



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO**

FACULTAD DE QUÍMICA

**“EVALUACIÓN DEL IMPACTO POTENCIAL EN
LA CALIDAD DEL AIRE POR SO₂ EN LA
ZONA METROPOLITANA DE LA CIUDAD DE
MÉXICO (ZMCM), POR LA CONTRIBUCIÓN DE
UNA FUENTE ESTACIONARIA”**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO QUÍMICO

PRESENTA:

EDGARDO MORENO TORRES

DIRECTOR DE TESIS:

DR. RODOLFO SOSA ECHEVERRÍA





Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Jurado Asignado:

Presidente: Profesor: María Rafaela Gutiérrez Lara

Vocal: Profesor: Luz María Lazcano Arriola

Secretario: Profesor: Rodolfo Sosa Echeverría

1° Suplente: Profesor: Gema Luz Andraca Ayala

2° Suplente: Profesor: Alejandra Mendoza Campos

Sitio donde se desarrolló el tema:

Sección de Contaminación Ambiental - Centro de Ciencias de la Atmósfera -
Universidad Nacional Autónoma de México.

Asesor del tema:

Dr. Rodolfo Sosa Echeverría

Supervisor técnico:

M. en I. Gilberto Fuentes García

Sustentante:

Edgardo Moreno Torres

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) por la oportunidad de brindarme la mejor educación a nivel profesional, junto con los conocimientos adquiridos por medio de sus docentes en la Facultad de Química. Al Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA) de la UNAM, por las facilidades y material otorgado durante mi estancia.

Al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT) de la DGAPA-UNAM, por la beca de titulación proporcionada mediante el proyecto titulado “Evaluación de la Deposición Atmosférica Húmeda y Seca en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México y en la Costa del Golfo de México para la prevención del deterioro ambiental significativo” (IN116215).

Al Dr. Rodolfo Sosa Echeverría por sus conocimientos transmitidos, consejos, experiencias y el tiempo dedicado en todo momento a lo largo del desarrollo de este proyecto en la Sección de Contaminación Ambiental (SCA).

Al Dr. Juan Humberto Bravo Álvarez[†] por permitir integrarme a su equipo de trabajo, así como su orientación y atenciones concedidas en todo instante para la elaboración de este trabajo.

A mi supervisor técnico, el M. en I. Gilberto Fuentes García por su aportación de conocimientos en el uso de modelos de dispersión y frecuente revisión de esta tesis.

A los miembros de la SCA del CCA de la UNAM: a la Q.F.B. María del Carmen Torres Barrera, al Biól. Pablo Sánchez Álvarez, a la M. en I. Ana Luisa Alarcón Jiménez y al Dr. Elías Granados Hernández por sus conocimientos, recomendaciones, constante asesoría y valiosa contribución a partir de toda su experiencia profesional. A Ángeles López Portillo por su apoyo y colaboración en asuntos administrativos.

A la M. en I. María Rafaela Gutiérrez Lara y a la Dra. Luz María Lazcano Arriola, por sus observaciones, tiempo y aportación en la revisión del presente estudio.

Al I.Q. Rodolfo Torres Barrera, Dr. José Agustín García Reynoso, Dr. César Guerrero Guerra y Q. José Landeros Valdepeña por su dedicación, comentarios y sugerencias que me permitieron obtener el mejor desempeño en la realización de este texto por completo.

Al Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México por la proporción de información para la elaboración y obtención de resultados de esta tesis.

A la Comisión Federal de Electricidad por las facilidades otorgadas para la obtención de información contenida en este trabajo, en especial al Dr. Sergio Rosas de Alba.

Al grupo de Climatología del Instituto de Geografía de la UNAM conformado por el Dr. Victor Magaña Rueda, el Dr. Ernesto Caetano Dosantos y el Ing. Gustavo Vázquez Cruz, quienes colaboraron en la proporción de datos y meteorología para la elaboración de este estudio.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS	8
ÍNDICE DE TABLAS.....	13
ABREVIATURAS, ACRÓNIMOS Y SIGLAS.....	15
RESUMEN.....	19
Meta	21
Objetivos.....	21
1. INTRODUCCIÓN	22
2. ANTECEDENTES	24
2.1. Calidad del aire	24
2.1.1. Contaminantes atmosféricos	24
2.1.2. Contaminante criterio.....	25
2.1.3. Dióxido de azufre.....	25
2.1.3.1. Efectos en la salud en humanos y animales	26
2.1.3.2. Efectos en el ambiente	26
2.2. Centrales de generación de electricidad	27
2.3. Operación de una central termoeléctrica de tipo vapor	30
2.3.1. Descripción funcional del proceso	30
2.3.2. Tipos de quemadores	33
2.3.3. Combustibles	33
2.4. Centrales termoeléctricas en México	36
2.4.1. Conversión de centrales a tecnología de combustión dual.....	38
2.5. Normatividad.....	39
2.5.1. Normas Oficiales Mexicanas	40
2.5.1.1. NOM de salud ambiental para SO ₂	40
2.5.1.2. NOM para la medición de SO ₂	41
2.5.1.3. Normas de emisión	42
2.5.2. Normas Mexicanas.....	47
2.6. Emisiones de SO ₂ a la atmósfera en centrales termoeléctricas de México	49
2.7. Emisiones a la atmósfera en la CTFPR y en la ZMCM	51
2.7.1. Distribución espacial de SO ₂ en la ZMCM.....	52
2.7.2. Distribución temporal de SO ₂ en la ZMCM	53
2.7.3. Tendencias de SO ₂ en la ZMCM	53
2.8. Estimación de emisiones	55

2.8.1. Evaluación de la calidad de los factores de emisión	57
2.8.2. Factores de emisión seleccionados para la CTFPR.....	58
2.8.3. Estimación de emisiones de SO ₂ de la CTFPR.....	60
2.9. Modelación de los procesos atmosféricos	60
2.9.1. Transporte y contaminación atmosférica	60
2.9.2. Transporte atmosférico de los contaminantes	61
2.9.3 Transformación química del SO ₂ en la atmósfera	62
2.10. Modelos de simulación para la calidad del aire.....	62
2.10.1. Estructura de un modelo de simulación.....	62
2.10.2. Modelos deterministas.....	63
2.10.2.1. Modelos gaussianos	64
2.10.3. Criterios de selección y aplicación de un modelo	64
2.10.4. Modelos para el estudio de la calidad del aire.....	65
2.11. Modelo de dispersión CALPUFF.....	66
2.11.1. Módulo CALMET	67
2.11.1.1. Modelo meteorológico MM5.....	68
2.11.2. Módulo CALPUFF	68
2.11.2.1 MESOPUFF II.....	69
2.11.3. Módulo CALPOST.....	69
3. ZONA DE ESTUDIO	70
3.1 Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM).....	70
3.1.1. Comportamientos de las variables meteorológicas en la ZMCM.....	72
3.1.1.1. Clima.....	72
3.1.1.2. Temperatura	73
3.1.1.3. Humedad	74
3.1.1.4. Precipitación	74
3.1.1.5. Viento.....	75
3.1.1.6. Presión atmosférica	76
3.1.1.7. Inversión térmica.....	77
3.1.1.8. Altura de mezcla	78
3.2. Zona Crítica Tula-Vito-Apasco	79
3.2.1. Central Termoeléctrica Francisco Pérez Ríos (CTFPR).....	79
3.3. Infraestructura de transporte de gas natural a la región de Tula.....	82
4. METODOLOGÍA.....	83

4.1 Revisión de la información registrada en las estaciones de monitoreo atmosférico del SIMAT para SO ₂ , empleando la información del ACal y CCal	83
4.1.1. Selección del periodo de estudio.....	83
4.1.2. Base de datos de calidad del aire para la ZMCM.....	84
4.1.3. Criterio de suficiencia de información para la selección de estaciones	86
4.1.4. Selección de las estaciones de monitoreo para CALPUFF	86
4.1.5. Evaluación de la información de la calidad del aire por SO ₂ en las estaciones de monitoreo	88
4.2 Aplicación de factores de emisión de la US EPA para el cálculo de emisiones de la CTFPR	89
4.3 Aplicación del modelo de dispersión CALPUFF.....	91
4.3.1 Configuración del modelo de dispersión CALPUFF	91
4.3.2. Datos geofísicos	93
4.3.3. Datos meteorológicos.....	94
4.3.4. Descripción de la fuente	94
4.3.5. Descripción de los receptores	96
4.3.6. Módulo de reacción química.....	97
4.3.7. Obtención de concentraciones e isóneas de SO ₂ en CALPUFF	97
4.3.7.1. Corrección de concentraciones por presión y temperatura.....	98
4.3.7.2. Conversión de unidades	99
4.4. Comparación de las concentraciones de SO ₂ obtenidas con el modelo de dispersión CALPUFF con las de monitoreo por el SIMAT	99
4.5 Estimación de la contribución de SO ₂ emitido por la CTFPR.....	100
4.6 Realización de las rosas de viento en las estaciones de monitoreo	101
4.7. Análisis estadístico de la distribución de emisiones, concentraciones y contribuciones de SO ₂	101
4.8. Comparación de concentraciones de SO ₂ con su NOM de calidad del aire	103
5. RESULTADOS.....	104
5.1 Evaluación de la información de la calidad del aire por SO ₂ en las estaciones de monitoreo	104
5.2. Consumo de combustóleo	106
5.3. Estimación de emisiones	107
5.4. Concentraciones de SO ₂ obtenidas con el modelo de dispersión CALPUFF y las reportadas por el SIMAT	108
5.4.1. Receptores discretos	108
5.4.2. Receptores agrupados	130
5.5. Contribuciones de SO ₂ por parte de la CTFPR a la ZMCM.....	135

5.6. Rosas de viento	148
5.6.1. Días con mayor concentración de SO ₂	148
5.6.2. Días con mayor contribución de SO ₂	151
5.7. Análisis estadístico de la distribución de datos	153
6. EVALUACIÓN DE RESULTADOS	159
6.1 Comparación con la Norma de Calidad del Aire para SO ₂	161
7. MÉTODOS PARA EL CONTROL DE SO ₂	164
8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	167
8.1. Conclusiones	167
8.2. Recomendaciones	168
BIBLIOGRAFÍA.....	170

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Diagrama de descripción del proceso de generación de electricidad en la CTFPR	32
Figura 2.2. Emisiones relativas de contaminantes durante la generación eléctrica a partir de combustibles fósiles	35
Figura 2.3. Centrales termoeléctricas de conversión a combustión dual.....	38
Figura 2.4. Consumo de combustóleo y gas natural por CFE del 2012 al 2016.....	39
Figura 2.5. Serie de tiempo de la concentración promedio mensual de SO ₂ de 1986 a 2015	54
Figura 2.6. Estructura de un modelo de calidad del aire	63
Figura 2.7. Módulos fundamentales del modelo CALPUFF	67
Figura 3.1. Características de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, 2014	71
Figura 3.2. Topografía y límites políticos de la ZMCM	72
Figura 3.3. Brisas de montaña y de valle en la Cuenca de México	76
Figura 3.4. Efecto de la altura de mezcla en la concentración de SO ₂	78
Figura 3.5. Ubicación del corredor industrial Tula-Tepeji y estaciones de monitoreo en la ZMCM.....	80
Figura 3.6. Unidades de generación de la CTFPR.....	81
Figura 4.1. Comparativo de la red de monitoreo antes y después de la etapa del rediseño de la RAMA del SIMAT	84
Figura 4.2. Ubicación de las estaciones de monitoreo en la ZMCM y CTFPR	88
Figura 4.3 a. Dominio modelado (180 x 120 km ²) y su terreno de elevación. 4.3 b. Mapa digital de relieve de la región de estudio utilizada para la aplicación del modelo CALPUFF	93
Figura 4.4. Imagen satelital de las unidades de generación de la CTFPR obtenida con el programa Google Earth	95
Figura 4.5. Dominio modelado (180 x 120 km ²); CTFPR (+); localización de las estaciones de monitoreo (+) del SIMAT seleccionadas.....	96
Figura 4.6. Dispersión de SO ₂ , 1° de junio de 2011	97
Figura 5.1. Perfil de la concentración horaria de SO ₂ de las estaciones de monitoreo de julio de 2010 a junio de 2011.....	105
Figura 5.2. Consumo diario de combustóleo por la CTFPR, de julio de 2010 a junio de 2011	106
Figura 5.3. Emisiones diarias totales de SO ₂ por la CTFPR, de julio de 2010 a junio de 2011	107

Figura 5.4. Concentración de SO ₂ obtenida con el modelo CALPUFF y la medida en la estación de monitoreo Atizapán.	109
Figura 5.5. Isolíneas de concentración de SO ₂ (µg/m ³) para el 14 de diciembre de 2010	109
Figura 5.6. Isolíneas de concentración de SO ₂ (µg/m ³) para el 1 de diciembre de 2010	110
Figura 5.7. Concentración de SO ₂ obtenida con el modelo CALPUFF y la medida en la estación de monitoreo FES Acatlán.	111
Figura 5.8. Isolíneas de concentración de SO ₂ (µg/m ³) para el 1 de diciembre de 2010	111
Figura 5.9. Concentración de SO ₂ obtenida con el modelo CALPUFF y la medida en la estación de monitoreo Tlalnepantla	112
Figura 5.10. Isolíneas de concentración de SO ₂ (µg/m ³) para el 5 de mayo de 2011 .	113
Figura 5.11. Isolíneas de concentración de SO ₂ (µg/m ³) para el 1 de diciembre de 2010	113
Figura 5.12. Concentración de SO ₂ obtenida con el modelo CALPUFF y la medida en la estación de monitoreo Tultitlan	114
Figura 5.13. Isolíneas de concentración de SO ₂ (µg/m ³) para el 5 de mayo de 2011 .	115
Figura 5.14. Isolíneas de concentración de SO ₂ (µg/m ³) para el 28 de enero de 2011	115
Figura 5.15. Concentración de SO ₂ obtenida con el modelo CALPUFF y la medida en la estación de monitoreo San Agustín	116
Figura 5.16. Isolíneas de concentración de SO ₂ (µg/m ³) para el 14 de mayo de 2011	117
Figura 5.17. Isolíneas de concentración de SO ₂ (µg/m ³) para el 28 de enero de 2011	117
Figura 5.18. Concentración de SO ₂ obtenida con el modelo CALPUFF y la medida en la estación de monitoreo Xalostoc.....	118
Figura 5.19. Isolíneas de concentración de SO ₂ (µg/m ³) para el 5 de mayo de 2011 .	119
Figura 5.20. Concentración de SO ₂ obtenida con el modelo CALPUFF y la medida en la estación de monitoreo Iztacalco	120
Figura 5.21. Isolíneas de concentración de SO ₂ (µg/m ³) para el 5 de mayo de 2011 .	120
Figura 5.22. Isolíneas de concentración de SO ₂ (µg/m ³) para el 7 de noviembre de 2010	121
Figura 5.23. Concentración de SO ₂ obtenida con el modelo CALPUFF y la medida en la estación de monitoreo Merced	122
Figura 5.24. Isolíneas de concentración de SO ₂ (µg/m ³) para el 5 de mayo de 2011 .	122
Figura 5.25. Isolíneas de concentración de SO ₂ (µg/m ³) para el 20 de febrero de 2011	123
Figura 5.26. Concentración de SO ₂ obtenida con el modelo CALPUFF y la medida en la estación de monitoreo Pedregal	124

Figura 5.27. Isolíneas de concentración de SO ₂ (µg/m ³) para el 1 de diciembre de 2010	124
Figura 5.28. Concentración de SO ₂ obtenida con el modelo CALPUFF y la medida en la estación de monitoreo Santa Úrsula.....	125
Figura 5.29. Isolíneas de concentración de SO ₂ (µg/m ³) para el 1 de diciembre de 2010	126
Figura 5.30. Concentración de SO ₂ obtenida con el modelo CALPUFF y la medida en la estación de monitoreo Tláhuac.....	127
Figura 5.31. Isolíneas de concentración de SO ₂ (µg/m ³) para el 12 de febrero de 2011	127
Figura 5.32. Concentración de SO ₂ obtenida con el modelo CALPUFF y la medida en la estación de monitoreo UAM Iztapalapa	128
Figura 5.33. Isolíneas de concentración de SO ₂ (µg/m ³) para el 7 de noviembre de 2010	129
Figura 5.34. Concentraciones de SO ₂ en los receptores de la región Noroeste obtenidas con el modelo CALPUFF	130
Figura 5.35. Concentraciones de SO ₂ medidas en las estaciones de monitoreo de la región Noroeste reportadas por el SIMAT	130
Figura 5.36. Concentraciones de SO ₂ en los receptores de la región Noreste obtenidas con el modelo CALPUFF	131
Figura 5.37. Concentraciones de SO ₂ medidas en las estaciones de monitoreo de la región Noreste reportadas por el SIMAT	131
Figura 5.38. Concentraciones de SO ₂ en los receptores de la región Centro obtenidas con el modelo CALPUFF	132
Figura 5.39. Concentraciones de SO ₂ medidas en las estaciones de monitoreo de la región Centro reportadas por el SIMAT.....	132
Figura 5.40. Concentraciones de SO ₂ en los receptores de la región Suroeste obtenidas con el modelo CALPUFF	133
Figura 5.41. Concentraciones de SO ₂ medidas en las estaciones de monitoreo de la región Suroeste reportadas por el SIMAT	133
Figura 5.42. Concentraciones de SO ₂ en los receptores de la región Sureste obtenidas con el modelo CALPUFF	134
Figura 5.43. Concentraciones de SO ₂ medidas en las estaciones de monitoreo de la región Sureste reportadas por el SIMAT	134
Figura 5.44. Isolíneas de concentración de SO ₂ (µg/m ³) para el 24 de noviembre de 2010.	136
Figura 5.45. Isolíneas de concentración de SO ₂ (µg/m ³) para el 28 de noviembre de 2010	137
Figura 5.46. Isolíneas de concentración de SO ₂ (µg/m ³) para el 11 de marzo de 2011.....	138

Figura 5.47. Isolíneas de concentración de SO ₂ (µg/m ³) para el 3 de marzo de 2011	139
Figura 5.48. Isolíneas de concentración de SO ₂ (µg/m ³) para el 4 de enero de 2011 .	140
Figura 5.49. Isolíneas de concentración de SO ₂ (µg/m ³) para el 8 de marzo de 2011	141
Figura 5.50. Isolíneas de concentración de SO ₂ (µg/m ³) para el 28 de noviembre de 2010	142
Figura 5.51. Isolíneas de concentración de SO ₂ (µg/m ³) para el 27 de abril de 2011 .	143
Figura 5.52. Isolíneas de concentración de SO ₂ (µg/m ³) para el 28 de noviembre de 2010	144
Figura 5.53. Isolíneas de concentración de SO ₂ (µg/m ³) para el 11 de marzo de 2011	145
Figura 5.54. Isolíneas de concentración de SO ₂ (µg/m ³) para el 28 de febrero de 2011	146
Figura 5.55. Isolíneas de concentración de SO ₂ (µg/m ³) para el 18 de octubre de 2010	147
Figura 5.56. Rosas de viento para la región Noroeste de los días de mayor concentración de SO ₂	149
Figura 5.57. Rosas de viento para la región Noreste de los días de mayor concentración de SO ₂	149
Figura 5.58. Rosas de viento para la región Centro de los días de mayor concentración de SO ₂	150
Figura 5.59. Rosas de viento para la región Suroeste de los días de mayor concentración de SO ₂	150
Figura 5.60. Rosas de viento para la región Sureste de los días de mayor concentración de SO ₂	150
Figura 5.61. Rosas de viento para la región Noroeste de los días de mayor contribución de SO ₂	151
Figura 5.62. Rosas de viento para la región Noreste de los días de mayor contribución de SO ₂	151
Figura 5.63. Rosas de viento para la región Centro de los días de mayor contribución de SO ₂	152
Figura 5.64. Rosas de viento para la región Suroeste de los días de mayor contribución de SO ₂	152
Figura 5.65. Rosas de viento para la región Sureste de los días de mayor contribución de SO ₂	153
Figura 5.66. Diagrama de cajas para la emisión de SO ₂ utilizando combustóleo, de julio de 2010 a junio de 2011.....	154
Figura 5.67. Diagrama de cajas de concentraciones promedio de 24 horas para SO ₂ reportadas por el SIMAT en las 12 estaciones de monitoreo	156
Figura 5.68. Diagrama de cajas para las concentraciones promedio 24 horas para SO ₂ obtenidas en CALPUFF en los 12 receptores.....	157

Figura 5.69. Diagrama de cajas para las contribuciones de SO ₂ emitido por la CTFPR a la ZMCM.....	158
Figura 6.1. Concentraciones máximas diarias de SO ₂ durante el periodo de julio de 2010 a junio de 2011 en la zona de influencia de la CTFPR.....	162
Figura 6.2. Concentraciones de SO ₂ obtenidas en CALPUFF durante el periodo de julio de 2010 a junio de 2011 en los 12 receptores	162
Figura 6.3. Concentraciones de SO ₂ reportadas en el SIMAT durante el periodo de julio de 2010 a junio de 2011 en las 12 estaciones de monitoreo	163

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Centrales termoeléctricas en México (2016)	37
Tabla 2.2. Normas de salud ambiental para SO ₂	41
Tabla 2.3. Niveles máximos permisibles de emisión para SO ₂	43
Tabla 2.4. Método y frecuencia de medición de SO ₂ para la verificación del cumplimiento de la norma	44
Tabla 2.5. Propiedades de los combustibles utilizados en la CTFPR.....	45
Tabla 2.6. Especificaciones del combustóleo industrial en procesos de combustión a fuego directo.....	46
Tabla 2.7. Especificaciones del gas natural	47
Tabla 2.8. Normas mexicanas y métodos de prueba de la US EPA que se aplican para llevar a cabo los muestreos en fuentes de emisiones a la atmósfera	48
Tabla 2.9. Emisiones e índice de emisiones de SO ₂ para las centrales termoeléctricas que consumen combustóleo en México (2002).....	50
Tabla 2.10. Emisiones e índice de emisiones de SO ₂ para las centrales termoeléctricas que consumen combustóleo en México (2005).....	51
Tabla 2.11. Clasificación de las pruebas en fuente para la determinación de factores de emisión.....	57
Tabla 2.12. Clasificación de FE de acuerdo con el AP-42.....	58
Tabla 2.13. Factores de emisión de SO ₂ para distintos aceites combustibles con diferente grado	59
Tabla 2.14. Modelos deterministas de acuerdo a su escala espacial.....	64
Tabla 4.1. Estaciones de monitoreo de SO ₂ que operaron en 2010 y 2011	85
Tabla 4.2. Criterio de suficiencia de información para la selección de estaciones válidas	86
Tabla 4.3. Porcentaje de datos válidos de concentraciones promedio de 24 horas para SO ₂ para las estaciones de monitoreo que operaron en 2010 y 2011	87
Tabla 4.4. Especificaciones generales para las unidades de generación de la CTFPR, el día 1° de junio de 2011	90
Tabla 4.5. Emisiones resultantes por chimenea de la CTFPR, el día 1° de junio de 2011	90
Tabla 4.6. Especificaciones iniciales para la simulación en CALPUFF	92
Tabla 4.7. Características de las chimeneas ubicadas en la CTFPR	95
Tabla 4.8. Coordenadas de las estaciones de monitoreo y su altura sobre el nivel del mar	96
Tabla 4.9. Estaciones de monitoreo que cuentan con base de datos meteorológicos	101

Tabla 5.1. Estadística básica de la información en datos horarios de la calidad del aire por SO ₂ generada en las 12 estaciones de monitoreo de julio de 2010 a junio de 2011	104
Tabla 5.2. Días de operación de cada unidad de generación de la CTFPR.....	106
Tabla 5.3. Consumo de combustóleo y emisiones de SO ₂ por unidad de la CTFPR, de julio de 2010 a junio de 2011.....	107
Tabla 5.4. Días con mayor concentración de SO ₂ en las diferentes regiones de la ZMCM	129
Tabla 5.5. Contribuciones porcentuales estimadas de los días con mayor contribución de SO ₂ en las diferentes regiones de la ZMCM	148
Tabla 5.6. Estadísticos descriptivos de emisión de SO ₂ utilizando combustóleo, de julio de 2010 a junio de 2011.....	154
Tabla 5.7. Estadísticos descriptivos de concentraciones promedio 24 horas para SO ₂ reportadas por el SIMAT en las 12 estaciones de monitoreo	156
Tabla 5.8. Estadísticos descriptivos de concentraciones promedio 24 horas para SO ₂ obtenidos en CALPUFF en los 12 receptores	157
Tabla 5.9. Estadísticos descriptivos para las contribuciones de SO ₂ emitido por la CTFPR a la ZMCM.....	158

ABREVIATURAS, ACRÓNIMOS Y SIGLAS

°C	Grados Celsius
ACal	Aseguramiento de Calidad
ASTM D	American Society for Testing and Materials (D Standard)
atm	atmósfera
BTU	British Thermal Unit
CC	Ciclo Combinado
CCal	Control de Calidad
CCA	Comisión para la Cooperación Ambiental
CFE	Comisión Federal de Electricidad
CFR	Code of Federal Regulations (United States)
CH ₄	Metano
CH1	Chimenea 1
CH2	Chimenea 2
CH3	Chimenea 3
CH4	Chimenea 4
CH5	Chimenea 5
CH6	Chimenea 6
CH7	Chimenea 7
cm ²	centímetro cuadrado
CO	Monóxido de carbono
CO ₂	Dióxido de carbono
COV	Compuesto Orgánico Volátil
CRE	Comisión Reguladora de Energía
cSt	centistoke
CT	Central Termoeléctrica
CTFPR	Central Termoeléctrica Francisco Pérez Ríos
DOF	Diario Oficial de la Federación
FE	Factores de Emisión
g	gramo
gal	galón
GJ	Gigajoule
GWh	Gigawatt-hora
h, hr	hora
H ₂ O	Agua
H ₂ S	Ácido sulfhídrico
H ₂ SO ₄	Ácido sulfúrico
HA	Humedad Absoluta

HC	Hidrocarburo
Hg	Mercurio
HNO ₃	Ácido nítrico
HR	Humedad Relativa
INEM	Inventario Nacional de Emisiones
J	Joule
K	Kelvin
kg	kilogramo
km	kilómetro
km ²	kilómetro cuadrado
L	litro
LAPEM	Laboratorio de Pruebas y Equipo de Mediciones
lb	libra
LGEEPA	Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente
m	metro
m ²	metro cuadrado
m ³	metro cúbico
mg	miligramo
MJ	Megajoule
mmHg	milímetros de mercurio
MM5	Modelo Meteorológico de mesoescala de 5 ^a generación
msnm	metros sobre el nivel del mar
MW	Megawatt
MWh	Megawatt-hora
N ₂	Nitrógeno
NA	Nivel de Actividad
NAAQS	National Ambient Air Quality Standards
NMPE	Niveles Máximos Permisibles de Emisión
NMX	Normas Mexicanas
NNE	Nor-Noreste
NNO	Nor-Noroeste
NO ₃ ⁻	Ión nitrato
NOM	Norma Oficial Mexicana
NO _x	Óxidos de Nitrógeno
O ₂	Oxígeno
O ₃	Ozono
OMS	Organización Mundial de la Salud
Pa	Pascal

Pb	Plomo
PEMEX	Petróleos Mexicanos
PIE	Productor Independiente de Energía
PM	Partículas
PM ₁₀	Partículas Menores a 10 micrómetros
PM _{2.5}	Partículas Menores a 2.5 micrómetros
POISE	Programa de Obras e Inversiones del Sector Eléctrico
ppb	partes por billón
ppm	partes por millón
ppm _v	partes por millón volumen
psi	pounds-force per square inch
PRODESEN	Programa del Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional
PST	Partículas Suspendidas Totales
RAMA	Red Automática de Monitoreo Atmosférico
REDDA	Red De Depósito Atmosférico
REDMET	Red de Meteorología y radiación solar
S	Azufre
s ²	segundo al cuadrado
SCA-CCA-UNAM	Sección de Contaminación Ambiental del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la Universidad Nacional Autónoma de México
SCFI	Secretaría de Comercio y Fomento Industrial
SECRE	Secretaría de Energía, Comisión Reguladora de Energía
SEMARNAT	Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales
SEN	Sistema Eléctrico Nacional
SENER	Secretaría de Energía
SIMAT	Sistema de Monitoreo Atmosférico
SMCE	Sistema de Monitoreo Continuo de Emisiones
SO ₂	Dióxido de azufre o bióxido de azufre
SO ₃	Trióxido de azufre
SO ₄ ²⁻	Ión sulfato
SO _x	Óxidos de azufre
SPSS	Statistical Package for the Social Sciences
SSA	Secretaría de Salud
TC	Termoeléctrica Convencional
U1	Unidad 1
U2	Unidad 2
U3	Unidad 3
U4	Unidad 4

U5	Unidad 5
US EPA	United States Environmental Protection Agency
vol	volumen
ZC	Zona Crítica
ZCTVA	Zona Crítica Tula-Vito-Apasco
ZMCM	Zona Metropolitana de la Ciudad de México
µg	microgramo
µl	microlitro
µm	micrómetro

RESUMEN

Actualmente, uno de los sectores industriales considerado como fuente potencial de contaminación ambiental corresponde a la generación de energía eléctrica, el cual genera emisiones de contaminantes a la atmósfera debido al uso de tecnologías convencionales basadas en el empleo de combustibles fósiles.

Una de las centrales termoeléctricas ubicada a nivel nacional, entre las primeras en emisiones de dióxido de azufre (SO_2) por la combustión de combustóleo con alto contenido de azufre, es la Central Termoeléctrica Francisco Pérez Ríos (CTFPR), ubicada en el municipio de Tula de Allende en el estado de Hidalgo. Las emisiones generadas por esta fuente estacionaria tienen una influencia en la atmósfera de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM), debido a que se localiza en la región Tula-Vito-Apasco (a 86 km de la ZMCM), la cual está identificada como una zona crítica de emisión de contaminantes a la atmósfera.

Una actividad fundamental para evaluar el impacto potencial en la calidad del aire por SO_2 en la ZMCM por la contribución de la CTFPR, fue la aplicación del modelo de dispersión de contaminantes atmosféricos CALPUFF, aprobado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US EPA), con el propósito de estimar el transporte, distribución y concentración de este contaminante para proponer estrategias de prevención, minimización y control. Mediante el modelo de dispersión empleado en este estudio se realizó la estimación de concentraciones promedio de 24 horas para SO_2 en 12 receptores del contaminante transportado desde la central, los cuales correspondieron a 12 estaciones de monitoreo de calidad del aire del Sistema de Monitoreo Atmosférico (SIMAT) en la ZMCM.

Para la aplicación del modelo se tomó en cuenta la información proporcionada por la CTFPR, sobre el consumo real de combustóleo diario por unidad de generación, de julio de 2010 a junio de 2011. Utilizando la metodología de factores de emisión (FE) se estimaron las emisiones de SO_2 para identificar el transporte y dispersión del contaminante. Fue importante considerar el tipo de suelo, así como la topografía y la meteorología del sitio de estudio, ya que el uso de variables reales es esencial para la obtención de resultados cercanos a la realidad. También se consideró la reacción de transformación de SO_2 que experimenta el contaminante al ser emitido, pues esta reacción reduce la estimación de concentraciones, por lo que se utilizó el módulo de reacción química MESOPUFF II.

Al realizar las simulaciones de la dispersión de SO₂ con el modelo CALPUFF, se obtuvieron concentraciones menores a las registradas en la base de datos de las estaciones de monitoreo de calidad del aire del SIMAT, lo cual proporcionó evidencia de la existencia de otras fuentes de contribución del contaminante distintas a la central. Las mayores concentraciones estimadas con el modelo de dispersión se encontraron en la región Noroeste de la ZMCM, con un valor máximo de 29.24 ppb y las menores en la región Sureste, con un valor máximo de 4.57 ppb, en los meses de noviembre a febrero.

