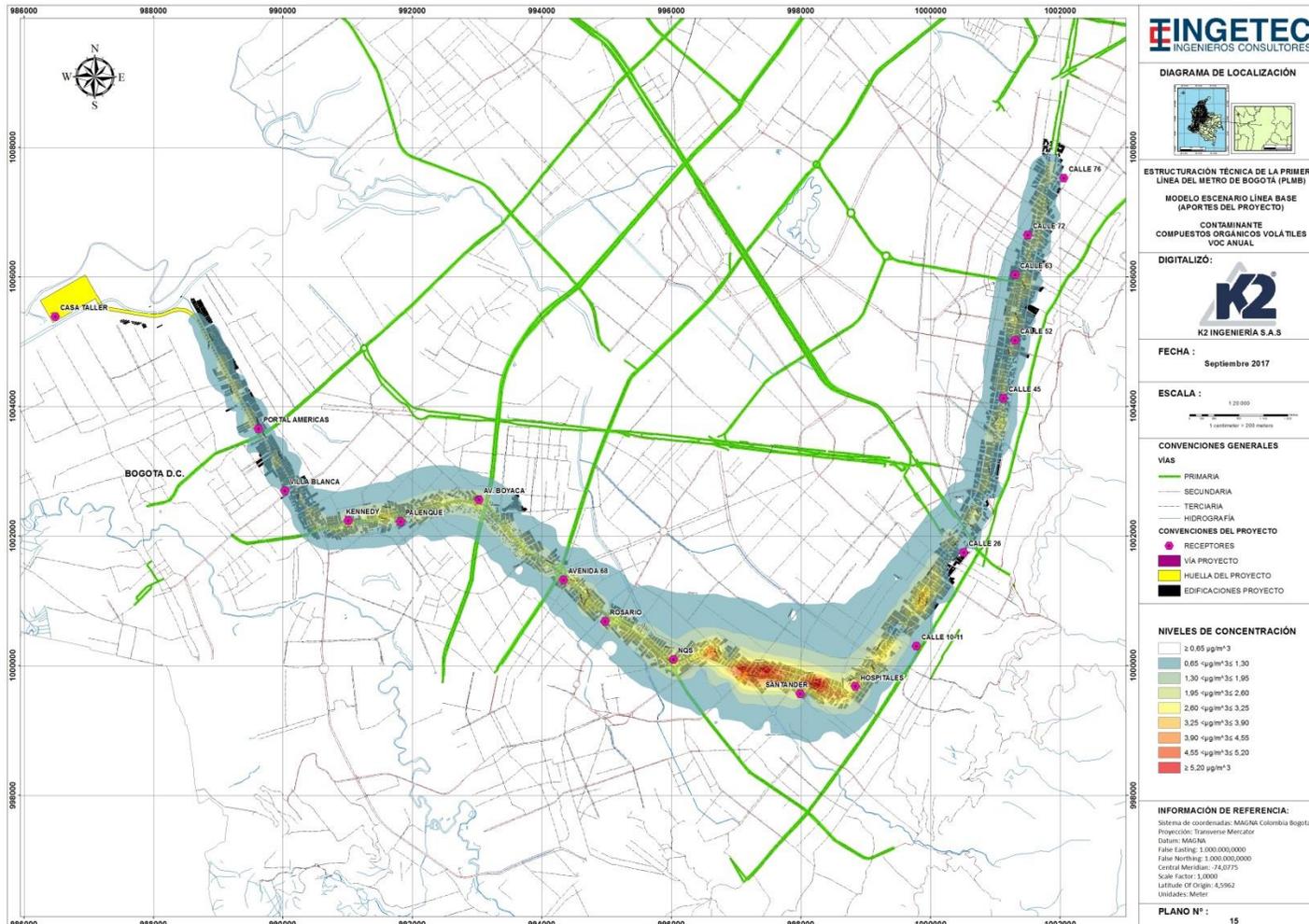


Figura 69. Isopleta anual VOC proyecto PLMB. Escenario 1
Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

9.4 ESCENARIO CONSTRUCCIÓN

Esta sección contiene los resultados de la modelación de dispersión (MD) de las emisiones de contaminantes: CO, PM₁₀, PM_{2.5}, NO₂, SO₂ y COV, asociadas al escenario construcción del proyecto Primera Línea del Metro de Bogotá ubicado en la ciudad de Bogotá, departamento de Cundinamarca. Para el escenario 2 (construcción) los resultados corresponden a la proyección del tráfico vehicular año 2022 y los diferentes procesos involucrados en este escenario (para mayor detalle remitirse a la sección 2.3), como la construcción de las fuentes: columnas, estaciones y vías. Los archivos ejecutables de los escenarios simulados se encuentran en el anexo AD-1 y las curvas de concentración – isopletas en el anexo 4.

9.4.1 Resultados de modelación – Material Particulado (PM₁₀ y PM_{2.5}):

En la Tabla 60 se presenta la contribución estimada de las concentraciones de material particulado PM₁₀ y PM_{2.5} en los receptores discretos.

Tabla 60. Resultados PM₁₀ - PM_{2.5} 24 horas y anual. Escenario 2

Estación	PM ₁₀ (µg/m ³) MD		PM _{2.5} (µg/m ³) MD	
	24 horas*	Anual	24 horas*	Anual
Patio Taller	17.0	3.4	8.0	1.6
Portal Américas	141.0	25.8	66.5	12.0
Villa Blanca	48.8	13.2	24.5	6.5
Kennedy	88.5	30.0	42.9	14.3
Palenque	36.7	7.4	16.9	3.2
Avenida Boyacá	65.0	14.9	31.7	6.9
Avenida 68	106.2	28.5	51.7	13.5
Rosario	63.3	16.1	29.9	7.2
NQS	94.0	31.8	41.9	14.1
Santander	49.8	10.3	22.6	4.5
Hospitales	158.7	55.0	74.9	25.3
Calle 10-11	31.5	5.1	14.9	2.3
Calle 26	29.4	2.6	14.3	1.2
Calle 45	76.2	11.0	38.9	5.3
Calle 52	114.0	18.0	59.3	9.3
Calle 63	42.7	13.2	22.0	6.8
Calle 72	40.0	12.2	20.7	6.2
Calle 76	25.9	3.9	13.3	2.0

*Corresponde al valor máximo de concentración estimado mediante modelación para cada receptor
Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

De acuerdo a la Tabla 60, los resultados anuales arrojados mediante la simulación no superan los $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de material particulado, siendo el valor más alto la estación Hospitales de $55 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $25.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$, respectivamente, mientras los valores más bajos se presentaron en Patio Taller, Calle 26 y Calle 76 con resultados de menores a $4 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Las concentraciones de material particulado- PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$ no presentan valores superiores a la norma anual de calidad del aire, $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{10} y de $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para $\text{PM}_{2.5}$, excepto por el la estación Hospitales. Para las concentraciones 24 horas se excede la norma ($100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{10} y de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para $\text{PM}_{2.5}$) en las estaciones: Portal Américas, Avenida 68, Hospitales y Calle 52, no obstante el valor presentado para el periodo 24 horas es el máximo presentado en cada receptor.

La Figura 58 y Figura 59 representan los resultados anuales en los receptores discretos, donde se puede apreciar que el receptor con mayores concentraciones de material particulado es Hospitales.

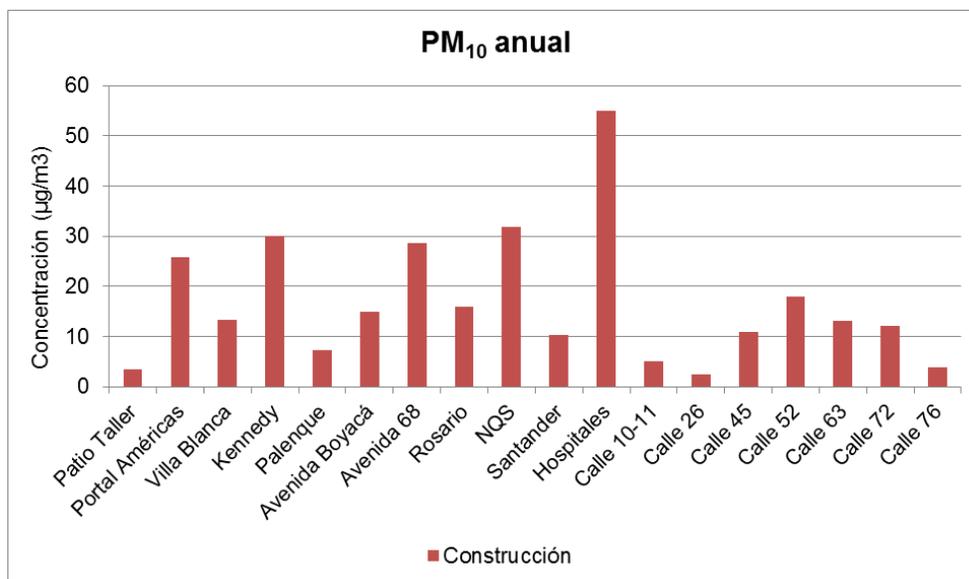


Figura 70. Aportes anuales PM_{10} . Escenario 2

Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

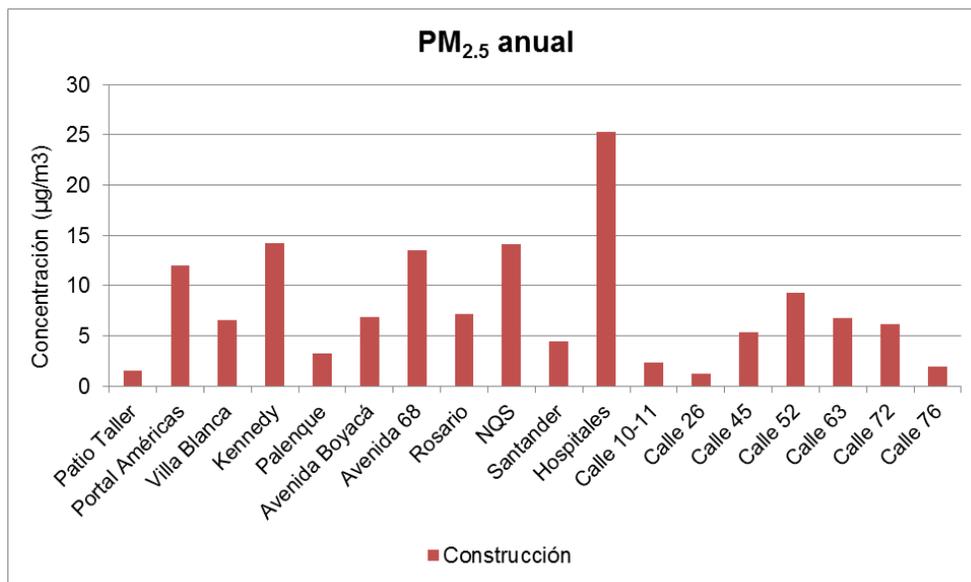


Figura 71. Aportes anuales PM_{2.5}. Escenario 2

Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

A continuación se muestra la distribución de curvas de concentración – Isopletras para PM₁₀ y PM_{2.5} estimadas para el escenario de construcción en el periodo anual, como resultado de la modelación.

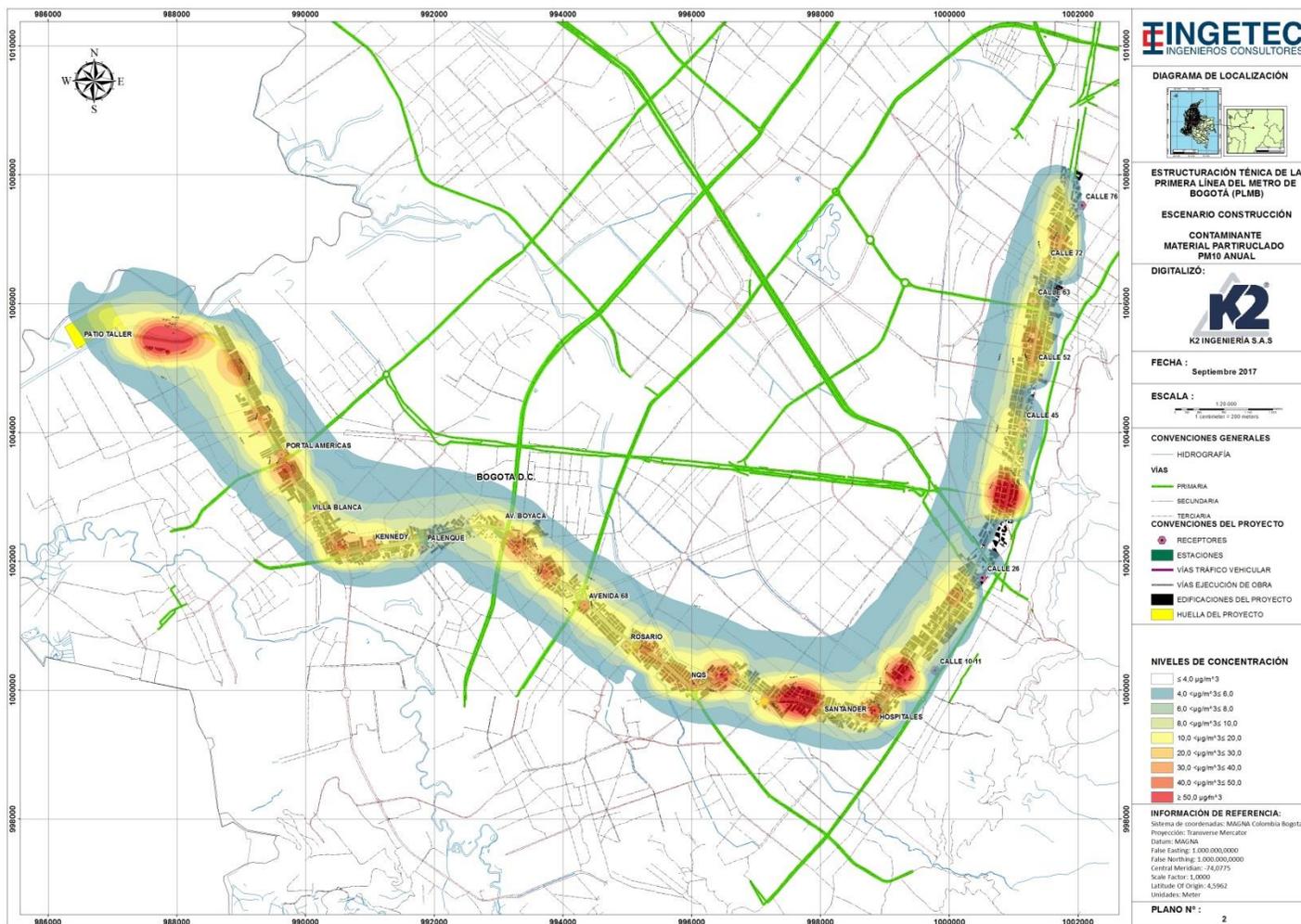


Figura 72. Isopleta anual PM₁₀ proyecto PLMB. Escenario 2
Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

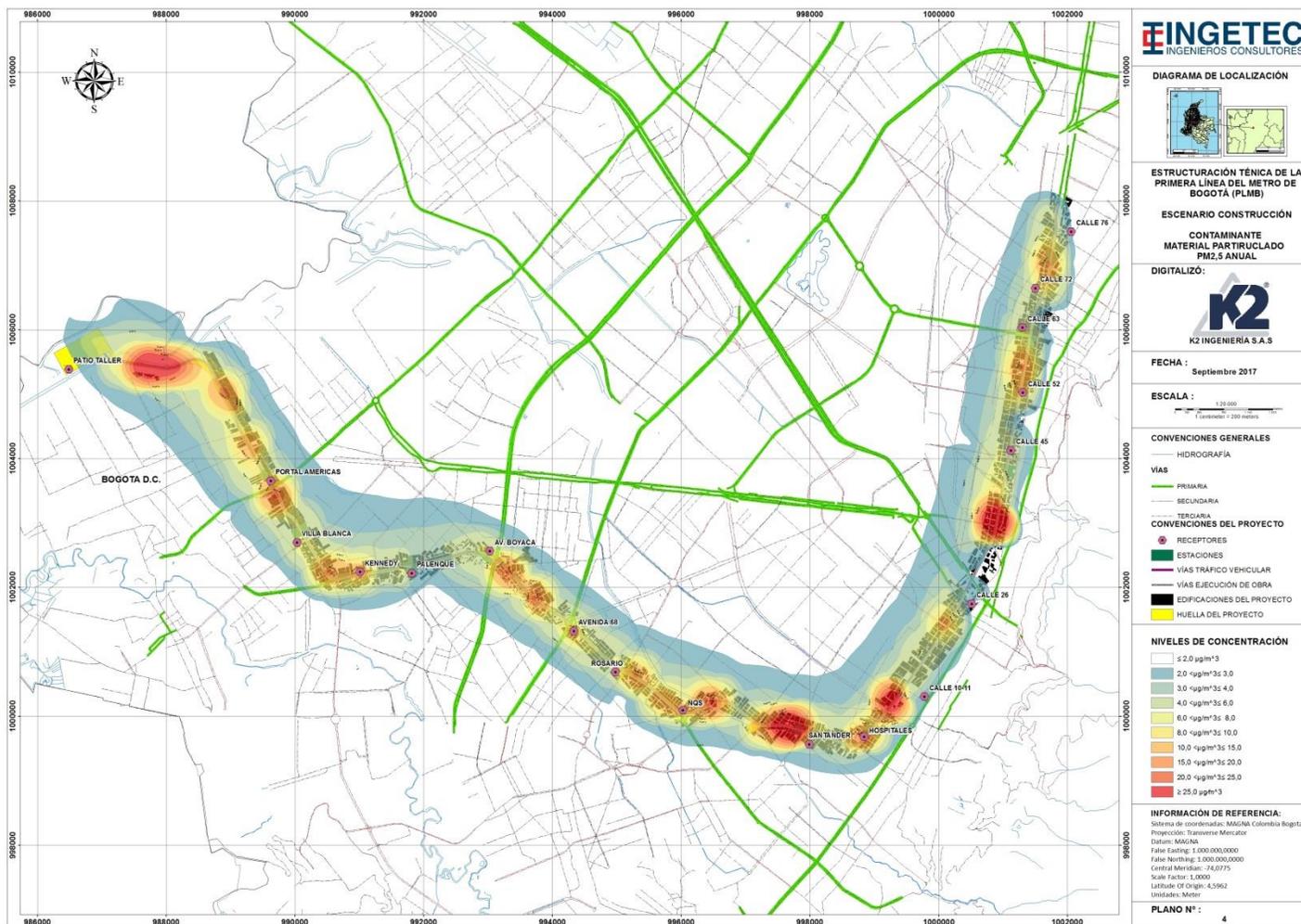


Figura 73. Isopleta Anual PM_{2.5} proyecto PLMB. Escenario 2
Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

Para PM_{10} , la isopleta presenta un rango de concentración de 4 - 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Se presentan las mayores concentraciones entre el sector Patio Taller, entre NQS y Calle 10 – 11 y Calle 26 – Calle 45. Como puede apreciarse en las curvas de concentración de $PM_{2.5}$, los mayores aportes se presentan en los mismos sectores, con un rango de concentración de 2 a 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

La dispersión de material particulado se visualiza uniforme en el área de influencia del proyecto, en el cual se tuvo en cuenta edificaciones, topografía de la zona de estudio, factores meteorológicos, como campos de viento y alturas de mezcla que inciden directamente en la dispersión de la pluma gaussiana, con componentes predominantes provenientes del Sureste (SE), tal como se observó en los mapas de dispersión (Figura 72 y Figura 73).

9.4.2 Resultados de modelación – Dióxido de nitrógeno (NO_2)

Los resultados del modelo de dispersión atmosférico para dióxido de nitrógeno (NO_2) es expuesto en la siguiente tabla; los periodos de tiempo utilizados en la modelación se tomaron con base a lo establecido en la Resolución 610 de 2010 para dióxido de nitrógeno (NO_2), 24 horas y anual. La Tabla 61 presenta los resultados 24 horas y anuales del Dióxido de Nitrógeno.

Tabla 61. Resultados NO_2 24 horas y anual. Escenario 2

Estación	NO_2 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) MD	
	24 horas*	Anual
Patio Taller	6.4	1.5
Portal Américas	67.3	12.0
Villa Blanca	20.0	5.6
Kennedy	40.3	14.0
Palenque	18.2	4.0
Avenida Boyacá	27.7	6.9
Avenida 68	45.4	13.3
Rosario	26.1	6.9
NQS	41.5	14.0
Santander	26.9	6.3
Hospitales	76.3	28.6
Calle 10-11	15.2	2.8
Calle 26	12.2	1.2
Calle 45	34.2	5.7
Calle 52	50.7	8.1
Calle 63	19.6	6.2
Calle 72	18.3	5.7
Calle 76	11.9	1.9

*Corresponde al valor máximo de concentración estimado mediante modelación para cada receptor

Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

Se puede apreciar que los valores anuales no superan los 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Los niveles de concentración diario (máximo) y anual (promedio), evaluados en el presente estudio producto del modelo de dispersión, resultan ser inferiores a los umbrales establecidos en la legislación de calidad del aire para NO_2 (100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ por año). El receptor que potencialmente recibiría los mayores aportes es Hospitales, con valor de 28.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

La Figura 74 presenta los aportes anuales de NO_2 , donde se observa que las estaciones con concentraciones más elevadas son NQS, Santander y Hospitales.

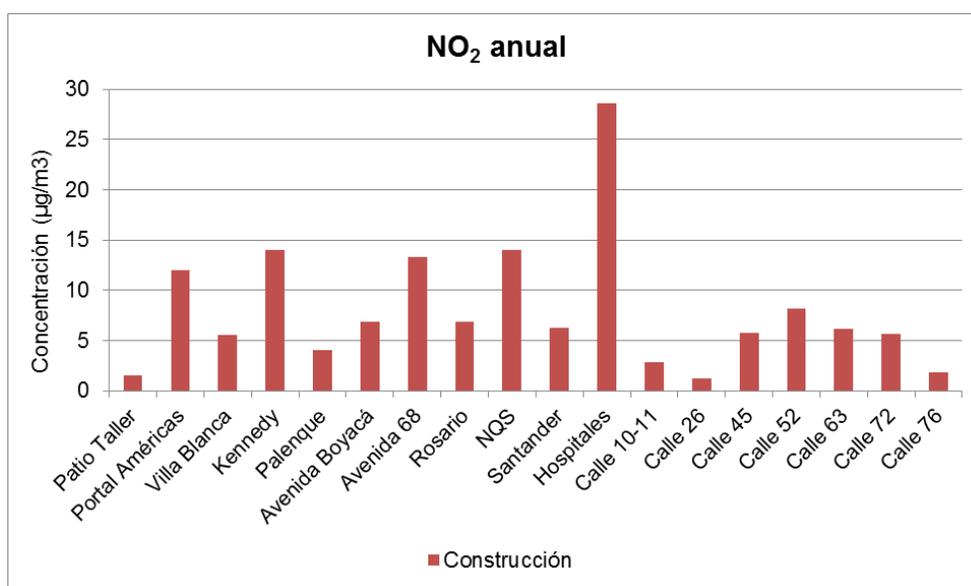


Figura 74. Aportes anuales NO_2 . Escenario 2

Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

En la Figura 75 se observa la isopleta de concentración anual de NO_2 , se obtiene un rango de concentración anual de 2 - 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. La isopleta no excede la norma anual de 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Se puede observar que las mayores concentraciones se presentan cerca de Patio Taller, en NQS – Hospitales y en Calle 26 – Calle 45.

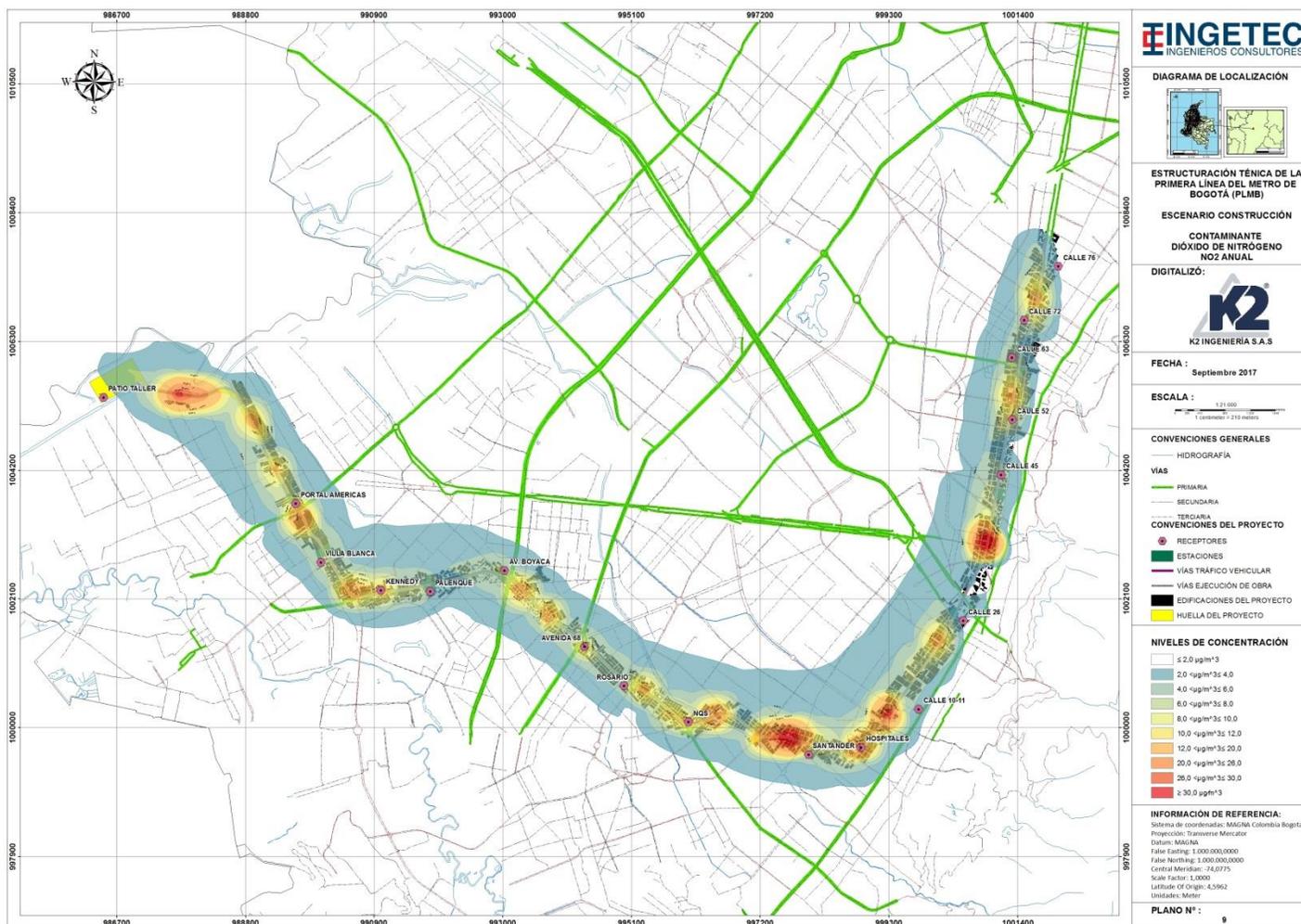


Figura 75. Isopleta anual NO₂ proyecto PLMB. Escenario 2
Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S

9.4.3 Resultados de modelación – Dióxido de azufre (SO₂)

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para los casos de estudio del dióxido de azufre. Los valores de inmisión de SO₂ en los receptores de calidad del aire calculados mediante la modelación se encuentran consolidados en la Tabla 62. La resolución temporal de modelación se tomó con base a lo aplicable en la Resolución 610 de 2010, esto es, 24 h y anual.