Al estimar la contribución de la CTFPR mediante la comparación de los resultados del modelo y lo registrado por las estaciones de monitoreo del SIMAT, se obtuvieron valores promedio de contribución que van del 13.96% a 29.71%, durante el periodo de estudio. Las regiones de la ZMCM en las que se encontró una mayor contribución promedio anual fueron en la parte Noroeste, Suroeste y Sureste y las menores en el Noreste y Centro. Los días con valores más altos de contribución estuvieron por arriba del 70%. El más significativo se encontró en el receptor Atizapán en la región Noroeste con un valor del 94.03%.

Al realizar las rosas de viento de los días de mayor concentración y de mayor contribución se encontró que la predominancia de los vientos fue del Nor-Noroeste (NNO) hacia la estación de monitoreo y en algunos casos Nor-Noreste (NNE), sugiriendo que la dirección del viento podría ser un indicativo de transporte de SO₂ a partir de la CTFPR y por tanto considerarla como una fuente de impacto potencial en la calidad del aire de la ZMCM.

Meta

Estimar la concentración y contribución de dióxido de azufre (SO₂) para evaluar la calidad del aire en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM) por las emisiones provenientes de la Central Termoeléctrica Francisco Pérez Ríos (CTFPR) ubicada en Tula de Allende, Hidalgo, para el periodo de julio de 2010 a junio de 2011.

Objetivos

- Revisar la información sobre calidad del aire para SO₂ en las estaciones de monitoreo del Sistema de Monitoreo Atmosférico (SIMAT).
- Estimar las emisiones diarias de SO₂ provenientes de la CTFPR, utilizando información sobre consumo real diario de combustóleo y por unidad de generación de energía eléctrica, con base en los factores de emisión de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US EPA).
- Aplicar el modelo de dispersión CALPUFF para conocer el transporte, distribución y concentración en promedio de 24 horas para SO₂, proveniente de la CTFPR.
- Analizar la información registrada sobre calidad del aire en las estaciones de monitoreo seleccionadas del SIMAT y comparar esa información con las concentraciones obtenidas con el modelo CALPUFF.
- Comparar las concentraciones de SO₂ obtenidas con la Norma Oficial Mexicana (NOM) para calidad del aire correspondiente.
- Determinar la contribución de SO₂ proveniente de la CTFPR a las distintas regiones de la ZMCM.
- Recomendar estrategias de prevención, minimización y control para SO₂ en la ZMCM, ocasionadas por el proceso de generación de electricidad en la CTFPR.

1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo que ha experimentado la humanidad a lo largo de su historia para alcanzar el bienestar y la comodidad, ha ido acompañado de consumos masivos de recursos naturales y energéticos, así como de la generación de una variedad de emisiones a la atmósfera, que han causado una extensa degradación provocando problemas ambientales por sus efectos sobre la población y los ecosistemas.

Un problema ambiental que actualmente existe en ciudades en vías de desarrollo es la contaminación atmosférica, la cual tiene efectos a nivel local, regional y global. Uno de estos efectos es el deterioro de la calidad del aire, el cual representa una amenaza importante para la salud, ecosistemas y el deterioro significativo a nivel mundial. Según una evaluación de la Organización Mundial de la Salud (OMS), cada año se producen más de dos millones de muertes prematuras atribuibles a los efectos de la contaminación atmosférica tanto en exteriores como en interiores (OMS, 2006).

Algunos países que enfrentan problemas de calidad del aire en sus principales zonas metropolitanas son Japón, China y México; en el caso particular de México destaca la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM), la cual se ve afectada por diversas emisiones de contaminantes a la atmósfera (SEMARNAT, 2013). De acuerdo a la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA) un contaminante se define como toda materia o energía en cualesquiera de sus estados físicos y formas, que al incorporarse o actuar en la atmósfera, agua, suelo, flora, fauna o cualquier elemento natural, altere o modifique su composición y condición natural (DOF, 2015).

Uno de los contaminantes relacionados con problemas de la calidad del aire en la ZMCM es el dióxido de azufre (SO_2), el cual está clasificado como contaminante primario, ya que se emite directamente de una fuente particular a la atmósfera y sin necesidad de que otros contaminantes reaccionen para su formación; se produce tanto por fuentes naturales (por ejemplo, las emisiones volcánicas e incendios forestales o agrícolas) así como antropogénicas, que en su mayoría son el resultado de la oxidación del azufre contenido en los combustibles fósiles (INE, 2010).

Las fuentes más importantes de SO_2 que pueden impactar en la ZMCM se encuentran fuera de ésta, tal es el caso del corredor industrial Tula-Tepeji (a 60 km al Noroeste) y ocasionalmente las emisiones del volcán Popocatepetl (a 70 km al Sureste), sin embargo, la contribución de esta fuente natural a la contaminación del aire de la ZMCM

es mínima, por lo cual no representan un riesgo significativo para la calidad del aire de la ciudad (SEDEMA, 2014b).

Dentro del corredor industrial Tula-Tepeji, se ubica la Zona Crítica Tula-Vito-Aspasco (ZCTVA), en la que se localiza la Central Termoeléctrica Francisco Pérez Ríos (CTFPR), la cual es una de las principales fuentes emisoras de SO_2 debido a que utiliza combustóleo con una composición alrededor de 4% de azufre para la generación de electricidad (Bravo *et al.*, 2011).

Existen fuentes de SO_2 dentro de la ZMCM que también impactan en la calidad del aire, estas son las industrias locales. De acuerdo con el inventario de emisiones 2014, en la ZMCM se arrojan cada año a la atmósfera 1,696 toneladas de este contaminante, de los cuales el 68% son emitidas por la industria (SEDEMA, 2014a). Otra fuente emisora de SO_2 es el tránsito vehicular y esto se debe a que el diésel y la gasolina empleados en los automóviles, contienen concentraciones de azufre que, a pesar de ser bajas, también emiten el contaminante durante su combustión (SEDEMA, 2016).

Para determinar el efecto que las emisiones de los contaminantes ocasionan en la calidad del aire, es necesario hacer uso de herramientas como los modelos de dispersión, para evaluar su distribución en la atmósfera permitiendo identificar los efectos de la dispersión en el tiempo y espacio, con la finalidad de proponer medidas de prevención, minimización y control (Bravo *et al.*, 2010).

2. ANTECEDENTES

2.1. Calidad del aire

El término de *calidad del aire* se emplea para referirse al estado del aire que nos rodea. Un aire libre de contaminantes es de buena calidad y por lo tanto es apto para ser respirado por los seres vivos del planeta y una vida sin riesgo para la salud humana y el ambiente. La mala calidad del aire se produce al momento en que los contaminantes alcanzan una concentración suficientemente alta en el ambiente para causar un desequilibrio ecológico (*contaminación atmosférica*).

El término *potencial* se define como la posibilidad de ser, manifestarse o de existir en un futuro. Partiendo de esto, el *impacto potencial en la calidad del aire* es la modificación o alteración del estado del aire que *puede ser* ocasionada como resultado de las emisiones a la atmósfera por fuentes naturales o antropogénicas.

La manera en la que las emisiones de los contaminantes pueden tener un impacto en la calidad del aire depende de factores como: el número y tipo de fuentes de emisión, la fisiografía, es decir, la forma y estructura del terreno, la meteorología, y las propiedades químicas y físicas de los contaminantes (SEDEMA, 2014b). Estos factores se desarrollan en la capa más baja de la atmósfera denominada troposfera, la cual abarca entre 8 y 10 km sobre la superficie de la Tierra; su importancia radica en que contiene el aire que respira el hombre y su dinámica influye en la manera en que se comportan y distribuyen los contaminantes del aire.

2.1.1. Contaminantes atmosféricos

Los contaminantes atmosféricos se pueden categorizar por su origen de la siguiente forma (OMS, 2006):

- **Primarios:** Aquellos procedentes directamente de las fuentes de emisión dentro de la atmósfera, por ejemplo: plomo (Pb), monóxido de carbono (CO), óxidos de azufre (SO_x), óxidos de nitrógeno (NO_x), hidrocarburos (HC), partículas (PM), entre otros. Su concentración es mayor en zonas industriales o en regiones con densidad vehicular.
- **Secundarios:** Aquellos originados en el aire por la interacción entre dos o más contaminantes primarios, o por sus reacciones con los componentes naturales de la atmósfera, por ejemplo: ozono (O₃), peroxiacetilnitrato (PAN), sulfatos (SO₄²⁻),

nitratos (NO_3^-), ácido sulfúrico (H_2SO_4), ácido nítrico (HNO_3), partículas (PM), entre otros. Su concentración es mayor en regiones viento abajo de las fuentes de emisión.

2.1.2. Contaminante criterio

Los *contaminantes criterio* son sustancias transportadas por aire para las cuales Estados Unidos y México han establecido límites de exposición basados en la salud y bienestar. Algunos de los contaminantes criterio del aire, por sus efectos en la salud de la población, han sido normados y se han establecido límites máximos de concentración en el aire ambiente para proteger la salud humana, el ambiente y el bienestar de la población. Los contaminantes criterio incluyen: el ozono (O_3), el monóxido de carbono (CO), el dióxido de azufre (SO_2), el dióxido de nitrógeno (NO_2), el plomo (Pb), las partículas suspendidas totales (PST), y las partículas suspendidas menores a 10 y a 2.5 μm (PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$).

Para el caso de estudio, se evaluó el contaminante criterio SO_2 .

2.1.3. Dióxido de azufre

El *dióxido de azufre* (SO_2) es un contaminante primario que pertenece a la familia de los óxidos de azufre (SO_x), éstos representan la suma del SO_2 y el trióxido de azufre (SO_3).

El SO_2 es un gas incoloro y de olor irritante que se produce de fuentes antropogénicas como la quema de combustibles fósiles que contienen azufre (el 85% del total de emisiones proviene de esta fuente), siendo las más importantes las instalaciones que utilizan combustóleo, carbón o diésel, así como los vehículos que utilizan diésel y gasolina. También se puede generar de fuentes naturales como las emisiones volcánicas, los incendios forestales o agrícolas y pueden tener una contribución importante en la concentración de este contaminante (SEDEMA, 2016).

En la atmósfera, ocurren reacciones químicas de oxidación de SO_2 mientras se desplaza de su fuente de origen formando SO_3 , que reacciona con el vapor de agua para formar H_2SO_4 , uno de los principales componentes de la lluvia ácida. Cuando el H_2SO_4 reacciona con el amoníaco atmosférico o con las partículas minerales, se forman iones sulfatos (SO_4^{2-}). Los humanos podemos inhalar esta especie que al alojarse en los pulmones resulta sumamente perjudicial. Las partículas de SO_4^{2-} , por otra parte, contribuyen a la disminución de la visibilidad y alteran el albedo de la Tierra, es decir, el

balance de radiación del planeta, lo que a su vez tiene un efecto en el clima (CCA, 2011).

En los sistemas de combustión, aproximadamente 95% del azufre presente en el combustible se convierte en SO_2 ; de 1 a 5% se oxida aún más para formar SO_3 , y de 1 a 3% se emite en forma de partículas de SO_4^{2-} (AWMA, 1992). Cuando se llegan a condiciones de equilibrio en las calderas donde se lleva a cabo la combustión, el SO_3 formado a partir del azufre quemado se descompone en SO_2 y por lo tanto la cantidad de SO_2 que fluye por la chimenea es el 99% del SO_x total (CORINAIR, 1996).

2.1.3.1. Efectos en la salud en humanos y animales

Debido a que el SO_2 es soluble en agua, durante la respiración se disuelve y oxida en las membranas mucosas de la nariz y el tracto respiratorio, provocando irritación en esas zonas. Los asmáticos y las personas con enfermedades pulmonares obstructivas crónicas y problemas cardíacos son los más sensibles a los efectos del SO_2 , el cual puede afectar al sistema respiratorio y reducir la habilidad de los pulmones para liberar partículas extrañas, además de causar irritación ocular. La inflamación del sistema respiratorio provoca tos, secreción mucosa y agravamiento del asma y de enfermedades respiratorias preexistentes (como la bronquitis crónica); al igual, aumenta la propensión de las personas a contraer infecciones de vías respiratorias y vulnerar el sistema inmunológico. Los ingresos hospitalarios por cardiopatías y la mortalidad aumentan en los días en que los niveles de SO_2 son más elevados (Jacobson, 2012; OMS, 2016).

2.1.3.2. Efectos en el ambiente

Existen varios efectos en el ambiente causados por el SO_2 , entre estos efectos se encuentran:

- **Aire.** El SO_2 es un importante precursor de partículas finas de hollín. También contribuye a la disminución de la visibilidad y los efectos en la salud de los seres vivos.
- **Agua.** Reacciona para acidificar las aguas superficiales, lo que mata a los peces y otros organismos acuáticos pequeños. Se presenta el fenómeno de lluvia ácida, el cual acelera la erosión de monumentos, edificios o estructuras metálicas.

- **Suelo.** Se presenta la acidificación de éstos, reduciendo la fertilidad de la tierra. El proceso de acidificación también libera metales que pueden dañar a microorganismos del suelo responsables de la descomposición, a los musgos, líquenes, hongos, árboles y organismos que viven en el suelo.
- **Vegetales.** En las plantas, el SO₂ ocasiona daños irreversibles en los tejidos, provocando la caída de sus hojas y la decoloración de las mismas. Alteran su metabolismo, afectando los procesos de fotosíntesis y la respiración.

2.2. Centrales de generación de electricidad

El Sistema Eléctrico Nacional (SEN) está conformado por el sector público, que está integrado por la infraestructura de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) y los Productores Independientes de Energía (PIEs), y aquella energía no suministrada al servicio público o privados (SENER, 2014).

La infraestructura del SEN se conforma de las siguientes fases (SENER 2015a):

- Generación
- Transformación y transmisión de alta tensión
- Distribución en media y baja tensión
- Ventas a usuarios finales (incluyendo proceso de mediación y facturación)

La fase de mayor importancia previa a la distribución de energía es la generación, clasificada como: neta o bruta. La *generación neta* es la energía eléctrica que una central generadora entrega a la red de transmisión, la *generación bruta* es la energía que se produce en las centrales eléctricas, medida a la salida de los generadores e incluye el consumo para usos propios de la central (CFE, 2015a). Para el año 2016, la participación porcentual en la generación de electricidad de CFE fue de 54.7%, los PIE's aportaron 27.8% de energía eléctrica y el 17.5% restante correspondió a la producción del sector privado (SENER, 2017b),

En México se cuenta con una gran diversidad de tecnologías de generación eléctrica, mismas que pueden ser clasificadas en convencionales o limpias. Las *convencionales* son aquellas que utilizan los combustibles fósiles para la generación de electricidad y las *limpias* son las que emplean fuentes de energía como lo son la fuerza del viento, la radiación solar, la energía producida por océanos, mares o ríos, yacimientos geotérmicos, bioenergéticos y energía nuclear.

La CFE clasifica las centrales de generación de electricidad de acuerdo a sus tipos de tecnología en convencionales o limpias:

Convencionales

- **Vapor o termoeléctrica convencional.** Central que utiliza el poder calorífico de combustibles derivados del petróleo (combustóleo, diésel y gas natural) para calentar agua y generar vapor que produzca el movimiento de una turbina acoplada al generador eléctrico. La eficiencia térmica de las unidades de vapor gira en torno a 35%, esto quiere decir que sólo 35% de la energía del combustible se transforma en electricidad. También es posible utilizar carbón como combustible para la generación de vapor y así su transformación a energía eléctrica, a este tipo de centrales se les llama **carboeléctricas**.

Si dos combustibles son utilizados para la producción de vapor, se le llama termoeléctrica dual y en ese caso los combustibles primarios pueden ser: combustóleo-carbón o combustóleo-gas.

- **Turbogas o turbina de combustión.** Central que aprovecha los gases de combustión para producir el movimiento de una turbina acoplada al generador eléctrico. Su eficiencia es menor a las de vapor pero como no tienen calderas o un suministro de vapor y condensadores, los costos del capital son mucho menores que las unidades generadoras a base de vapor. Los combustibles que utilizan este tipo de central son gas natural o diésel.
- **Ciclo combinado.** Central que tiene una combinación de tecnología de turbogas y vapor. La alta temperatura de los gases de combustión en las unidades de turbogas, se aprovecha para calentar el agua y generar vapor que produzca energía eléctrica adicional. La eficiencia térmica de una unidad de ciclo combinado gira en torno a 50%.
- **Combustión interna.** Central que posee motores de combustión interna en la que aprovechan la expansión del gas de combustión para obtener energía mecánica que se transforma en energía eléctrica en un generador. El combustible utilizado por este tipo de central es el diésel.

Limpias

- **Hidroeléctrica.** Central que utilizan el agua de océanos, mares o ríos y se hace pasar por una turbina que transmite energía hidráulica a un generador eléctrico, donde se transforma en energía eléctrica.
- **Geotermoeléctrica.** Central que utilizan el vapor extraído del subsuelo como combustible primario, para calentar agua que hace girar la turbina de un generador, produciendo electricidad.
- **Eoloeléctrica.** Centrales que aprovechan la energía cinética generada por efecto de las corrientes de aire y que es convertida en energía eléctrica mediante el uso de aerogeneradores.
- **Solar fotovoltaica.** Central que utilizan la radiación solar y la transforman en energía eléctrica mediante un dispositivo denominado celda fotovoltaica.
- **Nucleoeléctrica.** Central que genera energía eléctrica a partir de energía nuclear mediante el uso de combustibles nucleares, como lo es el uranio enriquecido. Se consideran como tecnología limpia pues no produce contaminación atmosférica de gases derivados de la combustión que producen el efecto invernadero, ya que no precisan del empleo de combustibles fósiles para su operación.
- **Cogeneración eficiente.** Se define como la producción secuencial de energía eléctrica y de energía térmica aprovechable en los procesos industriales y comerciales a partir de la misma fuente de combustibles. Sus unidades usan calor para generar electricidad y para otras aplicaciones térmicas en el sitio. La cogeneración es el método más eficiente energéticamente (hasta un 75% de eficiencia) pues permite recuperar la energía térmica para usarla en servicios (como calefacción) o para otros procesos industriales, que entrañan el uso de vapor.
- **Bioenergía.** Esta es la energía derivada de la conversión de la biomasa, la cual puede ser utilizada directamente como combustible o transformada en líquidos y gases (biogás) que a su vez se utilizan en la generación de electricidad, a través de un proceso convencional. La *biomasa* es un compuesto orgánico cuya materia deriva de las actividades agrícola, pecuaria, silvícola, acuicultura, residuos de pesca, residencial, comercial, industrial, de microorganismos y de enzimas.

Durante el año 2016, aproximadamente el 13% de la electricidad en México fue generada por centrales termoeléctricas que consumen combustóleo (de vapor) y 54% por las que consumen gas natural (ciclo combinado y turbogas). Se prevé que para el año 2031, la electricidad generada por combustóleo sea de 2%, por las que consumen gas natural del 60%, y el porcentaje restante por energías de tecnología limpia (SENER, 2017b).

2.3. Operación de una central termoeléctrica de tipo vapor

De manera general, una *central termoeléctrica (CT) de tipo vapor* es una instalación industrial en la que la energía química del combustible se transforma en una energía térmica para producir vapor de agua que se conduce a la turbina donde su energía cinética se convierte en energía mecánica, que se transmite al generador para producir energía eléctrica. El vapor producido por estas centrales tiene un orden de temperatura de los 520 °C y presiones entre 120 y 170 kg/cm², para impulsar turbinas que giran a 3600 revoluciones por minuto (Méndez, 2007; CFE, 2017).

2.3.1. Descripción funcional del proceso

El proceso de generación de electricidad por CT de tipo vapor que consumen combustóleo se observa en la Figura 2.1 por medio de una secuencia numerada y empieza por la transportación del combustible, el cual contiene una energía química, por medio de oleoductos (1.A) hacia los tanques de almacenamiento de mayor capacidad (2) y después hacer la distribución a los tanques de almacenamiento diario de menor capacidad (3), dependiendo de la demanda de energía eléctrica.

Una vez almacenado, el combustóleo es precalentado (4) para que tenga mayor fluidez y posteriormente ingrese a los quemadores (5) en el generador de vapor (también llamado caldera), en el que se introduce aire por medio de un ventilador de tiro forzado (6) con la finalidad de que el oxígeno asegure que la combustión sea lo más completa posible. Al mismo tiempo el generador de vapor recibe agua desmineralizada precalentada (10) que pasa por el economizador (11) cuya función es elevar la temperatura del agua hasta su punto de ebullición y llega al domo superior (12), donde se da la separación de la mezcla vapor-agua. El agua desmineralizada proviene de la red de pozos profundos (7), de la planta de tratamiento de aguas negras (8), o bien puede ser agua recuperada en el condensador (9) durante el proceso.

Una vez que el agua desmineralizada ha ingresado al domo superior (12) se da la separación de la mezcla vapor-agua; el vapor generado se dirige hacia las turbinas (15, 16, y 17) y el agua es succionada por una bomba de circulación (13), y la introduce al domo inferior (14), el cual distribuye el agua en los tubos que suben del generador. Para producir más vapor, el combustóleo que está siendo quemado al mismo tiempo en que el agua sube por los tubos, produce gases de combustión que transfieren su energía térmica por las paredes de los tubos que ascienden y la mezcla vapor-agua nuevamente se separa en el domo superior.

La energía cinética del vapor de agua generado se transforma en energía mecánica al accionar los álabes de las turbinas de baja, intermedia y alta presión (15, 16 y 17). El eje de las mismas turbinas mueve el generador eléctrico (18), al cual están acopladas y así haya una transformación de energía mecánica a energía eléctrica y se distribuya a partir de la torre de transmisión (22).

En el proceso existe un precalentador de aire regenerativo (19) con la finalidad de recuperar la energía térmica de los gases de combustión que aún presentan alto poder calorífico y puedan seguir generando vapor. Cuando los gases de combustión ya no son útiles para generar vapor, son conducidos a través de un ventilador de tiro inducido (20) y son emitidos a través de una chimenea (21).

Algunas CT cuentan con equipos de control, instalados previo al ventilador de tiro inducido, para así reducir las emisiones de contaminantes a la atmósfera; además pueden contar con equipo de monitoreo continuo instalado entre el ventilador de tiro inducido y la chimenea.

En la Figura 2.1 se muestra el diagrama del proceso de generación de electricidad en la CTFPR. Como se observa además de los oleoductos para el suministro de combustóleo, existe una red de ductos de gas natural, ambos combustibles proporcionados por PEMEX (1.B). El gas natural es usado como combustible en el arranque (5.B) y el combustóleo sólo es usado para la etapa de generación. Dado que la central no cuenta con equipo de control de emisiones, el diagrama hace omisión del mismo.

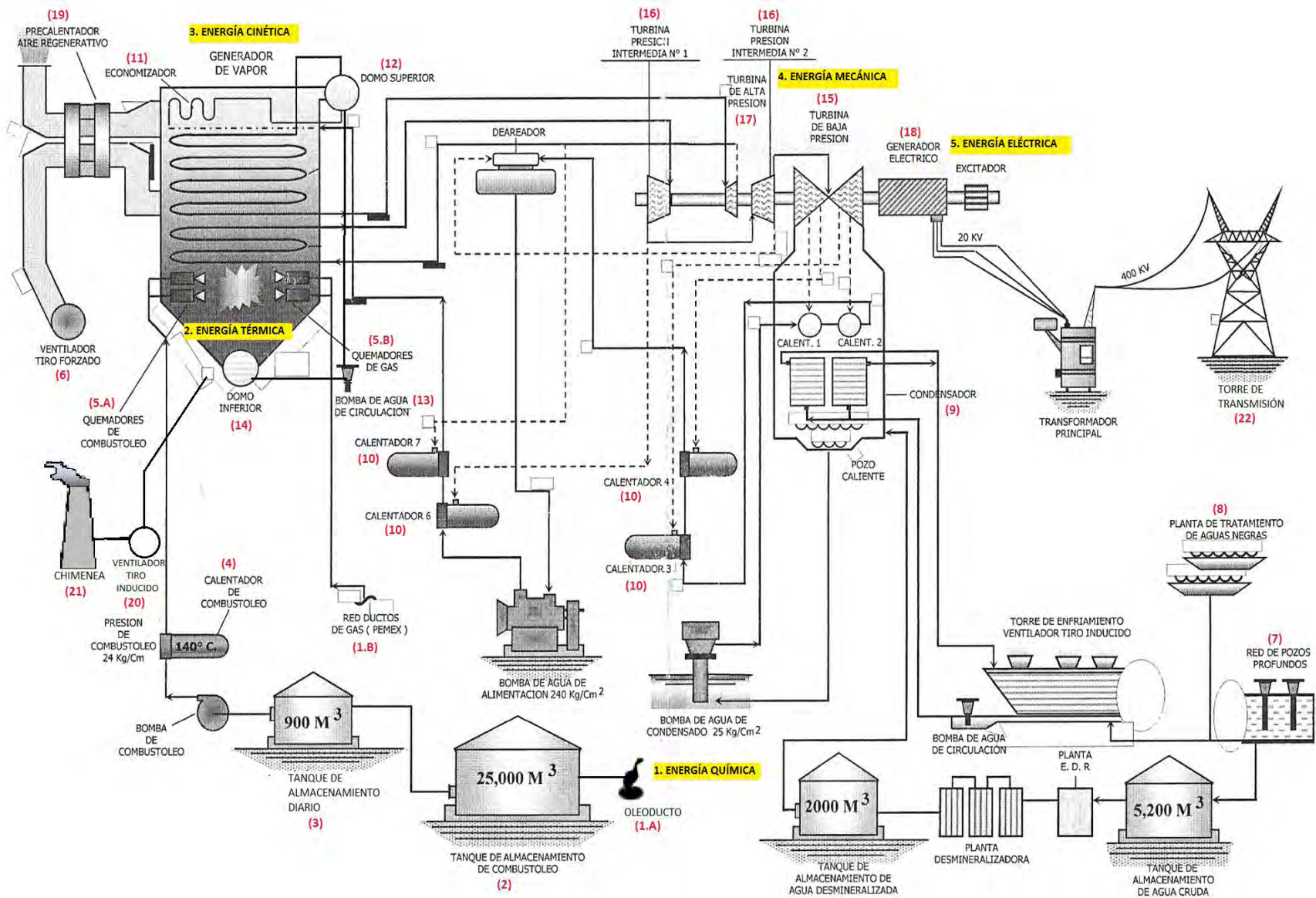


Figura 2.1. Diagrama de descripción del proceso de generación de electricidad en la CTFPR

Fuente: Información proporcionada por la CTFPR, junio de 2017

2.3.2. Tipos de quemadores

Conocer el tipo de configuración de los quemadores es muy importante para el caso de las emisiones a la atmósfera. En algunos contaminantes, su factor de emisión (FE) se ve modificado por el tipo de combustible utilizado o por la configuración de los quemadores.

Existen múltiples tipos de quemadores, los quemadores que se encuentran en la central de interés son:

- **Quemadores con configuración de pared.** Son llamados también quemadores horizontales con configuración normal. Son de carbón pulverizado dispuestos en las paredes del horno, lo más común es encontrarlos acomodados en hileras en la pared frontal. Este tipo de quemadores tienen múltiples llamas discretas que se extienden perpendicularmente en el área del horno (US EPA, 1995a).

La presencia de varias llamas no permite tener una flama homogénea para quemar el combustible, disminuyendo la eficiencia de transmisión de calor y contribuyendo a la formación de NO_x (MAVDT, 1998).

- **Quemador con configuración tangencial.** Son quemadores con boquillas de carbón pulverizado y aire instaladas en cada esquina de cada pared del horno. El carbón y el aire se dirigen desde las esquinas del horno tangencialmente formando un círculo situado en un plano horizontal del horno (US EPA, 1995 a).

La presencia de una sola flama homogénea permite que haya estabilidad en la combustión previniendo altas temperaturas y disminuyendo la formación de NO_x (MAVDT, 1998)

2.3.3. Combustibles

De acuerdo al Sistema de Información Energética (SIE), un *combustible* es cualquier sustancia usada para producir energía calorífica a través de una reacción química o nuclear; la energía se produce por la conversión de la masa del combustible a calor.

Los combustibles extraídos o captados directamente de los recursos naturales se les llaman *productos energéticos primarios* y los producidos a partir de los primarios se les conocen como *productos energéticos secundarios* como lo son los productos petroleros, el coque y el carbón vegetal, entre otros.

Los productos energéticos primarios pueden dividirse en combustibles de origen fósil y productos energéticos renovables. Los de origen fósil se extraen de los recursos naturales que se formaron a partir de biomasa en el pasado geológico; algunos ejemplos son el petróleo crudo, el carbón mineral, gas natural y la leña. Los renovables, a excepción de la energía geotérmica, se obtienen directa o indirectamente de los flujos corrientes de la energía solar y gravitacional, constantemente disponibles; dentro de esta categoría entran los biocombustibles, los cuales son combustibles de origen biológico a partir de materia orgánica, más concretamente conocida como *biomasa*. Algunos ejemplos de ésta son el bioetanol, el biodiesel, el biogás, el bioéter, biometanol. Pueden hacerse de aceites vegetales nuevos o usados y pueden mezclarse con o sustituir los combustibles en base a petróleo (AIE, 2007).

Los combustibles también son clasificados por su estado; pueden ser líquidos ó gaseosos, éstos son derivados del petróleo crudo y gas natural tales como las gasolinas, diésel, combustóleo, gasóleo, gas licuado del petróleo, butano, propano, metano, isobutano, propileno o sus combinaciones. Los combustibles también pueden ser sólidos, éstos son las variaciones de carbón mineral y coque de petróleo cuyo contenido en carbono varía del 10 al 90% en peso (SIE, 2017).

En términos de emisiones de contaminantes atmosféricos, el grado y composición del combustible es uno de los elementos más importantes a considerar, además del tipo y tamaño de quemador, prácticas de quemado y el nivel de mantenimiento de los equipos. Las emisiones a la atmósfera por el uso de combustibles son: NO_x , SO_x , partículas suspendidas totales (PST), compuestos orgánicos volátiles (COVs), compuestos metálicos como mercurio (Hg) y gases de efecto invernadero como dióxido de carbono (CO_2), óxido nitroso (N_2O) y metano (CH_4) (US EPA, AP-42, 2016).

En la Figura 2.2 se muestra la proporción de contaminantes emitidos durante la generación de electricidad a partir de la quema de combustibles fósiles, tomando como valor de referencia al carbón (es decir, se le asigna un valor de 100%) y con la finalidad de mostrar emisiones relativas generadas, en cualquier central de vapor en Norteamérica. En esta estimación, “carbón” es un carbón subbituminoso, “combustóleo” es el aceite combustible residual o “fuel oil” núm. 6 y “gas” es gas natural. Las emisiones son previas al proceso de control de poscombustión y son para calderas de quemadores tangenciales (>100 millones BTU/hr). Como se observa, el gas natural es el combustible que genera emisiones brutas considerablemente menores al carbón y al combustóleo, esto es por su bajo contenido en carbono, nitrógeno, azufre y otros componentes.

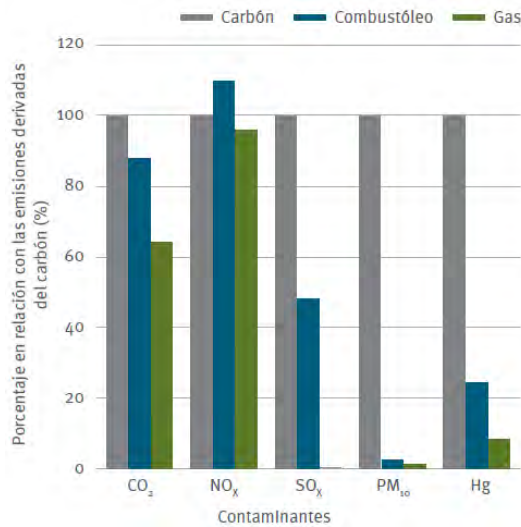


Figura 2.2. Emisiones relativas de contaminantes durante la generación eléctrica a partir de combustibles fósiles

Fuente: US EPA, 1998a; US EPA, 1998b; US EPA, 1998c

Los combustibles utilizados en la CTFPR son:

- **Combustóleo.** Es un aceite combustible residual derivado de la destilación del petróleo crudo, es el combustible líquido más utilizado para la generación de electricidad. Está compuesto por moléculas con más de 20 átomos de carbono, es una sustancia de color negro, viscosa e insoluble en agua (PEMEX, 2017a).

En el proceso de destilación del crudo, se obtienen dos principales categorías de aceites combustibles, llamados *fuel oil* y clasificados por grados según su punto de ebullición, composición y uso: los “fuel oil” destilados o ligeros (No. 1, 2 y 3) encontrados en el diésel y los “fuel oil” residuales o pesados (No. 5 y 6) encontrados en el combustóleo. El No. 4 es una mezcla de diésel y combustóleo (AWMA, 1992; Cunningham *et al.*, 2008).

El término combustóleo suele usarse (especialmente en México) para hacer referencia a los aceites combustibles pesados, sobre todo el No. 6 (CCA, 2011). Está constituido en por ciento peso de las siguientes composiciones: carbón (84 a 87%), hidrógeno (10 a 14%), oxígeno y nitrógeno (1.8 a 2.6%), azufre (2.5 a 4%) y pequeñas cantidades de vanadio, níquel y sodio (Sandoval, 1998).

El combustóleo utilizado en la CT de interés contiene: 83.7% de carbono, 10.18% de hidrógeno, 1.92% de oxígeno y nitrógeno, 4.04% de azufre y 0.059% de cenizas (Hernández, 2014).

- **Gas natural.** Es una mezcla de hidrocarburos simples que se encuentra en estado gaseoso, en condiciones normales de presión y temperatura. El gas natural comercial está compuesto mayoritariamente de metano (85-90% mol), que es la molécula más simple de los hidrocarburos. Además contiene etano (9% mol), propano (3% mol), butano, etilmercaptano y algunos gases inertes como nitrógeno, helio y dióxido de carbono, así como trazas de ácido sulfhídrico, agua y azufre (PEMEX, 2000; PEMEX 2017b).

La CTFPR hace uso de gas natural para el arranque de los generadores de vapor, así como para los equipos de las unidades de CC; del mismo modo debido a su conversión a tecnología dual en años recientes, es usado como combustible fósil alternativo al combustóleo. El gas natural utilizado por esta central tiene el siguiente contenido en porcentaje mol: 89% metano, 8.9% etano, 1.2% propano, 0.1% butano y 3.5 ppm de azufre (Hernández, 2014).

2.4. Centrales termoeléctricas en México

Las centrales termoeléctricas (CT) se clasifican de acuerdo al combustible que utilizan para la producción de vapor, siendo los más importantes combustóleo y gas natural.

El gas natural ha cobrado especial importancia por su uso intensivo en los ciclos combinados, tendencia que se ha acelerado con el auge de este combustible en los EUA. Adicionalmente, por restricciones ecológicas, se ha incrementado su utilización en las termoeléctricas convencionales (TC) ubicadas en las grandes ciudades, por lo cual el empleo del combustóleo disminuye rápidamente.

El combustóleo se emplea esencialmente en las TC y de combustión interna de nueva tecnología. Para facilitar el suministro de este combustible, las centrales se localizan cerca de los puertos o en la proximidad de las refinerías. En el caso de México, los puertos cercanos a las centrales son Tuxpan, Manzanillo, Mazatlán, Puerto Libertad, Guaymas, Topolobampo y La Paz; por su parte, las refinerías próximas a las centrales son de Petróleos Mexicanos, como Tula, Salamanca, Altamira y Poza Rica (CFE, 2015b).

En México existen 60 centrales (TC) cuya capacidad instalada total es de 12,594 MW, equivalente al 17% del total nacional y que en 2016 generaron 40,343 GW de energía, lo que representa el 13% del total de electricidad generada. El 66.5% de la capacidad instalada y el 72% de electricidad generada en TC se concentra en estados de Veracruz, Hidalgo, Colima, Sonora, Tamaulipas y Sinaloa (SENER, 2017b).

Capítulo 2. Antecedentes

En la Tabla 2.1 se presentan algunas de las características de las CT de CFE que estuvieron en operación durante el 2016.

Tabla 2.1. Centrales termoeléctricas en México (2016)

Central Termoeléctrica	Estado	No. de unidades	Capacidad MW ⁽¹⁾	Generación GWh ⁽²⁾	Factor planta (%) ⁽³⁾	Tecnología	Combustible
Tuxpan (Pte. Adolfo López Mateos)	Veracruz	6	2,100	6,696	36.4	TC, TG	COM, GAS
Tula (Francisco Pérez Ríos)*	Hidalgo	11	2,095	10,570	57.4	TC, CC	COM, GAS
Manzanillo I (Manuel Álvarez Moreno)	Colima	8	1,454	10,412	81.5	TC, TG	COM, GAS
Manzanillo II	Colima	4	1,300	3,017	26.4	TC, TG	COM, GAS
Presidente Juárez	Baja California	10	1,063	5,407	57.9	TC, CC	COM, GAS
Valle de México	México	7	999	4,368	49.8	TC, CC	GAS
Villa de Reyes	San Luis Potosí	2	700	2,177	35.4	TC	COM
Puerto Libertad	Sonora	4	632	3,344	60.2	TC	COM
El Encino	Chihuahua	5	619	4,846	89.1	CC	GAS
Mazatlán II	Sinaloa	3	616	2,431	44.9	TC	COM
El Sauz	Querétaro	8	591	3,594	69.2	CC	GAS
Salamanca	Guanajuato	2	550	578	12.0	TC	COM, GAS
Samalayuca II	Chihuahua	6	522	4,271	93.2	TC, CC	COM, GAS
Río Bravo	Tamaulipas	4	511	2,105	46.9	TC, CC	COM, GAS
Altamira	Tamaulipas	4	500	2,330	53.1	TC	COM, GAS
Guaymas II	Sonora	4	484	1,403	33.0	TC	COM
Huinalá II	Nuevo León	2	471	3,077	74.3	CC, TG	GAS
Dos Bocas	Veracruz	6	452	1,389	35.0	CC	GAS
Agua Prieta II	Sonora	3	410	1,418	39.3	CC	GAS
San Lorenzo Potencia	Puebla	3	382	3,064	91.3	CC	GAS
Huinalá	Nuevo León	5	378	1,997	60.2	CC, TG	GAS
Topolobampo II	Sinaloa	3	320	312	11.1	TC	COM
Lerdo	Durango	2	320	971	34.5	TC	COM

TC. Termoeléctrica convencional, **CC.** Ciclo combinado, **TG.** Turbogas, **COM.** Combustóleo, **GAS.** Gas natural.
 * Incluye 6 unidades de CC con una capacidad conjunta de 489 MW
 (3) Calculado con base en su operación continua durante los 365 días del año.

Fuente: CFE, 2015b; SENER, 2017a

(1) La *capacidad efectiva instalada* (capacidad efectiva de generación), es la potencia de una unidad generadora determinada por las condiciones ambientales y el estado físico de las instalaciones y corresponde a la capacidad de placa corregida por efecto de degradaciones permanentes, debido al deterioro o desgaste de los equipos que forman parte de la unidad (CFE, 2015a).

(2) La *generación bruta* es la energía que se produce en las centrales eléctricas, medida a la salida de los generadores e incluye el consumo para usos propios de la central (CFE, 2015a).

(3) El *factor de planta* es un indicador del grado de utilización de la capacidad de unidades generadoras en un periodo específico. Se calcula como el cociente entre la generación media de la unidad y su capacidad efectiva instalada (SENER, 2016).

2.4.1. Conversión de centrales a tecnología de combustión dual

Entre 2014 y 2016, la CFE convirtió 17 unidades de siete centrales de generación termoeléctrica (Figura 2.3) a combustión dual, para que, además de emplear combustóleo, puedan utilizar gas natural. Estas conversiones tienen como objetivo principal reducir y sustituir progresivamente el uso de combustóleo para que los costos en los procesos de generación de energía eléctrica sean menores ya que el combustóleo es un combustible cuyo precio y emisiones al ambiente son altos en comparación con el gas natural (CFE, 2016).



Figura 2.3. Centrales termoeléctricas de conversión a combustión dual

Fuente: CFE, 2016

De 2012 a 2016, la CFE redujo en 44% su consumo de combustóleo en la generación de energía eléctrica y aumentó en 35% el consumo de gas natural como se muestra en la Figura 2.4, en la cual se observa el consumo de ambos combustibles en miles de barriles por año para el combustóleo y en millones de pies cúbicos para el gas natural (SENER, 2017a). Existe una clara tendencia de la disminución del uso del combustóleo y el aumento de gas natural lo que ha llevado a un crecimiento anual del 6.2% en la generación de energía eléctrica bruta por gas natural (SENER, 2016).

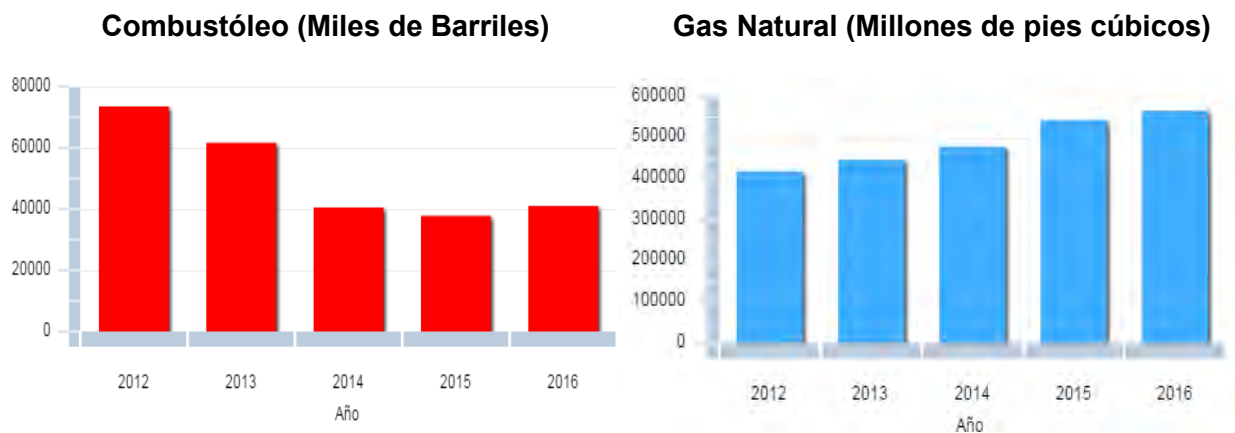


Figura 2.4. Consumo de combustóleo y gas natural por CFE del 2012 al 2016

Fuente: SENER, 2017a

De acuerdo con la evolución esperada de la generación de energía eléctrica, se espera que en los próximos quince años, el consumo de combustóleo disminuya a una tasa media de 18% anual y el consumo de gas natural incremente a una tasa promedio de 2.7% al año (SENER, 2017b). Esto se debe en gran medida al retiro de capacidad instalada de TC, la operación de gasoductos, centrales convertidas a combustión dual y a la incorporación de centrales de CC.

2.5. Normatividad

En México, la LGEEPA establece las bases para la preservación, restauración y mejoramiento del ambiente, en el territorio nacional y las zonas sobre las que la nación ejerce su soberanía y jurisdicción.

De acuerdo al reglamento derivado de esta ley, dentro del título de protección al ambiente en materia de prevención y control de la contaminación de la atmósfera, el artículo 110 estipula que para el aseguramiento de una calidad del aire satisfactoria para el bienestar de la población y el equilibrio ecológico, las emisiones de contaminantes de la atmósfera, ya sea de fuentes artificiales, naturales, fijas o móviles, deben ser reducidas y controladas; en tanto que el artículo 111 señala que para llevar el control y reducción de la contaminación, la Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL), expedirá en coordinación con la Secretaría de Salud (SSA), las Normas Oficiales Mexicanas (NOMs) con base en los valores de concentración máxima permisible (normas de inmisión) para la salud pública de contaminantes en el ambiente (DOF, 2015) y sus respectivos niveles permisibles de emisión (normas de emisión) (SSA, 2010).

2.5.1. Normas Oficiales Mexicanas

Las *Normas Oficiales Mexicanas* (NOMs) son regulaciones de carácter obligatorio que regulan los productos, procesos o servicios, cuando constituyen un riesgo para las personas, animales, vegetales y el ambiente en general. En términos de evaluación de calidad del aire, fijan la concentración a la cual un contaminante criterio no debe excederse en un periodo dado y con una frecuencia determinada (NOMs de salud ambiental), así como los procedimientos para su medición (NOMs técnicas).

2.5.1.1. NOM de salud ambiental para SO₂

En México el artículo 116 de la Ley General de Salud (SSA, 1984) señala que las autoridades sanitarias establecerán las normas, tomarán las medidas y realizarán las actividades a que se refiere esta ley, tendientes a la protección humana ante los riesgos y daños dependientes de las condiciones del ambiente. Tomando como base este artículo, la SSA es la encargada de emitir desde 1994, las *NOMs de salud ambiental* que establecen los límites permisibles para los contaminantes criterio en el aire ambiente.

En cuanto a las normas internacionales, a nivel mundial existen estándares de calidad del aire donde se establecen los niveles para garantizar la salud humana. En países como Estados Unidos, la Ley del Aire Limpio (“Clean Air Act”) establece que la EPA, a través de su Comité Científico Asesor para el Aire Limpio, propondrá los Estándares de Calidad del Aire Ambiente (NAAQS, por sus siglas en inglés) (40 CFR part 50), para contaminantes que dañan la salud humana y del ambiente, identificando dos tipos de estándares: los primarios que garantizan protección a la salud pública y los secundarios protección del bienestar en general como protección contra la visibilidad y el daño a animales, cultivos, vegetales y construcciones.

Por otra parte, la OMS periódicamente realiza una evaluación de la evidencia científica sobre la contaminación atmosférica y sus daños en la salud, a partir de cuyos resultados emite recomendaciones sobre la calidad del aire. Los valores de concentración de los contaminantes recomendados por la OMS, tienen el propósito de establecer un límite con un riesgo mínimo para la salud humana, estos generalmente son menores a los encontrados en ambientes urbanos típicos. Esta situación ha dificultado a los países interesados adoptar estos valores guía como estándares de calidad del aire.

Desde el 2003, el contaminante de interés para este estudio cumple con la NOM, a pesar de que en el 2010 se publicó su revisión más reciente, donde se redujo los valores de los límites para los indicadores de promedio de 24 horas y promedio anual. En cuanto a los estándares internacionales, los niveles del contaminante superan los indicadores de la US EPA y las recomendaciones de la OMS.

En la Tabla 2.2 se muestran los límites máximos permisibles a nivel nacional e internacional para el SO₂.

Tabla 2.2. Normas de salud ambiental para SO₂

	Norma	Límite permisible		Frecuencia
		ppm	µg/m ³⁽¹⁾	
NOM	NOM-022-SSA1-2010	0.11	288	Promedio en 24 horas
		0.025	66	Promedio anual
		0.200	524	Promedio móvil en 8 horas
OMS	Guía de Calidad del Aire (GCA) de la OMS	0.008	20 ⁽²⁾	Promedio en 24 horas
		0.19	500	Promedio en 10 min.
US EPA	Estándar primario: 40 CFR part 50, section 50.4	0.075	197	Promedio trianual, percentil 99 de la máxima concentración horaria
	Estándar secundario: 40 CFR part 50, section 50.5	0.5	1311	Promedio en 3 horas
(1) Concentración a condiciones estándar, es decir, 25°C y 1 atm.				
(2) Concentración a 18°C y 584 mmHg.				

Fuente: OMS, 2006; SSA, 2010; US EPA, 2010; US EPA, 2012

2.5.1.2. NOM para la medición de SO₂

Las *NOM técnicas* definen los métodos de medición recomendados para el monitoreo de los contaminantes criterio. Estos métodos de medición pueden ser de referencia o equivalentes. Generalmente los métodos de medición propuestos por la NOM tienen una correspondencia con los designados por la US EPA, por lo que cuando no existe una NOM para un contaminante criterio, se utiliza la recomendación de la US EPA.

Para medir la calidad del aire ambiental o las emisiones puntuales de contaminantes, se debe especificar el método de medición. Un método especificado como estándar se denomina método de referencia, en tanto que un método equivalente proporciona resultados comparables con el método de referencia; la equivalencia se determina aplicando pruebas estándar a la característica o principio de operación o funcionamiento del instrumento (Bravo *et al.*, 1992).

La NOM técnica vigente de SO₂ es la siguiente:

Norma de referencia	Método de referencia	Método equivalente
NOM-038-SEMARNAT-1993	Pararosanilina (Método fotométrico)	Fluorescencia ultravioleta (Método espectrofotométrico)

Fuente: SEMARNAT, 1993

2.5.1.3. Normas de emisión

Las *normas de emisión* son las NOMs que establecen los límites máximos permisibles de descarga o de emisión de contaminantes a la atmósfera. Están referidos al tipo de industria o proceso y pueden estar relacionadas con la unidad de alimentación, así como el tipo de combustible.

Para la regulación de CT y las características de los combustibles utilizados en la CTFPR, que son tanto gas natural como combustóleo, las NOMs que existen son las siguientes:

NOM-085-SEMARNAT-2011 (Norma publicada en el Diario Oficial de la Federación (DOF) por primera vez en diciembre de 1994 y con última modificación y publicación en febrero de 2012). – *Contaminación atmosférica – Niveles máximos permisibles de emisión de los equipos de combustión de calentamiento indirecto y su medición* (SEMARNAT, 2011).

Esta norma establece los niveles máximos permisibles de emisión (NMPE) de SO₂ y otros contaminantes como CO y NO_x, así como de humo y partículas emitidos en los equipos de combustión de calentamiento indirecto con combustibles convencionales o sus mezclas, con el fin de proteger la calidad del aire. Los NMPE se establecen en función de la capacidad térmica nominal del equipo, del tipo de combustible, de la ubicación de la fuente fija y de las condiciones de referencia.

Las fuentes fijas pueden estar distribuidas en tres regiones de acuerdo a esta norma, las cuales son: Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), Zona Crítica (ZC) o Resto del País (RP).

Se consideran ZC a la Zona Metropolitana de Guadalajara, Zona Metropolitana de Monterrey, corredor industrial Coatzacoalcos, corredor Irapuato-Celaya-Salamanca, corredor industrial Tula-Vito-Asasco, corredor industrial de Tampico-Madero-Altamira, el municipio de Ciudad Juárez en Chihuahua y el área integrada por los municipios de Tijuana y Rosarito en Baja California. La CTFPR se encuentra ubicada dentro de la ZC del corredor industrial Tula-Vito-Asasco.

La Tabla 2.3 presenta los NMPE que deben cumplir las calderas, generadores de vapor, quemadores de aceite térmico u otro tipo de fluidos, hornos y secadores de calentamiento indirecto en una ZC. Dado que los equipos pertenecientes a la CTFPR son equipos existentes a la entrada en vigor de la NOM, es decir, tienen más de 30 años de antigüedad y son de gran capacidad, solo se presentan los NMPE para el SO₂, emitido en equipos con una capacidad mayor de 106 GJ/h, tanto para combustibles sólidos y líquidos como gaseosos.

Tabla 2.3. Niveles máximos permisibles de emisión para SO₂

Capacidad térmica nominal del equipo (GJ/h)	Tipo de combustible	SO ₂ (ppm _v) ⁽¹⁾⁽²⁾
Mayor de 106 a 530	Sólido y líquido	1100
	Gaseoso	NA
Mayor de 530	Sólido y líquido	600
	Gaseoso	NA

1 ppm_v de SO₂ a 25°C y 1 atm equivale a 2620 µg/m³.
NA. No Aplica.
(1) Concentración correspondiente al empleo de combustible de 0.5, 2 y 4% de S en peso.
(2) Los límites se establecen como concentraciones en volumen y base seca, en condiciones de referencia de 25°C, 101325 Pa (1 atm) y 5% de O₂.

Fuente: SEMARNAT, 2011

La Tabla 2.4 presenta el método y frecuencia con la que se deben realizar los muestreos en la fuente de emisión para el SO₂ para cumplir con la normatividad vigente.

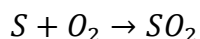
Tabla 2.4. Método y frecuencia de medición de SO₂ para la verificación del cumplimiento de la norma

Capacidad térmica nominal del equipo (GJ/h)	Tipo de combustible	SO ₂ (ppm _v)
Mayor de 106 a 530	Sólido y líquido	Método. Factores de emisión, análisis en chimenea o análisis químico del combustible. Frecuencia: Semestral
	Gaseoso	NA
Mayor de 530 a 1000	Sólido y líquido	Método: Factores de emisión Frecuencia: Semestral
	Gaseoso	NA
NA. No Aplica.		

Fuente: SEMARNAT, 2011

En la norma también se indican las propiedades de los diferentes combustibles utilizados por fuentes fijas. En la Tabla 2.5 se presentan las características solo del gas natural y del combustóleo pesado, por ser los combustibles utilizados en la CTFPR. Cabe destacar que el FE mostrado en esta tabla, se calculó de manera estequiométrica.

La *estequiometría* es parte de la química encargada del estudio de las relaciones cuantitativas entre las sustancias que intervienen en una reacción química (Correa, 2004). La reacción de transformación para el cálculo del factor de emisión, considerando un 100% de conversión de azufre es:



A partir de esta reacción, el cálculo para la obtención del FE mostrado en la Tabla 2.5 a partir del porcentaje de azufre en el combustóleo pesado es el siguiente:

$$\frac{4 \text{ kg-S}}{100 \text{ kg combustóleo}} * \frac{1 \text{ kmol-S}}{32 \text{ kg-S}} * \frac{1 \text{ kmol-SO}_2}{1 \text{ kmol-S}} * \frac{64 \text{ kg-SO}_2}{1 \text{ kmol-SO}_2} * \frac{1000 \text{ g SO}_2}{1 \text{ kg-SO}_2} = 80 \frac{\text{g SO}_2}{\text{kg combustóleo}}$$

Tabla 2.5. Propiedades de los combustibles utilizados en la CTFPR

Combustible	Poder calorífico (MJ/kg)	Peso específico (kg/L)	Componentes principales (%)			FE SO ₂ (g/kg)	F _d (m ³ /GJ)
			S	N ₂	Agua		
Gas natural	52	-	-	-	-	0	326
Combustóleo pesado	42	1.000 ⁽¹⁾	4.0 ⁽²⁾	Informar ⁽³⁾	1.0 ⁽²⁾	80*	339

F_d. "Dry F Factor". Volumen de productos de la combustión por GJ de energía en el combustible, m³/GJ, en condiciones de referencia: base seca, 25°C, 1 atm.
 FE SO₂. Factor de emisión de SO₂ del combustible, g/kg.
 (1) Hoja técnica de especificaciones de PEMEX-Refinación (PEMEX, 1998).
 (2) NOM-086-SEMARNAT-SENER-SCFI-2005 sustituida por la NOM-EM-005-CRE-2015.
 (3) Informar el contenido de nitrógeno del combustóleo utilizado.
 * Obtenido a partir del 4% en masa de azufre.

Fuente: SEMARNAT, 2011

NOM-EM-005-CRE-2015 (Norma con última modificación y publicación en el DOF en octubre de 2015). *Especificaciones de calidad de los petrolíferos* (CRE, 2015).

Esta norma establece las especificaciones de calidad que deben cumplir los petrolíferos (productos que se obtienen de la refinación del petróleo o del procesamiento del gas natural y que derivan directamente de hidrocarburos), en cada etapa de la cadena de producción y suministro, en territorio nacional.

Surge a partir de que la Comisión Reguladora de Energía (CRE) aprueba una NOM Emergente (NOM-EM) que sustituye a la NOM-086-SEMARNAT-SENER-SCFI-2005, en la que se establecen las especificaciones de los combustibles fósiles líquidos y gaseosos para la protección ambiental (SEMARNAT-SENER-SCFI, 2005).

Anteriormente, combustibles industriales líquidos con un porcentaje de hasta 4% de azufre en peso eran permitidos únicamente en procesos de combustión a fuego directo. A partir de la modificación de la norma en el 2015, se prohibió el uso de combustibles de uso industrial con un contenido de azufre mayor de 2% en peso, sin importar el proceso industrial para corredores industriales y centros de población en las ZC, así como un límite aplicable de 0.05% en peso de azufre en la ZMCM. Para el resto del país (toda extensión territorial excluyendo las ZC y la ZMCM), el límite máximo aplicable de contenido de azufre permanece en 4%.

En la Tabla 2.6 se presentan las principales características que debe cumplir el combustóleo como combustible industrial líquido.

Tabla 2.6. Especificaciones del combustóleo industrial en procesos de combustión a fuego directo

Combustible			Combustóleo
Propiedad	Unidad	Método de prueba ⁽¹⁾	
Temperatura de inflamación	°C	Temperatura de inflamabilidad: Prueba Pensky-Martens, de copa cerrada (ASTM D 93, ASTM D 7094, ASTM D 3828)	60.0 mínimo
Temperatura de escurrimiento	°C	Punto de fluidez de productos (ASTM D 97)	-
Viscosidad cinemática	cSt	Viscosidad cinemática de líquidos transparentes y opacos. Cálculo de viscosidad dinámica (ASTM D 445, ASTM D 88, ASTM D 2161)	636.0 a 1166 (a 50°C)
Azufre	% masa	Azufre en productos de petróleo por espectroscopía de fluorescencia de rayos X por dispersión de energía (ASTM D 4294) Determinación de azufre total en hidrocarburos ligeros (ASTM D 5453, ASTM D 7220, ASTM D 2622, ASTM D 7039)	4.0 ⁽²⁾
Nitrógeno	ppm	Nitrógeno total en aceites lubricantes y en combustibles líquidos (ASTM D 3228)	Informar ⁽³⁾
Poder calorífico	MJ/kg	Estimación de calor neto y bruto de combustión de combustibles diésel y para quemadores (ASTM D 4868, ASTM D 4809)	40.0 mínimo

(1) Para los métodos ASTM D consultar la parte bibliográfica de la NOM-EE-005.
 (2) Para los corredores industriales y centros de población en las ZC, se dispondrá de combustible con un contenido máximo de 2% en masa.
 (3) Informar el contenido de nitrógeno del combustóleo utilizado.

Fuente: CRE, 2015

En el caso del gas natural existe una norma que indica las características del combustible.

NOM-001-SECRE-2010 (Norma publicada en el DOF por primera vez en marzo de 2004 y con última modificación y publicación en marzo de 2010). *Especificaciones del gas natural* (SECRE, 2010).

Esta norma tiene como finalidad establecer las especificaciones que debe cumplir el gas natural que se maneje en los sistemas de transporte, almacenamiento y distribución de gas natural, para preservar la seguridad de las personas, medio ambiente e instalaciones de los permisionarios y de los usuarios.

Las principales características del gas natural se presentan en la Tabla 2.7:

Tabla 2.7. Especificaciones del gas natural

Propiedad	Unidades	Gas Natural
Metano (CH ₄)	% vol	84.0 mínimo
Oxígeno (O ₂)	% vol	0.2 máximo
Dióxido de carbono (CO ₂)	% vol	3.0 máximo
Nitrógeno (N ₂)	% vol	4.0 máximo
Total de inertes (CO ₂ y N ₂)	% vol	4.0 máximo
Etano (C ₂ H ₆)	% vol	11.0 máximo
Temperatura de rocío de hidrocarburos	°C	-2 máximo
Humedad (H ₂ O)	mg/m ³	110.0 máximo
Poder calorífico superior	MJ/m ³	37.3-43.6
Ácido sulfhídrico (H ₂ S)	mg/m ³	6.0 máximo
Azufre (S)	mg/m ³	150.0 máximo

Fuente: SECRE, 2010

2.5.2. Normas Mexicanas

Las *Normas Mexicanas* (NMX) son documentos técnicos que permiten establecer especificaciones de calidad sobre procesos, productos, servicios, sistemas, métodos de prueba, competencias, etc. Su aplicación es voluntaria y sirven de guía para llevar a cabo los muestreos en fuente.

En la Tabla 2.8 se muestran las NMX vigentes para el SO₂ y para los gases en general, así como métodos de prueba que ha establecido la US EPA para su muestreo en fuente.

Tabla 2.8. Normas mexicanas y métodos de prueba de la US EPA que se aplican para llevar a cabo los muestreos en fuentes de emisiones a la atmósfera

Parámetro	Norma/Método de prueba	Método equivalente/ Observaciones
SO ₂	Estimación a través de factores de emisión o balance de masas.	Equipos menores de 1000 GJ/h
	NMX-AA-055-1979. Contaminación atmosférica – Fuentes fijas – <i>Determinación de bióxido de azufre en gases que fluyen por un conducto.</i>	Vía húmedo
	NMX-AA-056-1980. Contaminación atmosférica – Fuentes fijas – <i>Determinación de bióxido de azufre y neblinas de ácido sulfúrico en los gases que fluyen por un conducto.</i>	Método 6 y 8 de la US EPA. Consultar: https://www.epa.gov/emc/emc-promulgated-test-methods
	<i>Determinación de SO₂ por métodos instrumentales.</i> Método 6c de la US EPA para SO ₂ . Consultar: https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-06/documents/method6c.pdf	UV o infrarrojo no dispersivo o fluorescente.
	<i>Especificaciones de funcionamiento de Sistema de Monitoreo Continuo de Emisiones (SMCE) para SO₂ y NO_x.</i> Consultar: https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-07/documents/ps-2.pdf	Equipo mayor de 1000 GJ/h
Flujo de gases en chimenea	NMX-AA-009-SCFI-1993. Contaminación atmosférica – Fuentes fijas – <i>Determinación de flujo de gases en un conducto por medio del Tubo de Pitot.</i>	Método de tubo de Pitot.
Humedad de gases	NMX-AA-054-1978. Contaminación atmosférica – <i>Determinación del contenido de humedad en los gases que fluyen por un conducto</i> – Método gravimétrico. Método 4 de la US EPA. Consultar: https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-06/documents/m-04.pdf	Método gravimétrico

Fuente: SEMARNAT, 2011

2.6. Emisiones de SO₂ a la atmósfera en centrales termoeléctricas de México

Los *inventarios de emisiones* son instrumentos que permiten identificar las fuentes generadoras de contaminantes, así como su aporte y localización, con la finalidad de ser una herramienta para la toma de decisiones en materia de calidad del aire y en la implementación y evaluación de medidas de reducción de contaminantes atmosféricos (SEDEMA, 2014a)

La Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), a través de la Subsecretaría de Gestión para la Protección Ambiental, elaboró el Inventario Nacional de Emisiones (INEM) de 1999, 2005 y 2008, estos inventarios presentan las emisiones generadas en las 32 entidades federativas y en todos los municipios del país, tanto de contaminantes criterio como de precursores de contaminantes secundarios que se forman en la atmósfera. El INEM muestra la información de emisiones organizada por tipos de fuente. Los tipos de fuente que descargan sus emisiones a la atmósfera son (SEMARNAT *et al.*, 2005; SEMARNAT, 2017):

- **Fuentes fijas.** Se les conoce como fuentes puntuales e incluye a las instalaciones industriales mayores que generen contaminantes en grandes cantidades a la atmósfera.
- **Fuentes de área.** Instalaciones que son pequeñas, numerosas y dispersas que individualmente emiten pequeñas cantidades de contaminantes, pero que en conjunto son significativas. Incluye actividades comerciales, domésticas y de servicios, así como fuentes difusas.
- **Fuentes móviles.** Incluye cualquier transporte que circule por carreteras (vehículos automotores) y no carreteras (maquinaria agrícola, de construcción, embarcaciones, locomotoras, despegue y aterrizaje de aeronaves).
- **Fuentes naturales.** Cualquier fuente o proceso natural en la vegetación, cuerpos de agua y suelos que genere emisiones (emisiones biogénicas).

Por lo que respecta a la estimación de emisiones del INEM, está basada en las metodologías desarrolladas por la US EPA, adaptas a las condiciones en México. La estimación se basa en la intensidad con que se realiza una operación (dato de actividad) y en una cantidad de contaminante generada por cada unidad de esa actividad (factor de emisión). Algunas instituciones que han ayudado a su elaboración

son la Asociación de Gobernadores del Oeste (WGA), la Comisión para la Cooperación Ambiental (CCA) de América del Norte y el Instituto Nacional de Ecología (INE).