Tabla 62. Resultados SO₂ 24 horas y anual. Escenario 2

Estación	SO ₂ (µg/m ³) MD	
	24 horas*	Anual
Patio Taller	0.19	0.06
Portal Américas	1.80	0.44
Villa Blanca	0.50	0.17
Kennedy	1.75	0.63
Palenque	0.96	0.27
Avenida Boyacá	1.02	0.35
Avenida 68	1.26	0.45
Rosario	1.16	0.36
NQS	2.17	0.75
Santander	2.04	0.56
Hospitales	5.98	2.15
Calle 10-11	0.99	0.23
Calle 26	0.64	0.08
Calle 45	0.66	0.22
Calle 52	0.47	0.11
Calle 63	0.34	0.11
Calle 72	0.32	0.11
Calle 76	0.18	0.04

*Corresponde al valor máximo de concentración estimado mediante modelación para cada receptor
Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

Los niveles de concentración anuales de SO₂ estimados sobre los receptores discretos no representan una concentración mayor a 3 µg/m³, al comparar el valor con los límites anuales establecidos en la legislación vigente – Resolución 610 de 2010 (80 µg/m³, véase sección 2.4.1) se observa que no se presentan excedencias de la normativa.

La Figura 76 es una representación de los datos anuales de la Tabla 62, donde se puede observar que el receptor con mayores aportes es Hospitales. Mientras que

los que presentan las menores concentraciones son: Patio Taller, Calle 26 y Calle 76.

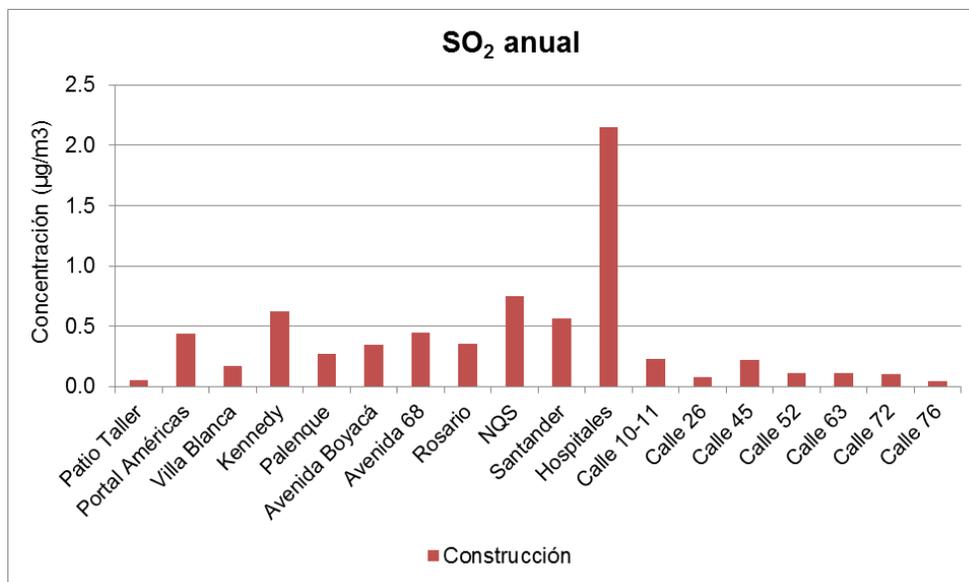


Figura 76. Aportes anuales SO₂. Escenario 2

Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

La Isopleta para SO₂ se presenta a continuación para el periodo anual, presenta un rango de concentración de 0.1 – 1.8 µg/m³. No se excede la norma anual de 80 µg/m³. Se puede observar que las mayores concentraciones se obtienen entre NQS y Hospitales y las menores desde la Calle 10 – 11, lo anterior obedece a la reducción del tráfico de vehículos de los carriles habilitados (26580 al día).

El Anexo 4 contiene los mapas de dispersión de SO₂ (mejorando el nivel de detalle) reportados para el periodo anual, 24 horas y de 3 horas

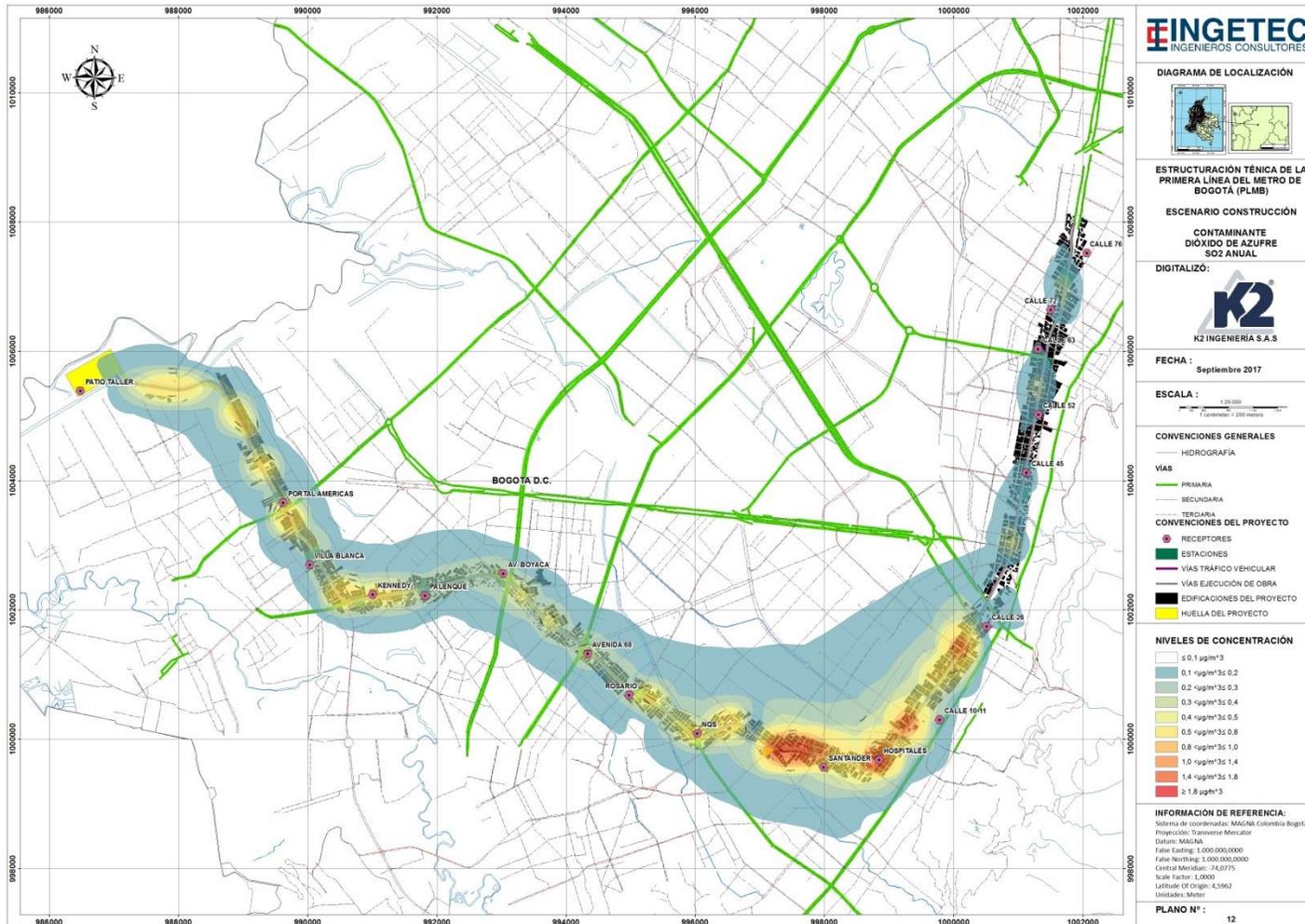


Figura 77. Isopleta anual SO₂ proyecto PLMB. Escenario 2
Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S

9.4.4 Resultados de modelación – Monóxido de carbono (CO)

En la Tabla 63 se presentan las concentraciones máximas obtenidas mediante simulación de dispersión de monóxido de carbono en los receptores discretos para periodos horario y octahorario.

Tabla 63. Resultados CO 1 hora y 8 horas. Escenario 2

Estación	CO (µg/m ³) MD	
	1 hora*	8 horas*
Patio Taller	55.4	15.1
Portal Américas	243.6	113.5
Villa Blanca	74.9	35.9
Kennedy	181.7	93.7
Palenque	96.1	53.5
Avenida Boyacá	144.1	54.1
Avenida 68	137.0	76.3
Rosario	117.7	62.1
NQS	194.7	114.6
Santander	177.6	98.5
Hospitales	399.2	277.5
Calle 10-11	113.7	49.3
Calle 26	107.9	40.7
Calle 45	182.5	56.0
Calle 52	160.9	58.3
Calle 63	75.4	30.8
Calle 72	103.8	28.6
Calle 76	59.0	18.1

*Corresponde al valor máximo de concentración estimado mediante modelación para cada receptor
Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

Los niveles de concentración 8 horas de CO estimados sobre los receptores discretos no superan los 300 µg/m³, al comparar el valor con los límites establecidos en la legislación vigente – Resolución 610 de 2010 (10,000 µg/m³, véase sección 2.4.1) se observa que no se presentan excedencias de la normativa.

Los resultados de concentración 8 horas se pueden apreciar en la Figura 78, donde el receptor con mayores aportes fue Hospitales con 277.5 µg/m³, respectivamente

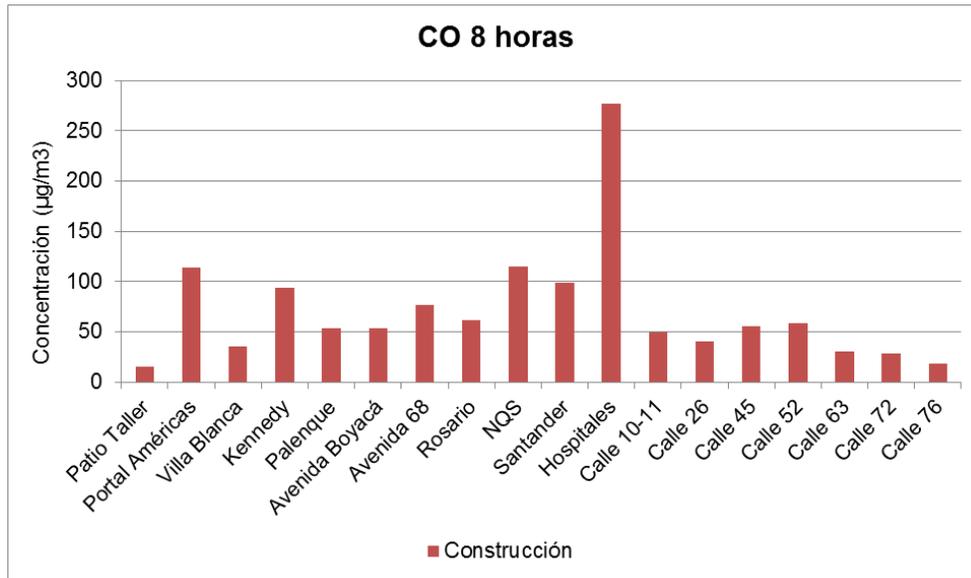


Figura 78. Aportes 8 horas CO. Escenario 2

Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S

En la Figura 79 se observa la isopleta de concentración octahoraria para el escenario modelado, el rango de concentración es de 20 – 190 µg/m³. No se excede la norma anual de 10,000 µg/m³, las mayores concentraciones se observan entre el sector NQS y Calle 10-11.

En el Anexo 4 se incluyen los mapas de dispersión de CO con un mejor nivel de detalle, para los periodos horarios y octahorarias como resultado de la modelación.

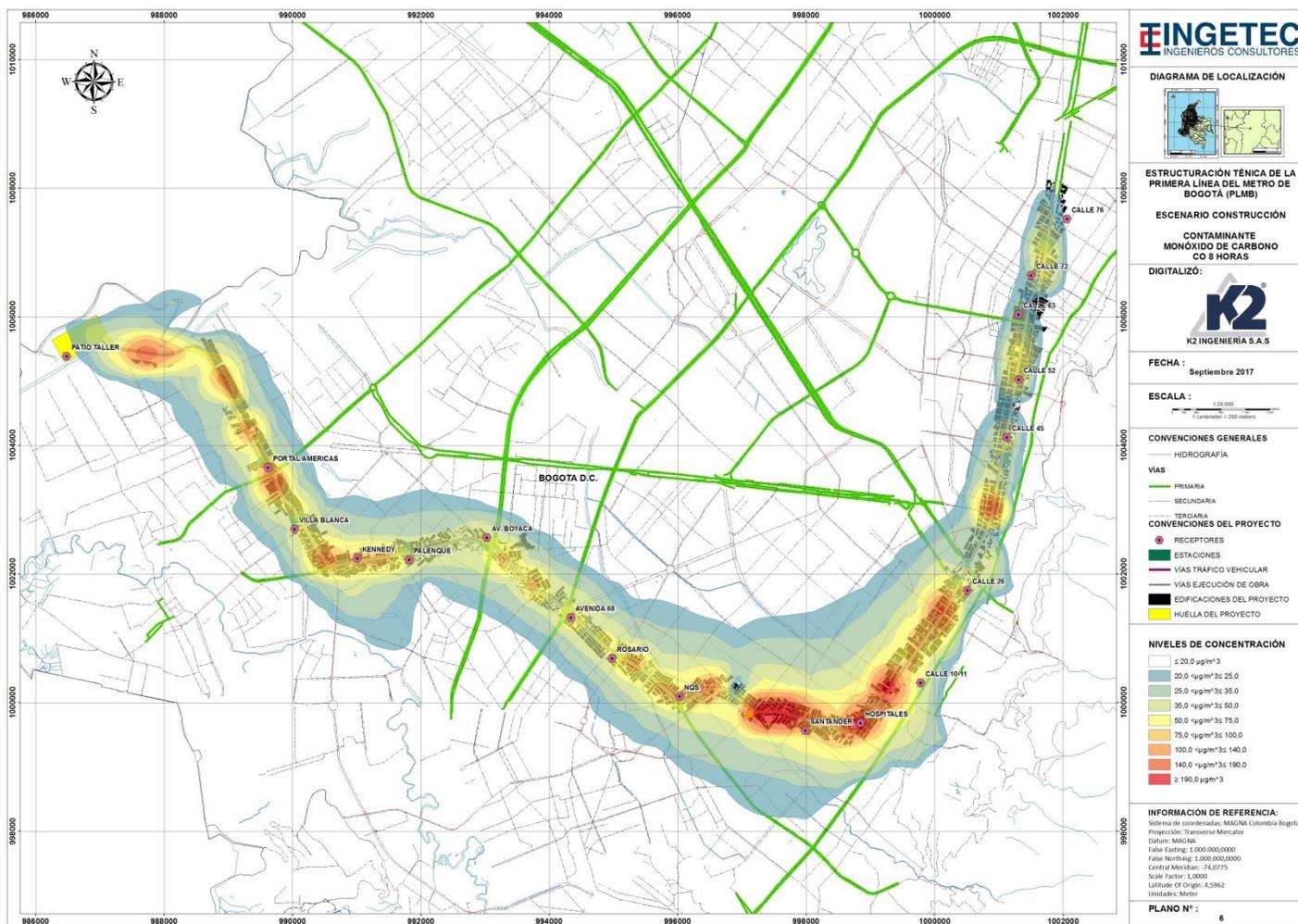


Figura 79. Isopleta CO 8 horas proyecto PLMB. Escenario 2

Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

9.4.5 Resultados de modelación – Compuestos orgánicos volátiles (VOC)

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para el caso de estudio. Los valores de inmisión de los compuestos orgánicos volátiles (VOC) en los receptores de calidad del aire calculados mediante la modelación se encuentran consolidados en la Tabla 64.

Tabla 64. Aportes VOC 24 horas y anual. Escenario 2

Estación	VOC (µg/m3) MD	
	24 horas*	Anual
Patio Taller	1.5	0.4
Portal Américas	13.7	3.3
Villa Blanca	4.1	1.4
Kennedy	13.4	4.8
Palenque	7.3	2.0
Avenida Boyacá	7.6	2.6
Avenida 68	9.9	3.3
Rosario	8.8	2.7
NQS	16.1	5.6
Santander	12.8	3.5
Hospitales	37.2	13.4
Calle 10-11	6.3	1.4
Calle 26	4.2	0.5
Calle 45	5.3	1.7
Calle 52	4.9	1.0
Calle 63	2.6	0.9
Calle 72	2.5	0.8
Calle 76	1.6	0.3

*Corresponde al valor máximo de concentración estimado mediante modelación para cada receptor
Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

En la Figura 68 se puede apreciar los aportes de los compuestos orgánicos volátiles en las estaciones de calidad del aire.

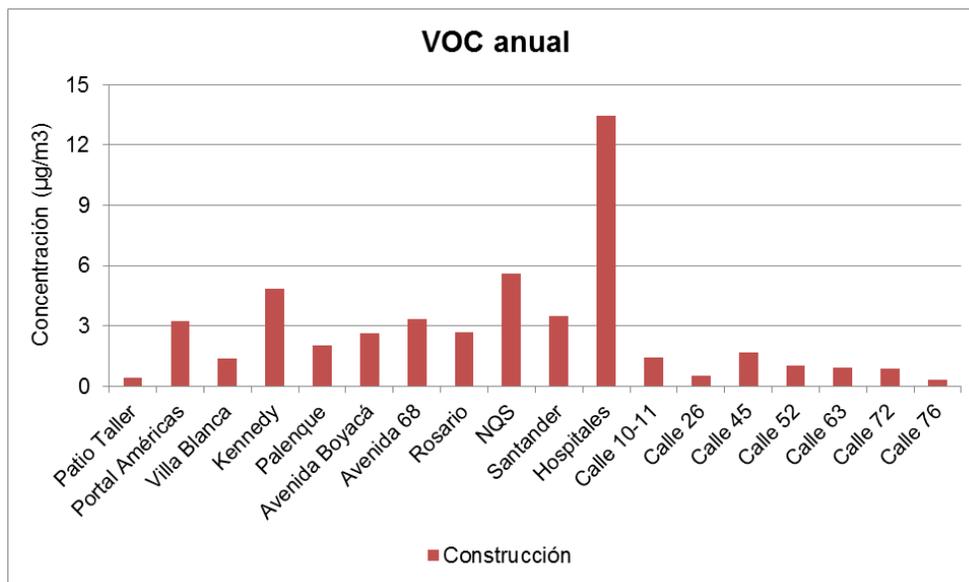


Figura 80. Aportes anuales VOC. Escenario 2

Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

Los niveles de concentración anual de VOC estimados sobre los receptores discretos no representan valores superiores a $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$. En el caso de los compuestos orgánicos volátiles no es posible comparar con la Resolución 610 de 2010, ya que no está regulado el nivel máximo permisible de concentración de VOC.

La isopleta anual para VOC se presenta a continuación, posee un rango de concentración de $0.7 - 8.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de los compuestos orgánicos volátiles, las mayores concentraciones se observan entre el sector NQS y Calle 26.

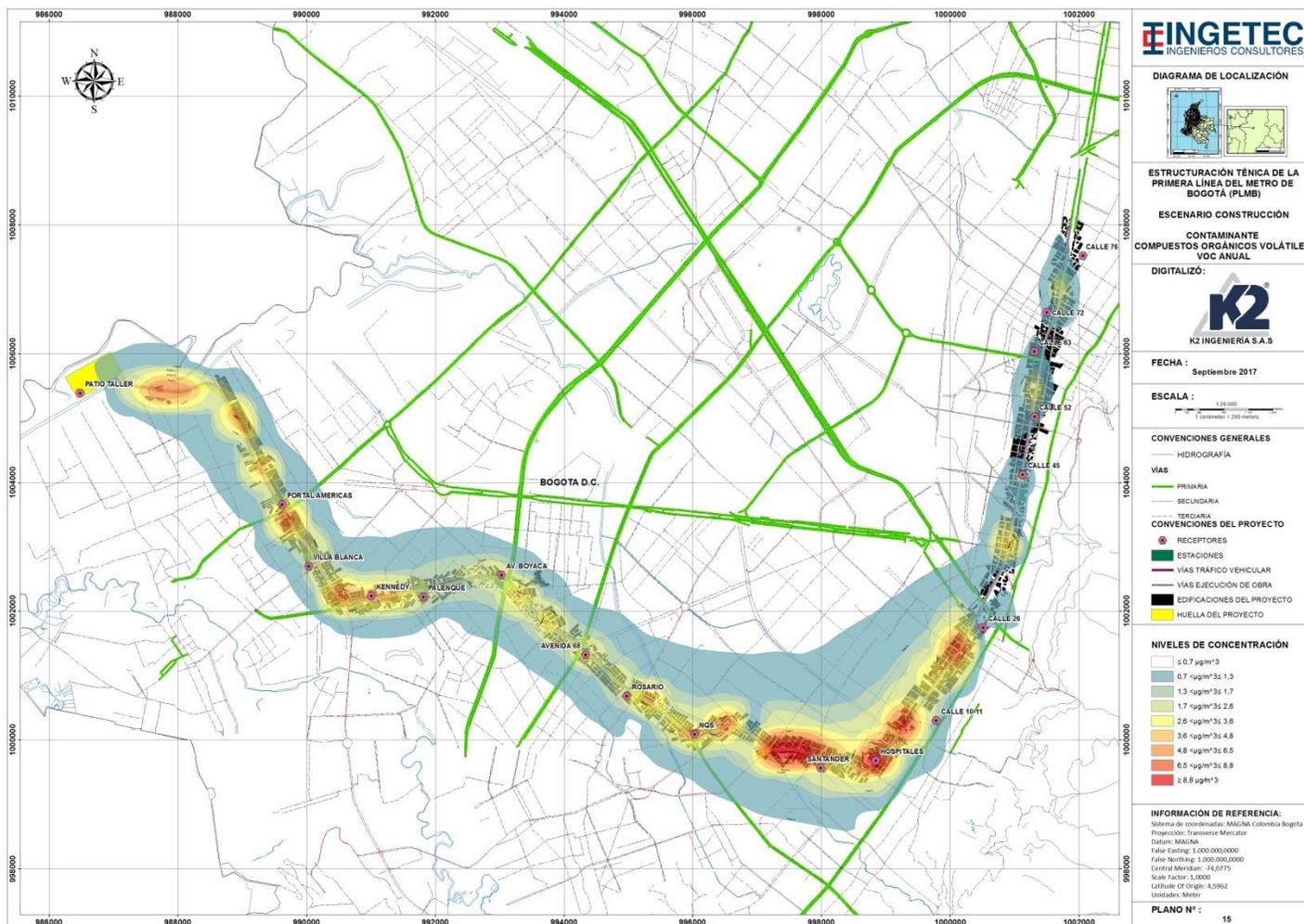


Figura 81. Isopleta anual VOC proyecto PLMB. Escenario 2
Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

9.5 ESCENARIO OPERACIÓN

Esta sección contiene los resultados de la modelación de dispersión (MD) de las emisiones de contaminantes: CO, PM₁₀, PM_{2.5}, NO₂, SO₂ y COV, asociadas al escenario operación del proyecto Primera Línea del Metro de Bogotá ubicado en la ciudad de Bogotá, departamento de Cundinamarca. Para el escenario 3 (operación) los resultados corresponden a la proyección del tráfico vehicular del año 2042. Los archivos ejecutables de los escenarios simulados se encuentran en el anexo AD-1 y las curvas de concentración – isopletras en el anexo 4.

Se realizó una relación entre el resultado de la modelación de línea base (LB) y operación (OP) para cada contaminante, con el fin de conocer el porcentaje de incremento de las concentraciones en los tramos de la Primera Línea del Metro de Bogotá en la operación del proyecto año 2042 con respecto al escenario línea base año 2016.

9.5.1 Resultados de modelación – Material Particulado (PM₁₀ y PM_{2.5}):

En la Tabla 65 se presenta la contribución estimada de las concentraciones de material particulado PM₁₀ y PM_{2.5} en los receptores discretos.

Tabla 65. Resultados PM₁₀ – PM_{2.5} 24 horas y anual. Escenario 3

Estación	PM ₁₀ (µg/m ³) MD		PM _{2.5} (µg/m ³) MD	
	24 horas*	Anual	24 horas*	Anual
Patio Taller	1.3	0.4	0.4	0.1
Portal Américas	17.9	5.0	5.3	1.5
Villa Blanca	6.7	2.6	2.0	0.8
Kennedy	21.5	7.2	6.2	2.1
Palenque	18.0	5.2	5.2	1.5
Avenida Boyacá	28.5	10.1	8.1	2.9
Avenida 68	24.8	9.3	6.9	2.6
Rosario	31.4	9.8	8.7	2.7
NQS	41.0	13.6	11.4	3.8
Santander	31.4	8.5	9.9	2.7
Hospitales	34.7	10.6	10.4	3.2
Calle 10-11	11.1	2.5	3.3	0.7
Calle 26	6.9	0.9	2.0	0.3
Calle 45	6.5	2.1	2.0	0.7
Calle 52	6.2	1.9	1.9	0.6
Calle 63	7.1	2.3	2.2	0.7
Calle 72	6.8	2.2	2.1	0.7
Calle 76	3.0	0.8	0.9	0.3

*Corresponde al valor máximo de concentración estimado mediante modelación para cada receptor

Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

De acuerdo a la Tabla 65, los resultados anuales arrojados mediante la simulación no superan los $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de material particulado, siendo el valor más alto la estación NQS de $16.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $3.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$, respectivamente, mientras los valores más bajos se presentaron en Patio Taller y Calle 26 con resultados menores a $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Las concentraciones de material particulado- PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$ no presentan valores superiores a la norma anual de calidad del aire, $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{10} y de $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para $\text{PM}_{2.5}$.

Tabla 66. Porcentaje de incremento PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$ anual. Escenario 3

Estación	PM ₁₀ anual MD			PM _{2.5} anual MD		
	Línea base ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Operación ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Línea base/Operación	Línea base ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Operación ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Línea base/Operación
Patio Taller	0.19	0.40	53.86%	0.05	0.12	53.80%
Portal Américas	2.29	5.03	54.49%	0.68	1.49	54.49%
Villa Blanca	1.18	2.58	54.42%	0.35	0.76	54.41%
Kennedy	3.28	7.21	54.51%	0.95	2.09	54.51%
Palenque	2.39	5.24	54.49%	0.69	1.52	54.48%
Avenida Boyacá	4.61	10.13	54.52%	1.32	2.89	54.51%
Avenida 68	4.24	9.32	54.54%	1.17	2.58	54.53%
Rosario	4.46	9.82	54.57%	1.24	2.72	54.56%
NQS	6.18	13.63	54.67%	1.72	3.80	54.68%
Santander	3.70	8.49	56.47%	1.16	2.67	56.46%
Hospitales	4.28	10.62	59.67%	1.28	3.16	59.57%
Calle 10-11	1.02	2.50	59.30%	0.30	0.73	59.18%
Calle 26	0.42	0.94	55.16%	0.12	0.28	54.81%
Calle 45	2.17	2.13	-1.99%	0.67	0.65	-2.47%
Calle 52	1.65	1.88	12.28%	0.51	0.58	11.98%
Calle 63	1.91	2.30	16.82%	0.59	0.71	16.62%
Calle 72	1.80	2.16	16.67%	0.55	0.66	16.49%
Calle 76	0.66	0.83	20.95%	0.20	0.25	20.61%

Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

Las estaciones que presentarán mayor incremento son Hospitales y Calle 10-11 con valores de 59.67% y 59.3% respectivamente, la estación Calle 45 en la operación del proyecto presentará una reducción del 2.5%, de acuerdo a los resultados de la simulación.