Relativo a las emisiones por categoría o sector industrial, el proceso de generación de electricidad contribuye en gran medida al total de las emisiones de los contaminantes del país. En el año 2002, de las emisiones generadas por las centrales eléctricas en América del Norte, se obtuvo que México dentro de la categoría de fuentes fijas en generación, transmisión y distribución de energía eléctrica, contribuyó en un 55% a las emisiones nacionales totales de SO₂ (Miller *et al.*, 2004). Por su parte, en años posteriores, de acuerdo al INEM 2008, las emisiones de SO₂ producidas por el mismo sector fueron de 1,053,028.61 de toneladas, lo que representó el 47% de las emisiones totales de SO₂, reflejando una disminución del porcentaje de la emisión del contaminante del 2002 al 2008 (SEMARNAT *et al.*, 2008).

En las Tablas 2.9 y 2.10 se muestran las CT que presentan la mayor generación de electricidad junto con su índice de emisiones (unidades de masa del contaminante por energía generada) para el contaminante de estudio durante el año 2002 y 2005, respectivamente. El índice de emisiones está estrechamente relacionado con el tipo de control que tienen las centrales o las prácticas de operación que llevan a cabo, es por esto que no necesariamente las centrales que presenten las mayores emisiones o la mayor generación de electricidad, tendrán el mayor índice de emisiones.

Tabla 2.9. Emisiones e índice de emisiones de SO₂ para las centrales termoeléctricas que consumen combustóleo en México (2002)

Central Termoeléctrica	Generación (MWh)	Emisiones de SO ₂ (Ton/año)	Índice de emisiones de SO ₂ (Kg/MWh)
Tuxpan (Pte. Adolfo López Mateos)	15,030,690	253,430	16.86
Tula (Francisco Pérez Ríos)	9,734,170	158,326	16.26
Manzanillo I (Manuel Álvarez Moreno)	6,449,140	107,032	16.60
Altamira	4,655,850	86,451	18.47
Puerto Libertad	3,349,740	61,159	18.26
Mazatlán II	3,284,120	61,155	18.62
Villa de Reyes	2,925,990	45,727	15.63

Fuente: Miller *et al.*, 2004

Tabla 2.10. Emisiones e índice de emisiones de SO₂ para las centrales termoeléctricas que consumen combustóleo en México (2005)

Central Termoeléctrica	Generación (MWh)	Emisiones de SO ₂ (Ton/año)	Índice de emisiones de SO ₂ (Kg/MWh)
Tuxpan (Pte. Adolfo López Mateos)	10,547,560	190,123	18.03
Manzanillo I (Manuel Álvarez Moreno)	8,783,848	175,279	19.96
Tula (Francisco Pérez Ríos)	8,741,955	132,374	15.14
Altamira	3,776,214	69,479	18.40
Mazatlán II	3,693,831	65,434	17.72
Villa de Reyes	3,243,039	65,205	20.11
Puerto Libertad	3,517,521	62,713	17.83

Fuente: CCA, 2011

2.7. Emisiones a la atmósfera en la CTFPR y en la ZMCM

Además de los inventarios nacionales, existen los *inventarios por entidad*, los cuales no solo permiten conocer las fuentes específicas generadoras de emisiones de una región, sino también el aporte de cada una de ellas a la contaminación del aire, con la finalidad de generar propuestas de reducción de contaminantes en beneficio de la población.

Los inventarios de emisiones por entidad, incorporan las metodologías establecidas por los Manuales del Programa de Inventarios de Emisiones de México (Radian, 1997), así como en las propuestas por el “Air Resources Board” de la Agencia de Protección Ambiental de California y de la US EPA.

De acuerdo al Inventario de Emisiones de Hidalgo para el año 2008, las emisiones de SO₂ por generación eléctrica fueron 113,391 toneladas anuales, las cuales representan el 11% de las emisiones nacionales, lo anterior por la presencia de la CTFPR en Tula-Tepeji que utiliza como combustibles combustóleo pesado y gas natural (SEMARNATH, 2014). Ese mismo año, el municipio de Tuxpan registró 97,095 toneladas de SO₂ (SEMARNAT *et al.*, 2008), por lo que la CTFPR pasó a ocupar el segundo lugar a nivel nacional en emisiones del contaminante.

Conforme al Inventario de Emisiones de la ZMCM del año 2008, las emisiones de SO₂ provenientes de esta región, en el sector de generación de energía eléctrica fueron de 15 toneladas anuales y de 6,704 considerando todas las fuentes de emisión contaminantes del área metropolitana (SEDEMA, 2010).

Comparando las emisiones de Tula y la ZMCM para el año 2008, se tiene como resultado que la CTFPR emitió 17 veces más SO₂ que lo que emiten todas las fuentes del área metropolitana, lo cual significa que las concentraciones del contaminante registradas en los informes de calidad del aire de la metrópolis son producto principal de fuentes externas a la ZMCM.

Respecto al inventario de emisiones más actual con el que cuenta la ZMCM (2014), las emisiones totales de SO₂ han disminuido hasta 1,696 toneladas anuales, de las cuales 15 toneladas le pertenecen al sector de generación de electricidad (SEDEMA, 2014a). La razón principal de la disminución de las emisiones del contaminante de estudio del 2008 al 2014 es debido a que en la última década el diésel y la gasolina que se ha consumido en el transporte de la zona metropolitana contienen bajas concentraciones de azufre (14 ppm en diésel y 15 ppm en gasolina, de acuerdo con PEMEX) y el diésel industrial tiene un contenido de azufre similar al empleado por el transporte, en consecuencia la concentración del SO₂ emitido por la actividad de la ciudad es baja (SEDEMA, 2016).

En cuanto a la contribución de SO₂ por el tipo de fuente, el 83.5% es aportado por la industria (fuentes fijas y de área) mientras que el 16.5% restante es atribuido al parque vehicular (fuentes móviles). Las fuentes naturales no presentaron emisiones en las categorías presentadas en el inventario (SEDEMA, 2014a).

2.7.1. Distribución espacial de SO₂ en la ZMCM

El SO₂ registra mayores concentraciones en el Estado de México que en la Ciudad de México, esto es debido a que sus municipios conurbados emiten en mayor parte el contaminante por la presencia de parques industriales e intenso tránsito vehicular.

Las mayores concentraciones se encuentran en las estaciones de monitoreo al Noroeste de la ZMCM, mientras que las menores se encuentran en las del Sureste. Estas estaciones se ven influenciadas por las emisiones de las industrias de los corredores industriales de Tlalnepantla, Naucalpan, Cuautitlán y Ecatepec. Si bien, la principal fuente de SO₂ son estos corredores, los registros de las estaciones y los inventarios de emisiones no explican los altos niveles del contaminante en la ciudad; es por esto que se ha sugerido la presencia de una fuente importante de SO₂ localizada fuera de la ZMCM, la cual es la región industrial de Tula-Tepeji, de acuerdo a lo reportado por algunos investigadores (Rivera, C. *et al.*, 2009; Kanda, I. *et al.*, 2014).

El corredor Tula-Tepeji es el que tiene la mayor contribución para SO_2 , ya que a pesar de encontrarse a poco más de 40 km de la región Noroeste de la ZMCM, sus emisiones son arrastradas por el viento, registrando la presencia de una pluma de contaminación que ingresa por el Noroeste (región de Tlalnepantla) de la ZMCM. Debido a que la Sierra de Guadalupe representa una barrera física que impide el libre paso del viento, en ocasiones la pluma también puede ingresar por el Noreste (región de Ecatepec) de la ZMCM. En ambos casos, el avance de la pluma continúa hacia el Centro y Sur de ciudad, diluyéndose gradualmente y contribuyendo en los sitios de esas regiones. Los promedios anuales en las estaciones de monitoreo del Norte de la metrópolis, pueden ser entre dos y cuatro veces mayores que los observados en los sitios del Sur (SEDEMA, 2016).

2.7.2. Distribución temporal de SO_2 en la ZMCM

Durante el día las concentraciones máximas se registran principalmente en la madrugada, cuando la altura de la capa de mezcla es mínima y el viento tiene una dirección predominantemente del Noroeste asociado a la contaminación proveniente del corredor industrial Tula-Tepeji. Las elevadas concentraciones del contaminante en horarios nocturnos sugieren el uso de combustibles con un contenido importante de azufre en el corredor. Los episodios de SO_2 asociados a las emisiones de este corredor se observan durante todo el año, cuando el flujo de viento se desplaza hacia el Sur, sin embargo, ocurren con mayor frecuencia durante el invierno cuando se registran los mayores valores de concentración del contaminante. En la temporada de lluvia disminuye la frecuencia e intensidad de los picos de concentración debido a que el SO_2 reacciona fácilmente con el agua (SEDEMA, 2016).

2.7.3. Tendencias de SO_2 en la ZMCM

El avance en la reducción de la contaminación en la ZMCM desde la década de los 90's es evidente, principalmente en los contaminantes de origen primario, en donde se han logrado disminuciones de hasta el 90%, esto a pesar del crecimiento y desarrollo ininterrumpido de la Ciudad de México y su área metropolitana. Estas tendencias reflejan el éxito de las políticas para el control de la contaminación del aire implementadas de manera continua desde esa década. En el caso del SO_2 , de 1991 a 1994, mostró un cambio abrupto de sus concentraciones en el aire. Las acciones realizadas durante esos años para disminuir su presencia en la atmósfera fueron (SEDEMA, 1995):

- Sustitución de combustóleo por gasóleo industrial en la ZMCM, con un nivel máximo de 2% de azufre.
- Cierre de la Refinería 18 de marzo.
- Uso de gas natural en dos plantas termoeléctricas del Valle de México y 365 grandes industrias.
- Distribución de diésel “Sin” a partir de octubre de 1993, con un contenido máximo de azufre de 0.05%.
- Venta e instalación de motores diésel para camiones modelo 1994.

En los últimos 15 años, la concentración promedio anual de SO_2 se ha reducido en un 75%, sin embargo se ha observado una sensible disminución en la tasa de cambio de este contaminante, es decir, los niveles de contaminación no disminuyen con la misma velocidad que en la década de los 90's (SEDEMA, 2016).

En la Figura 2.5 se muestra la serie de tiempo de la concentración promedio mensual de SO_2 de 1986 a 2015, en ella se observa la notoria disminución del contaminante en la década de los 90's y la condición de estabilidad que ha alcanzado en los últimos 10 años. La línea amarilla corresponde al promedio mensual, la región marcada en color gris indica la desviación estándar.

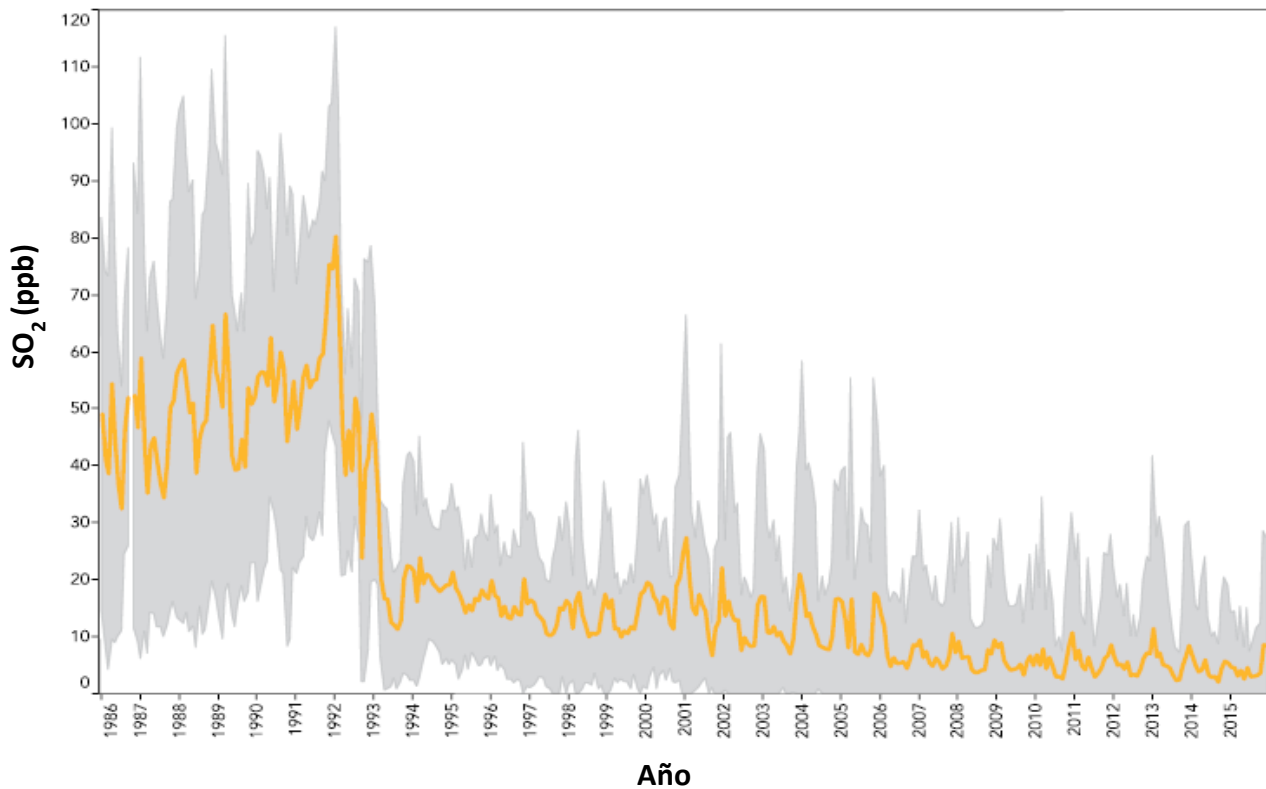


Figura 2.5. Serie de tiempo de la concentración promedio mensual de SO_2 de 1986 a 2015

Fuente: SEDEMA, 2016

2.8. Estimación de emisiones

Una *emisión* es un término usado para describir gases y partículas que son incorporados en el aire o que son emitidos por diversas fuentes (US EPA, 2017). Existen dos tipos de emisiones en una fuente fija: conducidas y no conducidas.

Las *emisiones conducidas* son aquellas que se descargan a través de ductos o chimeneas; los procesos que incluyen estas emisiones son los de combustión debido a que los gases de desecho se conducen por ductos, respiraderos y chimeneas.

Las *emisiones no conducidas* que se asocian con procesos a cielo abierto, con fugas no deseadas o derrames; los procesos que incluyen este tipo de emisiones están relacionadas con los equipos y conexiones que tiene una planta para su operación como el secado, trituración, separación, pintado, almacenamiento de materiales, rotura de tuberías, sellos o conexiones (SEMARNAT, 2009).

Existen varios métodos para cuantificar las emisiones de contaminantes atmosféricos de fuentes fijas; en general se dividen en métodos directos e indirectos. Los *directos* están basados en estudios de campo para recolectar información, debido a los requerimientos de equipo y de personal, estos métodos tienen un alto costo; los *indirectos* están basados en información sobre el comportamiento típico de un proceso o de un equipo de interés y son de menor costo.

El método directo más conocido es el de muestreo en fuente, el cual se describe a continuación:

- **Muestreo en fuente.** Es una prueba que se realiza directamente en la fuente de emisión, es decir, en la chimenea o conducto por donde se dirigen los gases contaminantes hacia la atmósfera. Con esta prueba se obtiene la concentración, esto es, la tasa de la masa del contaminante y el volumen de aire que lo transporta. Esta técnica de estimación de emisiones se caracteriza por su precisión y confiabilidad, así como por sus altos costos de implementación, los cuales dependen de las características del equipo de muestreo empleado, que puede ser manual o automático (Radian, 1996):

- **Muestreadores manuales:** el muestreo manual o a corto plazo se integra con mediciones de periodos que van de una a cuatro horas. Para recolectar una muestra representativa deben hacerse, al menos, tres muestreos en una chimenea o en un

escape para cada contaminante de interés. Este tipo de muestreo requiere complementarse con un método analítico separado, a diferencia del monitoreo automático. Una desventaja de este muestreo es que no siempre es realizado en condiciones normales de operación del equipo; es decir, cualquier cambio en la operación, como una disminución de temperatura en la cámara de combustión o alguna variación en el mantenimiento del equipo, puede alterar significativamente las emisiones obtenidas. No es recomendable realizar este tipo de muestreo para la estimación de emisiones con fines de inventarios, a menos que los datos hayan sido obtenidos en condiciones representativas de la operación normal del proceso.

- **Monitoreo continuo:** este tipo de monitoreo integra la colección y el análisis de la muestra combinados en un solo instrumento. Se realiza con equipo automático que debe tomar un mínimo de 15 lecturas en un periodo no menor a 60 minutos y no mayor a 360 minutos; el resultado del monitoreo es el promedio del periodo muestreado. La estimación de emisiones realizada con este tipo de monitoreo se considera más confiable que la realizada manualmente, ya que al cubrir periodos más largos de muestreo se pueden tener representadas las variaciones en la operación del equipo durante un periodo más largo e incluso durante diferentes épocas del año, sin embargo es necesario una calibración adecuada que generalmente se realiza en operación normal con gases patrón de concentración conocida del contaminante (Bravo *et al.*, 1992).

Los métodos indirectos de mayor uso para emisiones son los factores de emisión y los cálculos de balance de masa que son brevemente descritos a continuación:

- **Factores de emisión (FE).** Son valores promedio que relaciona la cantidad de masa de contaminante emitido a la atmósfera con la actividad del equipo asociada a la emisión de ese contaminante. Se expresan normalmente como la relación de un contaminante emitido y su masa, volumen, distancia o duración de la actividad que provoca la emisión (por ejemplo, en sistema internacional: lb de SO₂ emitido/gal de combustible o en sistema métrico decimal: kg de SO₂ emitido/m³ de combustible) (US EPA, 1998b).

Por lo general, en la elaboración de inventarios de emisiones de fuentes fijas se utilizan los FE por proceso reportados en el documento AP-42: "Compilation of Air Pollutant Emission Factors" (US EPA, AP-42, 2016). Este compendio contiene FE para diversas actividades y procesos y puede ser consultado vía Internet en el sitio de la EPA.

- **Balance de masa.** La técnica de balance de masa generalmente se utiliza para estimar las emisiones, considerando que la masa del contaminante es igual a la diferencia entre las entradas y las salidas del proceso; se entiende por entradas las materias primas que inician el proceso de transformación y por salidas los productos finales. Los balances de masa pueden realizarse a nivel de un equipo, de un proceso o de todo un establecimiento industrial (SEMARNAT *et al.*, 2001).

Los métodos indirectos tienden a ser menos confiables que los métodos directos, sin embargo en procesos específicos como la estimación de emisiones de SO₂ por quema de combustibles son altamente precisos (SEMARNAT, 2009). Dado que la forma más común y práctica de estimar son los FE, se seleccionó este método en el estudio para cuantificar las emisiones, ya que son aplicables a diferentes contaminantes y tipos de fuentes, a todas escalas y su uso es de bajo costo (Cureño, 2010; Cureño *et al.*, 2012).

2.8.1. Evaluación de la calidad de los factores de emisión

Debido a que los FE están basados en muestreos en fuente, modelado, balance de materia, información histórica de emisiones en fuente y otros, la clasificación de los factores puede variar mucho. Algunos factores han pasado por un control de calidad más riguroso que otros. De manera cualitativa la US EPA ha propuesto un sistema de evaluación de FE que, si bien no es un método que permita asignar un valor numérico, orienta sobre su confiabilidad.

Los muestreos o pruebas en fuente para la determinación de los FE están clasificados de la A a la D (Tabla 2.11). Esta clasificación es una evaluación de la confiabilidad de los datos utilizados para el desarrollo del propio factor.

Tabla 2.11. Clasificación de las pruebas en fuente para la determinación de factores de emisión

A	Las pruebas se realizan por una metodología sólida y son reportadas con suficiente detalle para su validación adecuada.
B	Las pruebas se realizan por una metodología generalmente sólida, pero carente de suficiente detalle para su validación adecuada.
C	Las pruebas se basan en una metodología no probada o nueva, o son carentes de una cantidad significativa de antecedentes.
D	Las pruebas se basan en un método generalmente inaceptable pero que puede proveer un valor de orden de magnitud para la fuente.

Fuente: US EPA, 1995b

Por otro lado, los FE están clasificados de la A a la E (US EPA, 1995b). Esta clasificación es una evaluación global de cuán bueno es un factor basado tanto en la calidad de las pruebas y qué tan bien el factor representa la fuente de emisión. Clasificaciones altas como A ó B corresponden a factores basados en muchas observaciones imparciales o en procedimientos de prueba ampliamente aceptados. En la Tabla 2.12 se presenta la clasificación de los FE:

Tabla 2.12. Clasificación de FE de acuerdo con el AP-42

A	Excelente. Factor desarrollado de pruebas de fuente clasificadas como A y B, realizadas en instalaciones elegidas de forma aleatoria de la población industrial. La población de categoría de fuente es suficientemente específica para minimizar la variabilidad.
B	Arriba del promedio. Factor desarrollado de pruebas de fuente clasificadas como A y B, realizadas en un número moderado de instalaciones. Aunque no es evidente una tendencia específica, no está claro si las instalaciones analizadas representan una muestra aleatoria de la población industrial. La población de categoría de fuente es suficientemente específica para minimizar la variabilidad.
C	Promedio. Factor desarrollado de pruebas de fuente clasificadas como A, B y C, realizadas en un número moderado de instalaciones. Aunque no es evidente una tendencia específica, no está claro si las instalaciones probadas representan una muestra aleatoria de la población industrial. La población de categoría de fuente es suficientemente específica para minimizar la variabilidad.
D	Debajo del promedio. Factor desarrollado de pruebas de fuente clasificadas como A, B y C, realizadas en un pequeño número de instalaciones. Puede haber razón para sospechar que estas instalaciones no representan una muestra aleatoria de la población industrial. Puede haber evidencia de variabilidad dentro de la población de categoría de fuente.
E	Pobre. Factor desarrollado de pruebas de fuente clasificadas como C y D, realizadas en un número muy limitado de instalaciones. Puede haber razón para sospechar que estas instalaciones analizadas no representan una muestra aleatoria de la población industrial. Puede haber evidencia de variabilidad dentro de la población de categoría de fuente.

Fuente: US EPA, 1995b

2.8.2. Factores de emisión seleccionados para la CTFPR

Las emisiones por la operación de la CTFPR, fueron estimadas mediante FE basados en procesos que miden directamente las emisiones reportados en la publicación AP-42 de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US EPA), publicado en

1972. En este documento se especifican los factores basados en procesos para más de 200 categorías de fuentes de contaminantes.

Los factores basados en procesos son un promedio de las mediciones realizadas a un gran número de fuentes. En el caso de fuentes fijas que queman combustible pueden tener diferentes tecnologías de combustión, utilizar combustibles de diferente calidad, tener diferentes tamaños y antigüedad, por lo que son valores representativos para una amplia variedad de fuentes (CONAMA, 2009).

Para el caso de estudio se utilizó el capítulo 1 “External Combustion Sources”, Sección 1.3: “Fuel Oil Combustion” (US EPA, 1998 b) del documento AP-42, dado que la central opera con combustóleo como combustible principal. En esta sección se especifica que para la determinación de las emisiones son necesarios los FE y el nivel de actividad (NA). Los FE dependen de las características de la fuente (configuración del quemador y poder calorífico de las calderas) y del tipo de combustible. Por su parte, el NA está asociado al proceso y en el caso de la central depende del consumo de combustóleo.

En la Tabla 2.13 se presentan los FE para el cálculo de las emisiones de SO₂ obtenidos de la Sección 1.3 (US EPA, 1998 b). Para las emisiones de este contaminante, a diferencia de otros, su factor de emisión no depende del tipo de configuración de quemador y considera el contenido de azufre en el combustóleo en porcentaje.

Tabla 2.13. Factores de emisión de SO₂ para distintos aceites combustibles con diferente grado

Caldera > 100 Millones BTU/h		
Grado del aceite combustible Configuración del quemador	Factor de emisión (lb/10³ gal)⁽¹⁾	Clasificación del factor de emisión
Aceite No. 6 Frontal o Tangencial	157S ⁽²⁾	A
Aceite No. 5 Frontal o Tangencial	157S	A
Aceite No. 4 Frontal o Tangencial	150S	A
Aceite No. 2 Quemador bajo en NO _x Recirculación de gases de combustión	142S	A

(1) Para convertir de lb/10³ gal a kg/10³ L, multiplicar el factor de emisión por 0.12
 (2) (S) es el contenido de azufre en el combustible en porcentaje, que debe ser multiplicado por el valor dado.

Fuente: US EPA, 1998

2.8.3. Estimación de emisiones de SO₂ de la CTFPR

Para la determinación de las emisiones de SO₂ se consideraron las características de la fuente y del combustible utilizado (la cantidad del mismo y sus características) (US EPA, 1998). La ecuación general para la estimación de emisiones de contaminantes mediante FE es la siguiente:

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

Donde:

E = Emisión

FE = Factor de emisión

NA = Nivel de actividad asociada al proceso

ER = Porcentaje de eficiencia en caso de que exista equipo de control de emisiones.

Para el cálculo de las emisiones de SO₂ en el proceso de quema de combustóleo, se aplicó la ecuación anterior. En el caso de la CTFPR, el NA corresponde a la información proporcionada por la central de consumo de combustóleo y dado que no se cuenta con un equipo de control, la ecuación general se reduce a la siguiente:

$$E = FE * NA$$

2.9. Modelación de los procesos atmosféricos

2.9.1. Transporte y contaminación atmosférica

El término *dispersión* generalmente se usa para referirse al conjunto de procesos que ocurren en la atmósfera y por los cuales se diluyen, transportan, remueven o transforman químicamente los contaminantes, hasta alcanzar una fuente receptora (Zuk *et al.*, 2006).

La dispersión de los contaminantes está determinada por variaciones locales, regionales o globales del clima, así como procesos ligados a la topografía; estas variaciones tienen un efecto directo sobre el movimiento de los contaminantes en la atmósfera. De manera general, las escalas de movimiento de contaminantes en la atmósfera se clasifican de la siguiente manera (Arya, 1999):

- **Microescala.** Pueden ocurrir en una escala espacial del orden de un par de kilómetros y en periodos del orden de segundos a minutos y cuya causa es, principalmente, la interacción de la atmósfera con la superficie adyacente. Algunos eventos que ocurren en esta escala son los truenos, relámpagos y ráfagas de viento.
- **Mesoescala.** Ocurren en una escala espacial del orden de decenas de kilómetros y en periodos de unos minutos hasta varios días; eventos como islas de calor urbanas, brisas de mar-tierra, brisas de valle-montaña y tormentas eléctricas ocurren en esta escala.
- **Macroescala.** Abarcan la escala global y sinóptica. Se desarrollan en una escala espacial de cientos a miles de kilómetros y en periodos de entre un par de días hasta semanas. En esta escala se encuentran la circulación general de los vientos, los huracanes, los sistemas de alta presión (anticiclón) y de baja presión (ciclón).

En el caso del SO₂ producto de la combustión en chimeneas de plantas industriales o del escape de los automóviles, se dispersan en un inicio por los movimientos a microescala y después, su transporte y difusión se genera por circulaciones a mesoescala.

2.9.2. Transporte atmosférico de los contaminantes

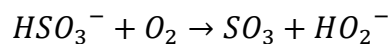
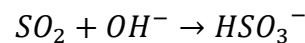
Una vez emitidos los contaminantes a la atmósfera, éstos se someten a procesos de transporte por advección o por difusión, transformación química y remoción seca o húmeda, que dan lugar a una distribución espacial y temporal variable, en concentración y composición en el aire, dependiendo de las condiciones meteorológicas que prevalecen durante su emisión.

La dispersión de los contaminantes emitidos depende de la turbulencia que se puede crear por el movimiento horizontal y vertical en la atmósfera. Al movimiento horizontal se le llama viento. Cuando el transporte de los contaminantes se da con la misma velocidad y en la misma dirección que el viento que los transporta, se le conoce como transporte por advección. Por lo general, una mayor velocidad del viento reduce las concentraciones del contaminante al nivel del suelo, ya que facilita la dilución. Al movimiento vertical de la atmósfera se le conoce como transporte por difusión y puede ser debido a un gradiente de concentraciones entre dos puntos en el espacio, por la existencia de remolinos en el aire que se producen por irregularidades en el terreno (turbulencia mecánica) o por diferencia de temperatura entre las capas atmosféricas (turbulencia térmica) (Zuk *et al.*, 2006).

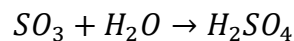
2.9.3 Transformación química del SO₂ en la atmósfera

Cuando el SO₂ es transportado en la atmósfera (por difusión o advección) experimenta reacciones químicas que lo llevan a formar nuevos contaminantes con propiedades físicas y químicas que podrían significar un mayor riesgo para el ambiente y salud de la población.

La oxidación de SO₂ en la fase gaseosa es iniciada por la reacción con el radical hidroxilo (OH⁻) presente en la atmósfera. Sus productos se expresan de forma general en las siguientes reacciones, las cuales son de lenta progresión (se requieren de horas o días) (McElroy, 2002):



Una vez que el SO₂ ha sido oxidado a SO₃, el agua de la atmósfera se adiciona rápidamente produciendo ácido sulfúrico, el cual es el componente principal y precursor de la lluvia ácida:



2.10. Modelos de simulación para la calidad del aire

Un *modelo de simulación de calidad del aire* es una herramienta de análisis que permite simular de manera integral, a través de expresiones matemáticas, los procesos atmosféricos que intervienen en el transporte, la dispersión, la remoción y en algunos casos la transformación química de los contaminantes. Con estos modelos es posible relacionar directamente las concentraciones ambientales de los contaminantes con sus fuentes de emisión o con la emisión de sus precursores, incluyendo en la modelación variables tales como las condiciones topográficas, uso de suelo y la meteorología de una región determinada (Lopez *et al.*, 2005). Mediante el uso de un modelo para la calidad del aire es posible aplicar medidas de prevención, minimización y control sobre los contaminantes que afectan al ambiente.

2.10.1. Estructura de un modelo de simulación

Un modelo de simulación en general opera con un conjunto de datos de entrada que caracterizan las emisiones, la topografía y la meteorología de una región y producen

salidas que describen la calidad del aire en esta región. En el caso de los modelos más avanzados, también se incluye un mecanismo químico que describe la transformación química de los contaminantes. La información necesaria para alimentar un modelo varía de acuerdo a la naturaleza del estudio que se desea realizar; su elección depende del contaminante que se desea simular (primario o secundario) o si se desean estudiar las emisiones de una sola fuente o de un conjunto de ellas.

En la Figura 2.6 se muestra de manera general los datos de entrada requeridos por un modelo de simulación de calidad del aire.

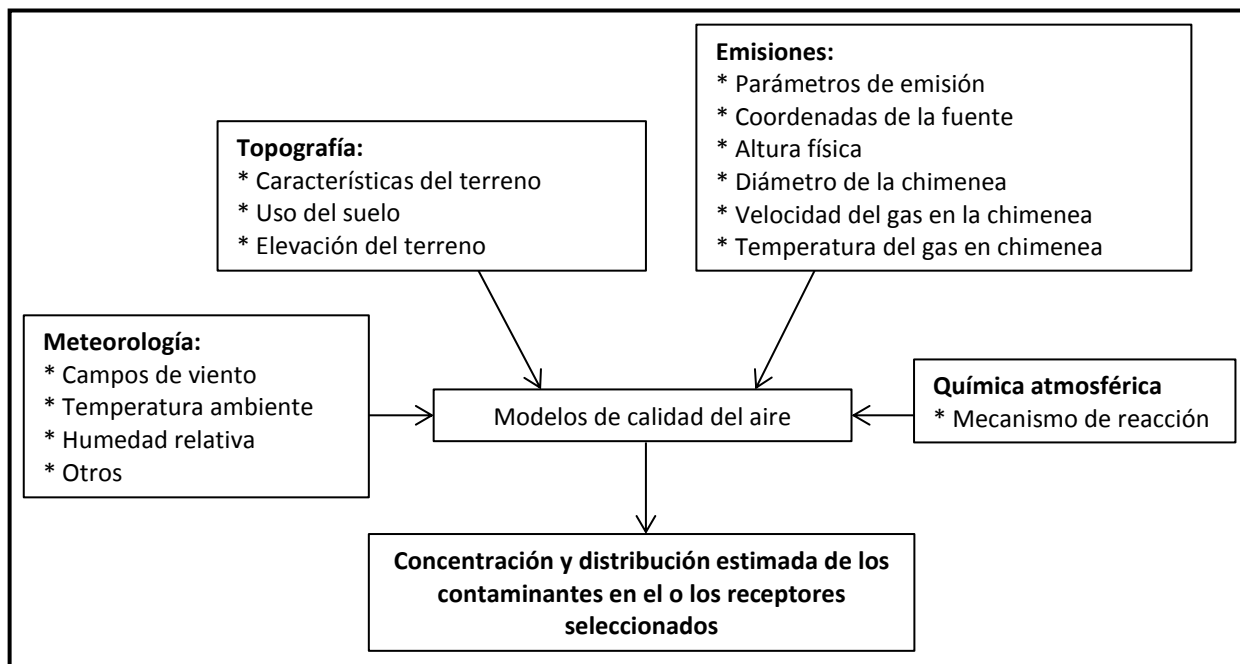


Figura 2.6. Estructura de un modelo de calidad del aire

2.10.2. Modelos deterministas

Los *modelos deterministas* evalúan la fracción con la que cada fuente emisora participa en las concentraciones ambientales de cada contaminante en el área receptora o de impacto, permitiendo así el diseño o la evaluación de estrategias de control de emisión. Pueden clasificarse de acuerdo a su escala espacial o bien, de acuerdo a las ecuaciones que describen el comportamiento de los contaminantes en la atmósfera.

En la Tabla 2.14 se muestran la clasificación de los modelos deterministas de acuerdo a su escala espacial, junto con su dominio y resolución:

Tabla 2.14. Modelos deterministas de acuerdo a su escala espacial

Modelo	Dominio típico	Resolución típica
Microescala	200 x 200 x 100 m	5 m
Mesoescala (urbano)	100 x 100 x 5 km	2 km
Regional	1,000 x 1,000 x 10 km	20 km
Sinóptico (continental)	3,000 x 3,000 x 20 km	80 km
Global	65,000 x 65,000 x 20 km	555 x 555 km

Fuente: SEMARNAT *et al.*, 2016

A los modelos deterministas, por la forma en que plantean las ecuaciones que describen el comportamiento de los contaminantes en la atmósfera, se les clasifica como modelos eulerianos (usan un sistema de coordenadas fijo con respecto al suelo) y lagrangianos (usan un sistema de coordenadas que sigue el movimiento de la atmósfera). Dentro de la clasificación de los modelos lagrangianos se encuentran los modelos gaussianos, en éstos su simulación se hace para una pluma de emisión, continua o discreta, como paquetes llamados comúnmente “puffs”

2.10.2.1. Modelos gaussianos

En los *modelos gaussianos* se describe el transporte y la mezcla de los contaminantes asumiendo que las emisiones presentan, en la dirección horizontal y vertical, una distribución normal o de curva gaussiana, con una concentración máxima en el centro de la pluma. Generalmente estos modelos se aplican para evaluar la dispersión de contaminantes provenientes de fuentes puntuales, de área y de línea. Este tipo de modelos se utilizan para evaluar la dispersión de contaminantes primarios no reactivos, aunque existen versiones que simulan procesos de depósito y transformación química. Algunos ejemplos de modelos gaussianos son el “Industrial Source Complex–ISC”; el “AMS/EPA Regulatory Model–AERMOD”; el “CALPUFF”; el “SCREEN3” y el “Complex Terrain Dispersion Model Plus Algorithms for Unstable Situations–CTDMPLUS”. Todos ellos aprobados y certificados por la US EPA.

2.10.3. Criterios de selección y aplicación de un modelo

La decisión sobre el modelo más adecuado a utilizar en un estudio depende de varios factores, entre los que se pueden mencionar los siguientes (US EPA, 1997):

- **El problema a resolver:** depende en gran medida de si se analizará la dispersión de un contaminante primario o secundario; si el contaminante es reactivo o no reactivo; si se estudiarán las emisiones de una o varias fuentes, etc.

- **La extensión geográfica del área de estudio:** se debe de considerar el que haya transporte de corto o de largo alcance; el que se cuente con información suficiente para caracterizar la meteorología, la topografía y las emisiones de una zona industrial, de un valle o de una ciudad.
- **La complejidad topográfica y meteorológica del área de estudio:** es fundamental analizar las características de la topografía (plana o accidentada) y de la meteorología, en cuanto a que sea posible caracterizarla adecuadamente con datos de superficie, o si se requieren datos de altura.
- **El grado de detalle y la exactitud requeridos para el análisis:** es necesario decidir si los resultados deben de tener una resolución espacial de unos cuantos kilómetros o de una región completa.
- **Los recursos técnicos y humanos disponibles:** estas consideraciones incluyen las características del equipo de cómputo (alta o baja capacidad de memoria y procesamiento) y la experiencia del personal, tanto en la aplicación de modelos como en la interpretación de los resultados de la simulación.
- **El detalle y la calidad de las bases de datos disponible:** es indispensable analizar el tipo de datos de entrada con que se cuenta, como son los datos de las emisiones (para una sola fuente o para una región completa), la confiabilidad, el grado de detalle y la precisión de la información disponible.

2.10.4. Modelos para el estudio de la calidad del aire

La US EPA clasifica a los modelos de calidad del aire con respecto a las expectativas del estudio. En la página oficial de los Estados Unidos: Technology Transfer Network Support Center for Regulatory Atmospheric Modeling for US EPA (<https://www.epa.gov/scram>), se encuentran los modelos de calidad del aire y meteorología que pueden ser utilizados para la modelación en una región específica. La clasificación de los modelos de calidad del aire, de acuerdo a las expectativas del estudio, son tres: dispersión, fotoquímicos y receptores

- Los *modelos de dispersión* son utilizados principalmente para estimar y/o predecir la concentración de contaminantes atmosféricos que se emiten por diferentes fuentes de contaminación, sobre la población (nivel de suelo), se usan también para caracterizar los procesos atmosféricos relacionados con uno o varios contaminantes y sirven para determinar el cumplimiento con las Normas de Calidad del Aire, así

como regular el funcionamiento de fuentes nuevas, y la Prevención del Deterioro Significativo (PSD, por sus siglas en inglés) en materiales.

- Los *modelos fotoquímicos* son utilizados para la evaluación de la calidad del aire a nivel reglamentario y político de las fuentes de emisión de contaminantes atmosféricos, así como su depósito atmosférico y sus transformaciones químicas en la atmósfera a escala local, regional, nacional y/o global, por medio de ecuaciones matemáticas que caracterizan los procesos físicos y químicos de la atmósfera.
- Los *modelos de receptores* no utilizan datos de emisión, meteorología y transformaciones con la atmósfera, sino que utilizan las características físico-químicas de los gases y partículas medidas en la fuente y en los receptores para identificar y cuantificar el nivel de concentración a la que los receptores están en contacto. Estos modelos son considerados como complementos de los modelos de dispersión y/o fotoquímicos.

2.11. Modelo de dispersión CALPUFF

En general, los modelos de dispersión se han utilizado para las evaluaciones de riesgo a la salud e impacto en la calidad del aire con base a la emisión de diferentes fuentes de contaminación para una región de estudio. Uno de los modelos de dispersión que actualmente tiene aplicaciones a nivel mundial es el modelo CALPUFF (Levy *et al.*, 2002; Zhou *et al.*, 2003), el cual considera datos de meteorología, condiciones atmosféricas, tipos de terreno, entre otros.

CALPUFF fue diseñado por Sigma Research Corporation (SCR) y California Air Resources Board (CARB). Está clasificado como tipo Lagrangiano-Gaussiano, es decir, un modelo de estado no estacionario, que permite simular los efectos en tiempo y espacio de las variaciones de los parámetros meteorológicos en el transporte, transformación y remoción de algún contaminante.

Es un modelo que trata las emisiones como “puffs” que experimentan procesos de transformación química al mismo tiempo que se van desplazando a través de un campo meteorológico tridimensional. Puede ser aplicado para transporte de emisiones provenientes de fuentes de punto, de área, de línea y de volumen, en distancias de fuente-receptor de decenas de metros a cientos de kilómetros y tiene la capacidad de generar datos horarios de concentración de algún contaminante (Scire *et al.*, 2000).

CALPUFF funciona a diferentes escalas o capas de la atmósfera, que ayudan a simular la dispersión, reacción química, depósito atmosférico y efecto de visibilidad para algún contaminante, además se pueden ingresar los contaminantes que se desean simular, por ello se dice que es un modelo multicapa y de multiespecies. El sistema de modelación consta de tres componentes principales: CALMET, CALPUFF y CALPOST (Figura 2.7)

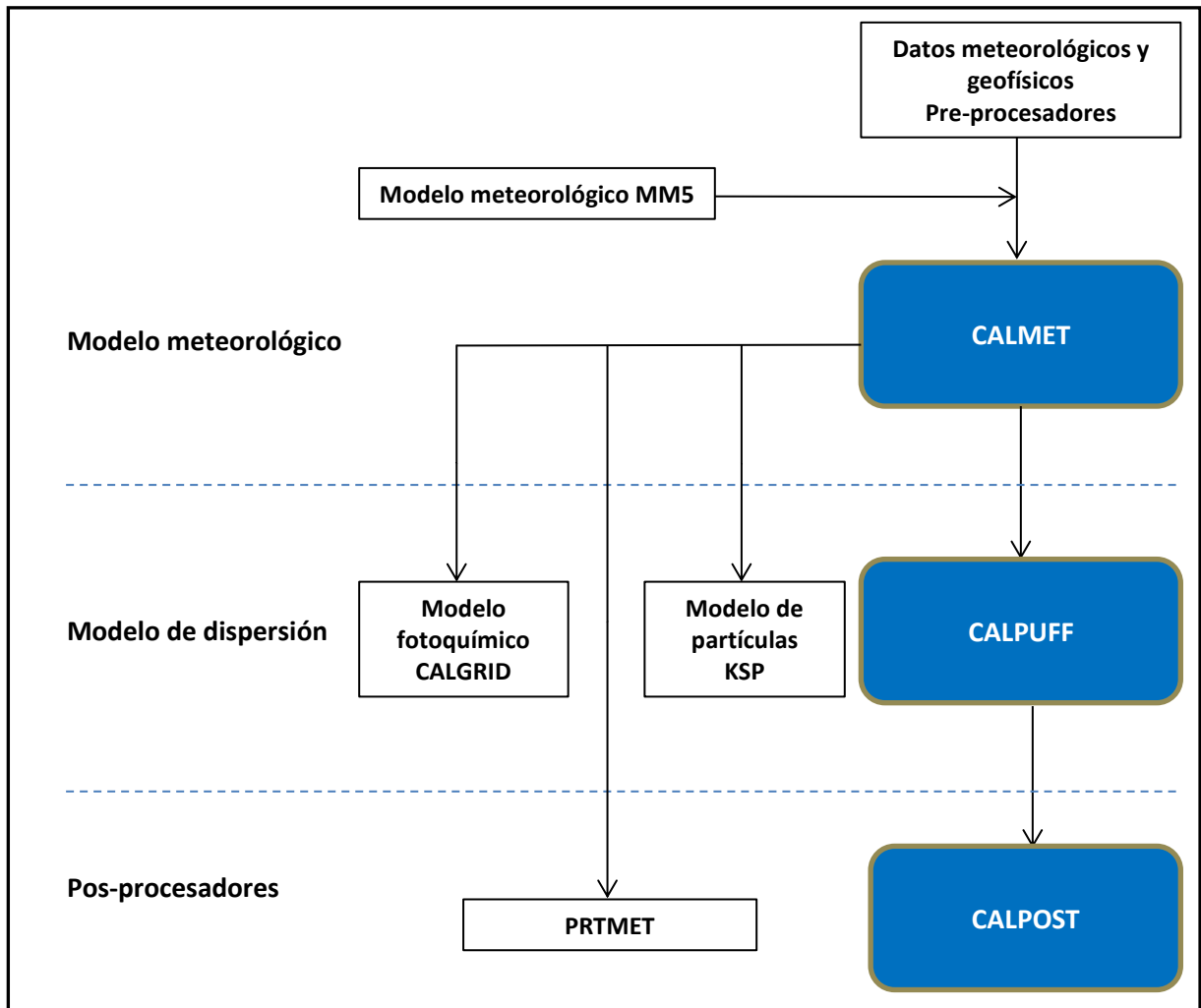


Figura 2.7. Módulos fundamentales del modelo CALPUFF

2.11.1. Módulo CALMET

Es un modelo meteorológico, el cual genera campos de viento, identifica los efectos cinemáticos de terreno (plano y complejo), tiene la capacidad de interpolar los datos de meteorología disponibles sobre superficie y capas superiores en un dominio de estudio. Adicionalmente, posee un módulo de micrometeorología que calcula los parámetros de

turbulencia vertical y horizontal. Asimismo, determina campos de viento y temperatura horarios en una malla 3D para un dominio establecido, asocia en 2D diagramas de altura de mezcla, características de la superficie y las propiedades de la dispersión influenciadas por los campos de viento.

2.11.1.1. Modelo meteorológico MM5

Para los estudios de parámetros meteorológicos o el análisis de la meteorología de una región en particular, la US EPA, recomienda utilizar el modelo meteorológico *MM5*. El modelo *MM5* (Fifth Generation Penn State/NCAR Mesoscale Model) es un modelo de mesoescala a nivel regional, diseñado para el pronóstico del tiempo y proyecciones climáticas, el cual simula los fenómenos meteorológicos que suceden en la atmósfera, predice ciclones tropicales y la proyección y/o simulación del cambio climático.

El modelo meteorológico *MM5* tiene el objetivo principal de generar campos meteorológicos tridimensionales en algún dominio de interés para poder alimentar sus salidas al módulo *CALMET* y así mejorar la descripción de la estructura vertical de los vientos en el área de modelación. Se utiliza debido a la escasez de información meteorológica con datos directos de campo sobre las capas superiores de la atmósfera (Grell *et al.*, 1994).

2.11.2. Módulo CALPUFF

Es un modelo de dispersión que simula el transporte y transformación de algún contaminante producto de una fuente puntual, lineal, de área o volumen; la simulación depende de los campos de viento generados en *CALMET*. El modelo *CALPUFF* es un modelo de nube que simula la dispersión del aire referente a una pluma de emisión (bocanada). Incorpora algoritmos para efectos de corto alcance (corriente descendente por objetos, elevación de la pluma, penetración parcial de la pluma) y largo alcance (remoción de contaminantes por depósito húmedo y seco, transformación química, transporte sobre superficies de agua e interacción costera. El módulo *CALPUFF* incluye un modelo fotoquímico (*CALGRID*) para simular el transporte y transformación de un contaminante en particular, el cual integra módulos de advección y difusión (vertical y horizontal) y deposición seca. También integra el modelo Kinematic Simulation Particle (*KSP*), usado para simular la deposición, dispersión y transporte de partículas.

2.11.2.1 MESOPUFF II

MESOPUFF II es un módulo que forma parte del componente CALPUFF, utilizado para modelar la transformación química de los compuestos de azufre y nitrógeno. Este módulo incorpora las dependencias más significativas de espacialidad y temporalidad, en las variaciones de condiciones ambientales en las tasas de transformación. Utiliza un mecanismo de primer orden para estimar la concentración de SO_2 resultante en un dominio una vez que ha reaccionado con otras especies presentes en la atmósfera (con el uso de opción de “Concentración”) e incluso modelar su conversión hasta radicales SO_4^{2-} (Con el uso de “Concentración + Depósito”).

2.11.3. Módulo CALPOST

Es un programa de post-procesamiento de lectura y extracción de datos, desde CALPUFF; es decir, en esta etapa, se puede determinar: el periodo de procesamiento de los datos, los promedios de concentración (1, 3 y 24 horas) de algún contaminante en uno o varios receptores, especies químicas, flux de concentración y depósito, parámetro de visibilidad, gráficos (isolíneas de concentración). CALPOST también identifica el primer y segundo valor mayor de concentración encontrado en toda el área de un dominio, junto con sus coordenadas UTM.

La información anterior se utiliza para generar los resúmenes reportados en diferentes formatos, por ejemplo: cuadros de concentraciones de mayor a menor, cuadros de valores que rebasaron la norma (especificada por el usuario) y archivos con datos en formato de matriz para visualizarlos en programas especializados (López, 2009).

3. ZONA DE ESTUDIO

3.1 Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM)

La *ZMCM* se ubica dentro de la cuenca del Valle de México, localizada cerca del trópico en la latitud 19° N y longitud 99°O, tiene una extensión de alrededor de 100 km en dirección Norte-Sur y 50 km en dirección Este-Oeste (Jáuregui, 1988), comprendida por 16 delegaciones de la Ciudad de México y 59 municipios del Estado de México. El terreno es plano cercado por montañas con una altura media entre 600 y 800 metros sobre el nivel del valle y 2240 metros sobre el nivel del mar (msnm). Con una superficie de 7800 km², cuenta con 20,116,842 habitantes (SEDESOL *et al.*, 2012).

De acuerdo con la información climatológica, en el Valle de México la temperatura promedio anual es de 17.5 °C y en los alrededores donde prevalecen áreas con cubierta vegetal, la temperatura es más fresca y entre 12 y 14 °C (Jáuregui, 2000). Hay un comportamiento estacional típico, con máximos entre marzo y agosto, y mínimos en los meses de invierno. El promedio acumulado de precipitación anual durante la temporada de lluvias fluctúa entre 600 y 800 mm, mientras que el promedio acumulado total anual varía entre 597 y 1000 mm (SEDEMA, 2012)

De acuerdo al Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas (DENUE) del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), la ZMCM tiene más de 5 millones de vehículos registrados y 70,000 industrias en operación, lo que representa el 21% del total de las industrias nacionales (INEGI, 2015), de las cuales solo 1935 industrias (incluye termoeléctricas) y 5 terminales de almacenamiento masivo de combustibles se encuentran presentes en el inventario de emisiones, esto se debe a que las industrias se regulan dependiendo del proceso productivo, el tipo de materias primas, los equipos que utilizan (calderas, hornos y otros), así como las normas que les aplican a esos equipos (SEDEMA, 2014a).

En la Figura 3.1, se muestran las características generales de la ZMCM en el 2014.

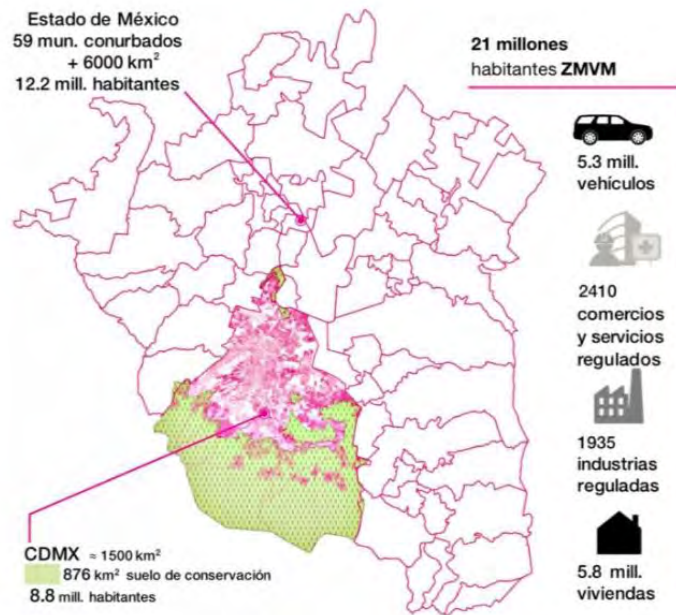


Figura 3.1. Características de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, 2014

Fuente: SEDEMA, 2014a

La ZMCM se encuentra rodeada por la Sierra de Guadalupe al Norte, al Oeste la Sierra de las Cruces, al Sur se encuentra la Sierra del Ajusco y al Oriente la Sierra Nevada que incluye a los volcanes Iztaccíhuatl y Popocatepetl. La cantidad y distribución de las montañas hacen del Valle de México un terreno complejo que tiene una influencia importante en la meteorología y en la manera en la que los contaminantes se comportan en la atmósfera (Jáuregui, 2000). Asimismo, debido a su altitud, el contenido de oxígeno en el aire es aproximadamente 23% menos que a nivel del mar (Molina, 2002), lo cual ocasiona que los procesos de combustión sean menos eficientes.

En la Figura 3.2 se muestra la cadena montañosa que rodea a la ZMCM, observándose una cuenca semicerrada lo que propicia el estancamiento de contaminantes y la obstaculización de la circulación del viento.

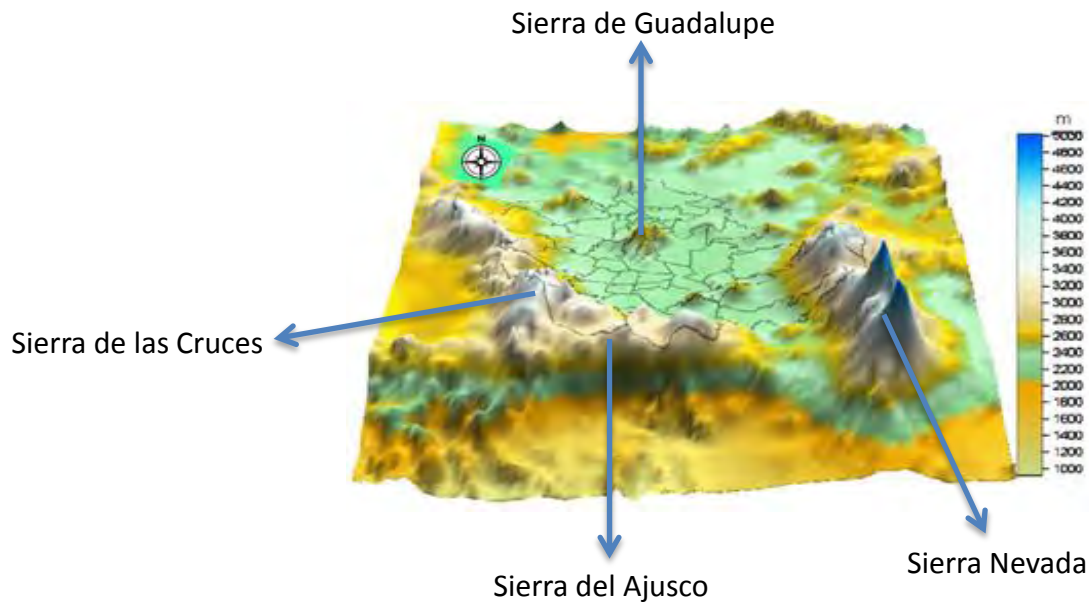


Figura 3.2. Topografía y límites políticos de la ZMCM

Fuente: SEDEMA, 2004

3.1.1. Comportamientos de las variables meteorológicas en la ZMCM

Para entender la variación de la calidad del aire en la ZMCM, es necesario evaluar condiciones meteorológicas como el clima, la temperatura, la humedad, la lluvia, los vientos, la presión barométrica, las inversiones térmicas, la altura de mezcla, etc. Las condiciones del tiempo tienen un efecto importante en la concentración y distribución espacial de los contaminantes, en la formación de nuevos compuestos en el aire y tienen una influencia en los procesos fotoquímicos de la atmósfera.

3.1.1.1. Clima

Tomando en consideración las condiciones geográficas, el comportamiento de las variables meteorológicas y de acuerdo a la clasificación climática universal de Köppen, la ZMCM tiene un clima templado con invierno seco (Cw), es decir la temperatura media del mes más cálido no llega a los 22°C, pero se superan los 10°C durante cuatro o más meses del año (McKnight *et al.*, 2000).

Por su posición geográfica y las características de los sistemas meteorológicos en la ZMCM se definen tres temporadas climáticas: seca-fría, seca-caliente y lluvias (Emanuel 1991). La descripción de estas temporadas se muestran brevemente:

La *temporada seca-fría* se caracteriza por escasa precipitación y bajas temperaturas, comprende los meses de noviembre a febrero; durante esta temporada es frecuente observar fenómenos meteorológicos tales como masas de aire frío de origen del Norte del continente que se desprenden desde los polos y provocan frentes fríos y nortes.

En la *temporada seca-caliente*, que comprende los meses de marzo a mayo, los sistemas meteorológicos que favorecen días calurosos en el centro del país son los sistemas de alta presión o anticiclones (se refiere a que el viento de superficie diverge, es decir, se aleja del centro del área de alta presión, en el sentido de las manecillas del reloj en el hemisferio Norte) (SEDEMA, 2011) que se generan en el océano Pacífico, los cuales traen en ocasiones humedad y masas de aire cálidas que afectan al centro del país y a la ZMCM.

Durante la *temporada de lluvias*, de junio a octubre, el Valle de México es afectado por tormentas tropicales y huracanes que se forman en los océanos Pacífico y Atlántico (Magaña, 2004). Los sistemas meteorológicos que favorecen días lluviosos en el centro del país son sistemas de baja presión o ciclones (se refiere a que el viento de superficie converge, es decir, se dirige hacia el centro del área de baja presión, con dirección contraria a las manecillas del reloj en el hemisferio Norte) (SEDEMA, 2011).

3.1.1.2. Temperatura

En términos atmosféricos la temperatura está directamente relacionada con la estabilidad atmosférica. Una baja temperatura está asociada con una atmósfera estable, desfavorable para la dispersión de la contaminación. Por otra parte, un aumento de la temperatura de superficie genera flujos convectivos y atmósfera inestable favorables para la dispersión de la contaminación.

La temperatura en la ZMCM presenta un comportamiento estacional típico, con la máxima durante los meses de marzo a agosto y la mínima durante el invierno. En cuanto a los patrones durante el día, la temperatura mínima se registra antes de la salida del sol, alrededor de las 7:00 hrs, a consecuencia del enfriamiento radiactivo del suelo durante la noche y la máxima algunas horas después de que el sol ha alcanzado el punto más alto del cielo, alrededor de las 15:00 hrs (SEDEMA, 2014b)

De acuerdo con los registros históricos, desde 1987 a la fecha se ha observado un incremento en el promedio anual de la temperatura ambiente. Este aumento puede ser el resultado de un conjunto de procesos que incluyen el crecimiento urbano, la

contaminación por partículas, el cambio de la cobertura del suelo, la disminución de los bosques y las variaciones climáticas a escala global (SEDEMA, 2015).

3.1.1.3. Humedad

La humedad tiene un comportamiento estacional durante el año en la ZMCM, con un máximo en la temporada de lluvia (más del 50% de humedad relativa) y un mínimo en la seca (no más del 40% de HR). En la temporada seca-fría el transporte de masas de aire con bajo contenido de humedad de origen del Norte del continente, disminuye significativamente la humedad relativa y la precipitación en la ciudad. Mientras que en la temporada seca-caliente, la influencia de sistemas de alta presión sobre el centro del país limita la entrada de humedad en la región que ocupa la ciudad. En la temporada de lluvia, las masas provenientes del Océano Pacífico, el Golfo de México y el Mar Caribe acarrearán humedad hacia la cuenca (SEDEMA, 2014b).

El patrón de humedad relativa durante el día es mayor durante la mañana entre las 5:00 y las 8:00 hrs, y alcanza su mínimo entre las 14:00 y las 16:00 hrs. Este patrón es inverso al de la temperatura del aire (SEDEMA, 2014b).

3.1.1.4. Precipitación

Los episodios de lluvia favorecen bajos niveles de contaminantes, no solo durante la lluvia, sino también pasadas unas horas después del evento, ya que la humedad del aire favorece la reacción en fase acuosa de algunos contaminantes gaseosos. La lluvia es el proceso más eficiente de eliminación de gran parte de los contaminantes en suspensión en la atmósfera, a este proceso se le conoce como lavado atmosférico.

La temporada de lluvia en la ZMCM se presenta generalmente durante los meses de junio a octubre, sin embargo, es normal que ocurran episodios ocasionales de lluvia durante mayo. Los episodios de lluvia se presentan generalmente durante las tardes, después de las 15:00 hrs, con una intensidad máxima entre las 19:00 y 22:00 hrs. El monitoreo sistemático de la precipitación pluvial en la ZMCM se realiza generalmente de mayo a noviembre como parte de las actividades de la Red de Depósito Atmosférico (REDDA) del SIMAT (SEDEMA, 2015).

En cuanto a la distribución espacial, los sitios localizados en la zona boscosa al Sur de la Ciudad de México reportan la mayor cantidad de lluvia. Esto es provocado por el efecto orográfico al Sur y Poniente de la ciudad, es decir, de las montañas de las sierras

del Ajusco y de Las Cruces. Sin embargo, el proceso de urbanización ha inducido un aumento en la frecuencia de aguaceros intensos (Jáuregui, 2000)

3.1.1.5. Viento

El *viento* se refiere al movimiento de las masas de aire en la atmósfera, ocasionado por las diferencias en la presión atmosférica y la temperatura. El viento influye en la concentración de los contaminantes. En general, cuanto mayor es la velocidad del viento, mejor es la dispersión y menor la concentración de los contaminantes. En un día ventilado los niveles de los contaminantes se reducen considerablemente, favoreciendo una buena calidad del aire, mientras que en días con ausencia de viento se produce un estancamiento de la contaminación.

La fisiografía del valle tiene una influencia importante en la forma en la que se comportan los vientos de superficie diariamente. Durante la noche se observa con claridad la brisa de montaña (21:00-7:00 hrs), la cual se forma cuando el aire frío desciende por la ladera de las montañas que rodean la cuenca de la ZMCM. Esta brisa hace que el viento converja en la región Norte y Centro de la ciudad, favoreciendo la acumulación de contaminantes en esas regiones, sobre todo entre las 5:00 y las 8:00 hrs pues en este horario los valores de viento más bajos se registran (SEDEMA, 2012; SEDEMA, 2016).

Por otro lado, durante el día se observa la brisa de valle (9:00-13:00 hrs) que se forma cuando el incremento de la temperatura impulsa la elevación del aire caliente en las montañas, creando un movimiento de arrastre del viento desde la cuenca. Esta brisa arrastra consigo el aire contaminado desde las zonas de máxima emisión en el Norte y Centro de la zona urbana hacia el Sur donde las montañas presentes dificultan la libre dispersión y los contaminantes permanecen parcialmente estancados después de mediodía. A medida que transcurre la tarde, el aumento de la convección propicia un incremento en la velocidad del viento, alcanzando una velocidad máxima entre las 18:00 y 19:00 hrs, lo que permite una mejor dispersión de contaminantes fuera del valle (SEDEMA, 2012; SEDEMA, 2016).

En la Figura 3.3 se ilustra el comportamiento de las brisas de montaña y de valle que suceden en la ZMCM, así como los vectores de dirección que arrastran consigo el viento.

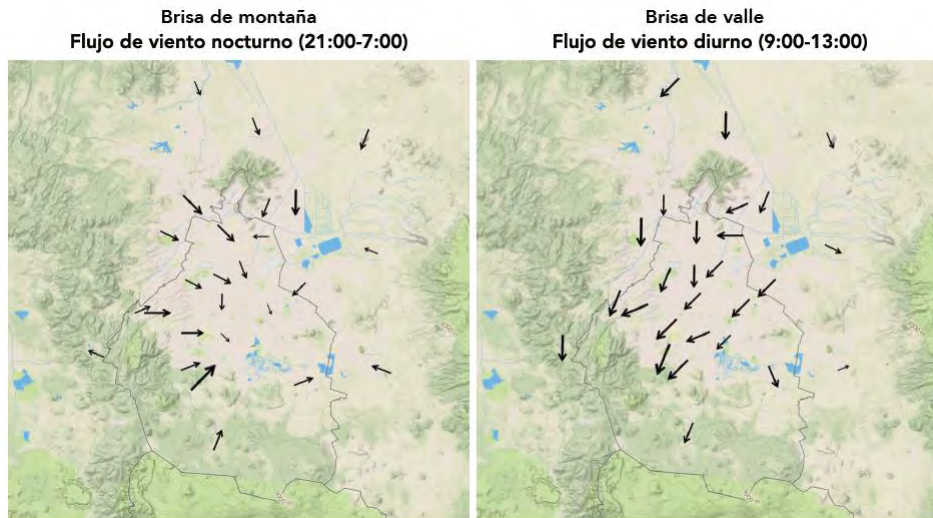


Figura 3.3. Brisas de montaña y de valle en la Cuenca de México

Fuente: SEDEMA, 2016

Además de las brisas de valle y montaña, la dirección predominante del viento en la cuenca determina el destino de los contaminantes, cuando el viento sopla del Norte hacia el Sur u Oeste, la dispersión es limitada por las montañas, favoreciendo la acumulación de los contaminantes en las laderas montañosas. Cuando el viento sopla desde el Sur, la contaminación sale de la cuenca dispersándose (SEDEMA, 2015).