La Figura 82 y Figura 83 son una representación gráfica de los resultados anuales en los receptores discretos.

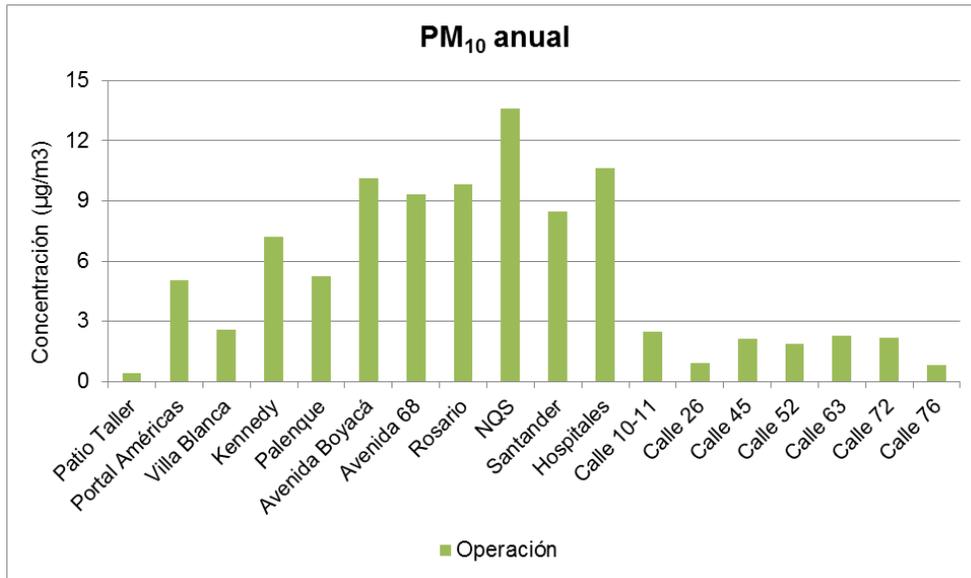


Figura 82. Aportes anuales PM₁₀. Escenario 3
Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

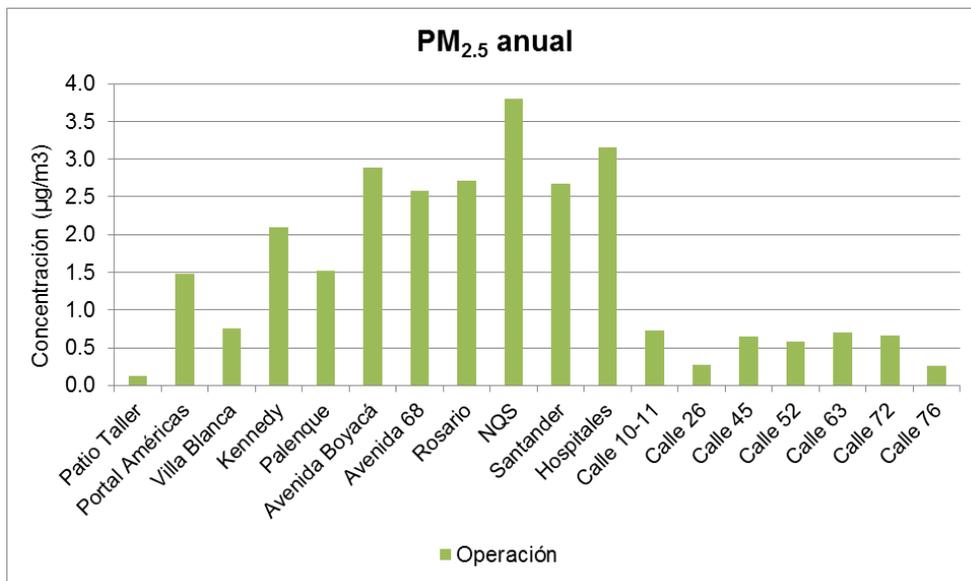


Figura 83. Aportes anuales PM_{2.5}. Escenario 3
Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

A continuación se muestra la distribución de curvas de concentración – Isopletas para PM₁₀ y PM_{2.5} estimadas para el escenario de línea base en el periodo anual, como resultado de la modelación.

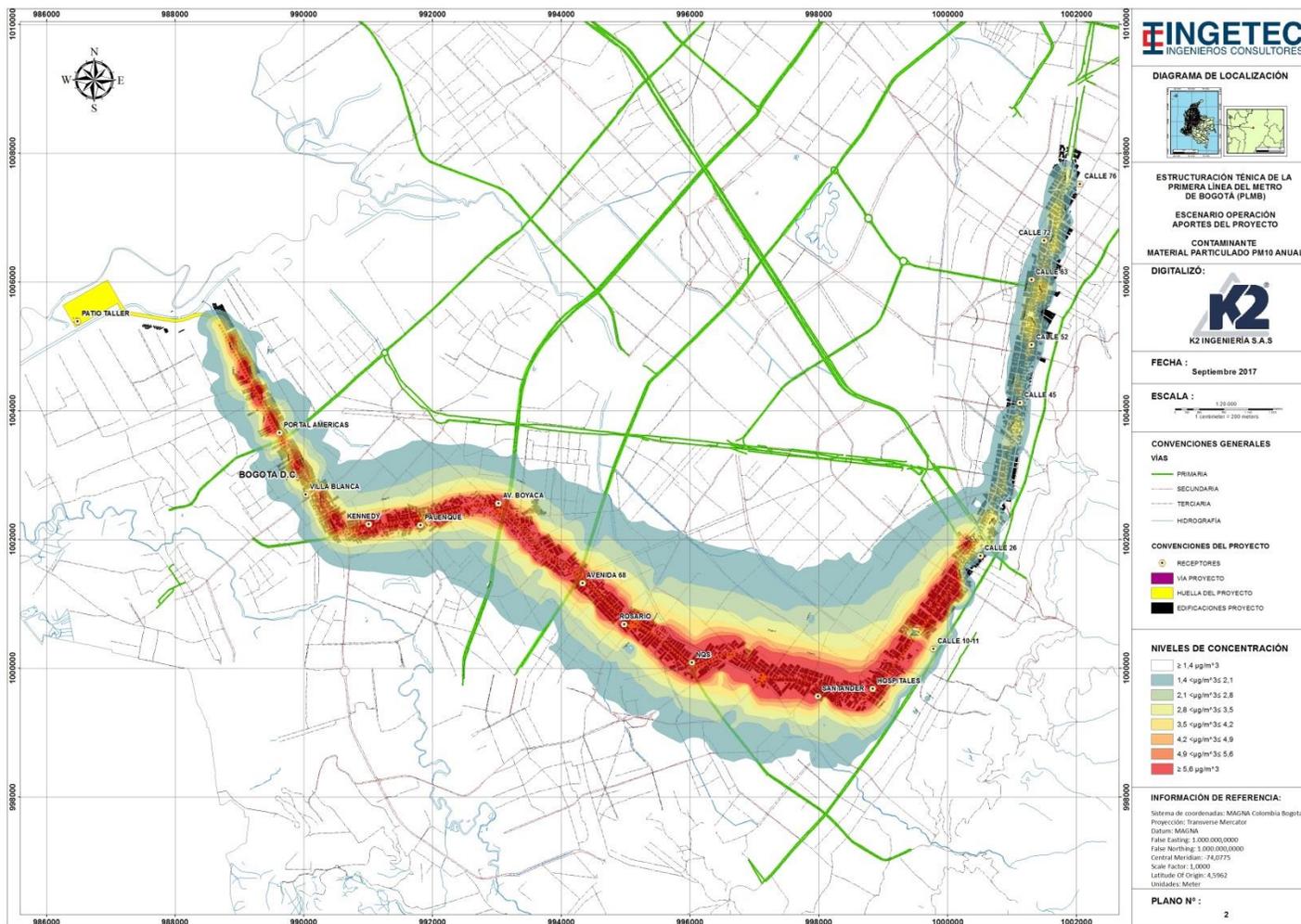


Figura 84. Isopleta anual PM₁₀ proyecto PLMB. Escenario 3
Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

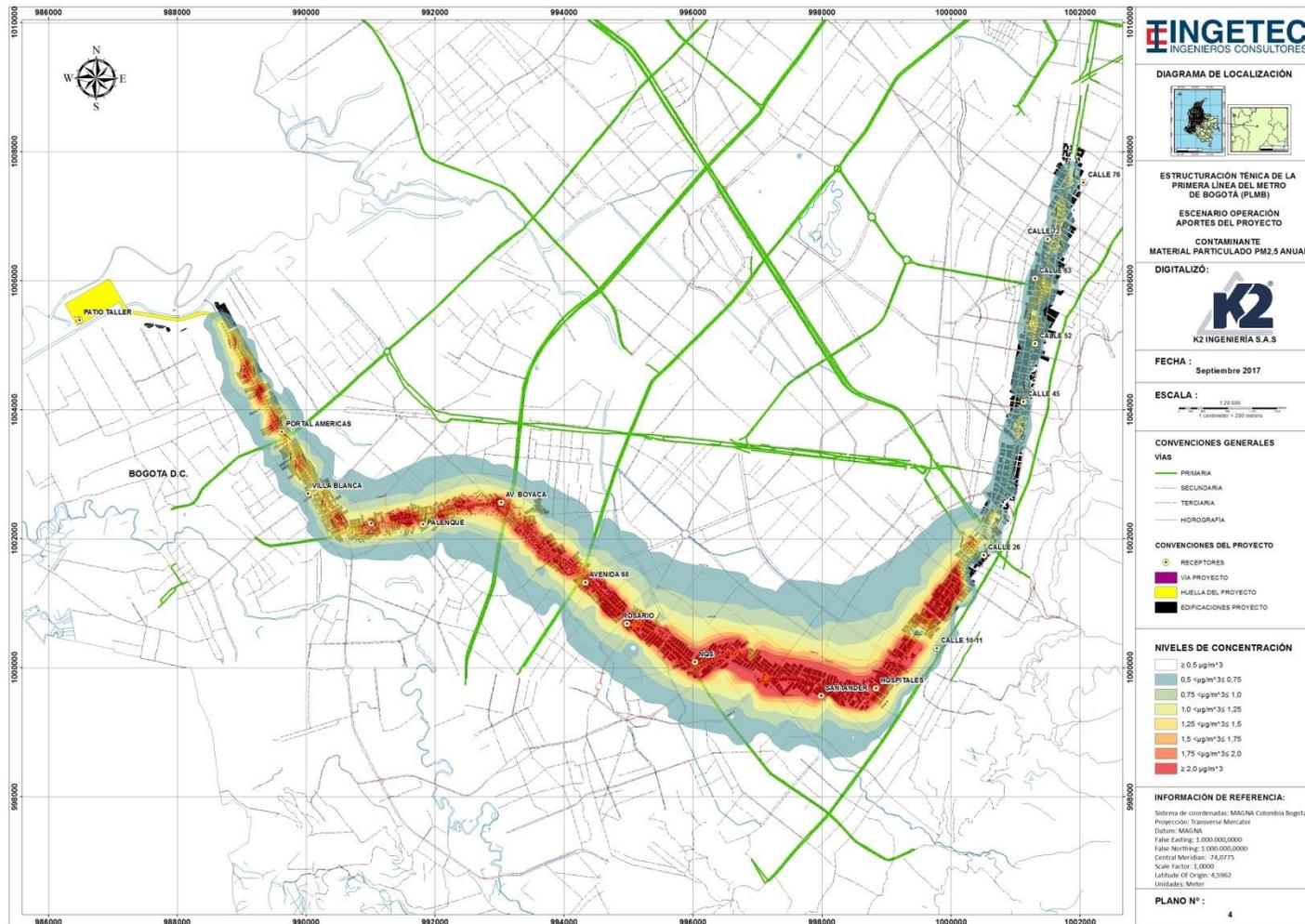


Figura 85. Isopleta anual PM_{2.5} proyecto PLMB. Escenario 3
Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

Para PM_{10} , el rango de concentración de la isopleta es de $1.4 - 5.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$, se presentan las mayores concentraciones entre el sector Patio Taller y Calle 26 y las menores desde la Calle 26 hasta la Calle 76. Como puede apreciarse en las curvas de concentración de $PM_{2.5}$, los mayores aportes se presentan entre el sector Palenque hasta la Calle 26 y los menores desde la Calle 26 hasta la Calle 76, con un rango de concentración de 0.5 a $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

La dispersión de material particulado se visualiza uniforme en el área de influencia del proyecto, en el cual se tuvo en cuenta edificaciones, topografía de la zona de estudio, factores meteorológicos, como campos de viento y alturas de mezcla que inciden directamente en la dispersión de la pluma gaussiana, con componentes predominantes provenientes del Sureste (SE), tal como se observó en los mapas de dispersión (Figura 84 a Figura 85).

9.5.2 Resultados de modelación – Dióxido de nitrógeno (NO_2)

Los resultados del modelo de dispersión atmosférico para dióxido de nitrógeno (NO_2) es expuesto en las siguientes tablas; los periodos de tiempo utilizados en la modelación se tomaron con base a lo establecido en la resolución 610 de 2010 para dióxido de nitrógeno (NO_2), 24 horas y anual. La Tabla 67 presenta los resultados 24 horas y anuales del Dióxido de Nitrógeno.

Tabla 67. Resultados NO_2 24 horas y anual. Escenario 3

Estación	NO_2 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) MD	
	24 horas*	Anual
Patio Taller	1.0	0.3
Portal Américas	13.0	3.7
Villa Blanca	5.1	2.0
Kennedy	18.4	6.3
Palenque	15.6	4.5
Avenida Boyacá	22.7	8.0
Avenida 68	15.3	5.7
Rosario	19.3	6.0
NQS	26.0	8.6
Santander	31.3	8.6
Hospitales	32.3	9.9
Calle 10-11	9.8	2.3
Calle 26	6.1	0.8
Calle 45	5.8	1.9
Calle 52	5.4	1.7
Calle 63	6.3	2.0
Calle 72	6.0	1.9

Estación	NO ₂ (µg/m ³) MD	
	24 horas*	Anual
Calle 76	2.7	0.7

*Corresponde al valor máximo de concentración estimado mediante modelación para cada receptor
Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

Se puede apreciar que los valores anuales no superan los 10 µg/m³. Los niveles de concentración diario (máximo) y anual (promedio), evaluados en el presente estudio producto del modelo de dispersión, resultan ser inferiores a los umbrales establecidos en la legislación de calidad del aire para NO₂ (100 µg/m³ por año). El receptor que potencialmente recibiría los mayores aportes es Hospitales, con valor de 9.9 µg/m³

En la Tabla 68 se puede observar los resultados del escenario 1 (línea base) y del escenario 3 (operación), así como el porcentaje de incremento.

Tabla 68. Porcentaje de incremento NO₂ anual. Escenario 3

Estación	NO ₂ anual MD		
	Línea base (µg/m ³)	Operación (µg/m ³)	Línea base/Operación
Patio Taller	0.14	0.31	53.77%
Portal Américas	1.67	3.67	54.48%
Villa Blanca	0.89	1.96	54.40%
Kennedy	2.86	6.28	54.51%
Palenque	2.06	4.52	54.49%
Avenida Boyacá	3.65	8.02	54.52%
Avenida 68	2.59	5.70	54.54%
Rosario	2.74	6.04	54.58%
NQS	3.89	8.60	54.75%
Santander	3.72	8.56	56.49%
Hospitales	4.01	9.91	59.58%
Calle 10-11	0.92	2.26	59.32%
Calle 26	0.38	0.85	55.21%
Calle 45	1.94	1.90	-2.22%
Calle 52	1.47	1.67	12.09%
Calle 63	1.70	2.04	16.66%
Calle 72	1.60	1.91	16.50%
Calle 76	0.58	0.73	20.62%

Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

El incremento de la operación con respecto a línea base presenta un rango de hasta 60%, donde las estaciones Hospitales y Calle 10-11 presentan los valores más altos de 59.58% y 59.32%, respectivamente. Mientras que el valor más bajo

se presenta en Calle 45 con una disminución del 2.22%. La Figura 86 presenta los aportes anuales de NO₂, donde se aprecia que las estaciones con concentraciones más elevadas son NQS, Santander y Hospitales.

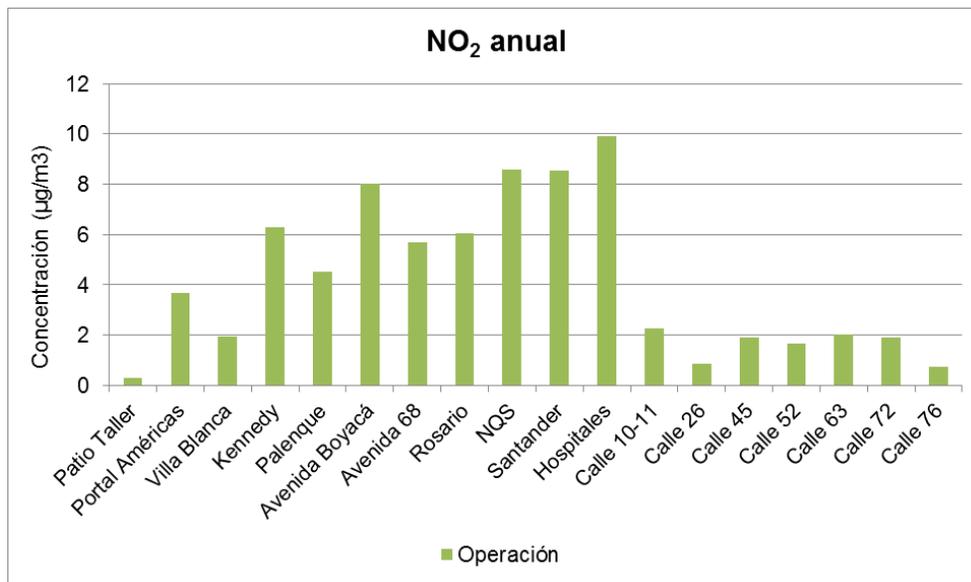


Figura 86. Aportes anuales NO₂. Escenario 3

Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

En la Figura 87 se observa la isopleta de concentración anual de NO₂, se obtiene un rango de concentración anual de 1.8 – 7.2 µg/m³. La isopleta no excede la norma anual de 100 µg/m³. Se puede observar que las mayores concentraciones se presentan entre NQS y Calle 26.

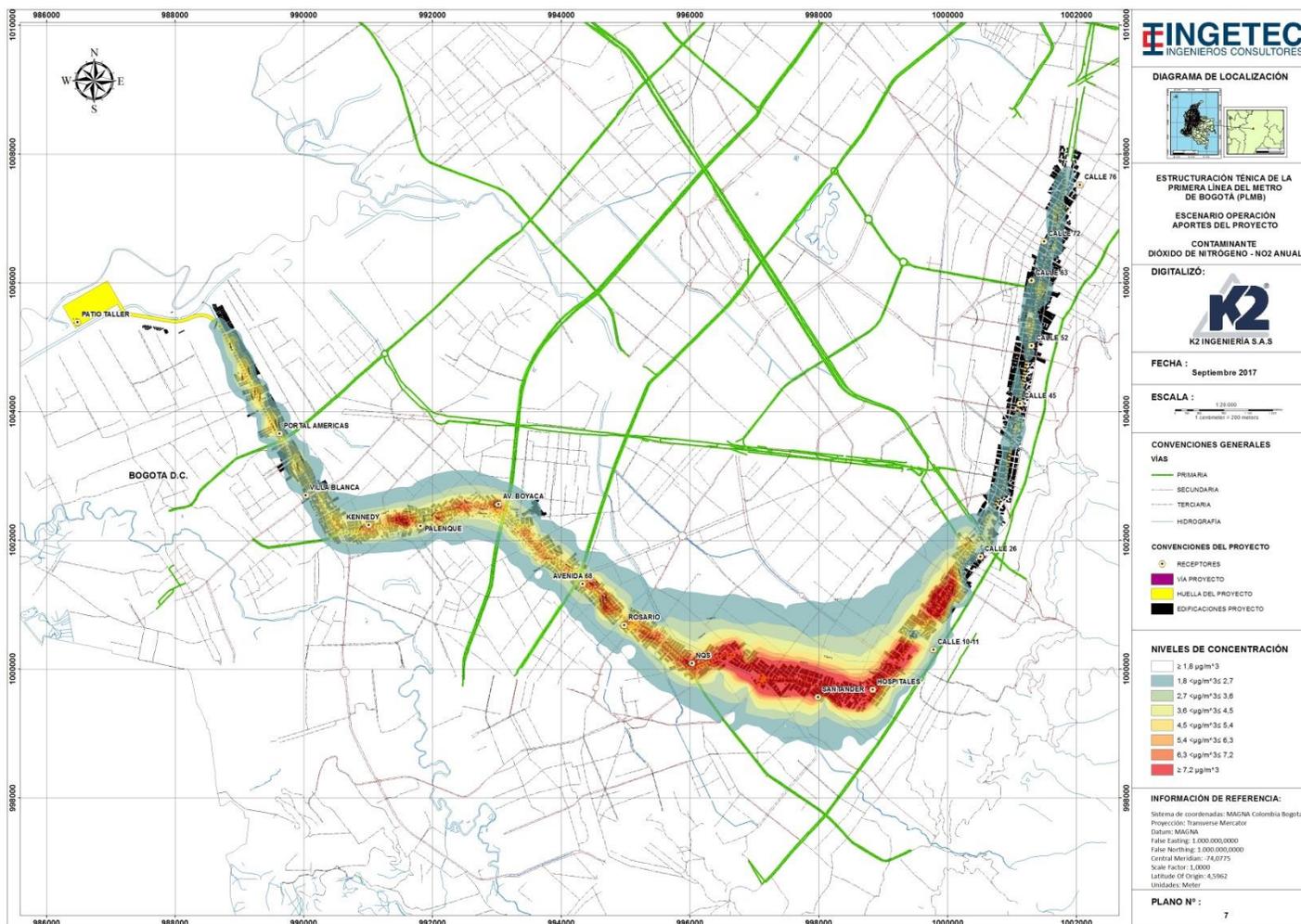


Figura 87. Isopleta anual NO₂ proyecto PLMB. Escenario 3
Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S

9.5.3 Resultados de modelación – Dióxido de azufre (SO₂)

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para los casos de estudio del dióxido de azufre. Los valores de inmisión de SO₂ en los receptores de calidad del aire calculados mediante la modelación se encuentran consolidados en la Tabla 69. La resolución temporal de modelación se tomó con base a lo aplicable en la Resolución 610 de 2010, esto es, 24 h y anual.

Tabla 69. Aportes SO₂ 24 horas y anual. Escenario 3

Estación	SO ₂ (µg/m ³) MD	
	24 horas*	Anual
Patio Taller	0.12	0.04
Portal Américas	1.60	0.45
Villa Blanca	0.61	0.23
Kennedy	2.08	0.70
Palenque	1.75	0.51
Avenida Boyacá	2.54	0.90
Avenida 68	1.72	0.64
Rosario	2.17	0.68
NQS	2.94	0.97
Santander	3.83	1.05
Hospitales	3.73	1.14
Calle 10-11	1.12	0.26
Calle 26	0.69	0.10
Calle 45	0.71	0.23
Calle 52	0.67	0.21
Calle 63	0.78	0.25
Calle 72	0.74	0.24
Calle 76	0.33	0.09

*Corresponde al valor máximo de concentración estimado mediante modelación para cada receptor
Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

Los niveles de concentración anual de SO₂ estimados sobre los receptores discretos no representan una concentración mayor de 2 µg/m³, al comparar el valor con los límites anuales establecidos en la legislación vigente – Resolución 610 de 2010 (80 µg/m³, véase sección 2.4.1) se observa que no se presentan excedencias de la normativa.

La Tabla 70 presenta el incremento del escenario operación con respecto a línea base, donde el porcentaje más alto es del sector Hospitales con 59.44% y el menor fue en Calle 45 con una disminución del 3% aproximadamente.

Tabla 70. Porcentaje incremento SO₂ 24 horas y anual. Escenario 3

Estación	SO ₂ anual MD		
	Línea base (µg/m ³)	Operación (µg/m ³)	Línea base/Operación
Patio Taller	0.02	0.04	53.70%
Portal Américas	0.21	0.45	54.47%
Villa Blanca	0.11	0.23	54.38%
Kennedy	0.32	0.70	54.50%
Palenque	0.23	0.51	54.47%
Avenida Boyacá	0.41	0.90	54.51%
Avenida 68	0.29	0.64	54.53%
Rosario	0.31	0.68	54.57%
NQS	0.44	0.97	54.75%
Santander	0.46	1.05	56.46%
Hospitales	0.46	1.14	59.44%
Calle 10-11	0.10	0.26	59.12%
Calle 26	0.04	0.10	54.59%
Calle 45	0.24	0.23	-2.96%
Calle 52	0.18	0.21	11.64%
Calle 63	0.21	0.25	16.38%
Calle 72	0.20	0.24	16.26%
Calle 76	0.07	0.09	20.14%

Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

La Figura 64 es una representación de los datos anuales de la Tabla 69, donde se puede observar que los receptores con mayores aportes son NQS, Santander y Hospitales. Mientras que los que presentan las menores concentraciones son: Patio Taller, Calle 26 y Calle 76.

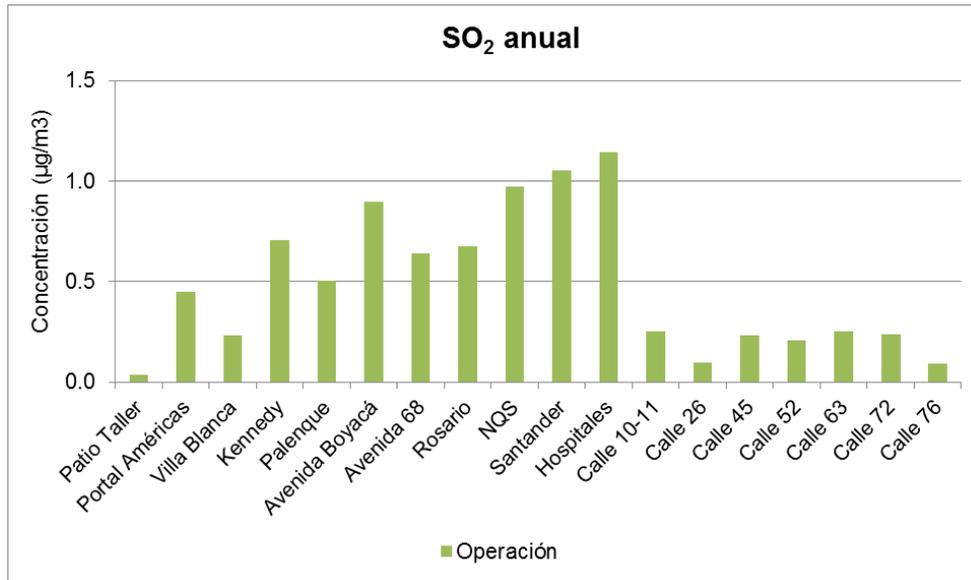


Figura 88. Aportes anuales SO₂. Escenario 3

Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

La Isopleta para SO₂ se presenta a continuación la cual posee un rango de concentración de 0.22 – 0.88 µg/m³, No se excede la norma anual de 80 µg/m³. Se puede observar que las mayores concentraciones se presentan entre NQS y Calle 26.

El Anexo 4 contiene los mapas de dispersión de SO₂ (mejorando el nivel de detalle) reportados para el periodo anual, 24 horas y de 3 horas.