En general, la dirección predominante del viento en la ZMCM es de Norte a Sur. El hecho de que durante el día la dirección predominante sea del Norte, tiene implicaciones importantes en la calidad del aire, ya que la metrópolis se ubica viento abajo de las zonas en donde se ubica la mayor cantidad de fuentes de emisión de contaminantes, es por eso que a pesar de haber pocas fuentes al Sur de la metrópolis, hay también un impacto severo en la calidad del aire de esa región, aunado a que las montañas al Sur dificultan la dispersión de la contaminación y en presencia de radiación solar se favorecen reacciones fotoquímicas para la formación de contaminantes secundarios (como el O_3).

3.1.1.6. Presión atmosférica

Las variaciones de la presión atmosférica son responsables del movimiento del viento de una zona donde la presión es mayor a una zona donde la presión es menor.

En general, un sistema de baja presión trae consigo nubosidad y lluvia, mientras que un sistema de alta presión favorece cielo despejado, sequías y estabilidad atmosférica (masas de aire inmóvil). Durante los días en los que la presión es alta y la velocidad de

viento es débil, las condiciones son favorables para el estancamiento de los contaminantes debido a la escasa dispersión vertical y horizontal de la contaminación.

El promedio de la presión atmosférica registrado en la ZMCM es de 584.5 mmHg. Los patrones de presión atmosférica durante el día en la ZMCM son dos máximos de presión alrededor de las 10:00 y las 21:00 hrs, mientras que los mínimos se presentan alrededor de las 4:00 y 16:00 hrs (SEDEMA, 2014b).

3.1.1.7. Inversión térmica

La *inversión térmica* consiste en el aumento de la temperatura con la altura en alguna región de la tropósfera, lo cual no es un fenómeno común, ya que en condiciones normales la temperatura disminuye con la altura.

El fenómeno de inversión térmica se presenta generalmente durante los meses de invierno cuando el suelo se enfría gradualmente, enfriando a su vez la capa de aire por encima de él haciéndolo más denso y pesado, el aire cálido de menor densidad se mueve sobre esta masa de aire más frío, actuando como una tapa que hace que la contaminación permanezca atrapada dentro de la capa de inversión. Una inversión térmica se debilita cuando el sol calienta el suelo y el aire caliente asciende, o por la presencia de viento que hace que la atmósfera sea lo suficientemente estable y los contaminantes se dispersen verticalmente (SEDEMA, 2014b).

De manera general las condiciones para la formación de una inversión térmica son: aire en calma con baja humedad, noches largas con baja temperatura y cielo despejado. La explicación a este fenómeno es debido a que en días sin nubes, la radiación emitida por el suelo en forma de calor al enfriarse se escapa hacia el espacio y el suelo se enfría rápidamente, por ende la capa de aire adyacente a él también; por el contrario, cuando existen nubes, la radiación emitida por el suelo, no se escapa hacia el espacio y el enfriamiento del suelo es lento, retrasando la velocidad de enfriamiento de la capa de aire adyacente a él (SEDEMA, 2012).

La formación de inversiones térmicas es importante para la calidad del aire, ya que su presencia favorece la acumulación de los gases contaminantes emitidos por vehículos y chimeneas en una capa cercana al suelo, provocando un incremento en la concentración de los contaminantes.

3.1.1.8. Altura de mezcla

Se define la *altura de mezcla*, como la altura de la capa adyacente a la superficie, sobre la cual cualquier componente emitido o arrastrado dentro de ella se dispersa verticalmente por convección (Seibert *et al.* 2000), y representa la altura máxima que pueden alcanzar los contaminantes liberados a nivel de la superficie. Debido a que la altura de mezcla no puede ser observada directamente, su estimación se realiza indirectamente a partir de mediciones del perfil de la temperatura atmosférica o con modelos de simulación.

En términos de la calidad del aire, la altura de mezcla representa un indicador del volumen disponible para la dilución de los contaminantes y es variable a lo largo del día. Una mayor altura de capa de mezcla, permite una mayor dilución de los contaminantes, reduciendo su concentración. Una baja altura se asocia con menor dilución y un incremento en la concentración de los contaminantes.

Las mayores alturas de capa de mezcla se alcanzan en la temporada más caliente del año. En cuanto al patrón durante el día, la altura máxima se alcanza entre las 14:00 y 16:00 hrs, cuando la temperatura del aire es mayor. Por la tarde disminuye gradualmente hasta alcanzar un mínimo durante la noche (SEDEMA, 2016). En la Figura 3.4 se presenta un ejemplo de la relación que hubo en algunos días de enero de 2015, entre la concentración de SO₂ (ppb) y su altura de la capa de mezcla (m). Se observa que la relación es inversamente proporcional, a una menor altura de mezcla, la concentración es mayor y viceversa.

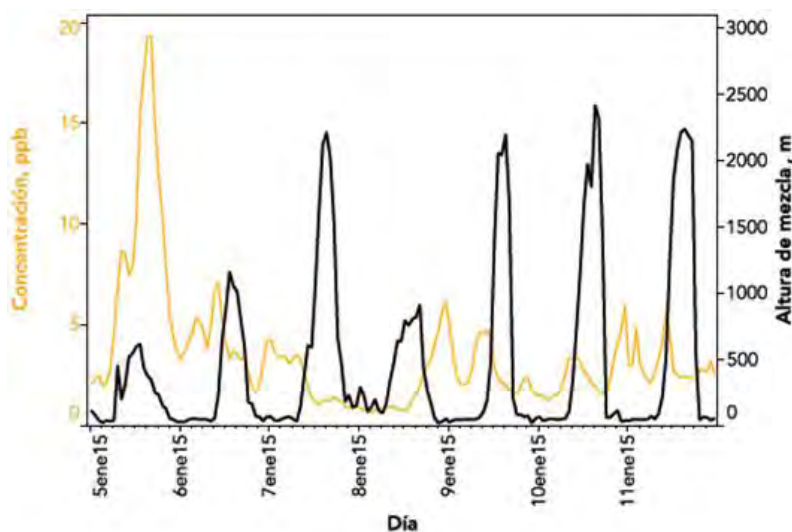


Figura 3.4. Efecto de la altura de mezcla en la concentración de SO₂

Fuente: SEDEMA, 2016

3.2. Zona Crítica Tula-Vito-Asasco

Una *Zona Crítica* (ZC) es aquella en las que por sus condiciones topográficas y meteorológicas se dificulta la dispersión o se registran altas concentraciones de contaminantes a la atmósfera (DOF, 2015).

Dentro del estado de Hidalgo y del Estado de México, se encuentra la Zona Crítica Tula-Vito-Asasco (ZCTVA), la cual abarca desde el municipio Tula de Allende, atravesando Tepejí del Río Ocampo, Tlahuelilpan, Atitalaquia, Atotonilco de Tula, Tlaxoapan hasta llegar a Apasco de Ocampo en el Estado de México.

Durante la formulación del Programa Ambiental de México en el año 1989, la región “Tula-Vito-Asasco” fue clasificada como zona crítica en materia de contaminación atmosférica, debido a sus características topográficas, demográficas, climáticas y meteorológicas y en base a la actividad industrial, a los tipos y cantidad de fuentes emisoras de contaminantes atmosféricos (INECC, 2016), por ello ha sido una región de atención prioritaria en materia de calidad del aire para el gobierno de la Ciudad de México.

Las fuentes fijas que generan mayores emisiones de contaminantes en la ZCTVA son plantas de generación de energía eléctrica, refinerías de petróleo, industrias cementeras y de cal, entre otras, siendo las más importantes:

- Central Termoeléctrica Francisco Pérez Ríos (CTFPR) de la Comisión Federal de Electricidad (CFE).
- Complejo Petroquímico Tula de Petróleos Mexicanos (PEMEX).
- Refinería Miguel Hidalgo de Petróleos Mexicanos.
- Plantas cementeras (Cruz Azul, Cementos México, LAFARGE Cementos, Apasco, Caleras Beltrán), entre otros.

3.2.1. Central Termoeléctrica Francisco Pérez Ríos (CTFPR)

Como caso de estudio, se seleccionó la CTFPR como fuente fija de emisión de contaminantes. La CT está ubicada en el municipio Tula de Allende en el estado de Hidalgo, México. Este municipio está ubicado a 93 km al Norte de la Ciudad de México, su altitud varía entre 2,100 y 2,700 m y ocupa el 1.62% de superficie del estado (INEGI, 2009).

La CTFPR se encuentra localizada en la ZCTVA, específicamente en el corredor Tula-Tepeji en el Valle del Mezquital, región donde también existen otras fuentes emisoras importantes y que en su conjunto tienen un impacto potencial en la calidad del aire resultante en las diversas estaciones de monitoreo de la ZMCM (García, 2008). En la Figura 3.5, se observa la ubicación del corredor industrial Tula-Tepeji y las estaciones de monitoreo de calidad del aire en la ZMCM.

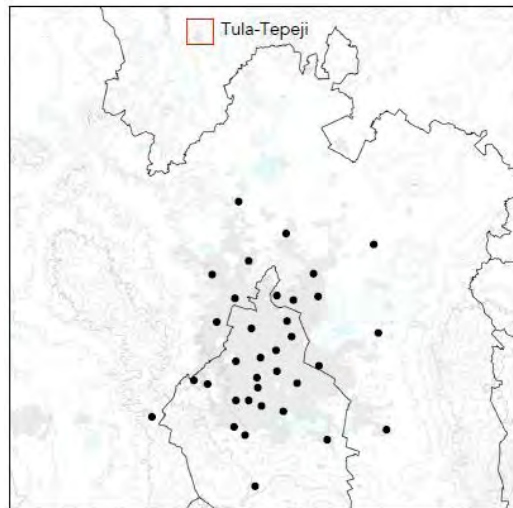


Figura 3.5. Ubicación del corredor industrial Tula-Tepeji y estaciones de monitoreo en la ZMCM

Fuente: SEDEMA, 2016

La CTFPR se encuentra ubicada en el kilómetro 27.5 de la carretera Jorobas-Tula, en el municipio de Tula de Allende en Hidalgo. Se ubica a 83 km al Noroeste de la Ciudad de México y a 8 km al Sur de la Ciudad de Tula, a una altura de 2100 msnm. Las razones que influyeron para la ubicación de la central en este lugar fueron, entre otras: la cercanía de la Ciudad de México que es el mayor centro de consumo de energía eléctrica del país, la existencia de vías de comunicación, la disponibilidad de aguas negras para su tratamiento y red de pozos para alimentar los sistemas de agua de circulación, la casi paralela construcción de la Refinería Miguel Hidalgo de PEMEX, lo que a su vez significa una ventaja en el suministro por bombeo directo del combustóleo (Fuentes, 2007).

La CTFPR cuenta con 5 unidades (U1-U5) generadoras de energía termoeléctrica con tecnología de vapor y su construcción se realizó en tres etapas: la primera abarcó la U1 y U2, las cuales comenzaron su operación en junio de 1976 y septiembre de 1975 respectivamente. La segunda etapa abarcó la construcción de la U3 y U4, que iniciaron su operación en septiembre de 1977 y abril de 1978. En la última etapa se construyó la U5 iniciando su operación en octubre de 1982, operando así con toda su capacidad.

La U1 y U2 presentan dos chimeneas respectivamente, mientras que la U3, U4 y U5 presentan una chimenea por unidad, teniendo siete chimeneas en total, las cuales tienen la función de emitir gases de escape a la atmósfera; la altura de las chimeneas de la U1 a la U4 es de 65 m cada una, mientras que para la U5 es de 56 m. Por otro lado, la configuración de sus quemadores es tangencial en la U1, U2 y U5 y frontal en la U3 y U4 (Figura 3.6)



Figura 3.6. Unidades de generación de la CTFPR

La CTFPR actualmente pertenece a CFE y forma parte de la Subgerencia Regional de Generación Termoeléctrica Central. Está posicionada como la segunda CT en emisiones totales de SO_2 en México. La central cuenta con una capacidad total instalada de 2095 MW (1,606 MW corresponden por consumo de combustóleo) distribuida de la siguiente forma: U1 y U2 con 330 MW cada una; U3 y U4 con 322.8 MW cada una; U5 con 300 MW. Además cuenta con 6 unidades de ciclo combinado con una capacidad conjunta de 489 MW. Durante el 2015 fue la instalación industrial de mayor generación eléctrica a nivel nacional, considerando las 11 unidades (vapor y ciclo combinado) (SENER, 2017a).

En los años 2010-2011, la CTFPR operaba con combustóleo como energético principal en la etapa de generación y con gas natural como combustible de arranque, así como en las unidades de ciclo combinado. En el 2014, tres de las cinco unidades de generación de la CT fueron convertidas a tecnología de combustión dual con la finalidad de que la central opere con gas natural como energético principal en la etapa de generación, para así producir energía eléctrica más limpia y de menor costo; el proyecto concluyó en 2015, iniciando operación a partir de octubre del mismo año (CFE, 2015a).

De acuerdo al Programa Indicativo para la Instalación y Retiro de Centrales Eléctricas (PIIRCE) de la SENER, se tiene planeado el retiro de la CTFPR de la siguiente forma: unidades 3 y 4 en el año 2023 y las unidades 1, 2 y 5 en el 2024 (SENER, 2017b). La decisión de tal retiro se basa en el ritmo del crecimiento del consumo de la electricidad, la incorporación de nuevas CT de tecnología limpia, el uso de equipos de generación más eficientes y la modernización del SEN con la finalidad de mejorar la competitividad.

3.3. Infraestructura de transporte de gas natural a la región de Tula

Para suministrar el gas natural al corredor industrial Tula-Tepeji, CFE ha impulsado varios proyectos en el desarrollo de gasoductos que transporten gas natural para llevar este combustible desde las regiones donde se produce hacia las regiones donde se consume. Dentro del Programa Nacional de Infraestructura y el Plan Quinquenal de Gasoductos del Centro Nacional de Gas Natural (CENAGAS) de la Estrategia Integral de Suministro de Gas Natural desarrollada en 2013 por CFE y PEMEX, tres gasoductos han sido planeados para abastecer a la región de Tula (CFE, 2016):

- **Ramal Tula.** Gasoducto en operación desde mayo de 2016 (la construcción desde 2015). Proporcionan gas natural tanto a la CTFPR y a la de CC en Tula de Allende. El transporte del gas natural se realiza desde Cempoala (Veracruz), atravesando la parte central de Puebla hasta llegar a Santa Ana de Allende (Hidalgo). La capacidad de este ramal es de 505 millones de pies cúbicos diarios. Tiene una longitud de 17 kilómetros y un diámetro de 30 pulgadas.
- **Tuxpan-Tula.** Gasoducto en construcción desde el 2016, que prevé una entrada en operación en diciembre de 2017. El transporte del gas natural comienza en Tuxpan (Veracruz), atraviesa Puebla y termina en Tula (Hidalgo). Este gasoducto contribuirá a satisfacer la demanda de nuevas centrales de generación y a otras que operan con combustóleo y que están siendo o ya fueron reconvertidas a gas natural. Tendrá una longitud de 283 km y 36 pulgadas de diámetro. Con una capacidad de 886 millones de pies cúbicos diarios.
- **Tula-Villa de Reyes.** Gasoducto en construcción desde el 2016, que prevé una entrada en operación en enero de 2018. El transporte del gas natural se origina en el municipio de Tula de Allende (Hidalgo) y se extiende hasta Villa de Reyes (San Luís Potosí), pasando por los estados de Querétaro y Guanajuato. El gasoducto tendrá una longitud de 420 km de longitud y 36 pulgadas de diámetro. Con una capacidad de 900 millones de pies cúbicos diarios.

4. METODOLOGÍA

La metodología realizada en este estudio fue la siguiente:

1. Revisión de la información registrada en las estaciones de monitoreo atmosférico del SIMAT para SO₂ empleando la información del Aseguramiento de Calidad (ACal) y Control de Calidad (CCal).
2. Aplicación de factores de emisión de la US EPA para el cálculo de emisiones de la CTFPR.
3. Aplicación del modelo de dispersión CALPUFF.
4. Comparación de las concentraciones de SO₂ obtenidas con el modelo de dispersión CALPUFF con las de monitoreo por el SIMAT.
5. Estimación de la contribución de SO₂ emitido por la CTFPR.
6. Realización de las rosas de viento en las estaciones de monitoreo.
7. Análisis estadístico de la distribución de emisiones, concentraciones y contribuciones de SO₂.
8. Comparación de concentraciones de SO₂ con su NOM de calidad del aire.

4.1 Revisión de la información registrada en las estaciones de monitoreo atmosférico del SIMAT para SO₂, empleando la información del ACal y CCal

4.1.1. Selección del periodo de estudio

Durante el año 2010 y 2011, la Sección de Contaminación Ambiental del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la Universidad Nacional Autónoma de México (SCA-CCA-UNAM), realizó un proyecto en colaboración conjunta con el Instituto de Geografía de la UNAM y Comisión Federal de Electricidad (CFE), tanto del Departamento Ambiental de la CTFPR como del Departamento de Control Ambiental de la Gerencia de Generación Termoeléctrica.

Se seleccionó el periodo de estudio de julio 2010 a junio 2011, debido a que en esos meses se contaban con los datos de consumo real de combustóleo por día y por unidad de la CTFPR, junto con los datos meteorológicos locales proporcionados por el Instituto de Geografía de la UNAM, que fueron indispensables para la correcta aplicación del modelo de dispersión CALPUFF.

4.1.2. Base de datos de calidad del aire para la ZMCM

Durante el año 2010, la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA) del SIMAT contaba con 34 estaciones de monitoreo en la ZMCM, de las cuales solamente 26 monitoreaban SO₂. A partir del año 2011, como parte del rediseño de la RAMA, 10 estaciones quedaron fuera de operación debido a que no cumplían con los objetivos del monitoreo para la red. Por otro lado, 2 estaciones fueron renombradas y comenzaron a monitorear por primera vez SO₂, las cuales fueron: La Perla (PER) renombrada como Nezahualcóyotl (NEZ) y Chapingo (CHA) renombrada como Montecillo (MON) (SEDEMA, 2012).

Tomando en cuenta la nueva configuración de las estaciones de la RAMA del SIMAT, su número disminuyó a un total de 24, de las cuales 23 monitoreaban SO₂, la única que no lo hizo en este periodo fue la estación de monitoreo Coyoacán (COY) (Figura 4.1).

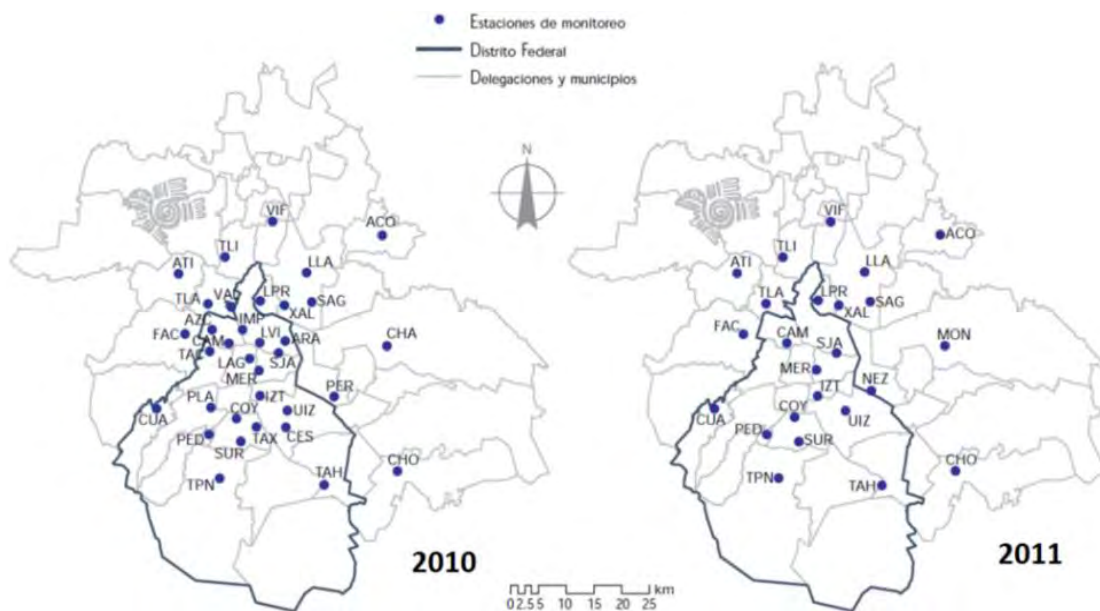


Figura 4.1. Comparativo de la red de monitoreo antes y después de la etapa del rediseño de la RAMA del SIMAT

Fuente: SEDEMA, 2012

En la Tabla 4.1 se muestran las 23 estaciones de monitoreo de SO₂ del SIMAT que operaron en el 2010 y 2011.

Tabla 4.1. Estaciones de monitoreo de SO₂ que operaron en 2010 y 2011

Región	Estación de monitoreo	Clave	Monitoreo de SO ₂	
			2010	2011
Noroeste	Atizapán	ATI	✓	✓
	Azcapotzalco	AZC	✓	
	Camarones	CAM		✓
	FES Acatlán	FAC	✓	✓
	Tacuba	TAC	✓	
	Tlalnepantla	TLA	✓	✓
	Tultitlán	TLI	✓	✓
	Vallejo	VAL	✓	
Noreste	Acolman	ACO	✓	✓
	Aragón	ARA	✓	
	La Presa	LPR	✓	✓
	La Villa	LVI	✓	
	Los Laureles	LLA	✓	✓
	Montecillo (antes Chapingo)	MON		✓
	Nezahualcóyotl (antes La Perla)	NEZ		✓
	San Agustín	SAG	✓	✓
	San Juan de Aragón	SJA		✓
	Villa de las Flores	VIF	✓	✓
	Xalostoc	XAL	✓	✓
Centro	Iztacalco	IZT	✓	✓
	Lagunilla	LAG	✓	
	Merced	MER	✓	✓
Suroeste	Cuajimalpa	CUA		✓
	Pedregal	PED	✓	✓
	Plateros	PLA	✓	
	Santa Úrsula	SUR	✓	✓
	Tlalpan	TPN		✓
Sureste	Cerro de las Estrellas	CES	✓	
	Chalco	CHO	✓	✓
	Taxqueña	TAX	✓	
	Tláhuac	TAH	✓	✓
	UAM Iztapalapa	UIZ	✓	✓

A partir de la tabla anterior, se encontró que 17 estaciones tenían información de concentraciones de SO₂ en la base de información del SIMAT en el 2010 y también en el 2011.

4.1.3. Criterio de suficiencia de información para la selección de estaciones

Para poder seleccionar las estaciones de monitoreo que se utilizaron como receptores discretos en CALPUFF fue necesario seguir un criterio de suficiencia de información para evaluar el cumplimiento de la NOM de salud de SO₂. En la NOM-022-SSA1-2010 no se especifica cómo realizar el manejo de datos y tampoco criterios de suficiencia de información para evaluar el cumplimiento de la NOM de salud, pero en congruencia con las especificaciones de las NOMs de PM y O₃ (NOM-025-SSA1-2014, NOM-020-SSA1-2014, respectivamente), se aplica en la agregación de cada dato, el criterio de 75% de suficiencia de información para obtener los indicadores (Tabla 4.2).

Tabla 4.2. Criterio de suficiencia de información para la selección de estaciones válidas

Contaminante	Dato base utilizado para la evaluación	Criterio de suficiencia anual
SO ₂	Promedio móvil de 8 horas	Al menos 75% de los promedios móviles de 8 horas
	Promedio 24 horas	Al menos 75% de los promedios de 24 horas
	Dato horario (Promedio anual)	Al menos 75% de los datos horarios

Fuente: INECC, 2015

4.1.4. Selección de las estaciones de monitoreo para CALPUFF

En la Tabla 4.3 se muestra el porcentaje de datos de concentraciones promedio de 24 horas para SO₂ con los que se contó para las 17 estaciones de monitoreo, de julio de 2010 a junio de 2011, para así cumplir con el criterio de suficiencia de información para la selección de estaciones válidas (Ver “Requisitos de la información” y “cálculo del promedio de 24 horas” del Anexo C de SEDEMA, 2012):

Tabla 4.3. Porcentaje de datos válidos de concentraciones promedio de 24 horas para SO₂ para las estaciones de monitoreo que operaron en 2010 y 2011

Región	Estación	Clave	Información disponible (%)
Noroeste	Atizapán	ATI	92.9
	FES Acatlán	FAC	96.7
	Tlalnepantla	TLA	95.1
	Tultitlán	TLI	92.1
Noreste	Acolman	ACO	71
	La Presa	LPR	58
	Los Laureles	LLA	52
	San Agustín	SAG	95.1
	Villa de las Flores	VIF	50
	Xalostoc	XAL	93.2
Centro	Iztacalco	IZT	98.1
	Merced	MER	93.4
Suroeste	Pedregal	PED	96.2
	Santa Úrsula	SUR	91.8
Sureste	Chalco	CHO	70
	Tláhuac	TAH	76.4
	UAM Iztapalapa	UIZ	95.9

Con la información anterior, se procedió a la selección de estaciones, resultando 12 de ellas como válidas ya que contaban con datos suficientes de monitoreo (más del 75% de datos) de concentraciones promedio de 24 horas para SO₂ y a partir de estos porcentajes, se seleccionaron para colocar estas estaciones como receptores discretos en CALPUF. La suficiencia de datos para validar las estaciones se relaciona con fallas de energía en las estaciones, problemas de aire acondicionado, descargas eléctricas que llevan a fallas de equipo, mantenimiento correctivo o fallas en la memoria del equipo.

En la Figura 4.2 se muestra la ubicación de las 12 estaciones de monitoreo seleccionadas como receptores discretos de SO₂ para la simulación en CALPUFF, así como la ubicación de la CTFPR en Tula de Allende, Hidalgo:



Figura 4.2. Ubicación de las estaciones de monitoreo en la ZMVM y CTFPR

4.1.5. Evaluación de la información de la calidad del aire por SO_2 en las estaciones de monitoreo

Una vez seleccionados los receptores discretos a utilizar en el estudio, se analizó y evaluó la información de calidad del aire para SO_2 generada en las distintas estaciones de monitoreo y reportadas por el SIMAT. Las estaciones de monitoreo cuentan con información de concentraciones tanto de promedios horarios como de 24 horas para el contaminante SO_2 en una base de datos colectada desde enero de 1986.

Para realizar esta evaluación se realizó una tabla de estadísticos descriptivos de la información reportada por el SIMAT en datos de concentraciones horarias de SO_2 (ppb) de las 12 estaciones de monitoreo seleccionadas como receptores discretos para el periodo de estudio. Algunas de las variables estadísticas que se muestran en la tabla son el porcentaje de datos válidos, el promedio anual de concentración (Ver “Cálculo del promedio anual” del Anexo C de SEDEMA, 2012), el percentil 25, 50 o mediana y 75, así como la desviación estándar e incertidumbre.

Para el cálculo de la desviación estándar y la incertidumbre las ecuaciones utilizadas fueron las siguientes (Miranda, 2009):

$$\text{Desviación estándar: } s(x_i) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

$$\text{Incertidumbre: } u(x_i) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}}$$

Donde:

\bar{x} = Promedio o media aritmética

n = Número de datos

x_i = Valor diario de emisión, concentración o contribución

4.2 Aplicación de factores de emisión de la US EPA para el cálculo de emisiones de la CTFPR

Los datos disponibles para la estimación de emisiones son el consumo de combustóleo para las cinco unidades de generación (U1-U5) y el porcentaje de azufre (en un intervalo de 3.5 a 4%). Estos datos fueron reportados de forma diaria por el personal del Laboratorio de Equipo de Pruebas y Mediciones (LAPEM), proporcionados por la CTFPR al personal de SCA-CCA-UNAM. El periodo de estudio fue de julio de 2010 a junio de 2011, contándose con 1,474 datos de consumo de 1,825 que habría en caso de que las unidades operaran en su capacidad total, lo cual en ciertos días no sucedió debido a que las unidades se encontraban en mantenimiento o fuera de servicio, descartando algunos datos.

Como ejemplo, se muestra el cálculo de la emisión de SO_2 del día de mayor consumo durante el periodo de estudio, siendo éste el 1° de junio de 2011. Para el cálculo del factor de emisión de SO_2 se consideró el contenido de azufre (S) en el combustóleo. La configuración del quemador es indiferente puesto que el factor de emisión es el mismo tanto para un quemador frontal como uno tangencial, en el caso del contaminante SO_2 .

Los datos necesarios para el ejemplo de cálculo, se presentan en Tabla 4.4:

Tabla 4.4. Especificaciones generales para las unidades de generación de la CTFPR, el día 1° de junio de 2011

Unidades	U1		U2		U3	U4	U5
Chimeneas	CH1	CH2	CH3	CH4	CH5	CH6	CH7
Configuración de los quemadores	Tangencial		Tangencial		Frontal	Frontal	Tangencial
Nivel de Actividad (NA) (m ³ /día)	1,978		1,733		1,380	1,702	1,518
Contenido de azufre en el combustóleo (S)	3.93%						

A continuación se presenta el cálculo de emisión para la unidad 1 (U1) utilizando el factor de emisión (FE) correspondiente al aceite combustible No. 6 (Ver sección 2.8.2) y el nivel de actividad (NA) mostrado en la tabla anterior, mediante la expresión sin un equipo de control de por medio (Ver sección 2.8.3):

$$E = FE * NA$$

$$FE = 157S = 157 \frac{lb}{1000 gal} * 3.93\% * \frac{454 g}{1 lb} * \frac{1000 gal}{3785 L} = 74 \frac{g}{L} \quad ; \quad NA = 1,978 \frac{m^3}{día}$$

$$E_{SO_2} = FE * NA = 74 \frac{g}{L} * 1978 \frac{m^3}{día} * \frac{1000 L}{1 m^3} * \frac{1 día}{24 h} * \frac{1 h}{3600 s} = 1,694 \frac{g}{s}$$

Dado que la U1 y U2 presentan dos chimeneas cada una (CH1-CH4) y las emisiones son alimentadas al modelo de dispersión por chimenea, es necesario dividir equitativamente las emisiones de estas unidades, para así obtener las emisiones por chimenea. Las U3, U4 y U5 solo cuentan con 1 chimenea cada una (CH5-CH7). En la Tabla 4.5 se presentan las emisiones resultantes de SO₂ para las 7 chimeneas para el 1° de junio de 2011:

Tabla 4.5. Emisiones resultantes por chimenea de la CTFPR, el día 1° de junio de 2011

Chimeneas	CH1	CH2	CH3	CH4	CH5	CH6	CH7
Emisiones (g/s)	847	847	742	742	1,182	1,458	1,300

El procedimiento anterior se realizó para cada día de julio de 2010 a junio de 2011, con la finalidad de alimentar las emisiones por chimenea y no por unidad, ya que en el modelo de dispersión CALPUFF, las chimeneas tienen diferentes coordenadas geográficas de acuerdo al sistema de posicionamiento global (GPS).