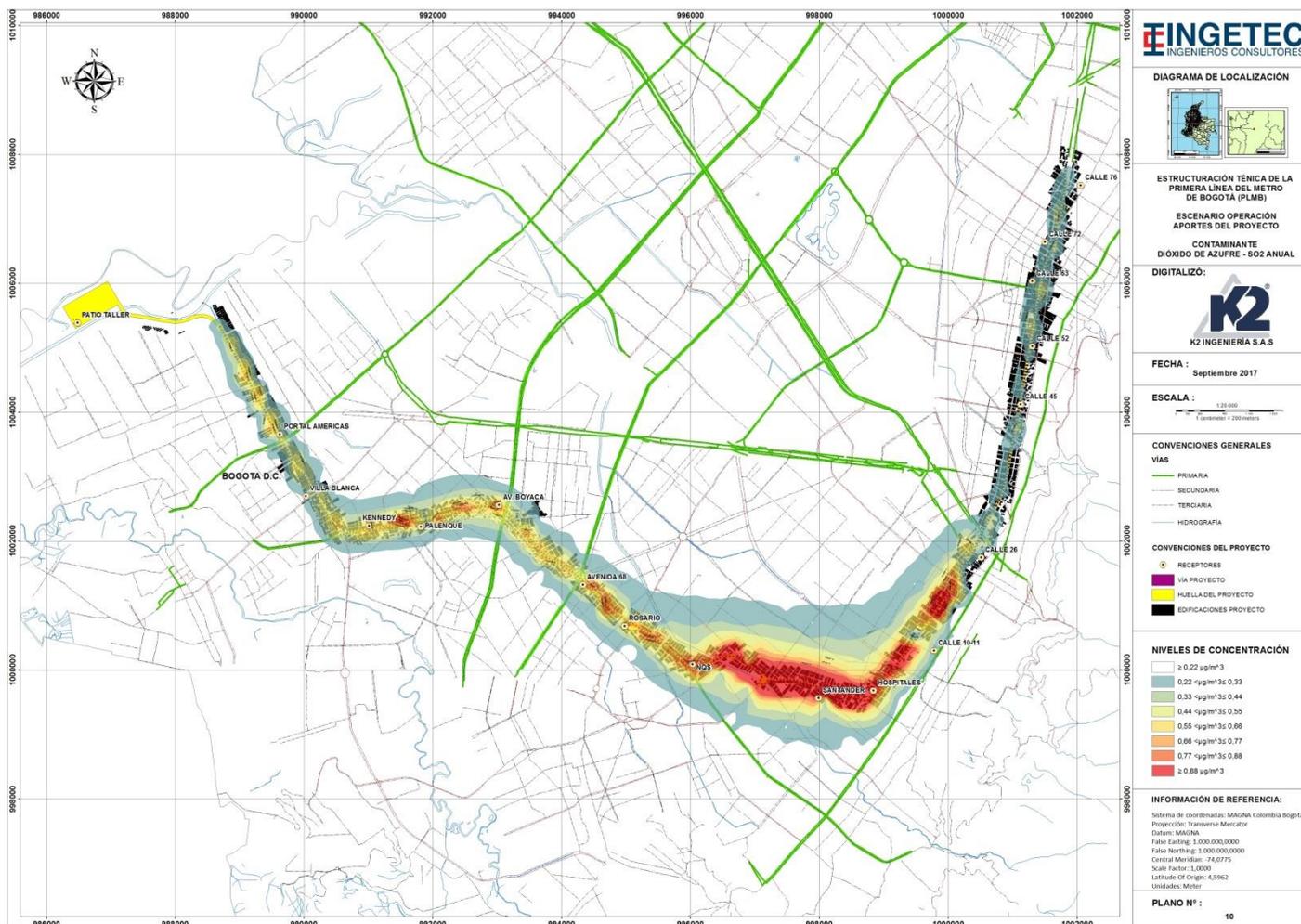


Figura 89. Isopleta anual SO₂ proyecto PLMB. Escenario 3
Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S

9.5.4 Resultados de modelación – Monóxido de carbono (CO)

En la Tabla 71 se presentan las concentraciones máximas obtenidas mediante simulación de dispersión de monóxido de carbono en los receptores discretos para periodos horario y octahorario.

Tabla 71. Resultados CO 1 hora y 8 horas. Escenario 3

Estación	CO (µg/m ³) MD	
	1 hora*	8 horas*
Patio Taller	16.4	6.9
Portal Américas	120.1	62.7
Villa Blanca	59.4	28.1
Kennedy	145.0	93.1
Palenque	113.4	76.8
Avenida Boyacá	150.9	109.1
Avenida 68	134.1	69.3
Rosario	145.1	93.7
NQS	198.3	130.5
Santander	294.5	169.7
Hospitales	251.6	162.1
Calle 10-11	133.6	50.2
Calle 26	79.7	35.0
Calle 45	86.1	35.3
Calle 52	68.0	30.8
Calle 63	56.9	35.1
Calle 72	56.3	33.9
Calle 76	27.5	14.6

*Corresponde al valor máximo de concentración estimado mediante modelación para cada receptor
Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

Los niveles de concentración 8 horas de CO estimados sobre los receptores discretos no superan los 170 µg/m³, al comparar el valor con los límites establecidos en la legislación vigente – Resolución 610 de 2010 (10,000 µg/m³, véase sección 2.4.1) se observa que no se presentan excedencias de la normativa. En la Tabla 72 se consolidan las concentraciones anuales de línea base y operación, así como la relación entre ellas.

Tabla 72. Porcentaje incremento CO 8 Horas. Escenario 3

Estación	CO 8 horas* MD		
	Línea base (µg/m ³)	Operación (µg/m ³)	Línea base/ Operación
Patio Taller	3.14	6.89	54.40%

Estación	CO 8 horas* MD		
	Línea base (µg/m ³)	Operación (µg/m ³)	Línea base/Operación
Portal Américas	28.54	62.70	54.48%
Villa Blanca	12.85	28.14	54.36%
Kennedy	42.37	93.07	54.48%
Palenque	34.98	76.82	54.46%
Avenida Boyacá	49.68	109.08	54.45%
Avenida 68	31.56	69.30	54.47%
Rosario	42.59	93.69	54.54%
NQS	59.00	130.46	54.77%
Santander	73.99	169.65	56.39%
Hospitales	66.37	162.09	59.05%
Calle 10-11	21.68	50.18	56.78%
Calle 26	13.78	35.04	60.66%
Calle 45	35.90	35.31	-1.67%
Calle 52	27.13	30.79	11.88%
Calle 63	28.95	35.05	17.40%
Calle 72	28.15	33.94	17.05%
Calle 76	11.73	14.63	19.86%

*Corresponde al valor máximo de concentración estimado mediante modelación para cada receptor
Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

El porcentaje más alto se presenta en la Calle 26 con 60.66%, mientras que el porcentaje más bajo representa una disminución del 1.67% en la estación Calle 45, en la operación del proyecto con respecto a la línea base.

Los resultados de concentración 8 horas se pueden apreciar en la Figura 90, donde los receptores con mayores aportes fueron Santander y Hospitales con 169.7 y 162.1 µg/m³, respectivamente

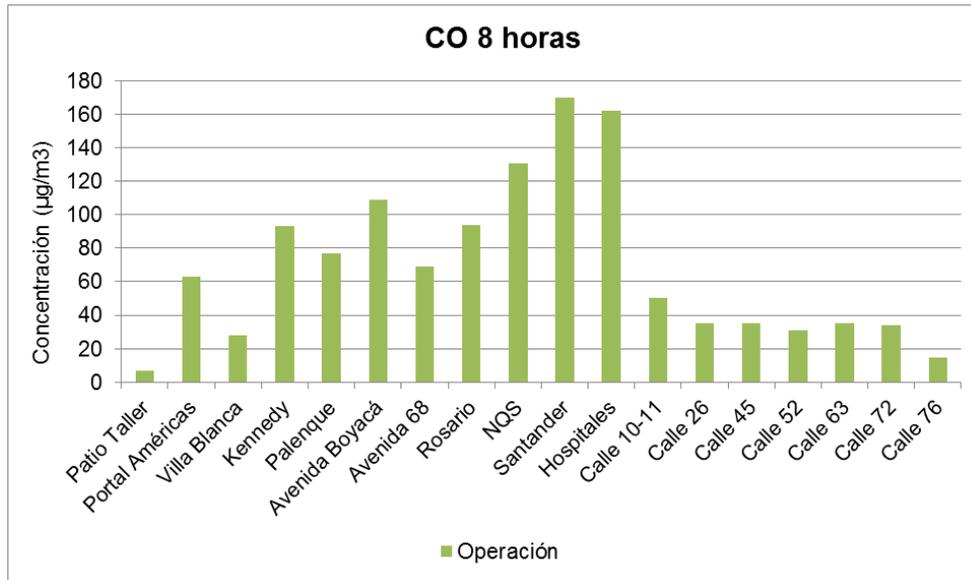


Figura 90. Aportes 8 horas CO. Escenario 3

Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S

En la Figura 91 se observa la isopleta de concentración octahoraria para el escenario modelado, el rango de concentración es de 27.5 – 110 µg/m³. No se excede la norma anual de 10,000 µg/m³, las mayores concentraciones se observan entre el sector NQS y Calle 26.

En el Anexo 4 se incluyen los mapas de dispersión de CO con un mejor nivel de detalle, para los periodos horarios y octahorarios como resultado de la modelación.

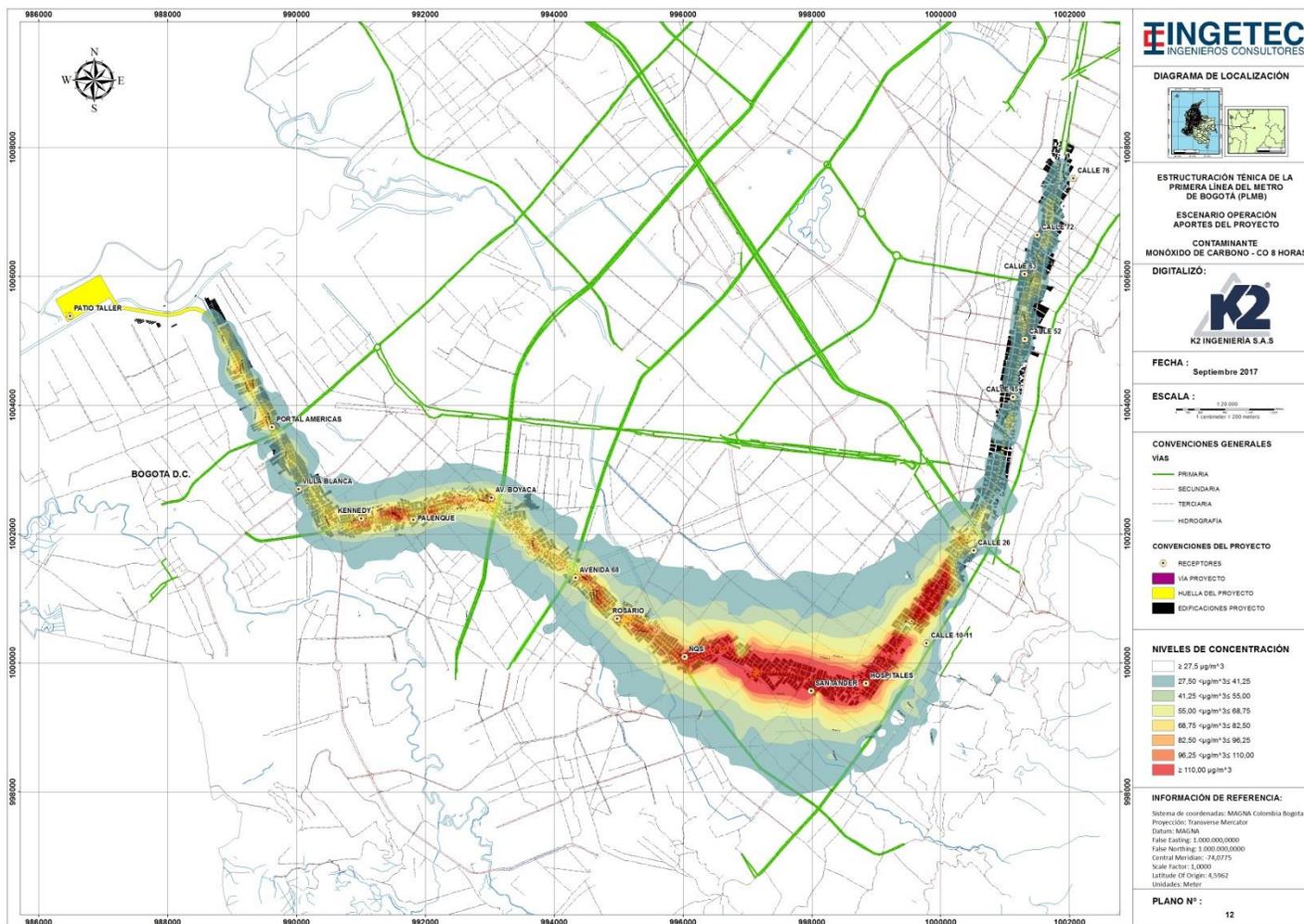


Figura 91. Isopleta CO 8 horas proyecto PLMB. Escenario 3
Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S

9.5.5 Resultados de modelación – Compuestos orgánicos volátiles (VOC)

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para el caso de estudio, los valores de inmisión de los compuestos orgánicos volátiles (VOC) en los receptores de calidad del aire calculados mediante la modelación se encuentran consolidados en la Tabla 73.

Tabla 73. Aportes VOC 24 horas y anual. Escenario 3

Estación	VOC ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	
	24 horas*	Anual
Patio Taller	0.8	0.2
Portal Américas	9.7	2.8
Villa Blanca	3.9	1.5
Kennedy	14.7	5.0
Palenque	12.5	3.6
Avenida Boyacá	18.2	6.4
Avenida 68	12.3	4.6
Rosario	15.5	4.8
NQS	20.7	6.8
Santander	23.5	6.4
Hospitales	25.3	7.8
Calle 10-11	7.7	1.8
Calle 26	4.9	0.7
Calle 45	4.4	1.4
Calle 52	4.1	1.3
Calle 63	4.7	1.5
Calle 72	4.5	1.4
Calle 76	2.0	0.6

*Corresponde al valor máximo de concentración estimado mediante modelación para cada receptor
Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

Los niveles de concentración anual de VOC estimados sobre los receptores discretos no representan un incremento de más de $8 \mu\text{g}/\text{m}^3$. En el caso de los compuestos orgánicos volátiles no es posible comparar con la Resolución 610 de 2010, ya que no está regulado el nivel máximo permisible de concentración de VOC.

En la Tabla 74 se puede observar los resultados de la modelación de línea base y operación, así como el porcentaje de incremento de la operación respecto a línea base.

Tabla 74. Porcentaje incremento VOC 24 anual. Escenario 3

Estación	VOC anual MD		
	Línea base (µg/m3)	Operación (µg/m3)	Línea base/Operación
Patio Taller	0.11	0.23	53.82%
Portal Américas	1.25	2.75	54.48%
Villa Blanca	0.68	1.50	54.41%
Kennedy	2.28	5.02	54.52%
Palenque	1.65	3.62	54.50%
Avenida Boyacá	2.92	6.43	54.52%
Avenida 68	2.07	4.56	54.55%
Rosario	2.19	4.83	54.59%
NQS	3.09	6.84	54.75%
Santander	2.80	6.43	56.52%
Hospitales	3.14	7.78	59.67%
Calle 10-11	0.73	1.80	59.45%
Calle 26	0.30	0.67	55.60%
Calle 45	1.45	1.43	-1.67%
Calle 52	1.10	1.26	12.43%
Calle 63	1.27	1.53	16.87%
Calle 72	1.19	1.43	16.69%
Calle 76	0.43	0.55	20.97%

El porcentaje de incremento más alto se presenta en la estación Hospitales con un valor de 59.67% y el resultado más bajo fue una disminución del 1.67% en la Calle 45.

En la Figura 92 se puede apreciar los aportes de los compuestos orgánicos volátiles en las estaciones de calidad del aire.

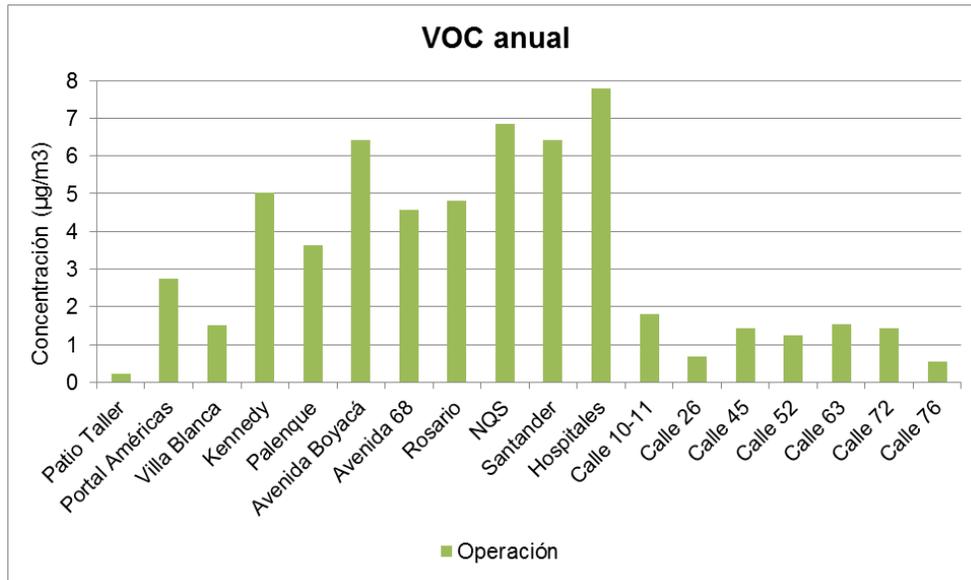


Figura 92. Aportes anuales VOC. Escenario 3

Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

La isopleta anual para VOC se presenta a continuación, posee un rango de concentración de 1.30 – 5.20 µg/m³ de los compuestos orgánicos volátiles, las mayores concentraciones se observan entre el sector NQS y Calle 26.

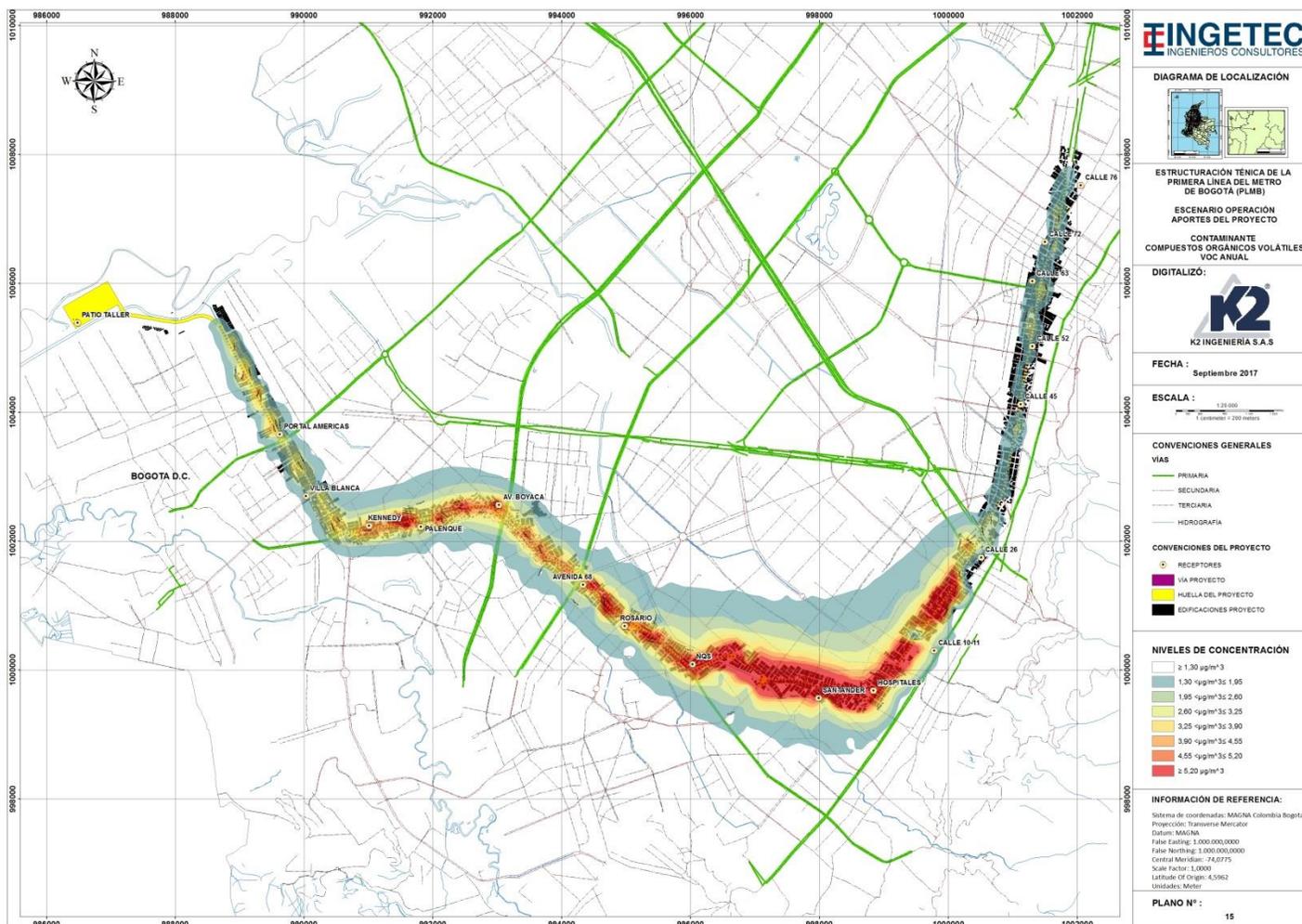


Figura 93. Isopleta anual VOC proyecto PLMB. Escenario 3
Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S

10. APORTES DE MODELACIÓN CON CONCENTRACIONES DE FONDO

A continuación se presentan los aportes de modelación con las concentraciones de fondo para cada contaminante, para el periodo anual y 24 horas.

La estimación de la concentración de fondo se obtiene de la diferencia entre el promedio del valor medido directamente y los resultados de la modelación, en el caso de 24 horas se tomará el valor mayor registrado en los 18 días; En la Tabla 75 y Tabla 76 se pueden apreciar los fondos estimados anuales y 24 horas para los contaminantes PM₁₀, PM_{2.5}, NO₂ y SO₂.

Las isopleas presentadas con concentración de fondo se realizaron a una distancia de 500 metros a cada lado del viaducto de acuerdo a la representatividad que tienen las estaciones de medición de calidad del aire.

De acuerdo al protocolo para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire del Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo sostenible (Minambiente), el cual establece que dependiendo de la altura de la toma muestras, la distancia a la vía y el tráfico promedio diario, se pueden clasificar en escala media, vecindario y escala urbana, dicho lo anterior para el presente estudio corresponde a la clasificación de escala media o micro escala con representatividad de las mediciones de 300 a 500 metros.

Tabla 75. Valores de fondo anual

Estación	PM ₁₀	PM _{2.5}	NO ₂	SO ₂
	Anual (µg/m ³)			
1 Patio Taller	51.3	30.9	15.3	20.15
2 Portal Américas	76.0	37.4	14.2	17.06
3 Villa Blanca	57.6	22.2	18.7	17.09
4 Kennedy	42.7	27.7	15.8	16.94
5 Palenque	43.0	23.2	15.1	17.80
6 Avenida Boyacá	54.8	27.7	23.9	17.52
7 Avenida 68	35.4	18.4	18.5	14.89
8 Rosario	31.4	18.5	13.4	16.50
9 NQS	42.6	26.4	19.8	17.14
10 Santander	30.8	17.8	10.2	17.39
11 Hospitales	49.0	33.1	40.1	16.93
12 Calle 10-11	41.1	24.1	14.0	18.58
13 Calle 26	37.3	16.3	15.1	19.32
14 Calle 45	41.3	22.2	16.3	17.73

Estación		PM ₁₀	PM _{2.5}	NO ₂	SO ₂
		Anual (µg/m ³)			
15	Calle 52	44.0	22.4	17.6	17.36
16	Calle 63	41.1	23.2	13.3	16.25
17	Calle 72	43.6	22.2	14.9	16.53
18	Calle 76	44.7	19.6	14.0	15.47

Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

Tabla 76. Valores de fondo 24 horas

Estación		PM ₁₀	PM _{2.5}	NO ₂	SO ₂
		24 horas (µg/m ³)			
1	Patio Taller	71.0	42.5	35.5	47.8
2	Portal Américas	89.0	73.4	17.1	17.6
3	Villa Blanca	91.2	33.9	31.6	17.7
4	Kennedy	59.0	42.3	22.3	17.5
5	Palenque	64.0	32.2	23.5	22.1
6	Avenida Boyacá	72.5	31.2	36.4	36.3
7	Avenida 68	43.8	26.3	37.2	16.7
8	Rosario	42.7	22.0	18.1	17.4
9	NQS	80.1	52.5	33.6	21.7
10	Santander	33.0	22.6	1.3	17.1
11	Hospitales	78.7	40.7	48.6	16.4
12	Calle 10-11	58.0	27.1	11.1	29.8
13	Calle 26	49.2	26.9	37.2	51.8
14	Calle 45	93.2	35.7	24.2	24.1
15	Calle 52	54.6	44.5	29.7	17.5
16	Calle 63	52.9	40.5	13.2	17.6
17	Calle 72	53.9	47.3	20.1	16.7
18	Calle 76	67.1	27.2	14.6	17.3

Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

10.1 ESCENARIO LÍNEA BASE

10.1.1 Material Particulado (PM₁₀ y PM_{2.5}):

A continuación se muestra la distribución de curvas de concentración – Isopletas para PM₁₀ y PM_{2.5} estimadas para el escenario de línea base en el periodo 24 horas y anual, como resultado de la modelación más la inclusión de la concentración fondo.

Para PM_{10} 24 horas, el rango de concentración de la isopleta es de 25 – 90 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, donde se presentaron los valores más altos entre el sector Patio Taller y Villa Blanca, NQS, Hospitales y Calle 45. La isopleta anual de PM_{10} posee un rango de 15 a 75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y las mayores concentraciones se observan entre el sector Patio Taller y Villa Blanca.

Como puede apreciarse en las curvas de concentración de $PM_{2.5}$, los mayores aportes se presentan entre el sector Patio Taller hasta el Portal Américas y los menores se observan en la zona de la Avenida 68 y Rosario y desde la Calle 26 hasta la Calle 76, con un rango de concentración de 20 a 70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y de 15 – 38 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para la isopleta 24 horas y anual, respectivamente.

Las concentraciones de material particulado- PM_{10} y $PM_{2.5}$ presentan valores superiores a la norma anual de calidad del aire, 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{10} y de 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para $PM_{2.5}$.

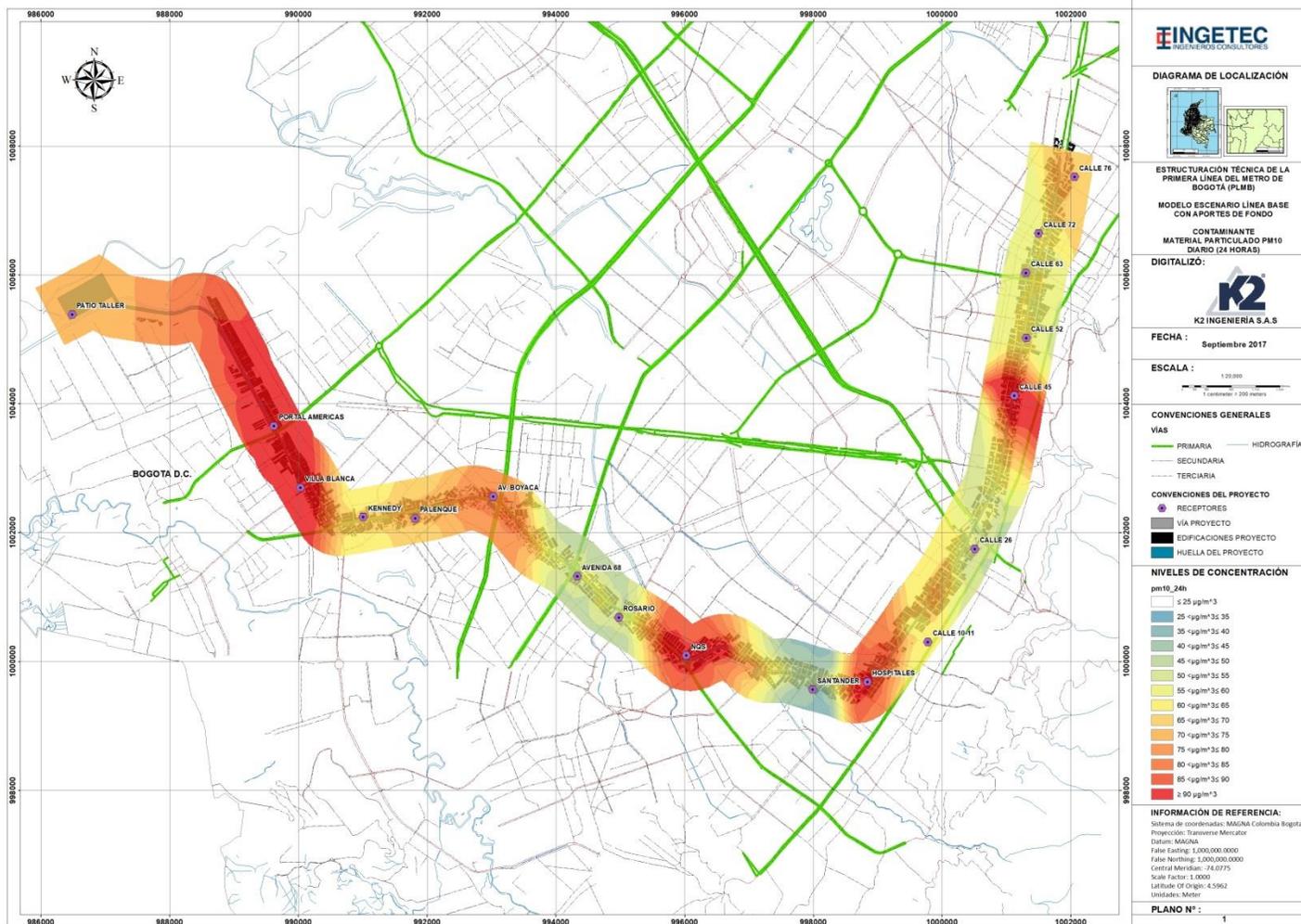


Figura 94. Isopleta 24 horas PM₁₀ proyecto PLMB + Fondos. Escenario 1
Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

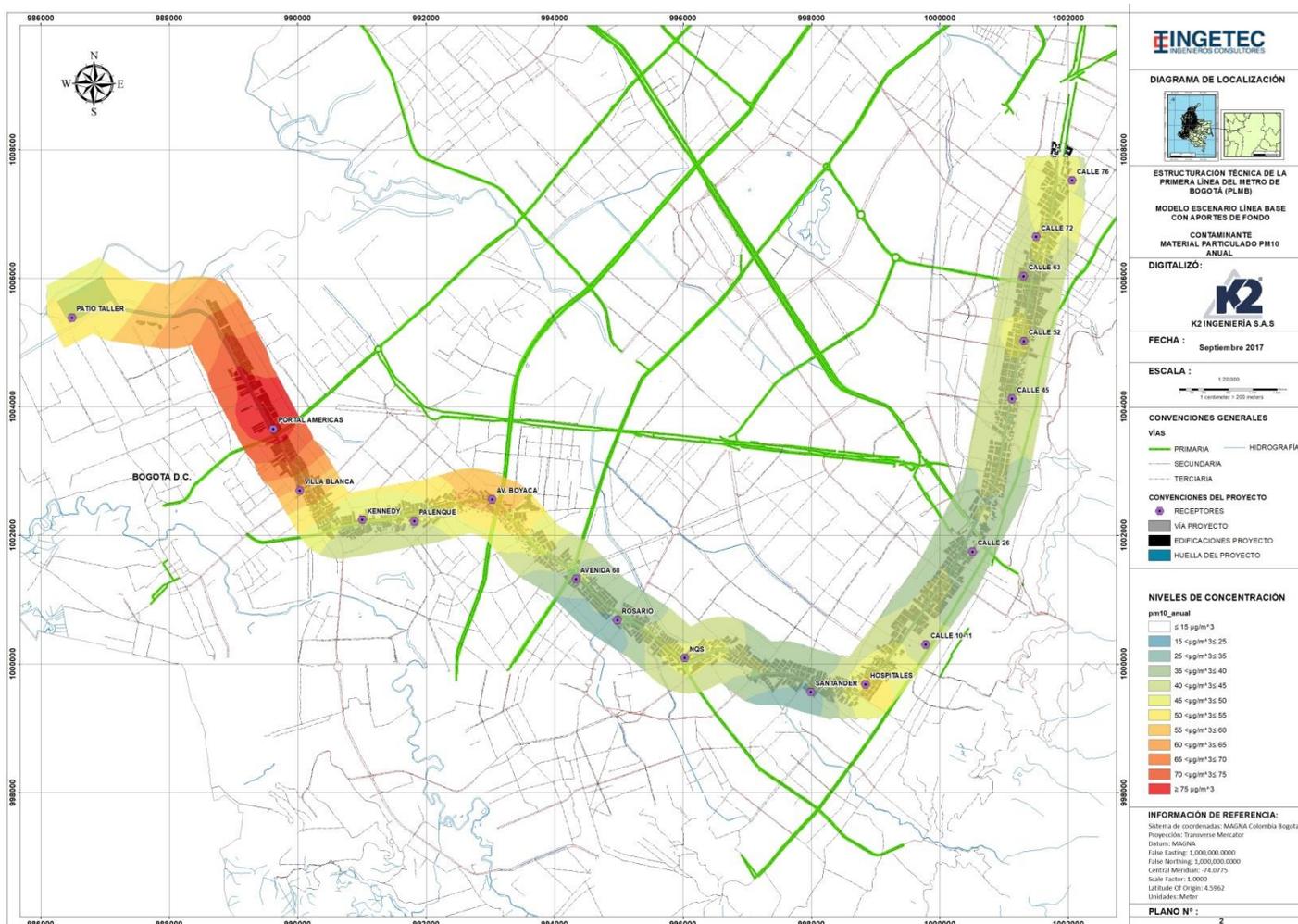


Figura 95. Isopleta anual PM₁₀ proyecto PLMB + Fondos. Escenario 1
Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

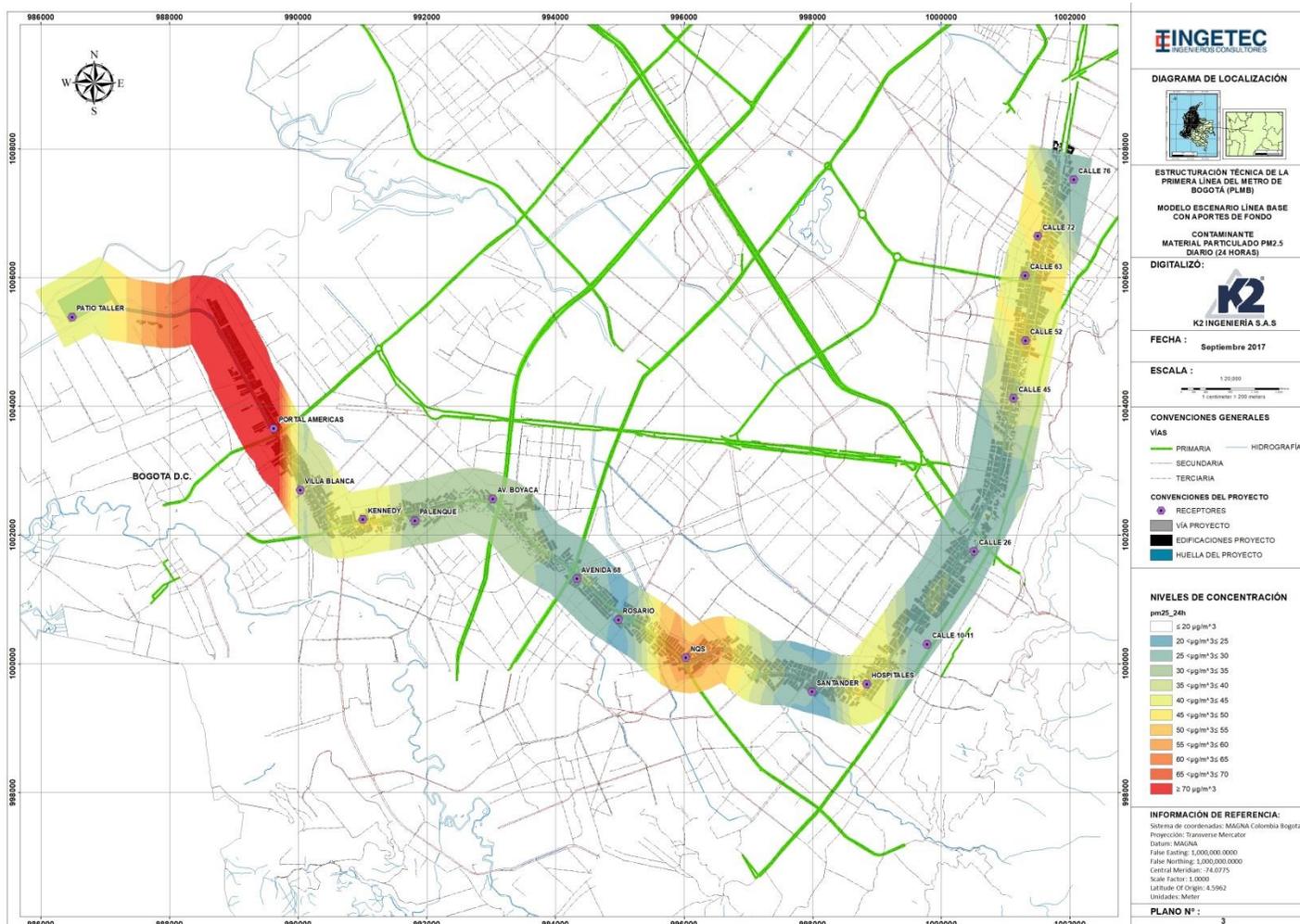


Figura 96. Isopleta 24 horas PM_{2.5} proyecto PLMB + Fondos. Escenario 1
Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

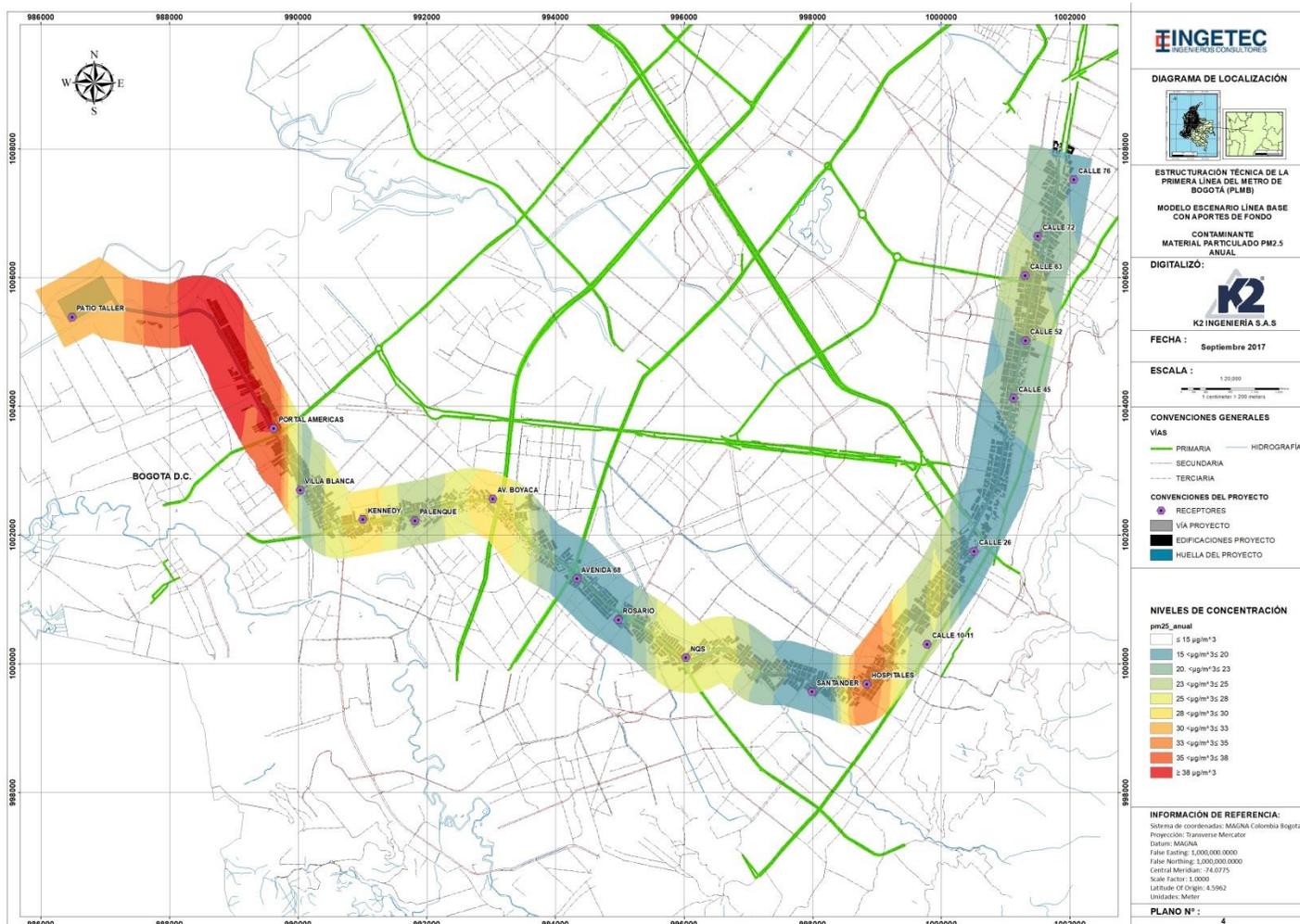


Figura 97. Isopleta anual PM_{2.5} proyecto PLMB + Fondos. Escenario 1
Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

10.1.2 Dióxido de nitrógeno (NO₂)

En la Figura 98 y Figura 99 se observan las isopletras de concentración 24 horas y anual de NO₂, se obtiene un rango de concentración de 20 – 70 µg/m³.y de 15 a 38 µg/m³ para 24 horas y anual, respectivamente. Las isopletras no exceden la norma anual de 100 µg/m³ ni la norma de 24 horas de 150 µg/m³. Se puede observar que las mayores concentraciones se presentan entre Santander y Hospitales, la Avenida Boyacá y la Avenida 68, Calle 26 y Calle 45.

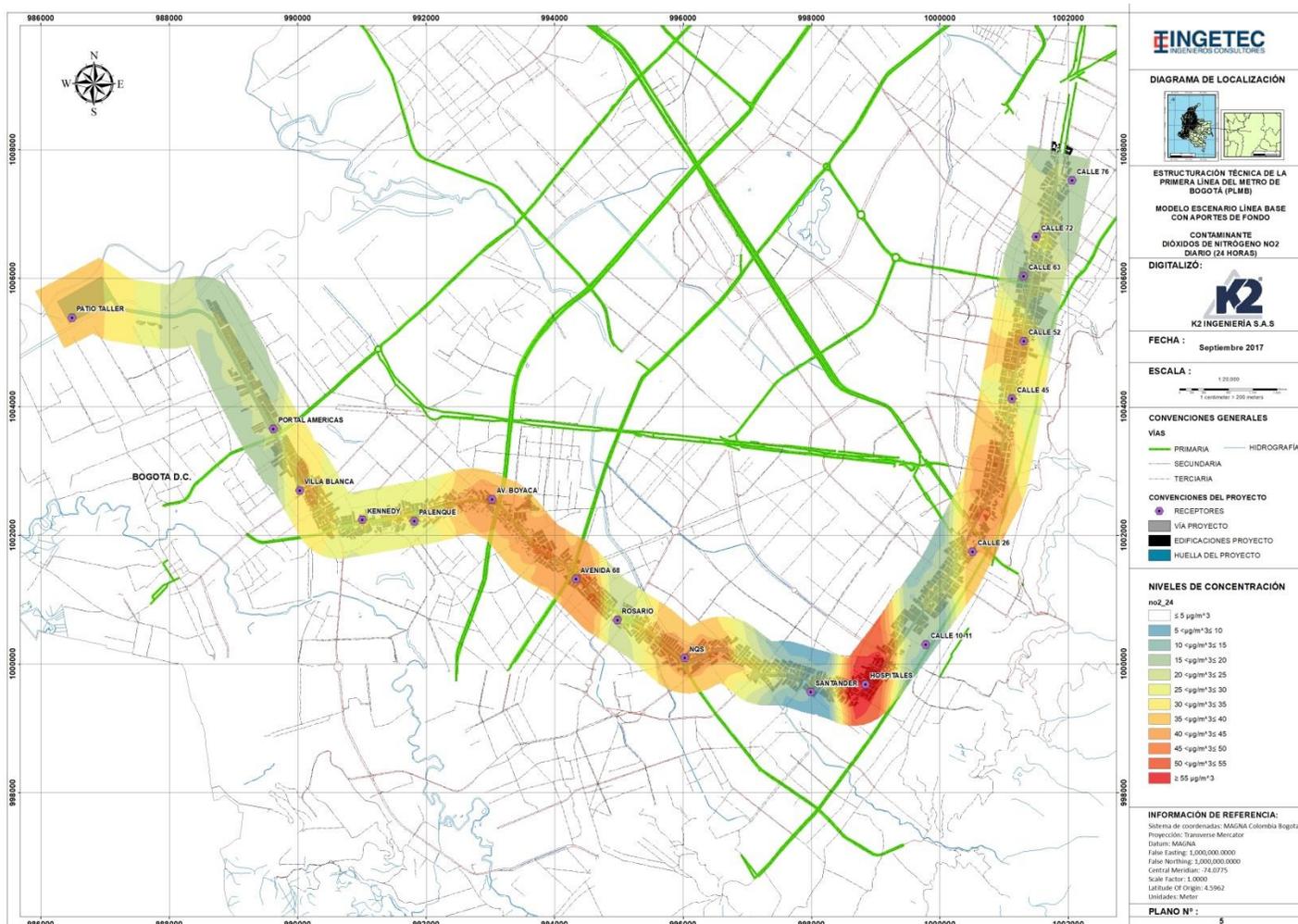


Figura 98. Isopleta 24 horas NO₂ proyecto PLMB + Fondos. Escenario 1
Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

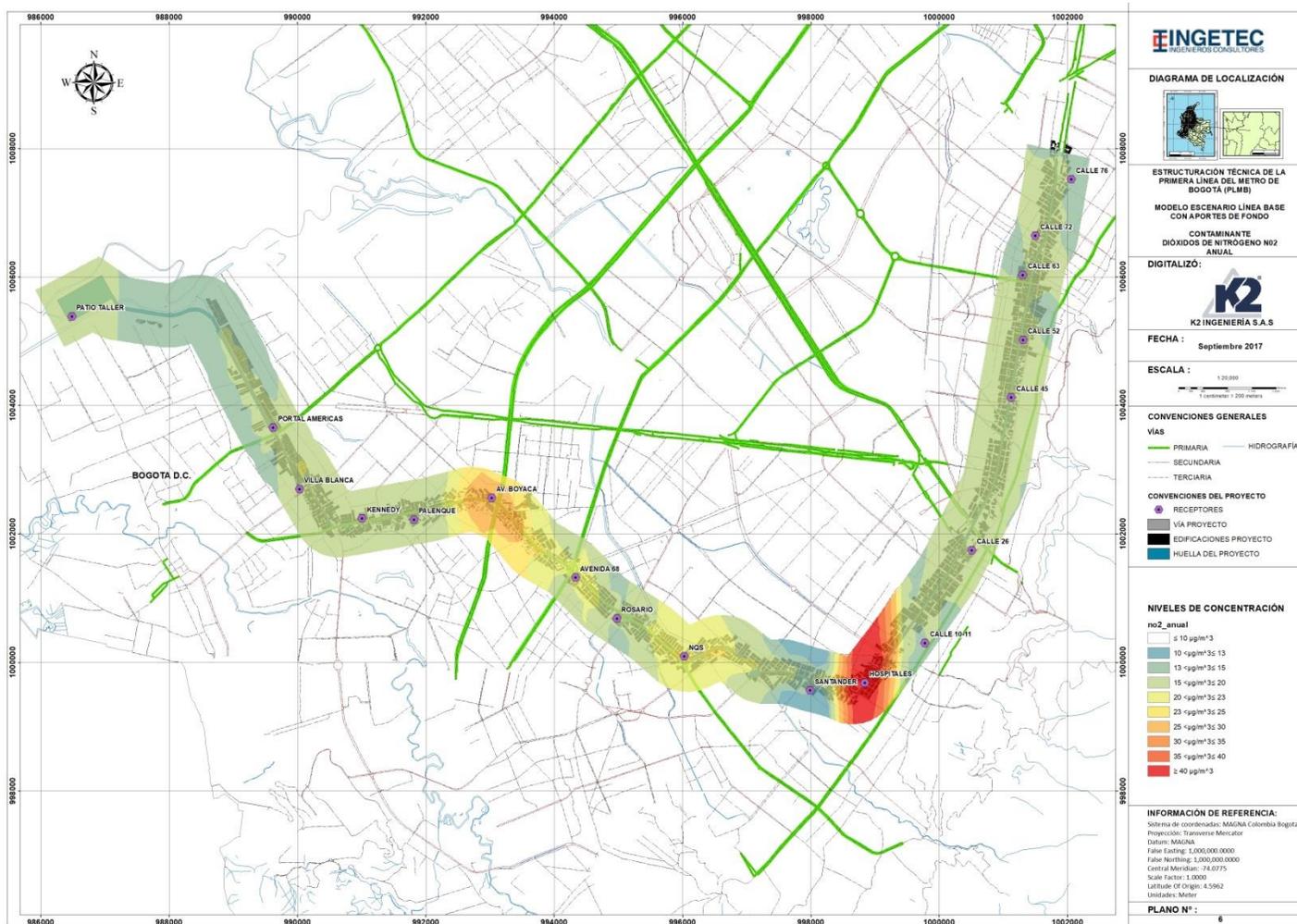


Figura 99. Isopleta anual NO₂ proyecto PLMB + Fondos. Escenario 1
Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

10.1.3 Dióxido de azufre (SO₂)

Las Isopletras para SO₂ se presentan a continuación.

El periodo 24 horas presenta un rango entre 15 y 50 µg/m³, mientras que la isopletra anual posee un rango de 14 a 20 µg/m³, no se exceden las normas 24 horas y anual de 250 y 80 µg/m³, respectivamente. Se puede observar que las mayores concentraciones se presentan en Patio Taller y entre los sectores Calle 26 y Calle 45.

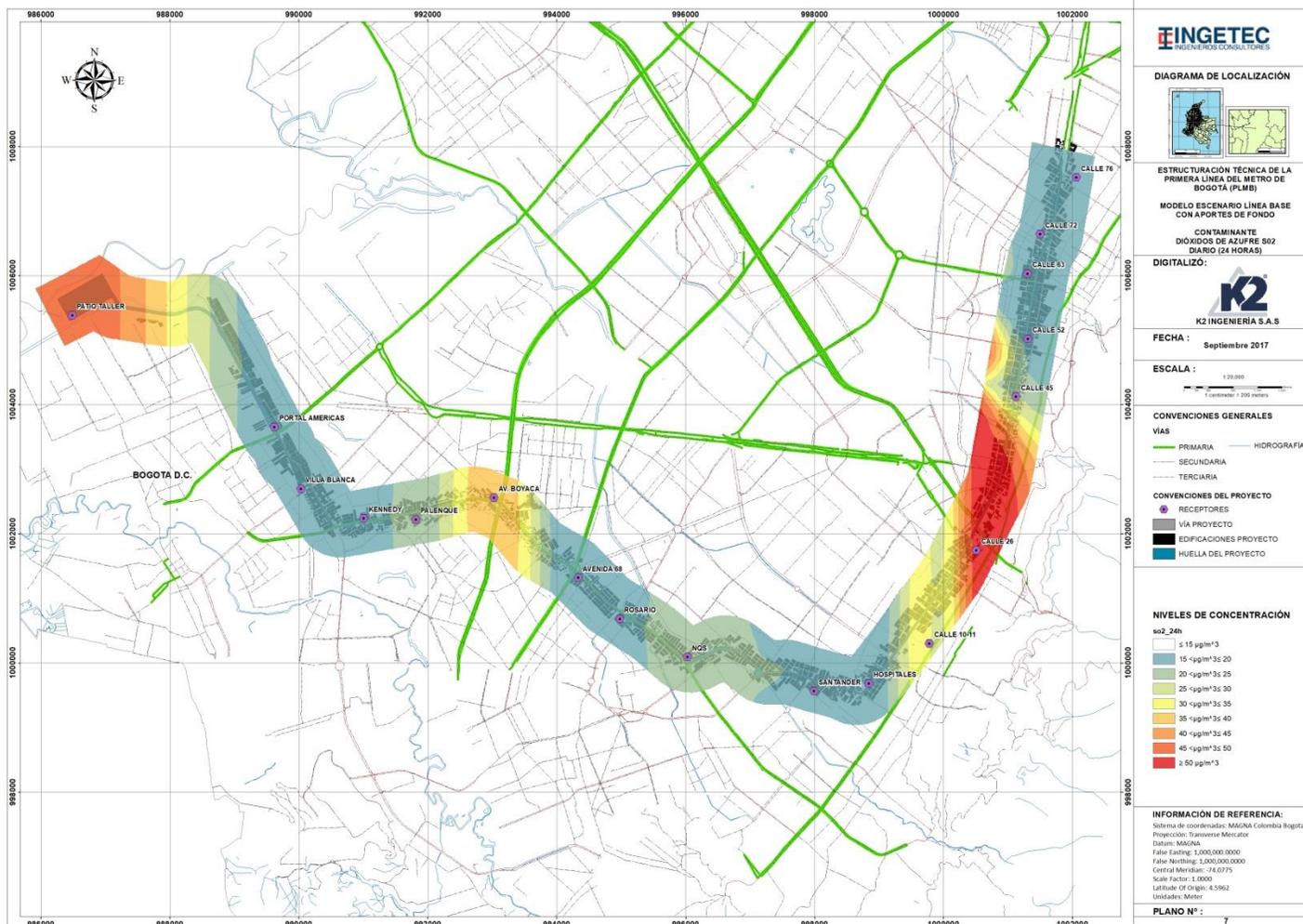


Figura 100. Isopleta 24 horas SO₂ proyecto PLMB + Fondos. Escenario 1
Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

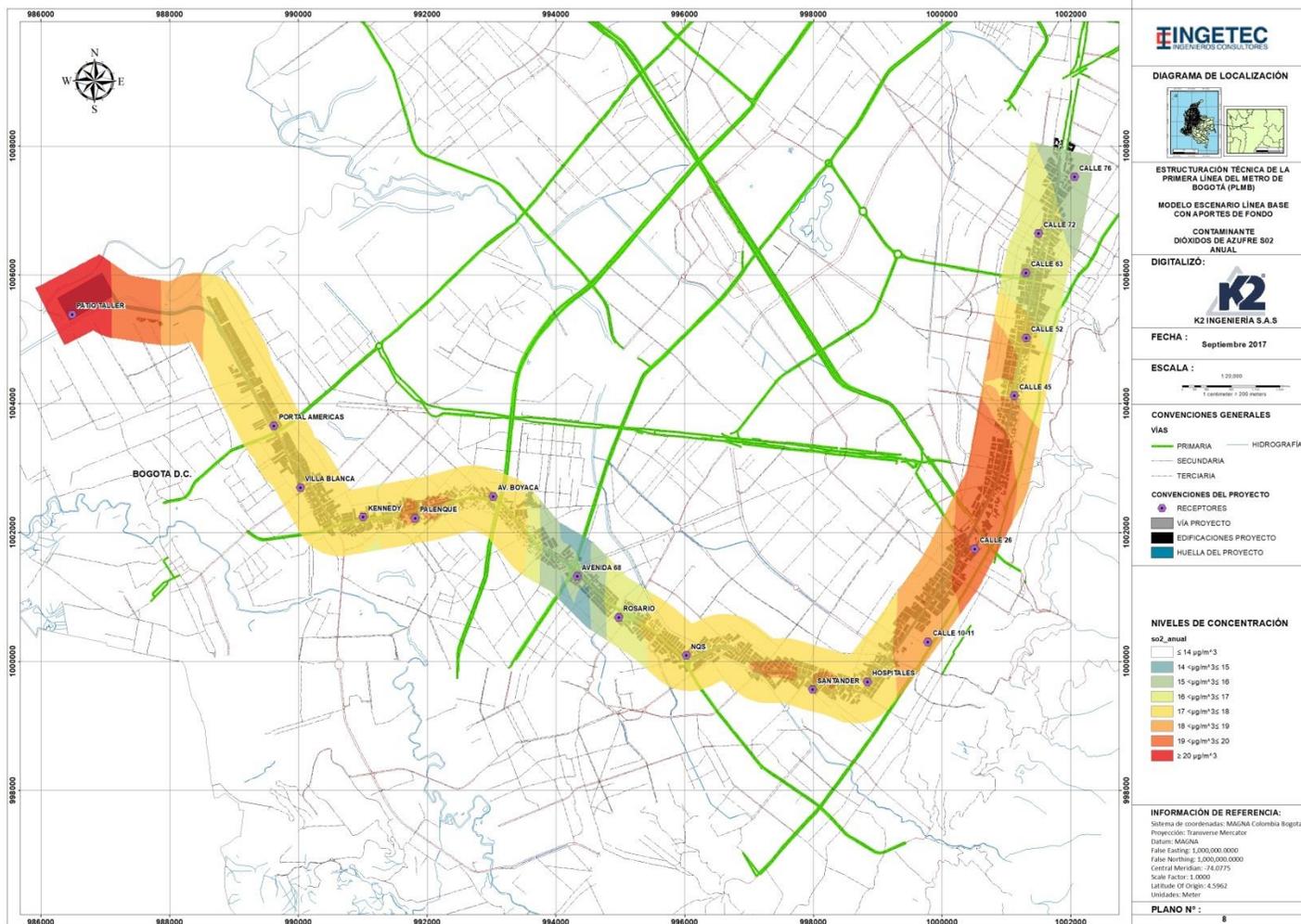


Figura 101. Isopleta anual SO₂ proyecto PLMB + Fondos. Escenario 1
Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

10.2 ESCENARIO CONSTRUCCIÓN

10.2.1 Material Particulado (PM₁₀ y PM_{2.5}):

A continuación se muestra la distribución de curvas de concentración – Isopletas para PM₁₀ y PM_{2.5} estimadas para el escenario de línea base en el periodo 24 horas y anual, como resultado de la modelación más la inclusión de la concentración fondo.