4.3 Aplicación del modelo de dispersión CALPUFF

Con el propósito de estimar las concentraciones de SO₂ en la ZMCM mediante la aplicación del modelo de dispersión CALPUFF, se generó y se alimentó como datos de entrada al modelo: la información referente a uso de suelo y topografía, meteorología superficial y en la vertical, así como características de las chimeneas de las unidades de la central y las emisiones previamente estimadas. También se colocaron receptores discretos en el dominio de estudio para así conocer la contribución de SO₂ a partir de la CTFPR.

Los parámetros de las chimeneas a alimentar en el modelo fueron las siguientes:

- Coordenadas de la chimenea
- Diámetro interno de la chimenea
- Altura física de la chimenea
- Velocidad de salida de los gases
- Temperatura de salida de los gases
- Emisiones estimadas a partir del consumo diario de combustible.

4.3.1 Configuración del modelo de dispersión CALPUFF

De forma general el modelo CALPUFF fue configurado de la siguiente forma: para CALMET, la información meteorológica fue procesada por el modelo meteorológico MM5. Para CALPUFF, las emisiones fueron alimentadas por día y por chimenea y se utilizó como método de transformación química el modelo MESOPUFF II Chemistry. Para CALPOST, se seleccionaron las opciones predeterminadas que permitirían el cálculo de promedios en 24 horas de concentración de SO₂ para cada receptor discreto debido a que la base de datos meteorológica con la que se contó fue diaria.

Para la aplicación del modelo de dispersión se aplicó el Modo Refinado de la versión 6 de CALPUFF View (Aprobado y certificado por la US EPA) de la empresa Lakes Environmental Software, la cual incorpora preprocesadores que permiten descargar datos de forma automática de meteorología y geofísicos. La licencia del modelo fue adquirida por la SCA-CAA-UNAM.

En la Tabla 4.6 se muestran las especificaciones utilizadas de acuerdo al terreno en el que se obtuvo la dispersión de SO₂:

Tabla 4.6. Especificaciones iniciales para la simulación en CALPUFF

Fuente	Central Termoeléctrica Francisco Pérez Ríos (CTFPR). Tula de Allende, Hidalgo
Receptores	Estaciones de monitoreo de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM)
Zona de Tiempo	UTC: Universal Time Coordinated UTC-0500. Eastern N. America para meses de abril a octubre UTC-0600. Central N. America para meses de noviembre a marzo
Proyección de mapa	UTM: Universal Transverse Mercator WGS84: World Geodetic System 84. Reference Ellipsoid, Global coverage
Parámetro de proyección	Zona UTM: 14 Hemisferio: Norte
Celdas verticales	10 celdas verticales sugeridas por EPA, Federal Land Manager & VISTAS: 0, 20, 40, 80, 160, 320, 640, 1200, 2000, 3000 m

Una vez que se seleccionaron las especificaciones, se acopló al mismo tamaño la malla meteorológica y computacional. El modelo se aplicó a un dominio de 60 celdas cuadrículas en dirección Este-Oeste y 90 celdas cuadrículas en dirección Norte-Sur, con una resolución de 2 km por cuadrícula, teniendo así una malla de 180x120 km² con origen en las unidades de la CTFPR, la cual tiene coordenadas geográficas de 20°03'16.3" Latitud Norte y 99°16'15.2" Longitud Oeste (Cureño *et al*, 2011). El radio de modelado para simular la dispersión del contaminante a partir de la fuente como punto central fue de 100 km, debido a que la cercanía de la ZMCM a la central es de aproximadamente 83 km.

En la Figura 4.3a se muestra el dominio seleccionado para la simulación del modelo de dispersión junto con su terreno de elevación y en la Figura 4.3b se muestra el mapa digital de relieve junto con la ubicación de la CTFPR y su zona de influencia, sobre la cual fue aplicado el modelo de dispersión CALPUFF.

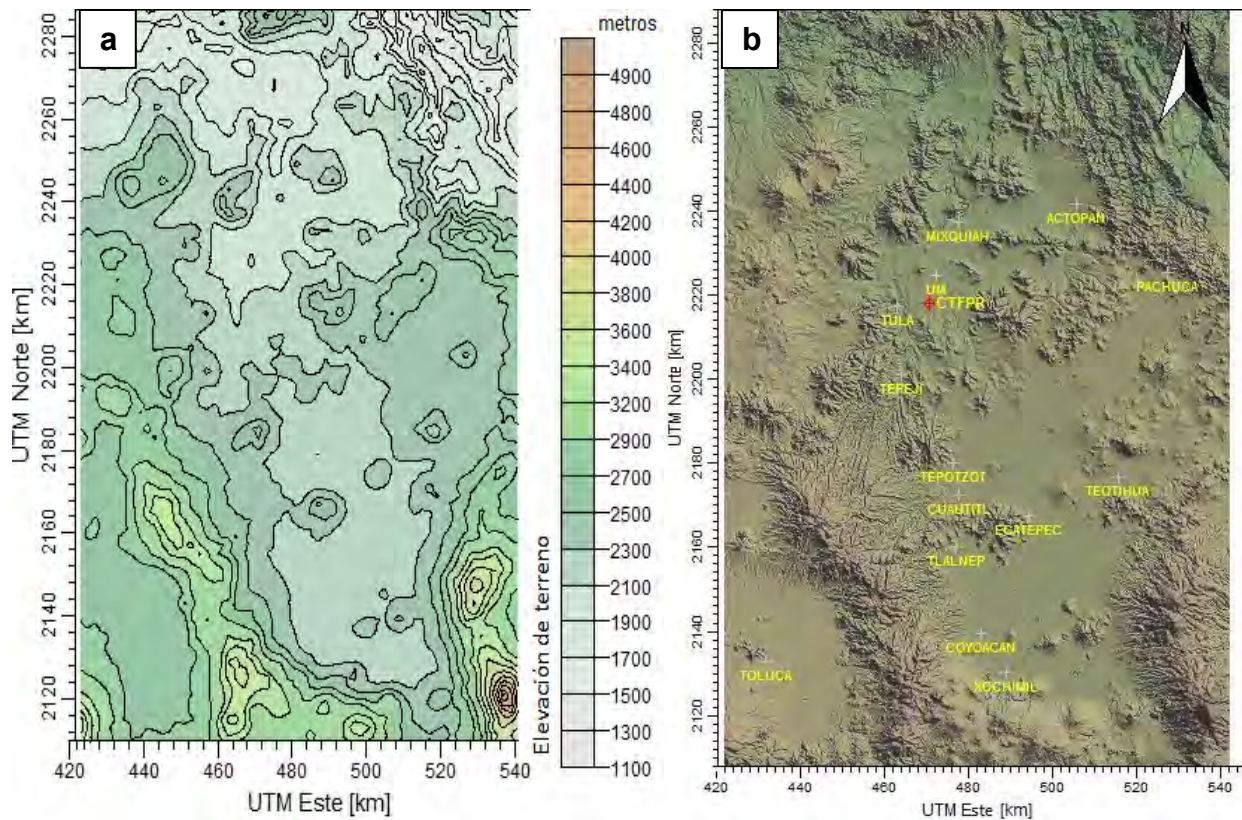


Figura 4.3 a. Dominio modelado (180 x 120 km²) y su terreno de elevación. 4.3 b. Mapa digital de relieve de la región de estudio utilizada para la aplicación del modelo CALPUFF

4.3.2. Datos geofísicos

Los datos de terreno y de uso de suelo se encontraron en el sitio web del “Geographic Information Systems” (GIS) Resource, el cual obtiene los datos de la “US Geological Survey” (USGS).

Los datos de terreno se obtuvieron a partir de los archivos disponibles: GTOPO-30 (“Global Topography 30 Arc Second Elevation”) y SRTM30 (“Shuttle Radar Topography Mission 30 Arc Second Elevation”) a una resolución de 900 metros.

Para el uso de suelo, los datos se obtuvieron directamente a partir del archivo GLCC (“Global Land Cover Characterization”) North America a una resolución de 1000 m.

Una vez que se tuvieron los datos de terreno y uso de suelo, se seleccionó como referencia el punto que tenía la máxima altura encontrada dentro del dominio, debido a que se considera el obstáculo más prominente y que afecta la dispersión del contaminante. A partir de este punto se estableció un radio de influencia de las

características del terreno de 80 km, distancia elegida ya que a esa longitud los receptores se encontraron dentro de la cobertura del radio y así se obtuvo una concentración más precisa influenciada por la dispersión de este obstáculo. El punto se localizó en las coordenadas UTM X (km): 537 y Y (km): 2,121.

4.3.3. Datos meteorológicos

Los datos meteorológicos que representaron las características típicas de la ciudad de Tula, tanto en la superficie como en la vertical fueron determinados por parte de la SCA-CCA-UNAM. La información fue proporcionada al grupo de Climatología del Instituto de Geografía de la UNAM y junto con una base de datos globales generaron las salidas para la evaluación de la dispersión de contaminantes en el modelo CALPUFF. La base de datos globales de reanálisis provino de la “National Centers for Environmental Prediction” (NCEP) y de la “National Center for Atmospheric Research” (NCAR), ambos servidores de la “National Oceanic and Atmospheric Administration” (NOAA).

Los datos de mediciones fueron preparados para ser procesados por la quinta generación del modelo meteorológico de mesoescala (MM5), Pennsylvania State University - NCAR, con la finalidad de proveer campos tridimensionales (con alta resolución espacial horizontal de 2 km y temporal de 1 hora) de vientos, temperatura, humedad y distribución espacial de la precipitación y así obtener archivos con datos diarios compatibles con el módulo CALMET, el cual es la primera etapa del modelo CALPUFF.

4.3.4. Descripción de la fuente

Para el módulo posterior al procesamiento de datos en CALMET, el cual se llama CALPUFF, se incluyó la configuración de los datos de fuente y los receptores, así como la elección del modelo fotoquímico de transporte y dispersión a utilizar.

En la Tabla 4.7 se presentan las características de las chimeneas ubicadas en la CTFPR, las que se ingresaron al modelo de forma individual tales como: sus coordenadas, diámetro, altura, temperatura de los gases de salida.

Tabla 4.7. Características de las chimeneas ubicadas en la CTFPR

Unidad	Chimenea	Coordenadas (UTM)		Diámetro (m)	Altura física (m)	Temperatura de los gases de salida (K)
		X (km)	Y (km)			
U1	CH1	470.99	2,217.86	3.40	65.00	460.13
	CH2	470.99	2,217.85	3.40	65.00	460.13
U2	CH3	470.98	2,217.82	3.40	65.00	445.45
	CH4	470.98	2,217.81	3.40	65.00	445.45
U3	CH5	470.98	2,217.74	5.33	65.00	453.65
U4	CH6	470.98	2,217.70	5.33	65.00	440.76
U5	CH7	470.97	2,217.63	5.40	56.00	430.78

En la Figura 4.4 se muestran las 5 unidades que conforman a la CTFPR desde una vista aérea, así como sus alrededores



Figura 4.4. Imagen satelital de las unidades de generación de la CTFPR obtenida con el programa Google Earth

Además de la información anterior necesaria para el modelo, se requirió la velocidad de salida de los gases de las chimeneas, la cual fue obtenida a partir de los datos de muestreos reportados por el personal del LAPEM de la CTFPR y proporcionados a la SCA-CCA-UNAM. Al igual se ingresaron sus emisiones calculadas por chimenea mediante los FE para SO_2 (Ver sección 4.2 de este documento).

4.3.5. Descripción de los receptores

Se colocaron receptores de tipo discreto en el dominio de estudio los cuales son las estaciones de monitoreo de la RAMA del SIMAT que fueron seleccionadas. La Tabla 4.8 muestra las coordenadas UTM en km de las estaciones de monitoreo así como la altura a la que se encuentran sobre el nivel del mar:

Tabla 4.8. Coordenadas de las estaciones de monitoreo y su altura sobre el nivel del mar

Región	Estación	Clave	X (km)	Y (km)	Altura (msnm)
Noroeste	Atizapán	ATI	473	2164	2,345
	Fes Acatlán	FAC	474	2154	2,309
	Tlalnepantla	TLA	479	2159	2,319
	Tultitlan	TLI	481	2167	2,317
Noreste	San Agustín	SAG	497	2160	2,250
	Xalostoc	XAL	492	2159	2,309
Centro	Merced	MER	487	2148	2,262
	Iztacalco	IZT	488	2143	2,248
Suroeste	Pedregal	PED	479	2137	2,338
	Santa Úrsula	SUR	484	2135	2,287
Sureste	Tláhuac	TAH	499	2128	2,301
	UAM Iztapalapa	UIZ	493	2141	2,241

En la Figura 4.5 se muestra el dominio del modelo a utilizar y la localización de la CTFPR y las 12 estaciones de monitoreo seleccionadas:

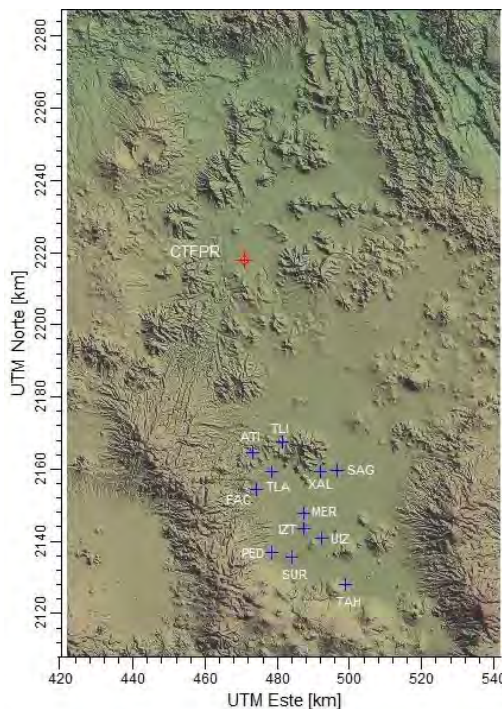


Figura 4.5. Dominio modelado (180 x 120 km²); CTFPR (+); localización de las estaciones de monitoreo (+) del SIMAT seleccionadas

4.3.6. Módulo de reacción química

Dentro del módulo de dispersión, en el apartado de Especies, se eligió el módulo de reacción química MESOPUFF II para SO_2 , ya que incorpora las dependencias más significativas de espacialidad y temporalidad con las variaciones de condiciones ambientales.

En el caso del SO_2 se eligió el cálculo de concentración en los distintos receptores discretos para estimar el SO_2 resultante después de su transformación en la atmósfera cuando se lleva a cabo su dispersión, teniendo como datos mínimos de partida las emisiones de SO_2 calculadas con FE.

4.3.7. Obtención de concentraciones e isólinas de SO_2 en CALPUFF

Después de realizar las configuraciones correspondientes para los tres módulos de CALPUFF (CALMET-CALPUFF-CALPOST) y simular la secuencia de estos módulos, se obtuvieron las concentraciones de SO_2 en las coordenadas de los distintos receptores discretos de la ZMCM, así como la distribución de las isólinas a lo largo del dominio, reportadas en resultados de CALPOST.

En la Figura 4.6 se muestra las isólinas de concentración que se obtuvieron para el caso ejemplo del 1° de junio de 2011.

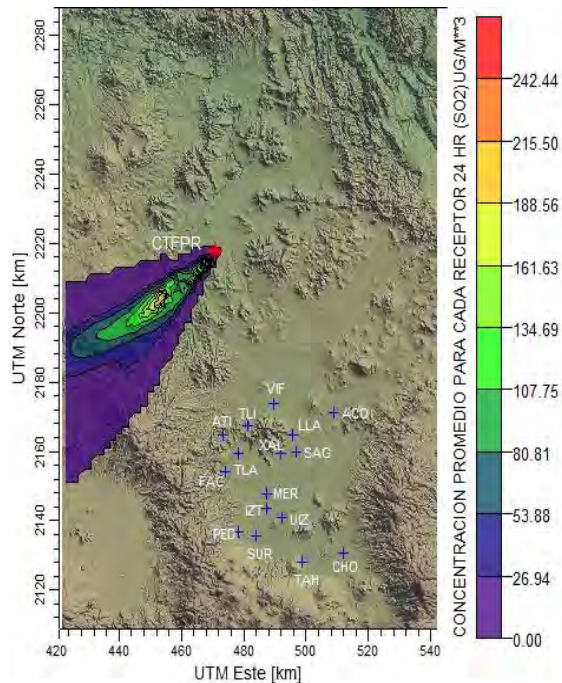


Figura 4.6. Dispersión de SO_2 , 1° de junio de 2011

Como se observa en la figura anterior, la dispersión se realizó hacia el Suroeste de la CTFPR. En este caso la dispersión de SO₂ no fue realizada hacia la ZMCM y esto se debe a las condiciones meteorológicas de ese día (por ejemplo, la dirección del viento), así como a las condiciones de terreno del dominio. Una adecuada caracterización de la meteorología y topografía de una región permite llegar a una adecuada evaluación de la capacidad de la cuenca atmosférica para dispersar contaminantes atmosféricos.

4.3.7.1. Corrección de concentraciones por presión y temperatura

Las concentraciones obtenidas en las simulaciones fueron corregidas mediante presión y temperatura para su posterior comparación con la norma. Para hacer esta corrección se utilizó la ecuación de variación de la presión en función de la altura, ya que se conocían todas las alturas a lo largo del área de dominio, es decir, alturas cada 2 km de la malla. La ecuación es la siguiente:

$$P_h = P_0 e^{\left(\frac{-mgh}{kT}\right)}$$

Donde:

P_h = Presión a una altura dada (atm)

P₀ = Presión respecto al nivel del mar (atm)

m = masa molecular promedio del aire seco = 0.029 $\frac{kg}{mol}$

g = constante de gravedad = 9.8 $\frac{m}{s^2}$

h = altura (m)

k = constante de Boltzman = 1.38 x 10⁻²³ $\frac{J}{átomos \cdot K}$ = 1.38 x 10⁻²³ $\frac{kgm^2}{s^2 \cdot átomos \cdot K}$

T = Temperatura (K)

Sabiendo que se quiere obtener una P_h = 1 atm a una T = 298.15K, debido a que la norma es referenciada a condiciones estándar, se procede a despejar P₀ para encontrar la presión a una altura dada respecto al nivel del mar, teniendo así:

$$P_0 = \frac{P_h}{e^{\left(\frac{-mgh}{kT}\right)}}$$

Realizando la comprobación de unidades de la ecuación anterior:

$$atm = \frac{atm}{e^{\left(\frac{-\frac{kg}{mol} \cdot \frac{m}{s^2} \cdot m \cdot \frac{mol}{6.022 \times 10^{23} \text{ átomos}}}{\frac{kgm^2}{s^2 \cdot átomos \cdot K}}\right)}}$$

Una vez encontrado la presión mediante la ecuación anterior, se multiplicaron las concentraciones obtenidas en el modelo de dispersión por este valor numérico, obteniendo así las concentraciones de SO₂ ya corregidas, en unidades de µg/m³ para poder hacer sus comparaciones con la NOM de calidad del aire correspondiente.

4.3.7.2. Conversión de unidades

Posteriormente, se optó por convertir las unidades de µg/m³ a ppb debido a que las concentraciones en la base de datos del SIMAT se encuentran en ppb y se facilita la comparación de los resultados obtenidos en CALPUFF con los reportados en el SIMAT. Tomando la relación volumétrica, donde se sabe que para el caso de contaminación del aire $1\text{ ppb} = \frac{1\ \mu\text{l de contaminante}}{\text{m}^3\ \text{de aire}}$ y un volumen molar de $24.4\ \frac{\text{L}}{\text{mol}}$, que se obtiene a partir de la ecuación del gas ideal a condiciones estándar (P=1 atm, T=298.15K), la conversión utilizada fue la siguiente:

$$\text{ppb} = \frac{\frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3} * V_m}{PM * 1000} * 1000$$

Donde:

V_m = Volumen molar a condiciones estándar = $24.4\ \frac{\text{L}}{\text{mol}}$

PM = Peso molecular de SO₂ ($64\ \frac{\text{g}}{\text{mol}}$)

La comprobación de unidades de la ecuación anterior es la siguiente:

$$\frac{\mu\text{l}}{\text{m}^3} = \frac{\frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3} * \frac{\text{L}}{\text{mol}} * \frac{1\ \text{mg}}{1000\ \mu\text{g}} * \frac{1000000\ \mu\text{l}}{1\ \text{L}}}{\frac{\text{g}}{\text{mol}} * \frac{1000\ \text{mg}}{1\ \text{g}}}$$

4.4. Comparación de las concentraciones de SO₂ obtenidas con el modelo de dispersión CALPUFF con las de monitoreo por el SIMAT

Una vez que se obtuvieron las concentraciones en promedios de 24 horas (corregidas por presión y temperatura) a partir de CALPUFF y la base de datos del SIMAT para los distintos receptores, se procedió a elaborar gráficos donde se compararon las concentraciones de SO₂ reportadas en cada una de las estaciones de monitoreo, con

las obtenidas como resultado de la aplicación del modelo de dispersión para el periodo anual analizado.

También para observar una comparación más clara del comportamiento de las concentraciones de SO₂ en la ZMCM, se agruparon las estaciones de monitoreo por regiones y se elaboraron gráficos donde se mostró la comparación entre ellas y así observar la tendencia de cada región, tanto con lo obtenido en CALPUFF como por lo reportado por el SIMAT.

De la elaboración de estos gráficos de concentraciones, se obtuvo el día con mayor concentración para cada receptor obtenido en CALPUFF y el día con mayor concentración reportado por el SIMAT y se mostraron las figuras de las isóneas de concentración para estos días.

4.5 Estimación de la contribución de SO₂ emitido por la CTFPR

Después de realizar la corrección de concentraciones por presión, temperatura y la conversión de unidades a partes por billón (ppb) durante el periodo anual de estudio, se obtuvo el porcentaje de contribución de SO₂ por parte de la CTFPR.

Para cada receptor discreto, se compararon los valores de concentración obtenidos en CALPUFF con los reportados por el SIMAT, considerando éstos como el 100%, para obtener el porcentaje de contribución que tuvo la CTFPR en la ZMCM en el periodo anual de estudio. La ecuación utilizada para la estimación de contribución es la siguiente:

$$\%Contribución = \frac{\text{Concentración obtenida en CALPUFF}}{\text{Concentración reportada por SIMAT}} * 100$$

De acuerdo a la ecuación anterior, se observa que la contribución de SO₂ estimada es directamente proporcional a la concentración del contaminante obtenido en CALPUFF como producto de las emisiones de la CTFPR y es inversamente proporcional a las concentraciones reportadas por el SIMAT como producto de las emisiones de diversas fuentes.

De la determinación de las contribuciones diarias que tuvo la CTFPR en la ZMCM, se obtuvo el día con mayor contribución del periodo de estudio y las isóneas de concentración de SO₂ para ese día. Esto se realizó para cada receptor discreto.

4.6 Realización de las rosas de viento en las estaciones de monitoreo

Se procedió a realizar rosas de viento para las distintas estaciones de monitoreo que contaban con una base de datos meteorológicos para así determinar la dirección predominante de los vientos durante los días con mayor concentración reportados por el SIMAT y los obtenidos en CALPUFF y también los días con mayor contribución.

Las rosas de viento fueron obtenidas a partir de los Gráficos Interactivos que se encuentran dentro de la sección de Estadísticas del sitio web de la Dirección de Monitoreo Atmosférico: <http://www.aire.cdmx.gob.mx>. No todas las estaciones de monitoreo cuentan con una base de datos meteorológicos para la elaboración de las rosas de viento durante el periodo de estudio.

En la Tabla 4.9 se muestran las 9 estaciones que cuentan con información de dirección y velocidad del viento para generar estas rosas:

Tabla 4.9. Estaciones de monitoreo que cuentan con base de datos meteorológicos

Región	Estación	Clave
Noroeste	FES Acatlán	FAC
	Tlalnepantla	TLA
Noreste	San Agustín	SAG
	Xalostoc	XAL
Centro	Merced	MER
Suroeste	Pedregal	PED
	Santa Úrsula	SUR
Sureste	Tláhuac	TAH
	UAM Iztapalapa	UIZ

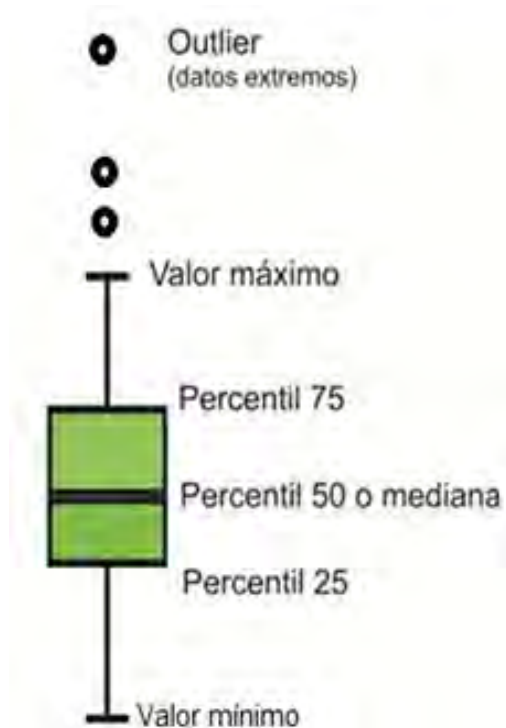
Las estaciones que no cuentan con base de datos meteorológicos para la obtención de las rosas de viento son: Atizapán (ATI), Tultitlán (TLI) e Iztacalco (IZT).

4.7. Análisis estadístico de la distribución de emisiones, concentraciones y contribuciones de SO₂

Con base en el porcentaje de datos válidos se observa que hay suficiencia analítica de la información en las 12 estaciones de monitoreo seleccionadas.

A partir de la información de calidad del aire por SO₂ generada por las estaciones de monitoreo en la zona de estudio se procedió a representar los datos obtenidos

mediante diagramas de cajas. Para su elaboración se utilizó el software IBM-SPSS Statistics. La descripción del diagrama se presenta a continuación:



Valor Máximo: Representa el comportamiento de eventos extraordinarios del conjunto de datos.

Percentil 75: Valor abajo del cual se encuentra el 75% de los eventos. Caracteriza el comportamiento de los registros altos de un contaminante, evita la presencia de eventos extraordinarios de contaminación.

Percentil 50 o mediana: Valor que divide en dos partes iguales al total de eventos. Caracteriza el comportamiento de registros típicos, tiene mayor sensibilidad a su aumento.

Percentil 25: Valor abajo del cual se encuentra el 25% de los eventos. Caracterizan el

comportamiento de registros bajos y son sensibles ante su posible aumento.

Valor mínimo: Representa el comportamiento de eventos extraordinarios del conjunto de datos.

Rango intercuartil. Calculado como la diferencia del percentil 75 y el percentil 25. Caracteriza la variación de registros típicos, evita la influencia del 25% de las concentraciones más altas y del 25% de las concentraciones más bajas de un conjunto de datos.

Outlier o valores extremos: Comportamiento de eventos extraordinarios de contaminación. Representa escasamente al conjunto de datos y son valores que están 3 veces por arriba del valor del rango intercuartil.

Aunado a la representación gráfica de diagramas de cajas, se muestran las tablas de estadísticos descriptivos donde se observan los datos válidos, es decir, el número de días que contó con más del 75% de información de concentraciones, la mediana, percentil 25 y 75, desviación estándar, valores mínimos y máximos de concentración y contribución en las estaciones e incertidumbre en ppb.

4.8. Comparación de concentraciones de SO₂ con su NOM de calidad del aire

Se realizaron gráficos para comparar los resultados obtenidos a nivel de superficie por el modelo de dispersión CALPUFF con la NOM de calidad del aire para SO₂ (NOM-022-SSA1-2010), que establece que la concentración de SO₂ como contaminante atmosférico no debe rebasar el límite máximo normado de 0.11 ppm (288 µg/m³) promedio en 24 horas una vez al año para protección a la salud de la población.

Con fines de comparación de las concentraciones de SO₂ con la NOM, se realizaron las conversiones de partes por billón a partes por millón (1 ppb = 1000 ppm). Las gráficas elaboradas fueron para las concentraciones obtenidas en CALPUFF en la zona de influencia de la CTFPR y en los distintos receptores discretos y también para las concentraciones monitoreadas en el SIMAT para promedios de 24 horas en ppm (Ver “Evaluación del promedio de 24 horas” del Anexo C de SEDEMA, 2012).

5. RESULTADOS

5.1 Evaluación de la información de la calidad del aire por SO₂ en las estaciones de monitoreo

Para evaluar la información oficial de calidad del aire en las estaciones de monitoreo, se revisó la base de datos del SIMAT de concentraciones horarias para SO₂ (ppb) y se elaboró una tabla de estadísticos por región de la ZMCM (Tabla 5.1) con la finalidad de verificar que al igual que las concentraciones promedio de 24 horas, también se cumple con el criterio de suficiencia de información para las concentraciones horarias (arriba del 75% de datos) y no se tiene que descartar alguna de las estaciones seleccionadas.

Tabla 5.1. Estadística básica de la información en datos horarios de la calidad del aire por SO₂ generada en las 12 estaciones de monitoreo de julio de 2010 a junio de 2011

Región	Noroeste				Noreste	
Estaciones de monitoreo	ATI	FAC	TLA	TLI	SAG	XAL
Datos Totales	8,760	8,760	8,760	8,760	8,760	8,760
Datos Válidos	8,522	8,442	8,250	8,428	8,290	8,164
% Datos Válidos	97.3	96.4	94.2	96.2	94.6	93.2
Promedio anual (ppb)	7.10	7.58	6.95	5.76	5.11	4.47
Mediana (ppb)	3	4	5	4	3	3
Desviación estándar (ppb)	13.51	12.87	8.61	9.07	5.99	8.86
Mínimo (ppb)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Máximo (ppb)	272	274	147	163	97	178
Percentil 25 (ppb)	1	2	4	2	3	2
Percentil 75 (ppb)	7	7	7	6	5	4
Incertidumbre (ppb)	0.146	0.140	0.167	0.162	0.097	0.086

Región	Centro		Suroeste		Sureste	
Estaciones de monitoreo	IZT	MER	PED	SUR	TAH	UIZ
Datos Totales	8,760	8,760	8,760	8,760	8,760	8,760
Datos Válidos	8,172	8,163	8,425	8,346	7,736	8,291
% Datos Válidos	93.3	93.2	96.2	95.3	88.3	94.6
Promedio anual (ppb)	3.93	2.26	8.84	6.84	4.19	6.53
Mediana (ppb)	2	1	4	3	2	5
Desviación estándar (ppb)	6.90	3.67	15.19	14.87	6.53	7.73
Mínimo (ppb)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Máximo (ppb)	125	60	283	248	121	143
Percentil 25 (ppb)	1	0	2	1	1	2
Percentil 75 (ppb)	4	3	8	6	5	8
Incertidumbre (ppb)	0.095	0.1004	0.065	0.076	0.042	0.072

Para observar el comportamiento de las concentraciones de SO₂ durante el día, en las 12 estaciones de monitoreo seleccionadas de la ZMCM, se determinó el promedio de las concentraciones a cada hora del día en el periodo de estudio con la misma base de datos utilizada para generar la tabla anterior. El perfil de concentraciones horarias se muestra en la Figura 5.1.