Para PM₁₀ 24 horas, el rango de concentración de la isopleta es de 60 – 300 µg/m³, donde se presentaron los valores más altos entre el sector Patio Taller y Portal Américas, Santander, Hospitales y entre Calle 26 a Calle 45. La isopleta anual de PM₁₀ posee un rango de 30 a 110 µg/m³ y las mayores concentraciones se observan en los mismos sectores que la isopleta 24 horas.

Como puede apreciarse en las curvas de concentración de PM_{2.5}, los mayores aportes se presentan entre el sector Patio Taller hasta el Portal Américas y los menores se observan en la zona de la Avenida 68 y Rosario y desde la Calle 10-11 hasta la Calle 26, con un rango de concentración de 30 a 150 µg/m³ y de 15 – 60 µg/m³ para la isopleta 24 horas y anual, respectivamente.

Las concentraciones de material particulado- PM₁₀ y PM_{2.5} presentan valores superiores a la norma anual de calidad del aire, 50 µg/m³ para PM₁₀ y de 25 µg/m³ para PM_{2.5}, así como hubo valores que superaron las normas de 24 horas para ambos casos.

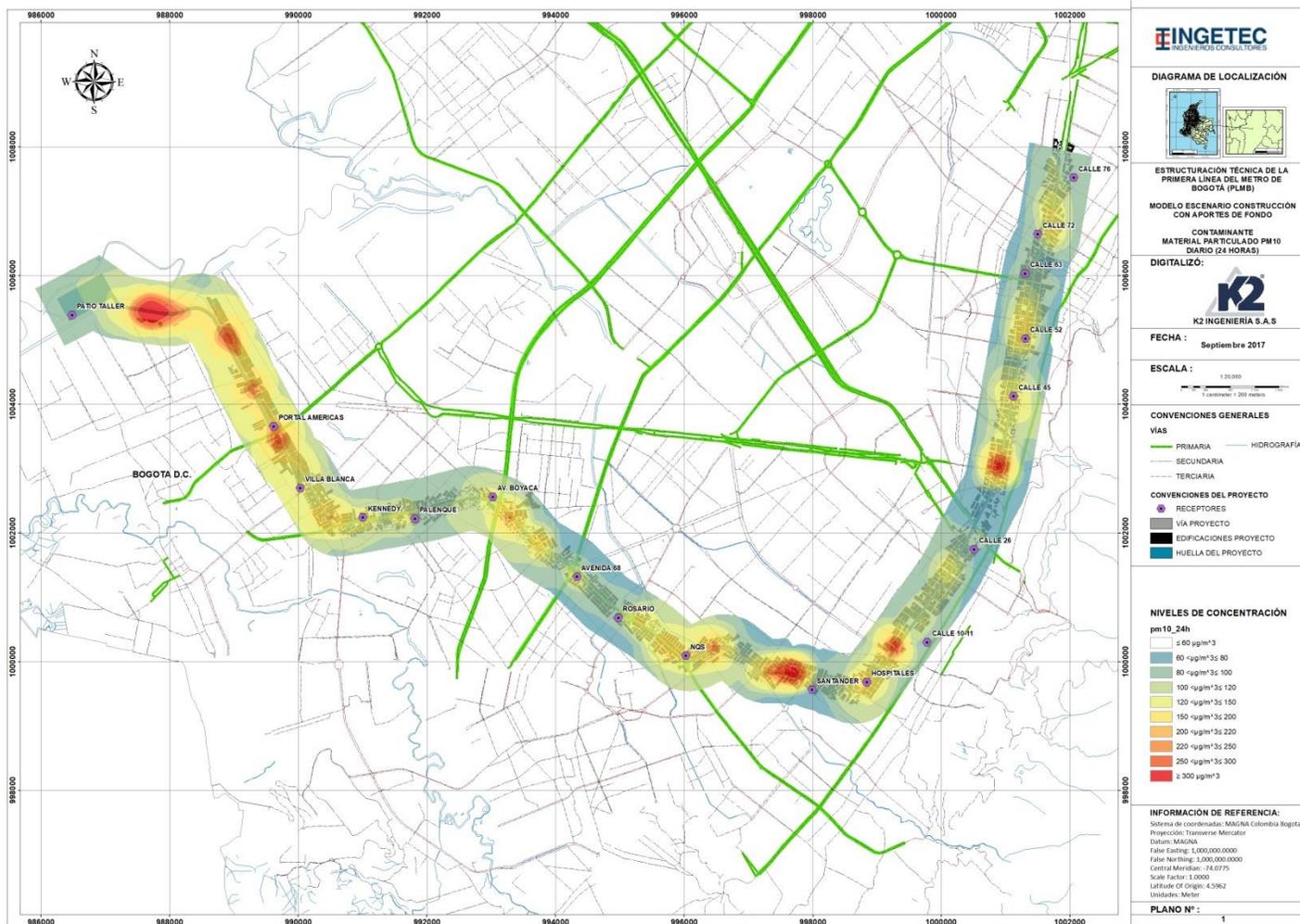


Figura 102. Isopleta 24 horas PM₁₀ proyecto PLMB + Fondos. Escenario 2
Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

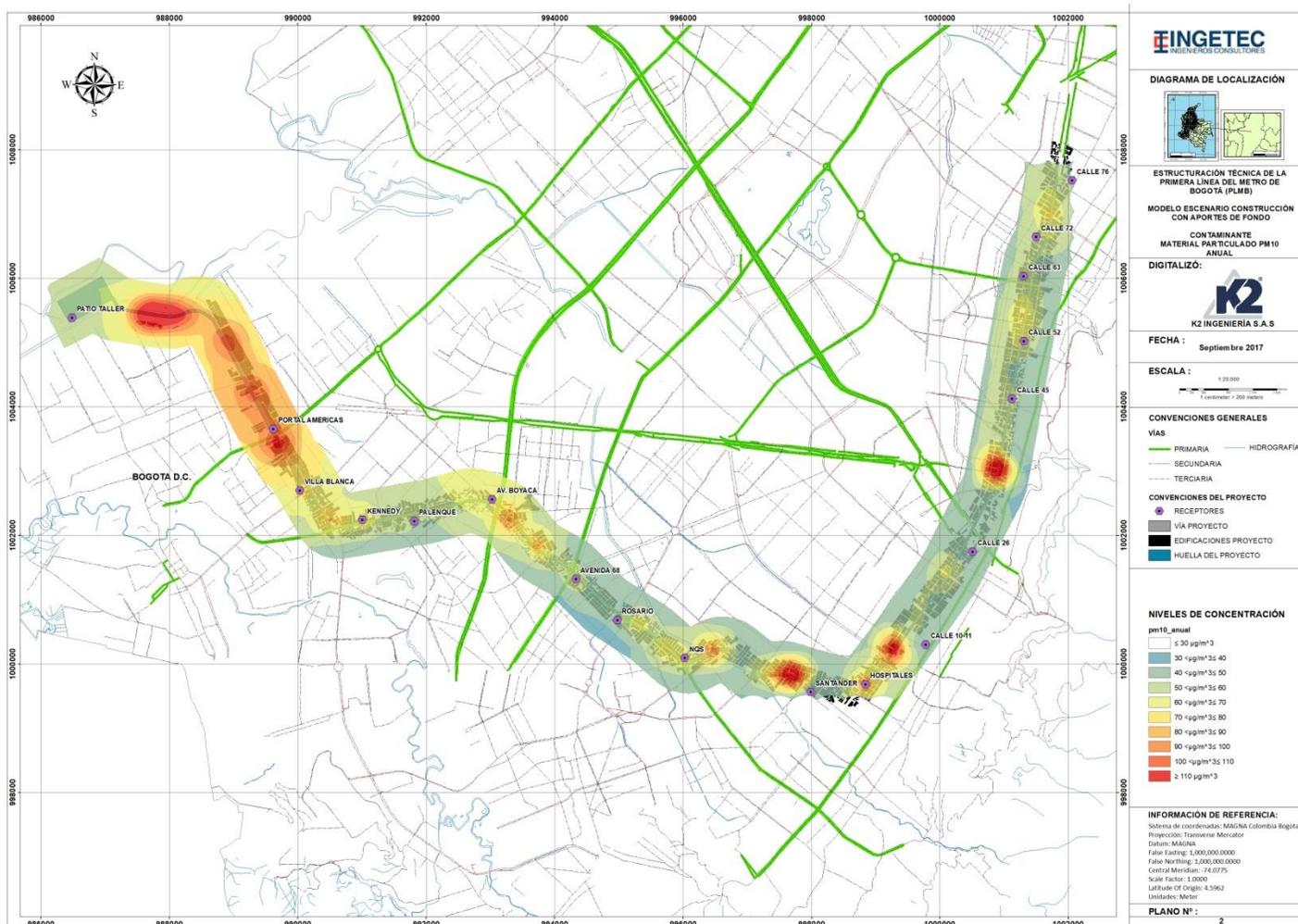


Figura 103. Isopleta anual PM₁₀ proyecto PLMB + Fondos. Escenario 2
Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

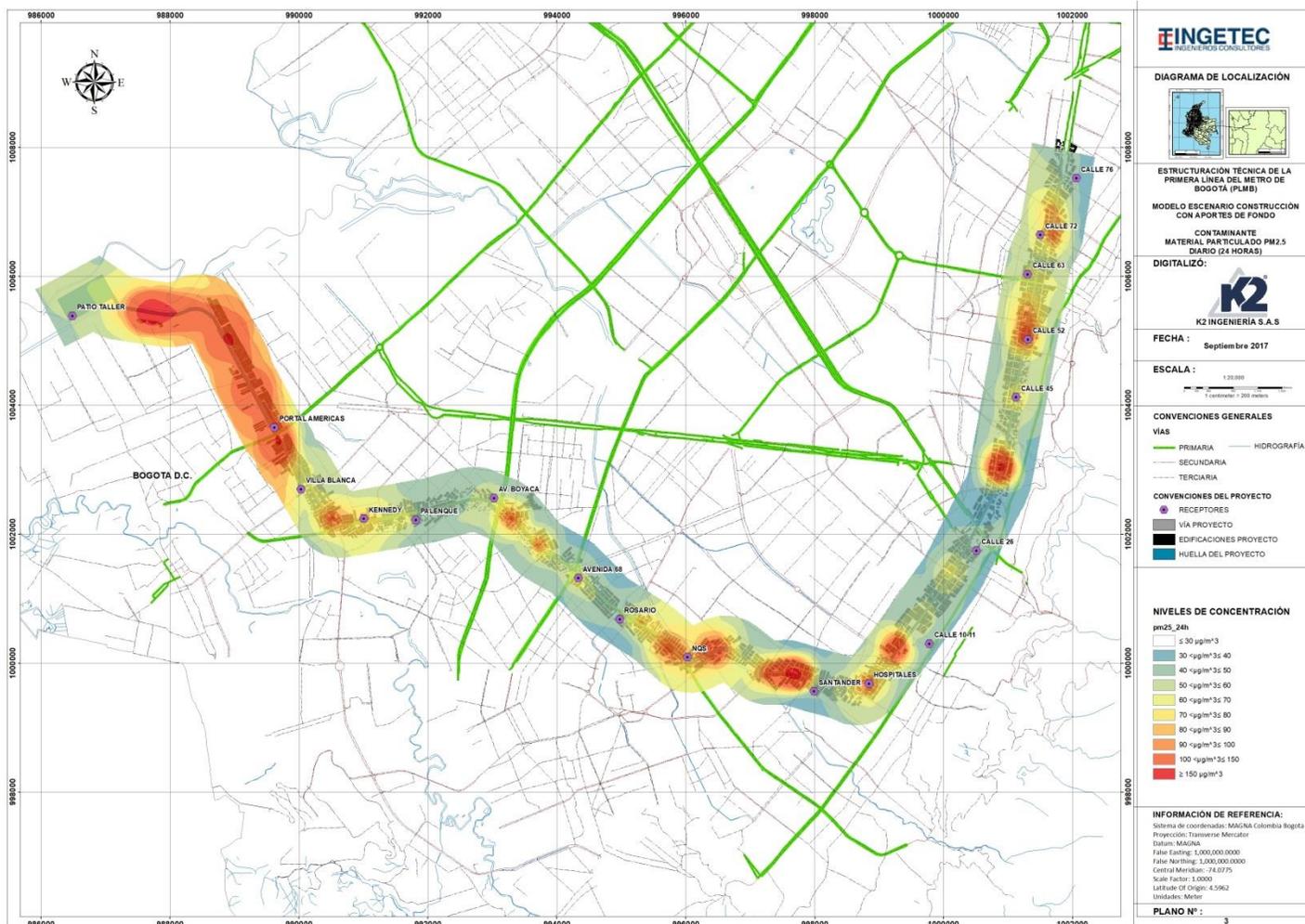


Figura 104. Isopleta 24 horas PM_{2.5} proyecto PLMB + Fondos. Escenario 2
Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

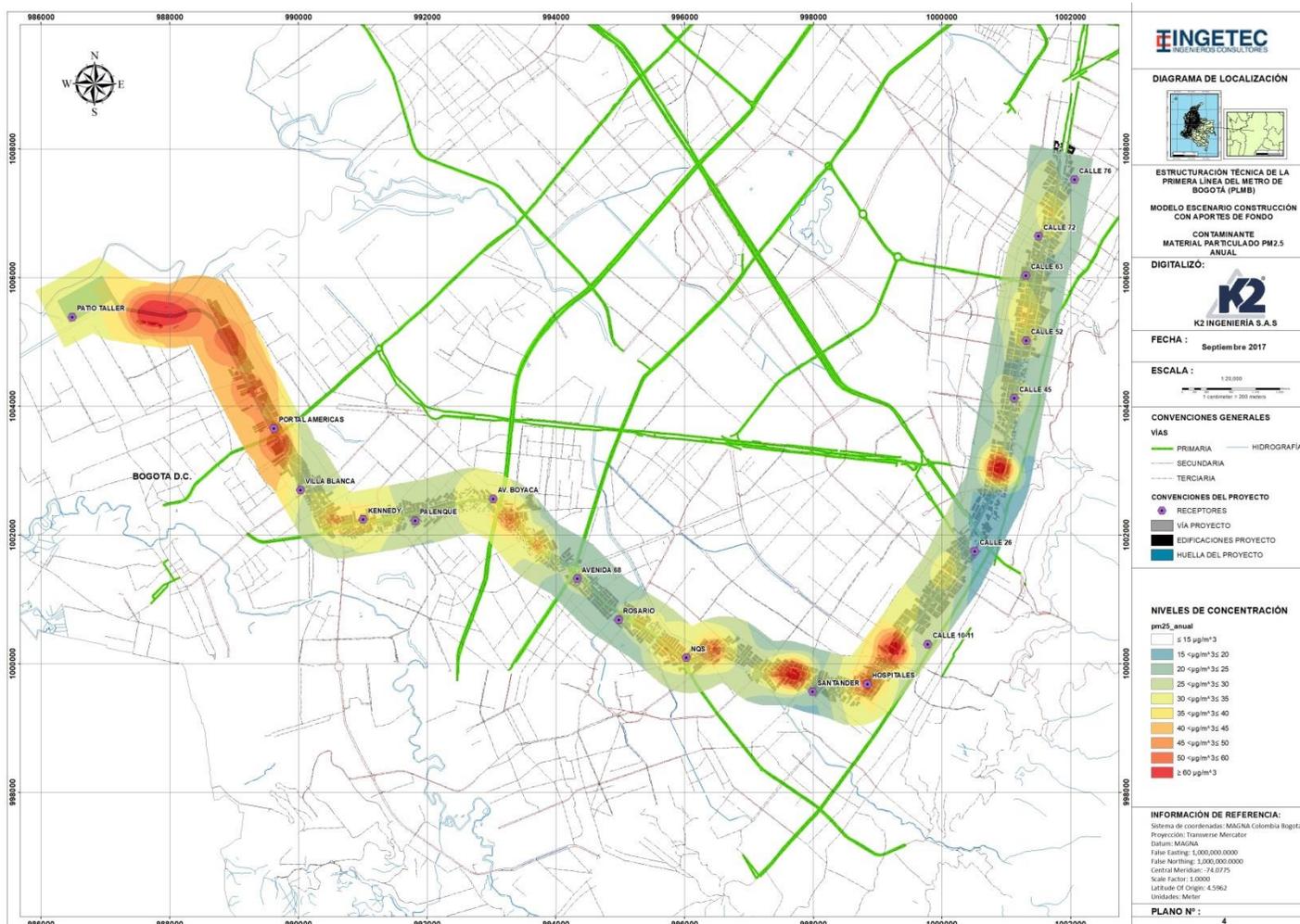


Figura 105. Isopleta anual PM_{2.5} proyecto PLMB + Fondos. Escenario 2
Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

10.2.2 Dióxido de nitrógeno (NO₂)

En la Figura 98 y Figura 99 se observan las isopletras de concentración 24 horas y anual de NO₂, se obtiene un rango de concentración de 20 – 120 µg/m³.y de 10 a 45 µg/m³ para 24 horas y anual, respectivamente. Las isopletras no exceden la norma anual de 100 µg/m³ ni la norma de 24 horas de 150 µg/m³. Se puede observar que las mayores concentraciones se presentan en Patio Taller, entre Santander y Hospitales, y entre Calle 26 a Calle 45.

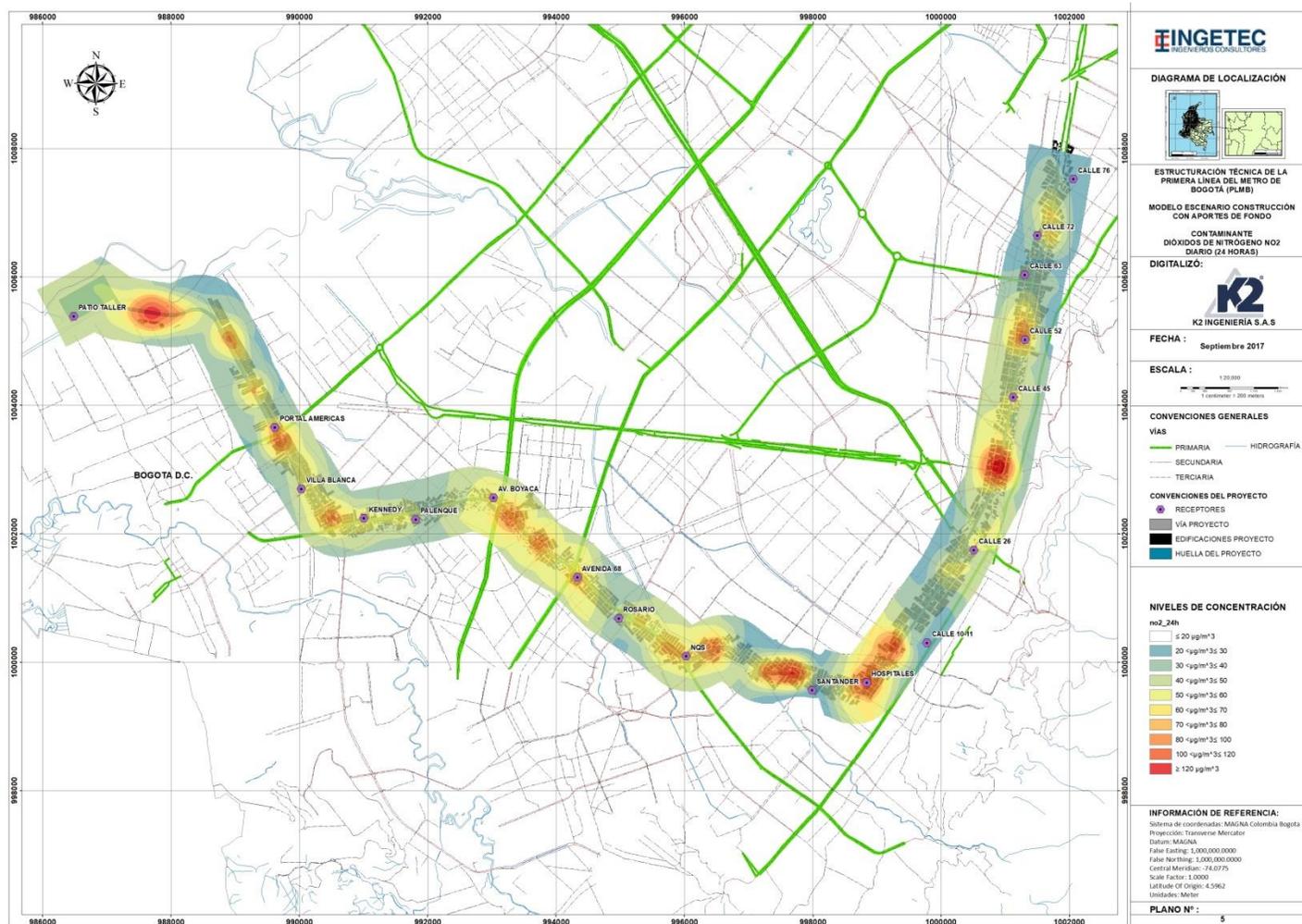


Figura 106. Isopleta 24 horas NO₂ proyecto PLMB + Fondos. Escenario 2
Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

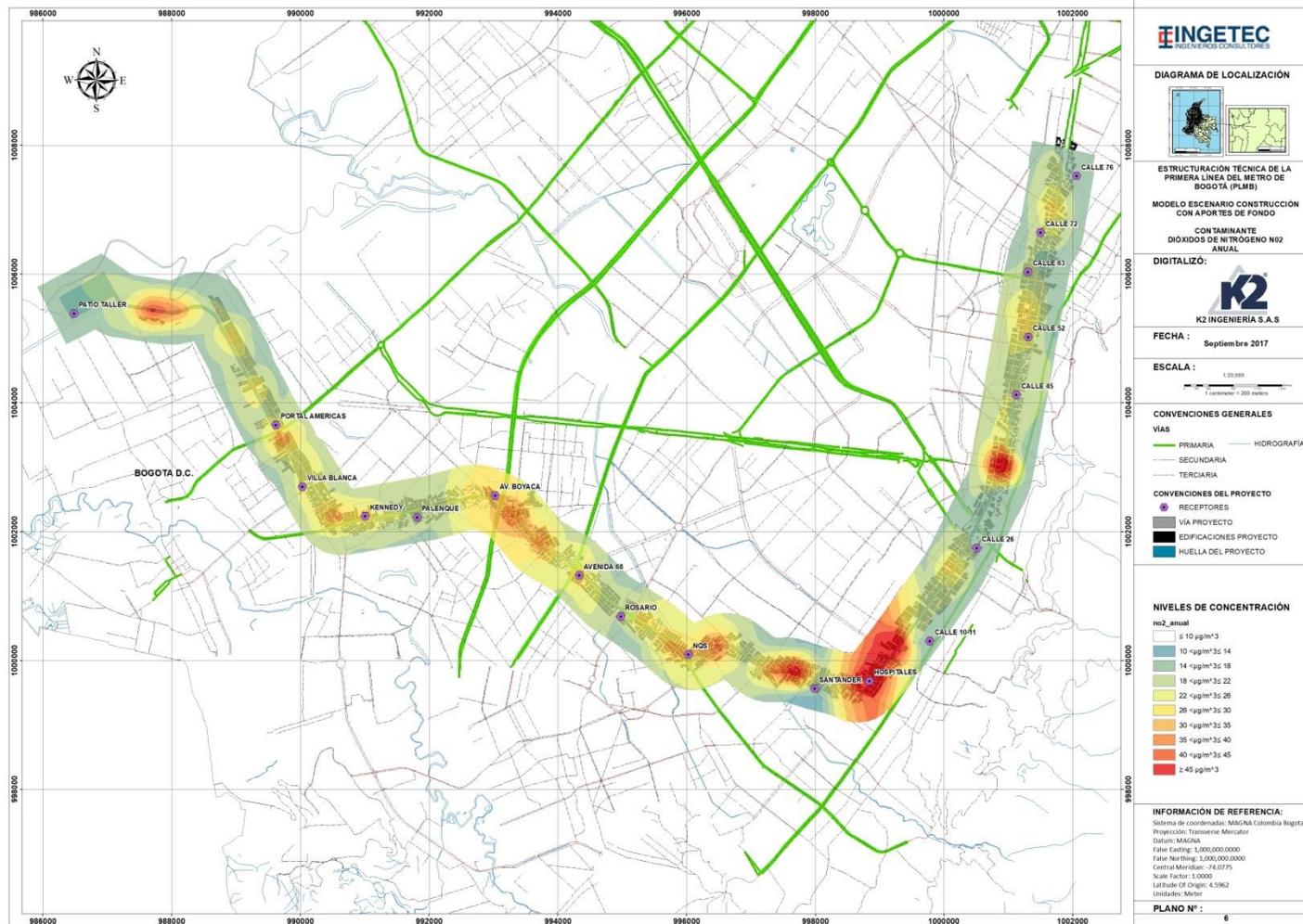


Figura 107. Isopleta anual NO₂ proyecto PLMB + Fondos. Escenario 2
Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

10.2.3 Dióxido de azufre (SO₂)

Las Isopletras para SO₂ se presentan a continuación.

El periodo 24 horas presenta un rango entre 13 y 50 µg/m³, mientras que la isopletra anual posee un rango de 14.5 a 19.5 µg/m³, no se exceden las normas 24 horas y anual de 250 y 80 µg/m³, respectivamente. Se puede observar que las mayores concentraciones se presentan en Patio Taller y entre los sectores Calle 10-11 hasta la Calle 45.

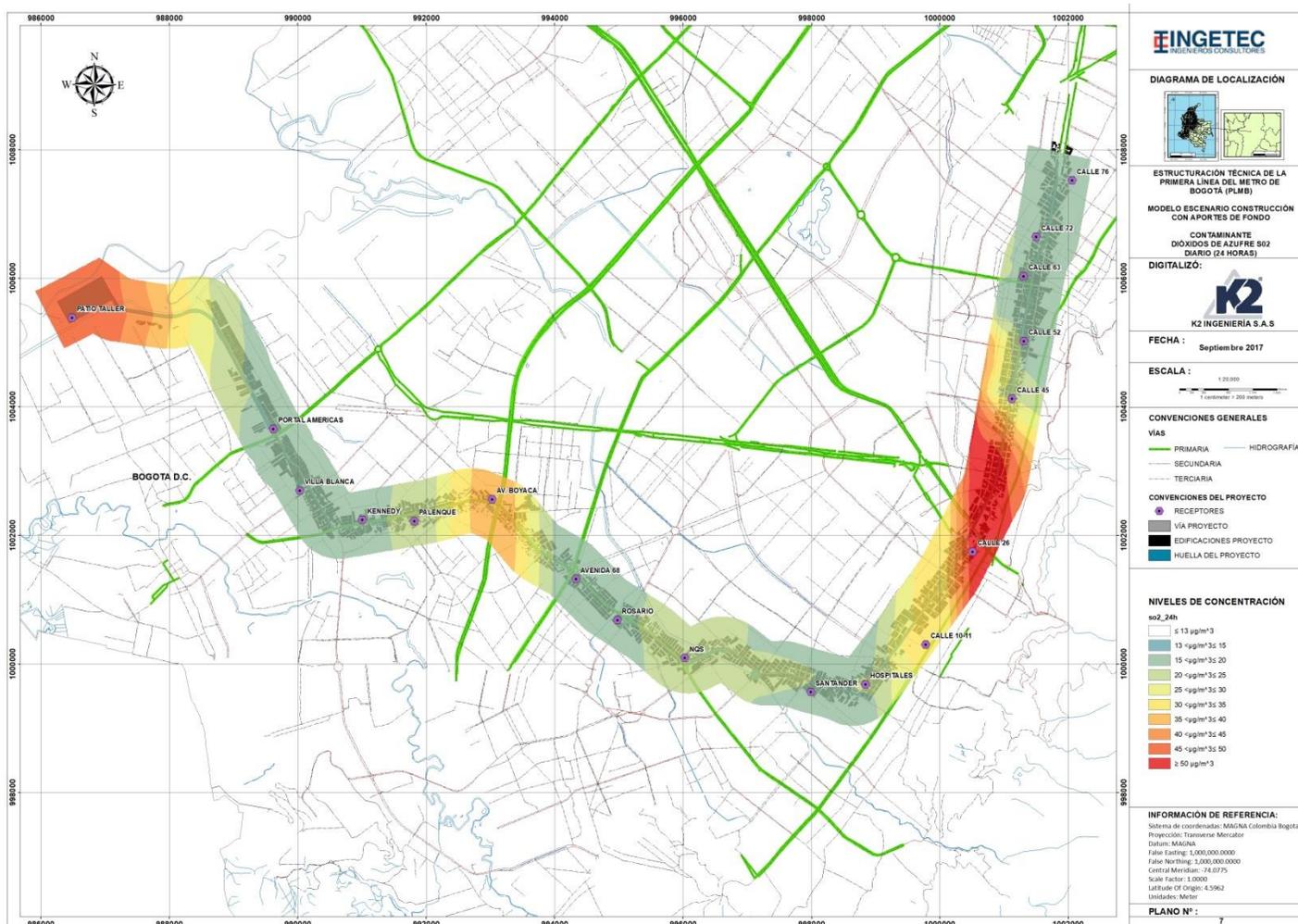


Figura 108. Isopleta 24 horas SO₂ proyecto PLMB + Fondos. Escenario 2
Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

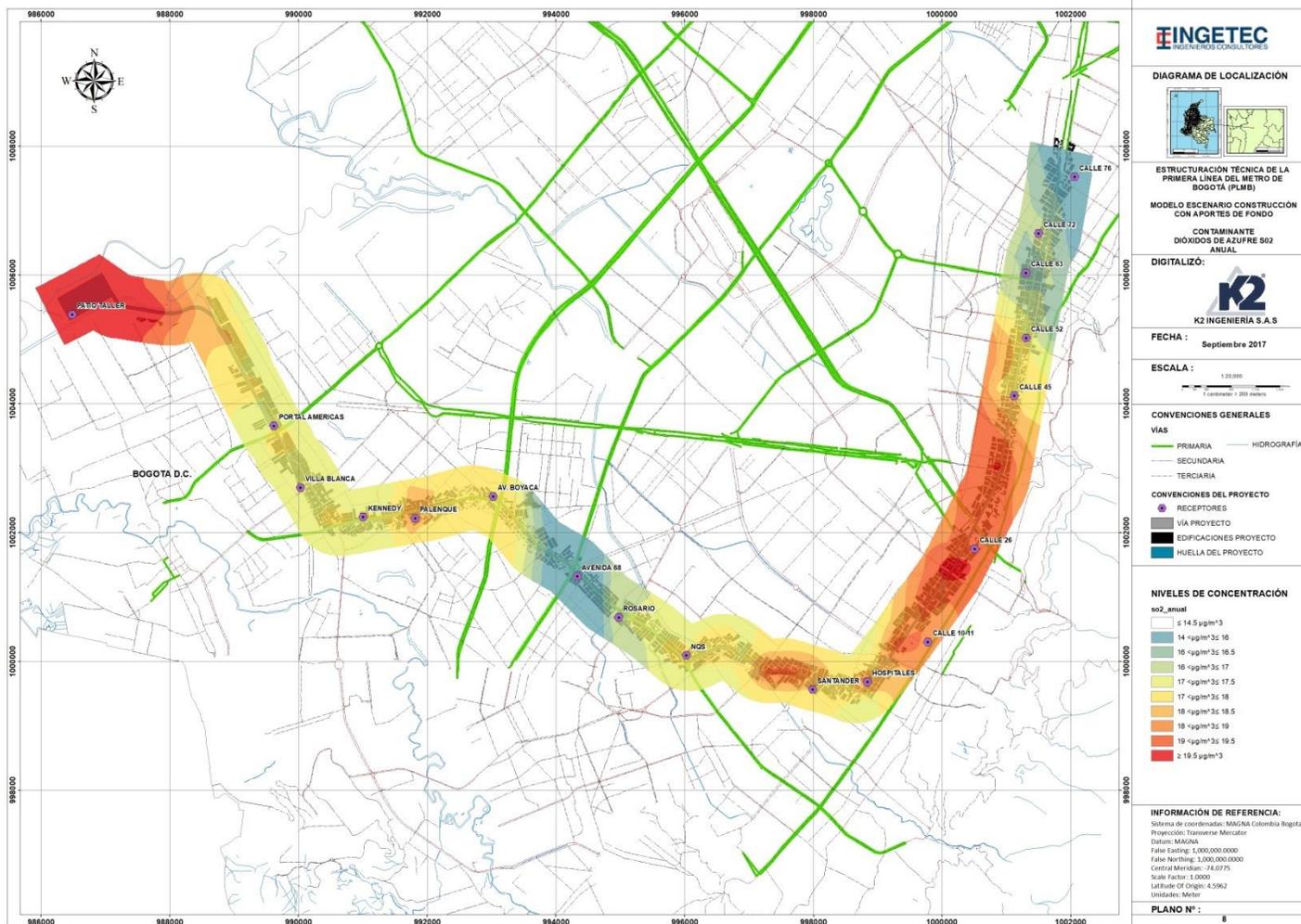


Figura 109. Isopleta anual SO₂ proyecto PLMB + Fondos. Escenario 2
Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

10.3 ESCENARIO OPERACIÓN

10.3.1 Material Particulado (PM₁₀ y PM_{2.5}):

A continuación se muestra la distribución de curvas de concentración – Isopletas para PM₁₀ y PM_{2.5} estimadas para el escenario de línea base en el periodo 24 horas y anual, como resultado de la modelación más la inclusión de los fondos.

Para PM₁₀ 24 horas, el rango de concentración de la isopleta es de 25 – 90 µg/m³, donde se presentaron los valores más altos entre el sector Patio Taller y Villa Blanca, Avenida Boyaca, NQS, Hospitales y Calle 45. La isopleta anual de PM₁₀ posee un rango de 15 a 75 µg/m³ y las mayores concentraciones se observan entre el sector Patio Taller y Villa Blanca.

Como puede apreciarse en las curvas de concentración de PM_{2.5}, los mayores aportes se presentan entre el sector Patio Taller hasta el Portal Américas y los menores desde la Calle 26 hasta la Calle 76, con un rango de concentración de 20 a 70 µg/m³ y de 15 – 38 µg/m³ para la isopleta 24 horas y anual, respectivamente.

Las concentraciones de material particulado- PM₁₀ y PM_{2.5} presentan valores superiores a la norma anual de calidad del aire, 50 µg/m³ para PM₁₀ y de 25 µg/m³ para PM_{2.5}.

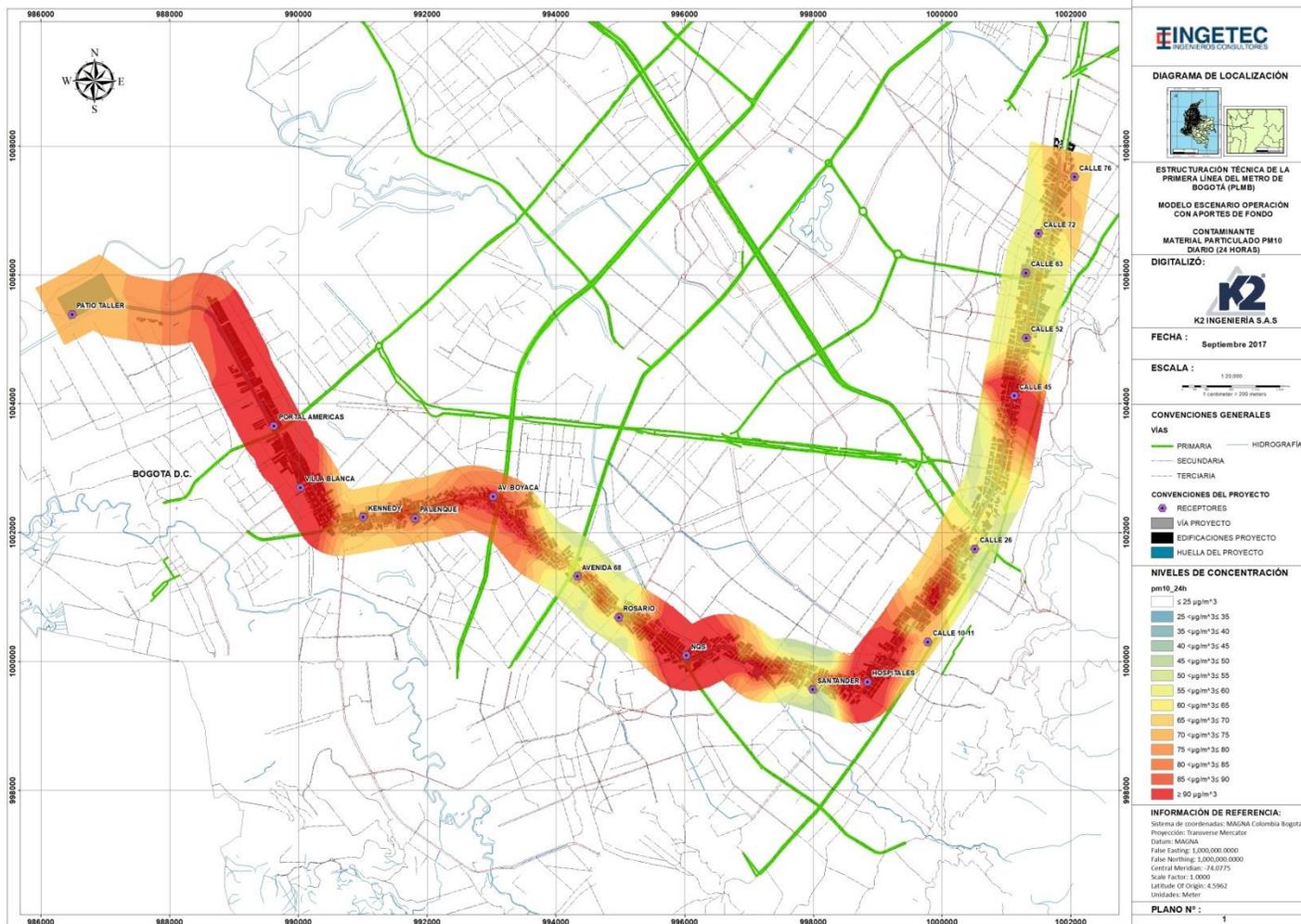


Figura 110. Isopleta 24 horas PM₁₀ proyecto PLMB + Fondos. Escenario 3
Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

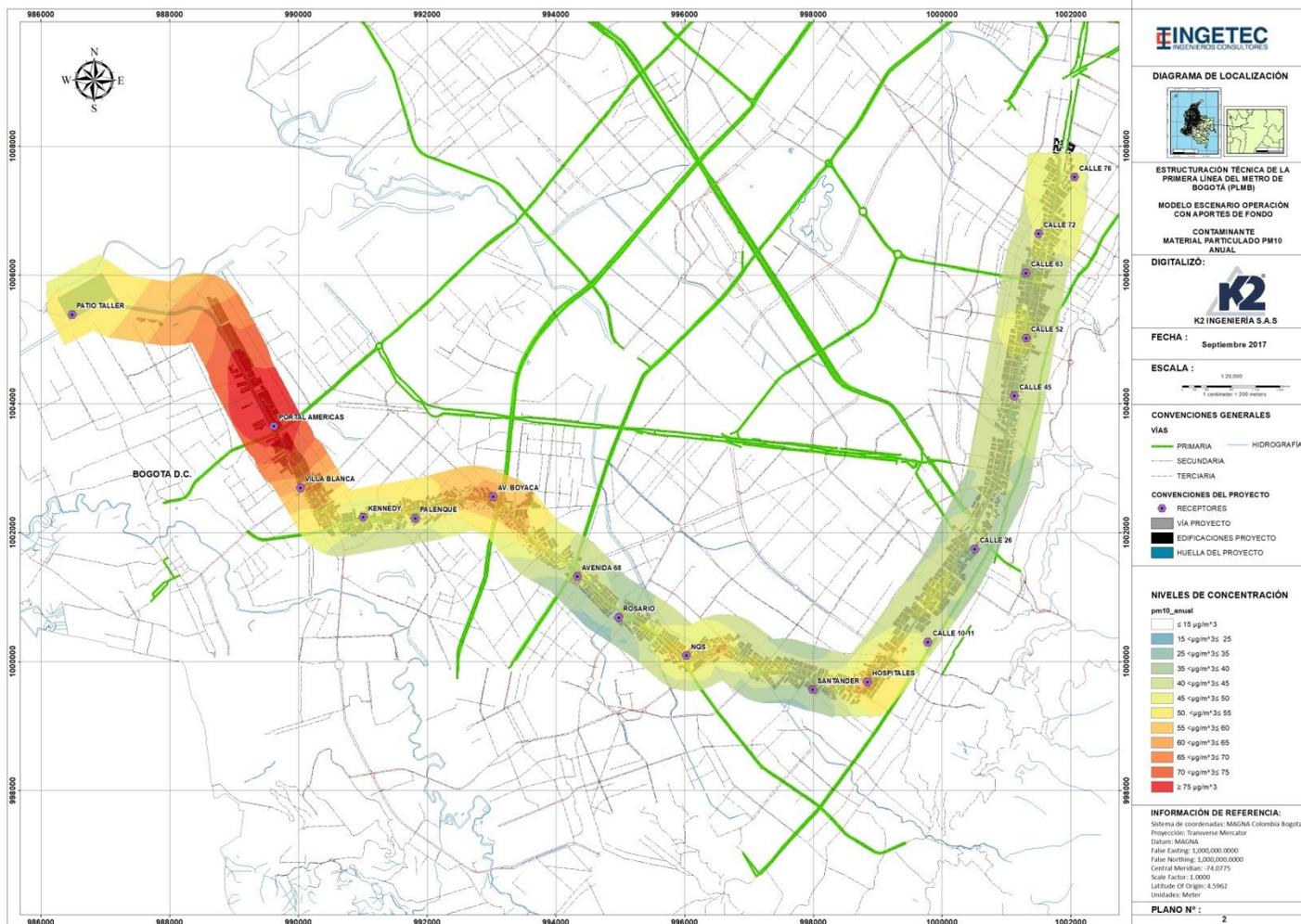


Figura 111. Isopleta anual PM₁₀ proyecto PLMB + Fondos. Escenario 3
Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

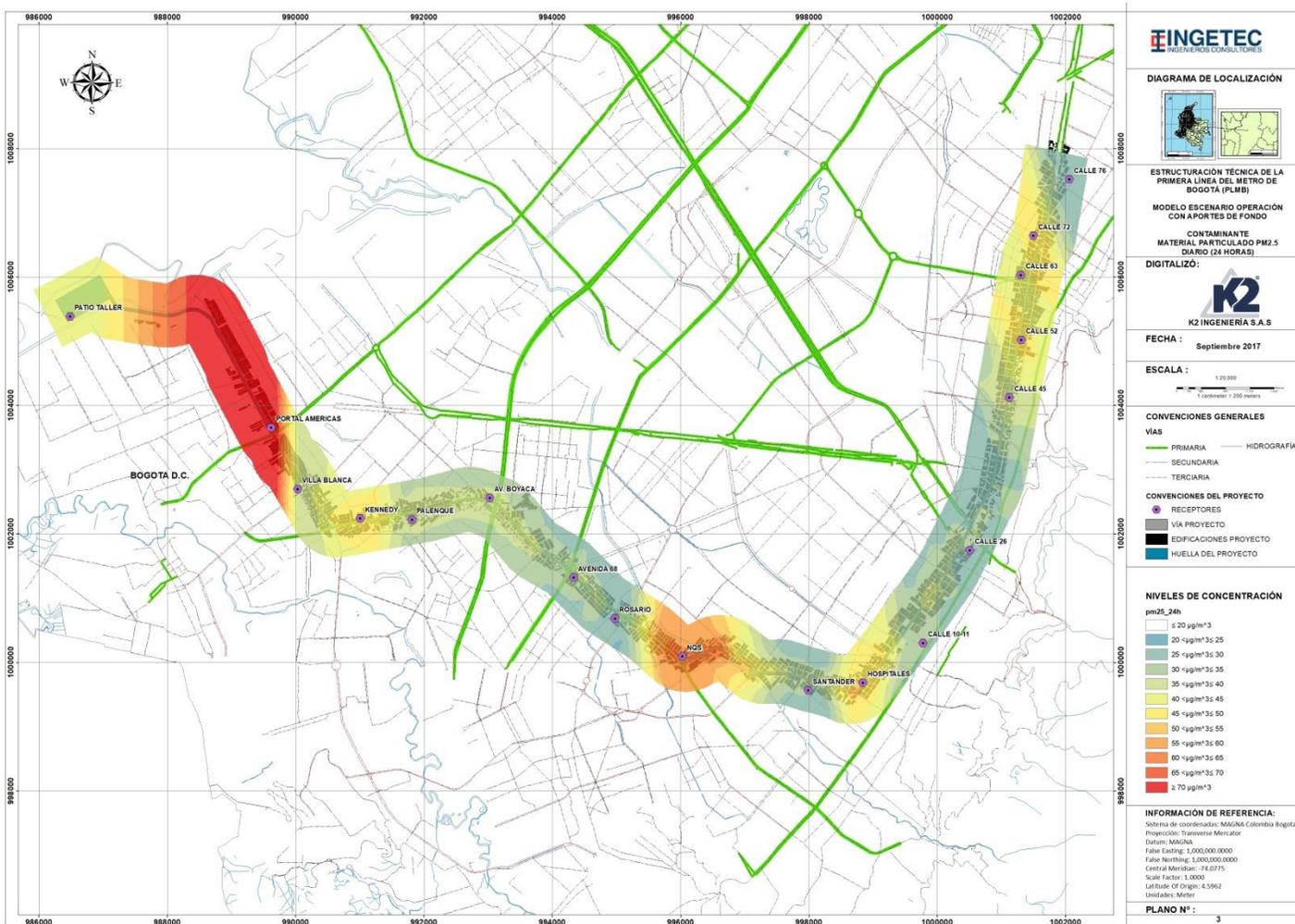


Figura 112. Isopleta 24 horas PM_{2.5} proyecto PLMB + Fondos. Escenario 3
Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

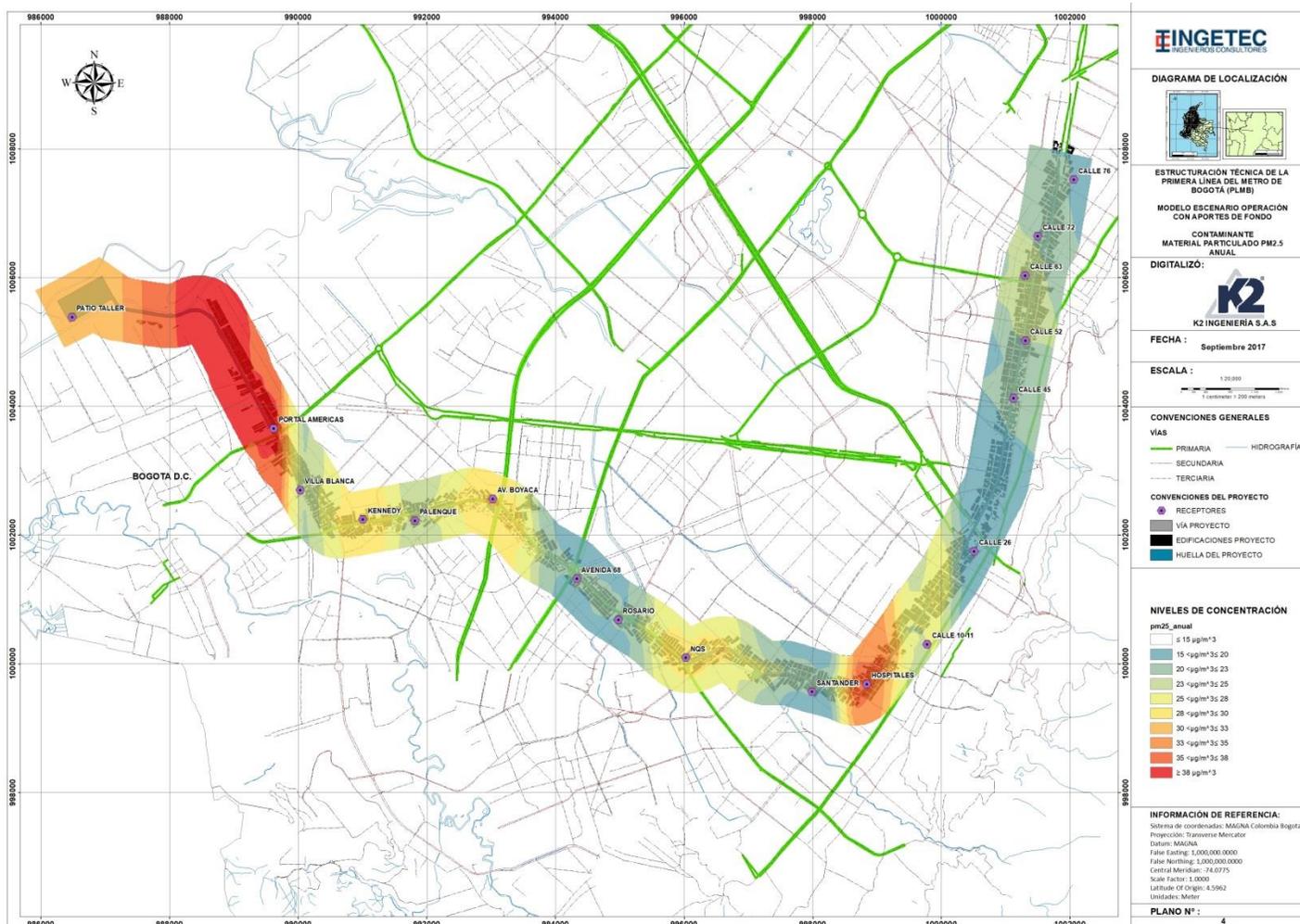


Figura 113. Isopleta anual PM_{2.5} proyecto PLMB + Fondos. Escenario 3
Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

10.3.2 Dióxido de nitrógeno (NO₂)

En la Figura 114 y Figura 115 se observan las isopletras de concentración 24 horas y anual de NO₂, se obtiene un rango de concentración de 5 – 55 µg/m³.y de 10 a 40 µg/m³ para 24 horas y anual, respectivamente. Las isopletras no exceden la norma anual de 100 µg/m³ ni la norma de 24 horas de 150 µg/m³.

Se puede observar que las mayores concentraciones se presentan entre Avenida 68 y hospitales para la isopletra 24 horas, por otro lado para la isopletra anual se obtienen las mayores concentraciones entre el sector Santander y Hospitales.

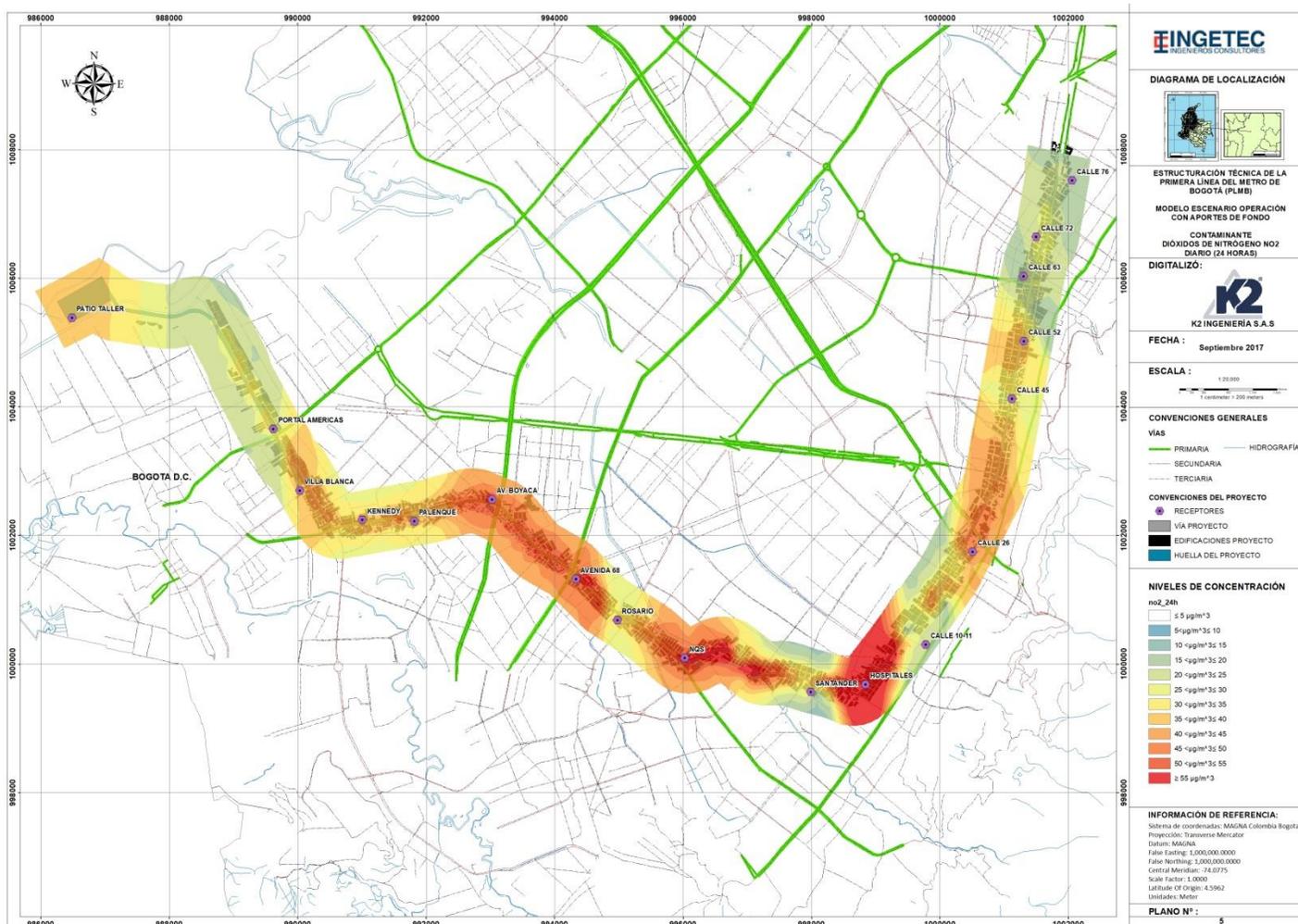


Figura 114. Isopleta 24 horas NO₂ proyecto PLMB + Fondos. Escenario 3
Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

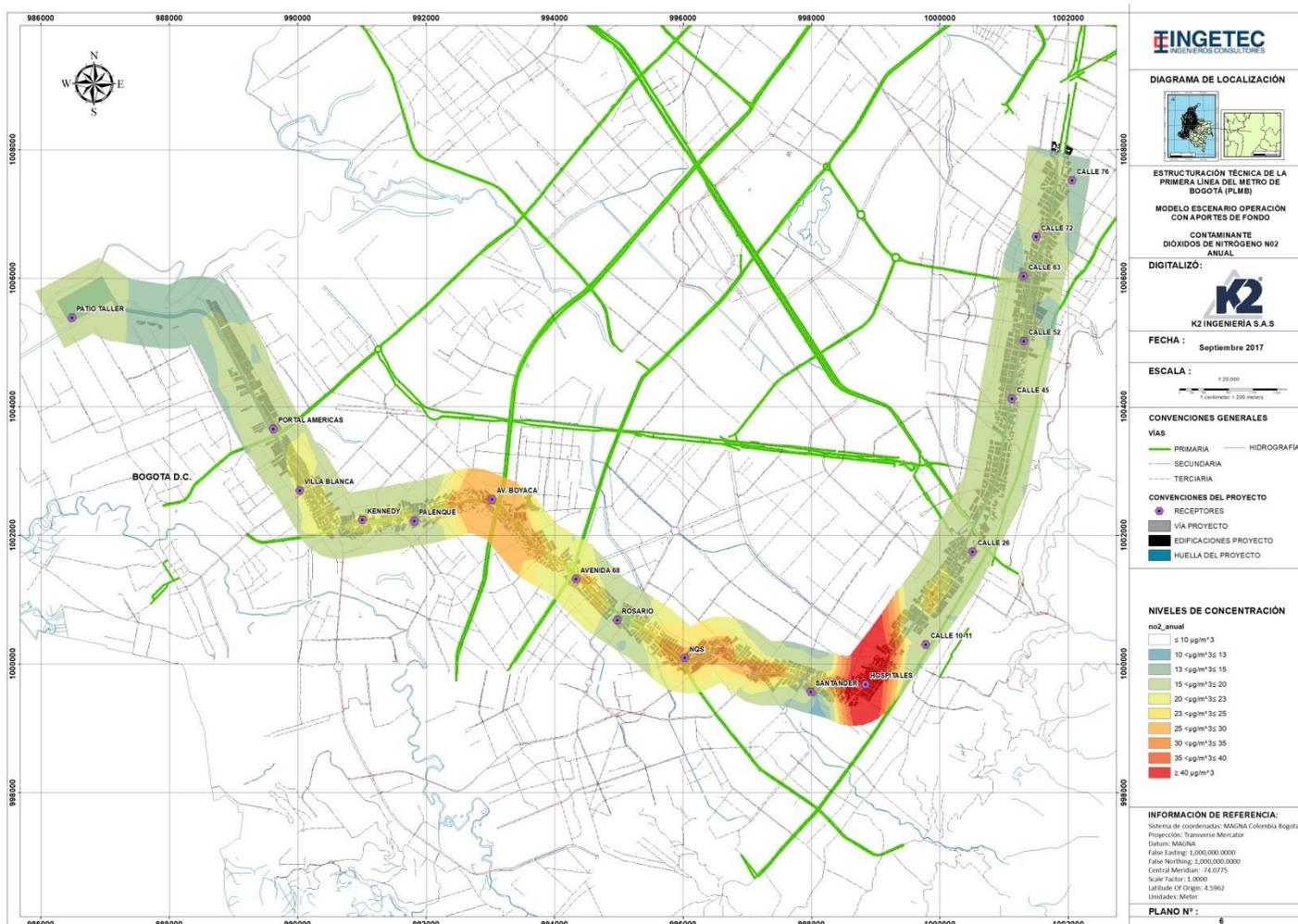


Figura 115. Isopleta anual NO₂ proyecto PLMB + Fondos. Escenario 3
Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

10.3.3 Dióxido de azufre (SO₂)

Las Isopletras para SO₂ se presentan a continuación.

El periodo 24 horas presenta un rango entre 15 y 50 µg/m³, mientras que la isopletra anual posee un rango de 14 a 20 µg/m³. No se exceden las normas 24 horas y anual de 250 y 80 µg/m³, respectivamente. Se puede observar que las mayores concentraciones se presentan en Patio Taller y entre los sectores Calle 26 y Calle 45.

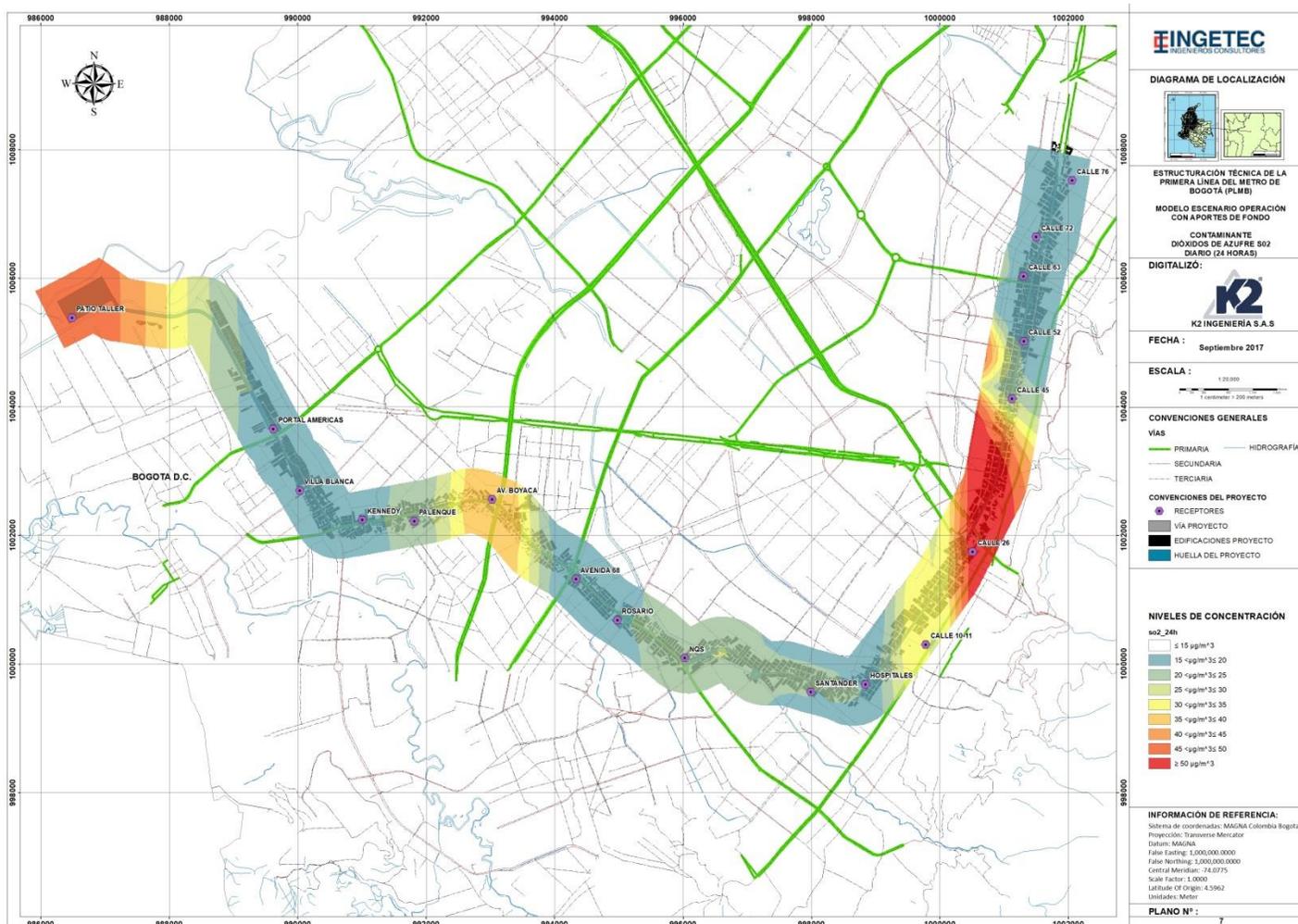


Figura 116. Isopleta 24 horas SO₂ proyecto PLMB + Fondos. Escenario 3
Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

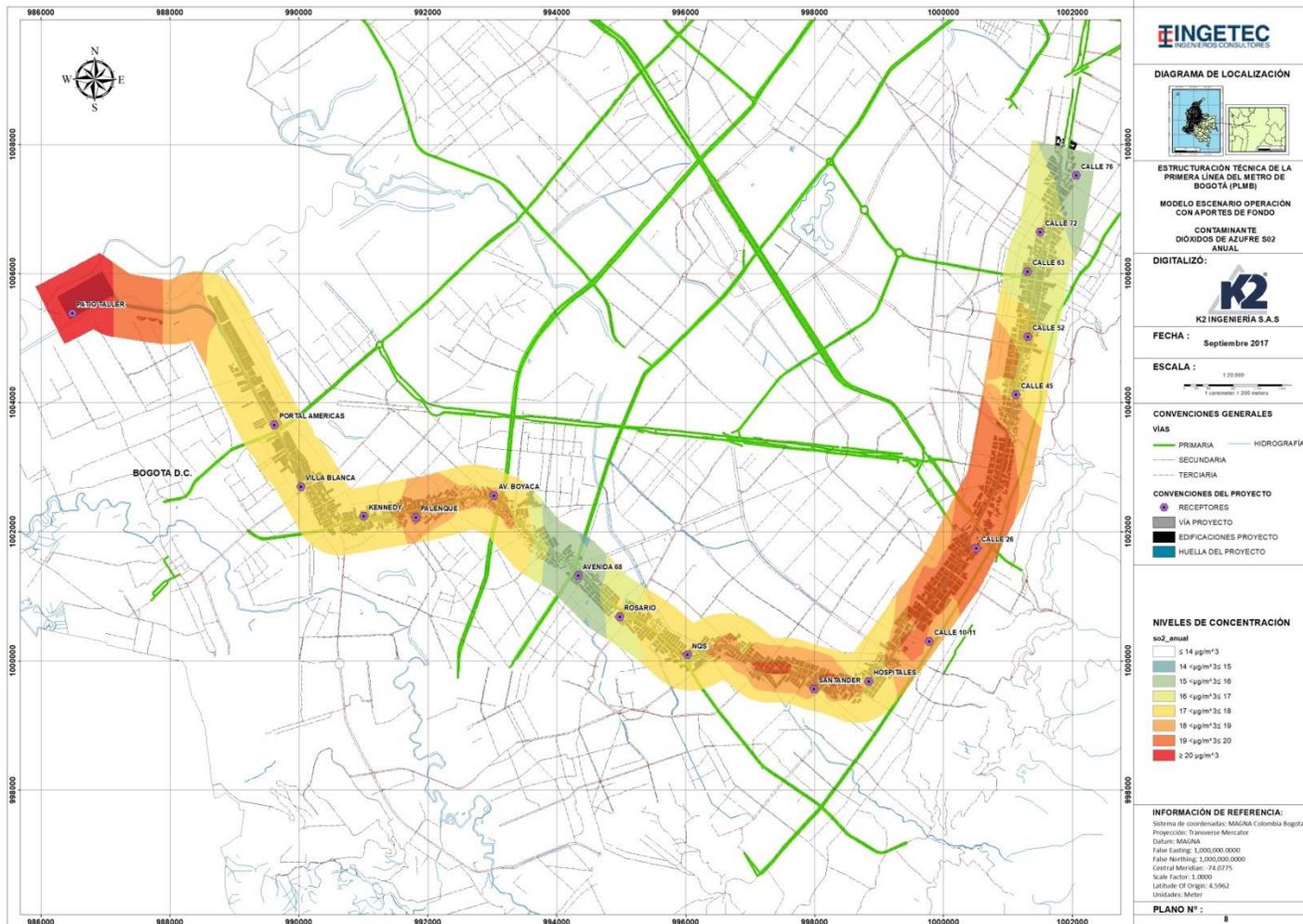


Figura 117. Isopleta anual SO₂ proyecto PLMB + Fondos. Escenario 3
Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

11. INCERTIDUMBRE DEL MODELO

Los factores que afectan en mayor grado la precisión de los modelos son: el modelo matemático en sí y la calidad de los datos de entrada.

En los modelos de dispersión se interacciona con dos tipos de variables: variables conocidas que pueden ser medidas, como son: velocidad y dirección del viento, temperatura, altura de mezcla, factores de emisión, características de receptores y fuentes, entre otros. Además existen otras, las cuales no se pueden medir, por ejemplo, algunos detalles no resueltos del flujo atmosférico en condiciones convectivas. Cuando se corre el modelo, que es una idealización de la realidad, estas variables desconocidas generan la pérdida de precisión en las concentraciones de contaminantes finales. Estos errores han sido llamados incertidumbre inherente (Ministry for the Environment. 2004). Esta incertidumbre se puede considerar como una limitante del modelo.

Los parámetros bajo los cuales se mide la exactitud de un modelo son los errores en las bases de datos y lo concerniente a la física y formulación del modelo.

Varios estudios realizados en otros países con el objetivo de medir la exactitud de los modelos han confirmado lo siguiente:

- Los modelos son más fiables para medir concentraciones promedio a largo plazo que para estimar concentraciones a corto plazo en un punto específico.
- Los modelos son bastante fiables estimando picos de concentraciones en un área determinada (los errores para este caso típicamente están entre $\pm 10\%$ a 40%).

Entre más se ajuste el modelo matemático a la física y química de la atmósfera, el modelo presentará mayor precisión. Lo mismo sucede con los datos de entrada, entre mayor sea la calidad de los datos, las concentraciones de salida serán mejores y más aproximadas a la realidad.

De acuerdo a las anteriores observaciones, el presente modelo debe ser leído en sus capacidades reales teniendo en cuenta su información de la siguiente forma:

- El modelo es fiable estimando los puntos de mayor concentración.
- Los resultados dan un orden de magnitud probable y solo en esas dimensiones puede ser interpretado.

Además de las limitaciones comunes a los modelos de dispersión atmosférica (error inherente) el presente modelo presenta las siguientes limitaciones que deben ser corregidas en estudios posteriores.

- La altura de mezcla se obtuvo de manera numérica a partir de datos de meteorología de superficie solamente. La altura de mezcla tiene generalmente un efecto notorio en las concentraciones máximas.
- Los datos de velocidad y dirección de viento usados tienen una resolución de 22.5 grados.
- Consideraciones de idealización en cuanto a la información ingresada a la simulación.

Los datos de entrada fueron tomados de las proyecciones que se tienen en cuenta para la construcción y operación de la Primera Línea del metro de Bogotá. Los aportes calculados con este modelo corresponden al trazado, por tanto, los resultados de la simulación representan únicamente las actividades de la región limitada, lo cual es una fracción de la calidad del aire de Bogotá que se midió. Los resultados de este estudio se deben entender con los niveles de concentraciones que se podrían presentar si se consideran las actividades descritas en el presente documento.

12. OBSERVACIONES Y CONCLUSIONES

GENERALIDADES

- El presente modelo de dispersión debe leerse como una aproximación al orden de los valores de concentración de material particulado (PM_{10} y $PM_{2.5}$), óxidos de nitrógeno (NO_2), dióxido de azufre (SO_2), monóxido de carbono (CO) y compuestos orgánicos volátiles (VOC) que aportaría el proyecto Estructuración Técnica de la Primera Línea del Metro de Bogotá en su área de influencia. El modelo ha sido corrido para tres (3) escenarios que incluyen línea base, construcción y operación.
- La información meteorológica para modelación se obtuvo a partir de simulación atmosférica de última generación WRF (Weather Research and Forecasting) para el año 2016, el cual es un modelo numérico de sexta generación, de meso-escala y no hidrostático; Construido para ser aplicado tanto en pronóstico operativo de tiempo, como también para la investigación de los fenómenos meteorológicos.
- Los resultados de la simulación para los diferentes escenarios alcanzan un valor diferente al estudio de calidad de aire debido a que la simulación se obtiene al reunir información de fuentes puntuales como las edificaciones, vehículos promedio, entre otros; mientras que el estudio de calidad de aire no sólo mide las emisiones de estas fuentes cercanas sino que puede medir cualquier emisión de que se produzca ya sea cerca o lejos de la estación de calidad del aire, de acuerdo al comportamiento meteorológico que ocurre en temporada de toma de muestras sea seca o húmeda.
- En los receptores cercanos no se tuvieron en cuenta las emisiones generadas por la actividad urbana que no depende de las operaciones del proyecto y pueden aportar material particulado significativo a las estaciones de monitoreo de calidad del aire.
- Los mapas de isopletras son más significativos cuando se realizan análisis con periodicidad mayor, en este caso anual. Por su parte los niveles de concentración máxima relacionados de forma diaria son indicativos de impactos que se producen de forma particular sobre un receptor y no suelen representar impactos distintivos de la zona de interés.

CONCLUSIONES

- En los escenarios línea base y operación simulados los valores de concentración predichos sobre los receptores discretos mediante el modelo de dispersión de las actividades que tendrían lugar en el proyecto, muestran el cumplimiento de las normas de calidad del aire establecidas para los contaminantes material particulado (PM_{10} y $PM_{2.5}$), dióxido de nitrógeno (NO_2), dióxido de azufre (SO_2) y monóxido de carbono (CO) en los diferentes periodos de exposición aplicables. El escenario de construcción presentaría valores superiores a la norma en la Estación Hospitales para el material particulado, los otros contaminantes no excederían su norma correspondiente; la información de mediciones de calidad del aire permitió considerar concentraciones de fondo (indicativo) para los contaminantes PM_{10} , $PM_{2.5}$, NO_2 , SO_2 y CO.
- El escenario 1 (línea base) presenta los resultados de modelación de material particulado con concentraciones que no alcanzarían los $7 \mu g/m^3$, donde la estación NQS obtiene el valor más alto, de $6.2 \mu g/m^3$ y $1.7 \mu g/m^3$ para PM_{10} y $PM_{2.5}$, respectivamente. Con respecto a la calidad del aire, se puede apreciar en las estaciones Rosario y NQS se obtendrían los mayores aportes de 12.4% y 12.7%, respectivamente.
- Los aportes de línea base en el trazado del metro de Bogotá se presentan en mayores concentraciones en los sectores NQS, Santander y Hospitales. Con respecto a calidad del aire, en el caso de NO_2 el mayor aporte se genera en Santander con 26.8%, para el SO_2 en Hospitales con 2.66%, el CO presenta un 94.2% en la estación Avenida 68.
- El escenario 3 (operación) presenta los resultados de modelación en donde los aportes más altos se generarían en la estación NQS para material particulado, gases (NO_2 , SO_2 y VOC) en la estación Hospitales y CO en Santander.
- De acuerdo al tráfico vehicular del año 2042 se esperaría que sectores entre Patio Taller y Calle 26 incrementen más del 50% los aportes de concentraciones por flujo vehicular, mientras que sectores entre Calle 52 y Calle 76 incrementen en valores no mayores a 21% y en el sector Calle 45 se obtendría una reducción en el tráfico, de 3% aproximadamente.
- Los aportes de concentraciones calculados de la modelación del escenario 1 (línea base) y el escenario 3 (operación) son bajos debido a que solo se contemplaron los aportes presentados por el flujo vehicular presente en los tramos del proyecto. En el escenario 3 se consideró un flujo mayor de vehículos (proyección año 2042) por lo cual, aumentan los niveles de

concentración. No obstante, se puede concluir que la Primera Línea del Metro de Bogotá no generaría grandes aportes de concentración de contaminantes por ser un medio de transporte eléctrico. Para el año 2042 se reduciría el flujo vehicular proyectado en la Avenida Caracas.

- El escenario 2, presentaría valores más altos en material particulado debido a todos los procesos involucrados en la construcción. Con respecto a la norma anual, la estación Hospitales alcanzaría valores que excederían la norma de 55 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) para PM_{10} y 25.3 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) en $\text{PM}_{2.5}$. En este caso se recomienda la utilización de sistemas de riego, específicamente en la actividad de construcción de vías, ya que es la de mayor aporte, lo anterior con el fin de mitigar la resuspensión de material particulado.
- Para el escenario de construcción, los aportes de NO_2 y SO_2 indican que el aumento de la concentración es debido a la presencia de vehículos y maquinaria pesada que circularán por los tramos. Dichas maquinarias usarán combustible diesel y gasolina que generan aportes de dióxido de nitrógeno y dióxido de azufre. En los tramos que se reducirá el flujo vehicular se disminuirían las concentraciones de estos contaminantes.
- En general, los aportes de gases en el escenario 2 no excederían la norma de calidad del aire de la Resolución 610 del 2010.
- En los resultados de aportes de modelación con concentración de fondo se puede observar que para material particulado se alcanzarían los valores máximos permisibles establecidos por la Resolución 610 del 2010, excepto la concentraciones de PM_{10} 24 horas que cumplirían con la norma de 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.
- De acuerdo con los resultados de modelación, al tener en cuenta todas las fuentes de emisión del proyecto para todos los escenarios, los receptores de calidad del aire que presentarían mayores aportes son NQS y Hospitales. Además los sectores que tendrían menos dispersión de contaminantes se encuentra entre Calle 26 a Calle 76.

13. REFERENCIAS

1. Cabrera. F. (2008). Evaluación de un Modelo de dispersión de contaminantes atmosféricos con la técnica espectroscópica DOAS Pasiva. Universidad Nacional Autónoma de México.
2. Caputo. M. Giménez. M. y Schlamp M. (2003). Intercomparison of atmospheric dispersion models. Atmospheric environment 37: (pp. 2435-2449).
3. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. (2009). Compilation Pollutant Emission Factors. AP-42. Fifth Edition. Volume I: Stationary Point and Area Sources. United States of America: – U.S. EPA.
4. Manatū. M. (2004) Good Practice Guide for Atmospheric Dispersion Modelling. Ministry for the Environment.
5. MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE & ITESM. (2008). Guía nacional de modelación de calidad del aire. Colombia: MAVDT.
6. DEPARTMENT OF SUSTAINABILITY. ENVIRONMENT. WATER. POPULATION AND COMMUNITIES. (2012). National Pollutant Inventory - NPI. Australia. Disponible en: <http://www.npi.gov.au/>.
7. Roberts Alley & Associates Inc. (2001). Manual de Control de la Calidad del Aire. McGraw-Hill Interamericana Editores S.A.
8. K2 INGENIERÍA S.A.S. (2001). Modelación de la dispersión de contaminantes atmosféricos.
9. MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE & ITESM. (2010). Resolución 610 de 2010. Colombia: MAVDT.
10. Shankar. K. (2005). Uncertainty analysis in atmospheric dispersion modelling. Pure Appl. Geophys 162: (pp. 1893-1967).
11. Seibert. P. (2002). Uncertainties in atmospheric dispersion modelling and source determination. University of Agricultural Sciences Vienna.

12. Sozzi. Roberto. 1997. “La Turbulencia de la Atmósfera y la Dispersión de los Contaminantes”. Micrometeorología y Turbulencia de la Atmósfera. ASAS. Bucaramanga-Colombia; SERVIZI TERRITORIO. Cinisello Balsamo-Italia.
13. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. (2012). Support Center For Regulatory Atmospheric Modeling. United States of America: U.S. EPA - SCRAM. Disponible en: <http://www.epa.gov/scram001/>.
14. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. (1995). User’s Guide for the Industrial Source Complex (ISC3) Dispersion Models. Volume I - User Instructions. United States of America: U.S. EPA.
15. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. (1995). User’s Guide for the Industrial Source Complex (ISC3) Dispersion Models. Volume II - Description of Model Algorithms. United States of America: U.S. EPA.
16. Yegnan. A. Williamson. D.G y Graettinger. A.J. (2002). Uncertainty analysis in air dispersion modeling. Environmental Modelling & Software 17: (pp. 639–649).
17. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. (2009). 40 CFR Part 51 Appendix W – Guidelines on Air Quality Models. United States of America: U.S. EPA.
18. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. (2012). Haul Road Workgroup Final Report Submission to EPA-OAQPS. United States of America: U.S. EPA.
19. MRT CORP. KVMRTMY. (2012/08/14). CONSTRUCTION STAGES FOR ELEVATED VIADUCTS AND STATIONS [Video]. Recuperado de: <https://www.youtube.com/watch?v=f5nfwWCs85E>
20. BOGOTÁ COMO VAMOS: LA MOVILIDAD EN BOGOTÁ, UN COMPROMISO. Disponible en línea en <http://www.bogotacomovamos.org/blog/la-movilidad-en-bogota-un-compromiso/>.

14. ANEXOS