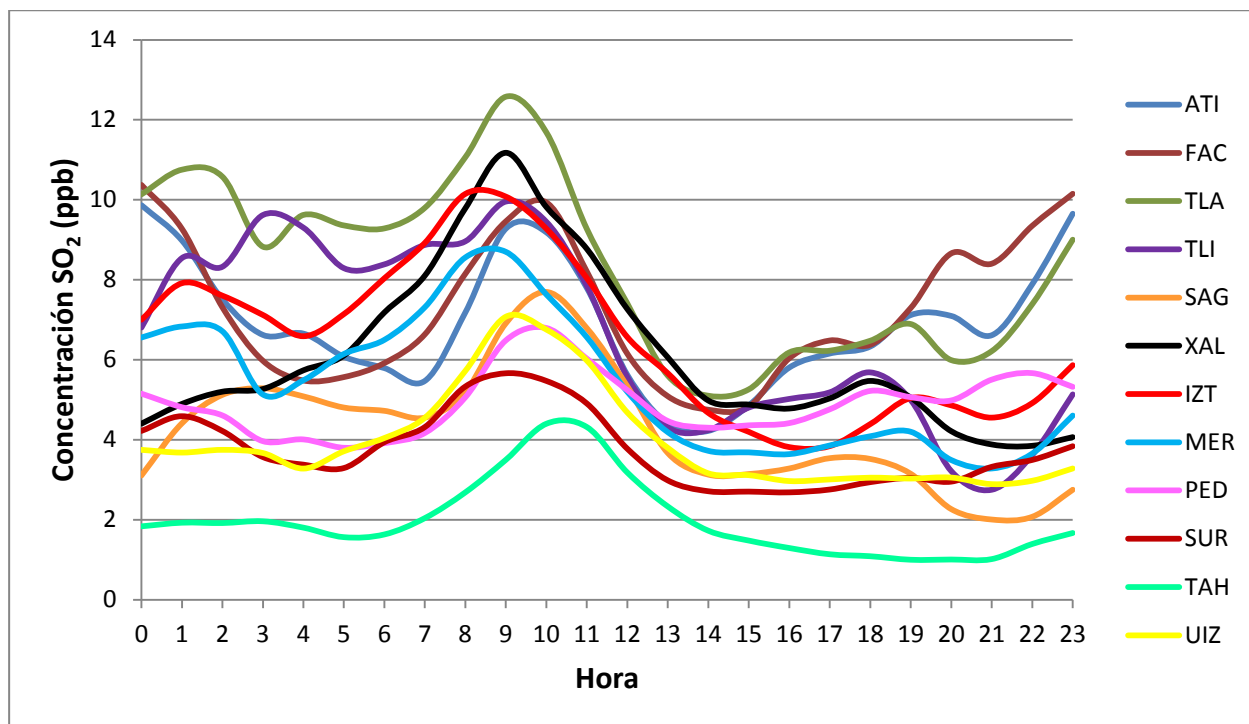


Figura 5.1. Perfil de la concentración horaria de SO₂ de las estaciones de monitoreo de julio de 2010 a junio de 2011

En la figura anterior, se observa de manera general un incremento de las concentraciones de SO₂ a partir de las 7:00 y hasta las 13:00 hrs, con un valor máximo entre las 8:00 y 11:00 hrs, un decremento entre las 13:00 y 20:00 hrs y una tendencia constante durante la madrugada.

Las estaciones con mayor concentración de SO₂ fueron en los horarios de inicio de la actividad industrial (8:00 a 11:00 hrs) en Tlalnepantla (TLA) y Xalostoc (XAL), ambas localizadas al Norte de la ZMCM y en la trayectoria de la pluma que proviene de la zona Tula-Tepeji y las de menor fueron Santa Úrsula (SUR) y Tláhuac (TAH), ubicadas al Sur de la ZMCM; a pesar de que existen menor número de fuentes de emisión en esa región, la presencia de SO₂ se atribuye a su acarreo desde el Norte.

5.2. Consumo de combustóleo

La CTFPR opera todos los días del año, sin embargo, no todas sus unidades lo hacen al mismo tiempo, debido a que pueden encontrarse en mantenimiento o en reparación. También cada unidad puede presentar diferente generación de energía eléctrica ocasionada por la demanda requerida. El consumo de combustóleo de la central depende del número de unidades en funcionamiento. Los días de operación por unidad de generación durante el periodo de estudio se presentan en la Tabla 5.2:

Tabla 5.2. Días de operación de cada unidad de generación de la CTFPR

Unidad de generación	Número de días en operación
U1	317
U2	330
U3	304
U4	287
U5	236

En la Figura 5.2 se muestra el consumo total (suma de las 5 unidades de generación) de combustóleo en m³/día. Las líneas de color naranja corresponden al periodo de estudio seleccionado en el que se contó con una base de datos meteorológicos para CALPUFF, mientras que las líneas de color azul corresponden a los meses en los que solo había información de consumo de combustóleo proporcionada por la central, pero el cual no fue seleccionado debido a que no había una base de datos meteorológicos.

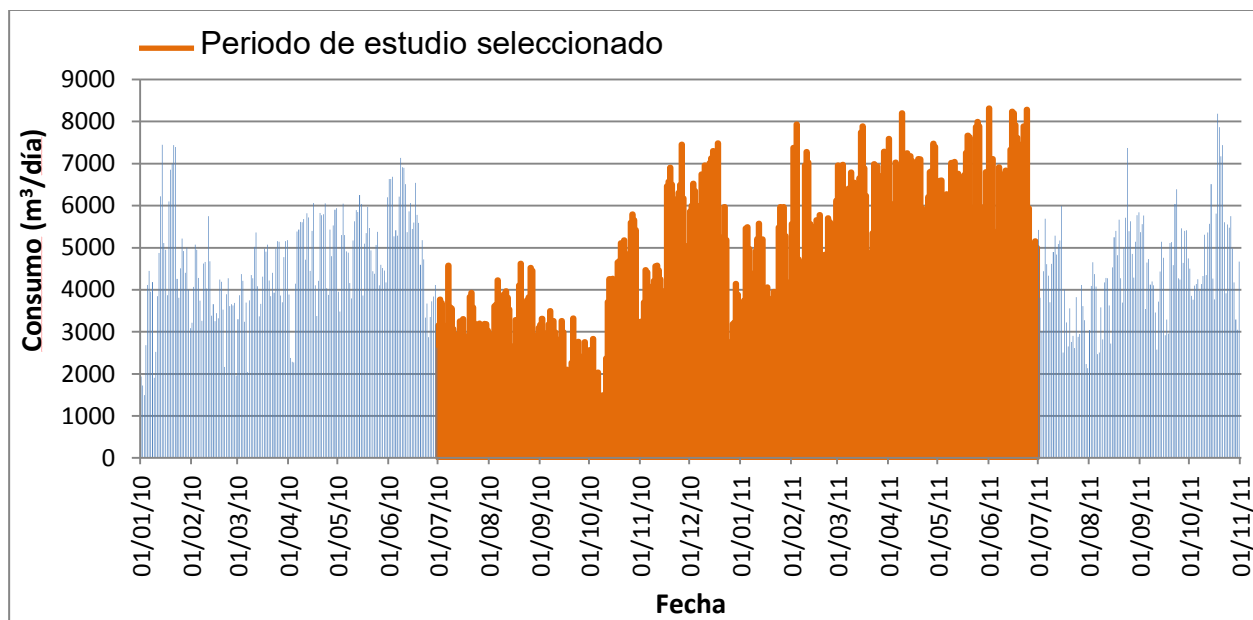


Figura 5.2. Consumo diario de combustóleo por la CTFPR, de julio de 2010 a junio de 2011

5.3. Estimación de emisiones

A partir del consumo de combustóleo y los FE se estimaron las emisiones de SO₂ por unidad y por día. Con estas emisiones se elaboró una gráfica donde se muestran las emisiones totales (suma de las 5 unidades de generación). El periodo de estudio a analizar se indica nuevamente con color naranja (Figura 5.3).

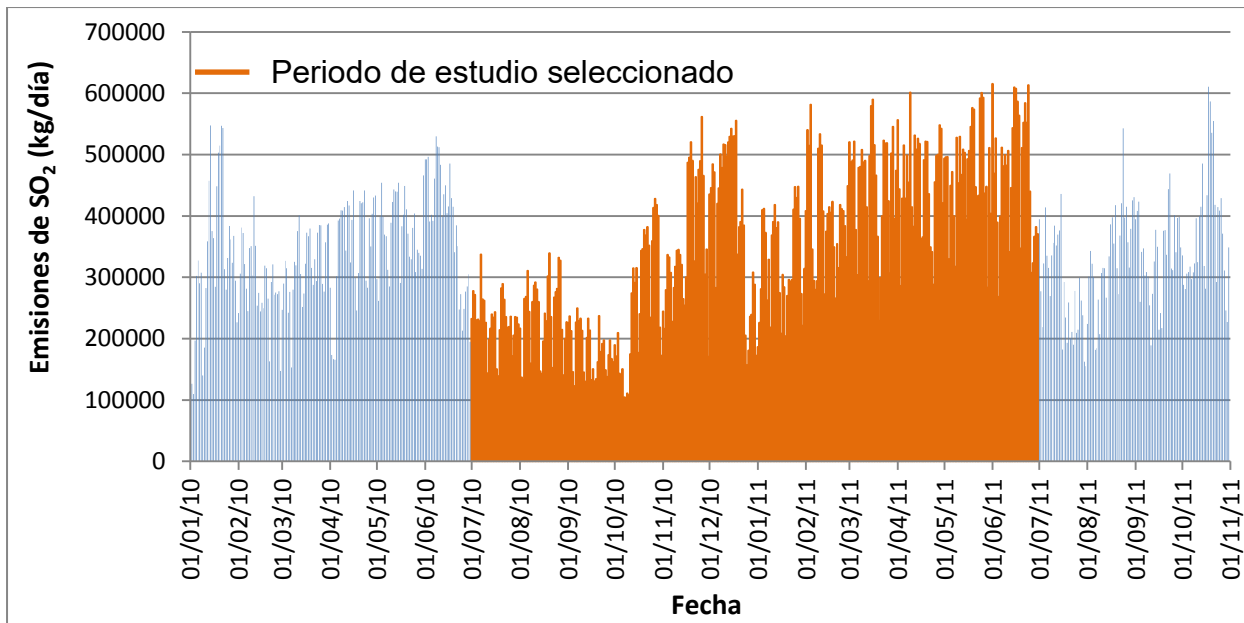


Figura 5.3. Emisiones diarias totales de SO₂ por la CTFPR, de julio de 2010 a junio de 2011

En las Figuras 5.2 y 5.3 se observa el mismo comportamiento pero con distinto orden de magnitud debido a que para la obtención de emisiones se multiplicó el consumo de combustóleo por un factor de emisión, es decir, a mayor consumo de combustóleo hay mayores emisiones de SO₂. En la Tabla 5.3 se presentan las cifras del consumo de combustóleo y las emisiones resultantes por unidad durante el periodo anual analizado:

Tabla 5.3. Consumo de combustóleo y emisiones de SO₂ por unidad de la CTFPR, de julio de 2010 a junio de 2011

Unidad de generación	Consumo de combustóleo (m ³ /año)	Emisiones de SO ₂ (Ton/año)
U1	386,240	28,512
U2	390,673	28,933
U3	370,798	27,419
U4	330,670	24,543
U5	263,479	19,487
Total	1,741,860	128,894

5.4. Concentraciones de SO₂ obtenidas con el modelo de dispersión CALPUFF y las reportadas por el SIMAT

Al periodo anual de estudio, se le aplicó el modelo de dispersión CALPUFF, con el módulo de transformación química MESOPUFF II para la estimación de concentración de SO₂ en cada receptor discreto.

5.4.1. Receptores discretos

Para conocer el comportamiento de las concentraciones promedio de 24 horas para SO₂ en los distintos receptores de la ZMCM, de julio de 2010 a junio de 2011, se presentan las Figuras 5.4 a 5.33. Las figuras se encuentran ordenadas de acuerdo a su región en la ZMCM: Noroeste, Noreste, Centro, Suroeste y Sureste.

REGIÓN NOROESTE

Receptor: Atizapán (ATI)

La Figura 5.4 muestra la gráfica de comparación de concentración de SO₂ obtenida con CALPUFF y la registrada en el SIMAT en el periodo de estudio en el receptor ATI. Se observan las mayores concentraciones en noviembre, diciembre y algunos máximos en febrero, mayo. La tendencia entre lo obtenido en CALPUFF y lo reportado en el SIMAT sigue el mismo comportamiento.

Las Figuras 5.5 y 5.6 muestran las isólineas de concentración de SO₂ del día de mayor concentración en el receptor ATI obtenido en CALPUFF y SIMAT, respectivamente. En ambas figuras se observa el impacto que hubo de la pluma en el receptor ATI en la ZMCM, con una dispersión que se observa con dirección Norte y Sur a partir de la CTFPR.

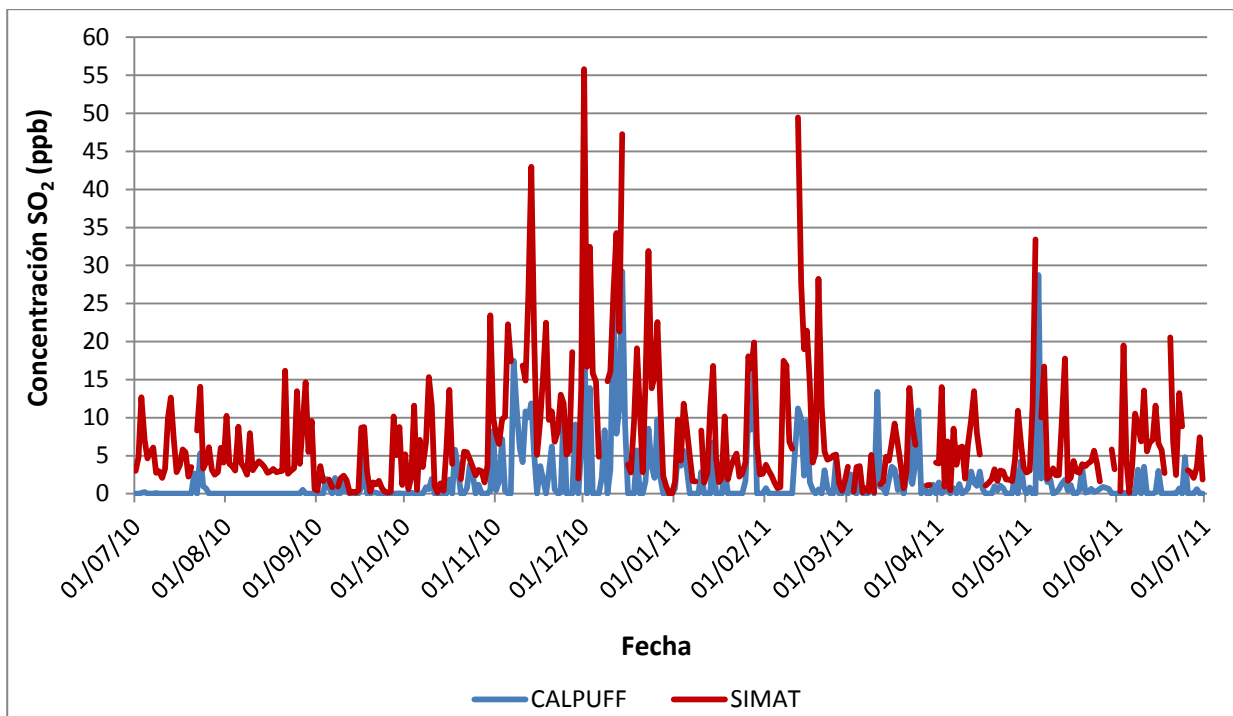


Figura 5.4. Concentración de SO₂ obtenida con el modelo CALPUFF y la medida en la estación de monitoreo Atizapán.

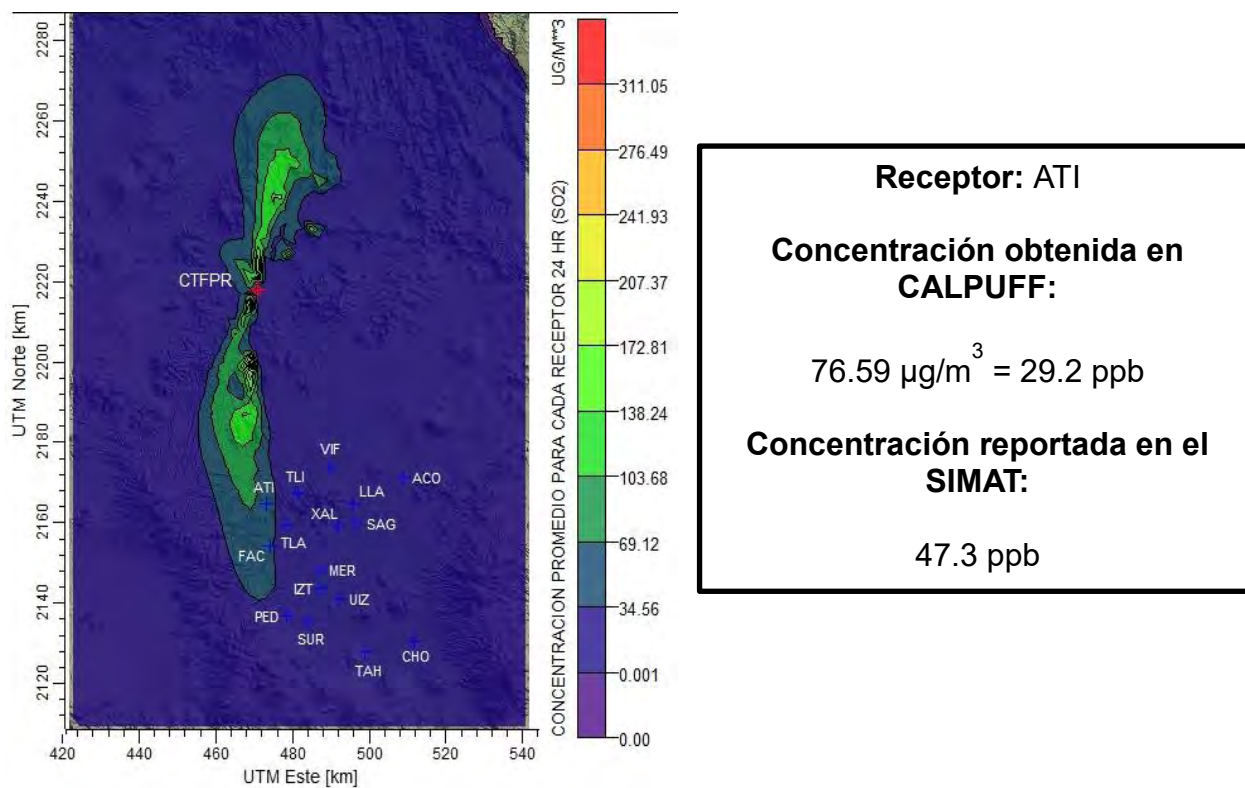


Figura 5.5. Isóneas de concentración de SO₂ (µg/m³) para el 14 de diciembre de 2010

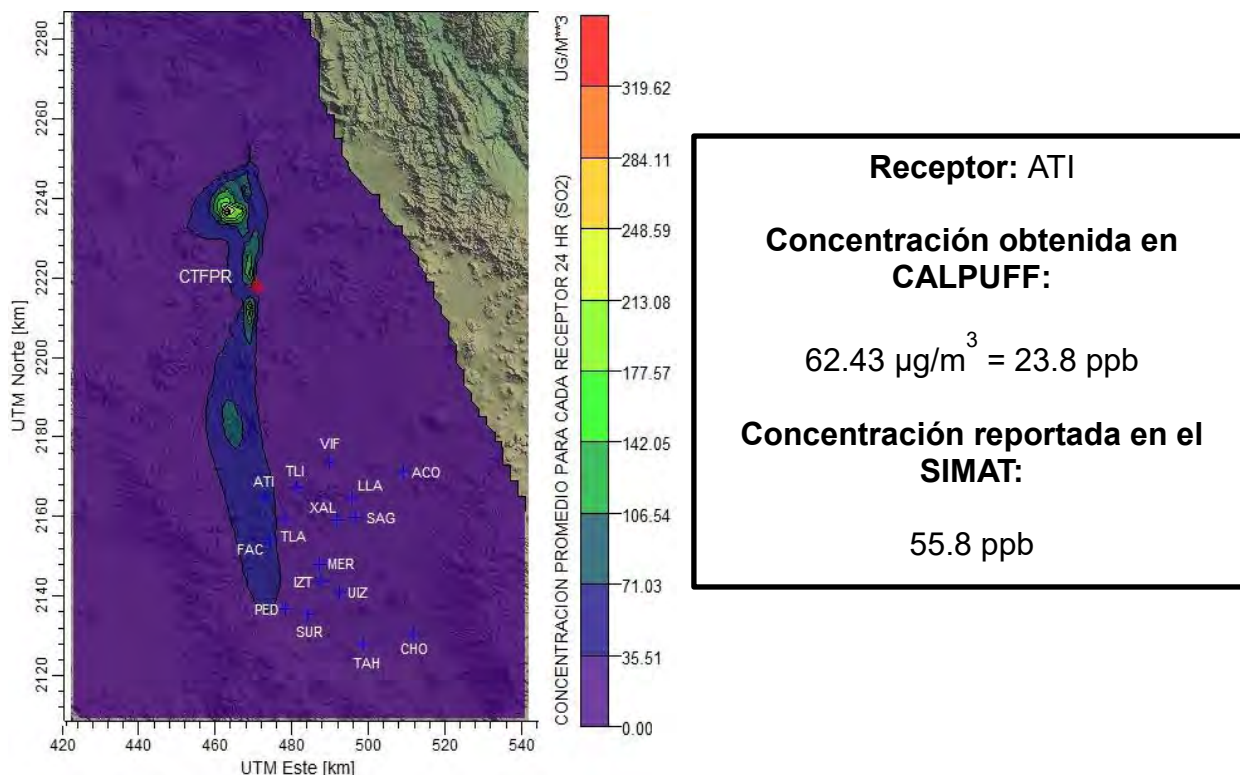


Figura 5.6. Isolíneas de concentración de SO₂ (µg/m³) para el 1 de diciembre de 2010

Receptor: FES Acatlán (FAC)

La Figura 5.7 muestra la gráfica de comparación de concentración de SO₂ obtenida con CALPUFF y la registrada en el SIMAT en el periodo de estudio en el receptor FAC. Se observan las mayores concentraciones en diciembre y algunos máximos en febrero y mayo. El día de mayor concentración en CALPUFF correspondió al día de mayor concentración en el SIMAT, el cual fue el 1° de diciembre de 2010, lo que proporciona evidencia de que ese día la principal fuente de contribución en este receptor fue la CTFPR.

La Figura 5.8 muestra las isolíneas de concentración de SO₂ del día de mayor concentración en el receptor FAC tanto en CALPUFF como en el SIMAT. En la figura se observa el impacto que hubo de la pluma en el receptor FAC en la ZMCM, con una dispersión que se observa hacia el Norte y hacia el Sur de la CTFPR.

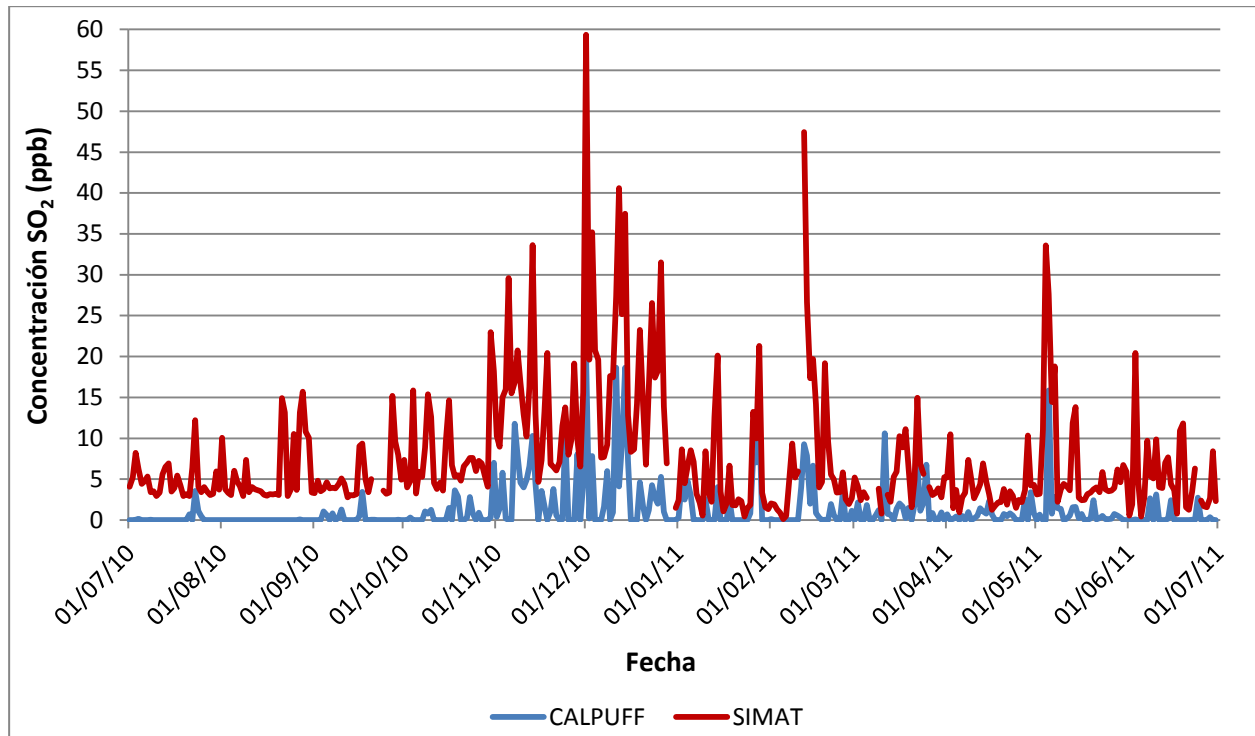


Figura 5.7. Concentración de SO₂ obtenida con el modelo CALPUFF y la medida en la estación de monitoreo FES Acatlán.

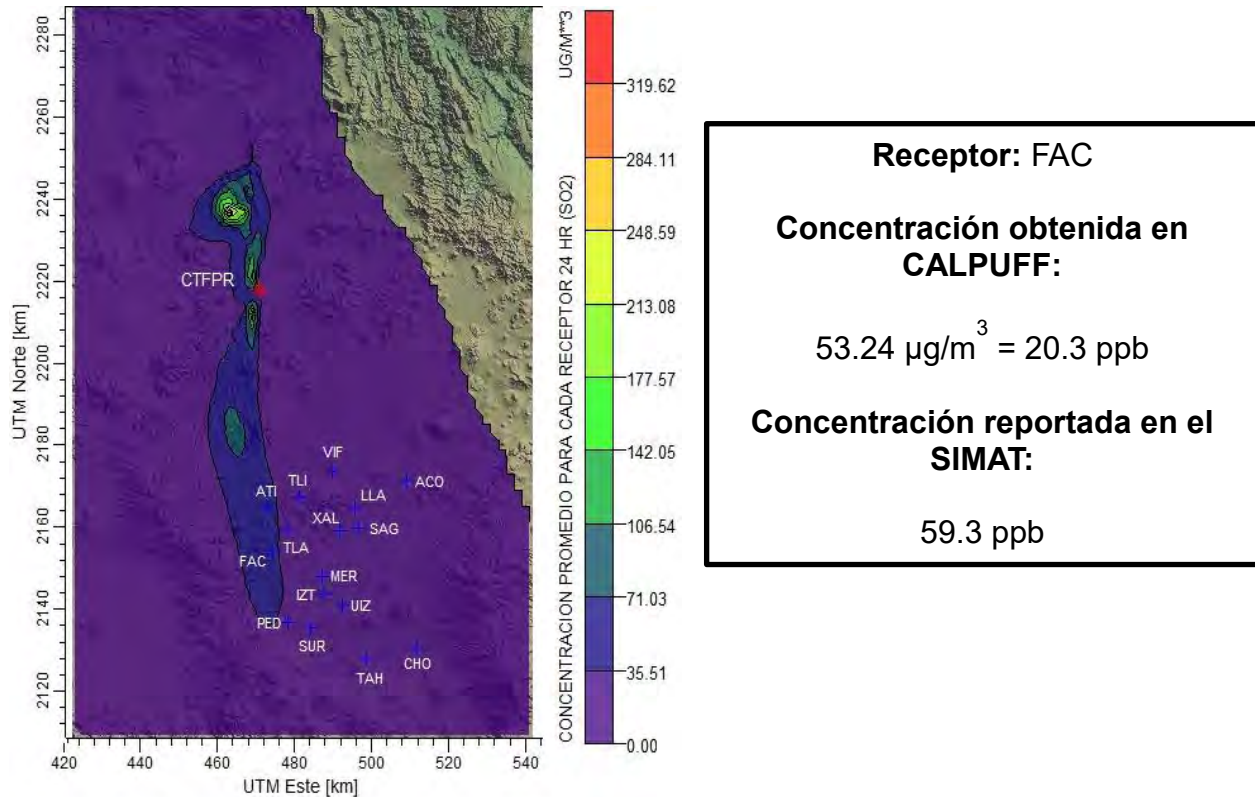


Figura 5.8. Isolíneas de concentración de SO₂ (µg/m³) para el 1 de diciembre de 2010

Receptor: Tlalnepantla (TLA)

La Figura 5.9 muestra la gráfica de comparación de concentración de SO₂ obtenida con CALPUFF y la registrada en el SIMAT en el periodo de estudio en el receptor TLA. Se observan las mayores concentraciones en diciembre y algunos máximos en enero y mayo. La tendencia entre la comparación de concentraciones sigue un comportamiento similar.

Las Figuras 5.10 y 5.11 muestran las isolíneas de concentración de SO₂ del día de mayor concentración en el receptor TLA obtenido en CALPUFF y SIMAT, respectivamente. En ambas figuras se observa la dispersión del contaminante de Norte a Sur hasta impactar en el receptor TLA, sin embargo en la segunda figura la pluma se observa a unos kilómetros de la ubicación del receptor.

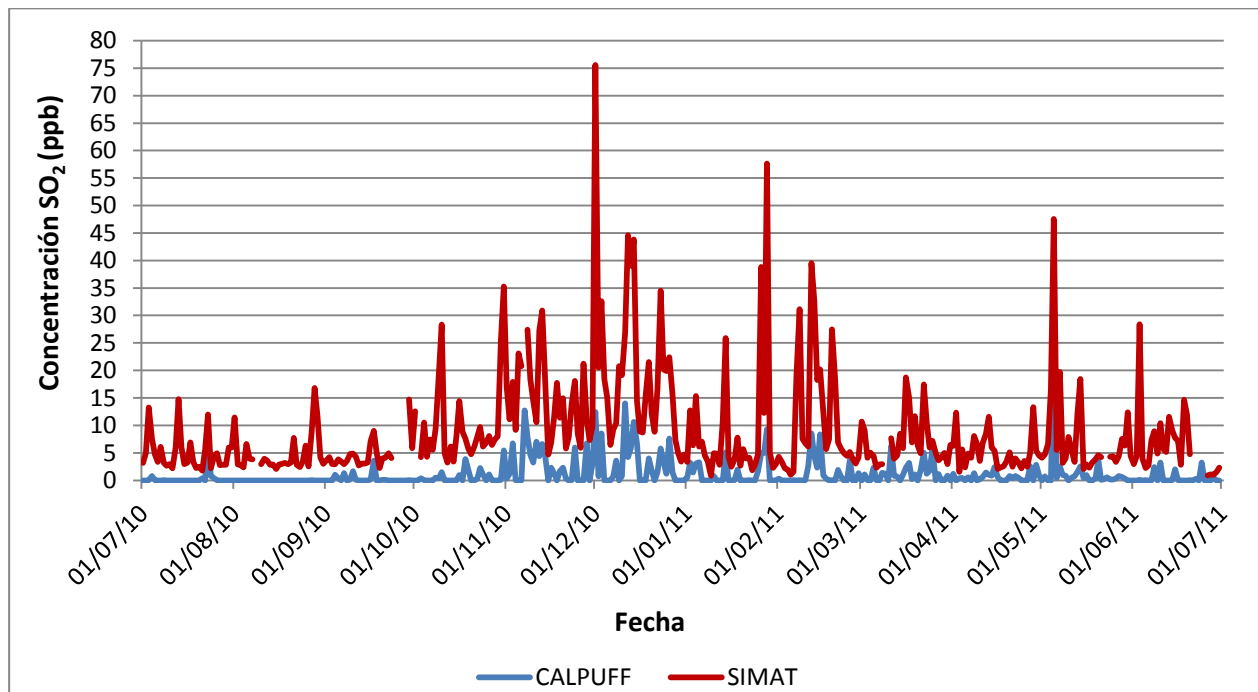


Figura 5.9. Concentración de SO₂ obtenida con el modelo CALPUFF y la medida en la estación de monitoreo Tlalnepantla

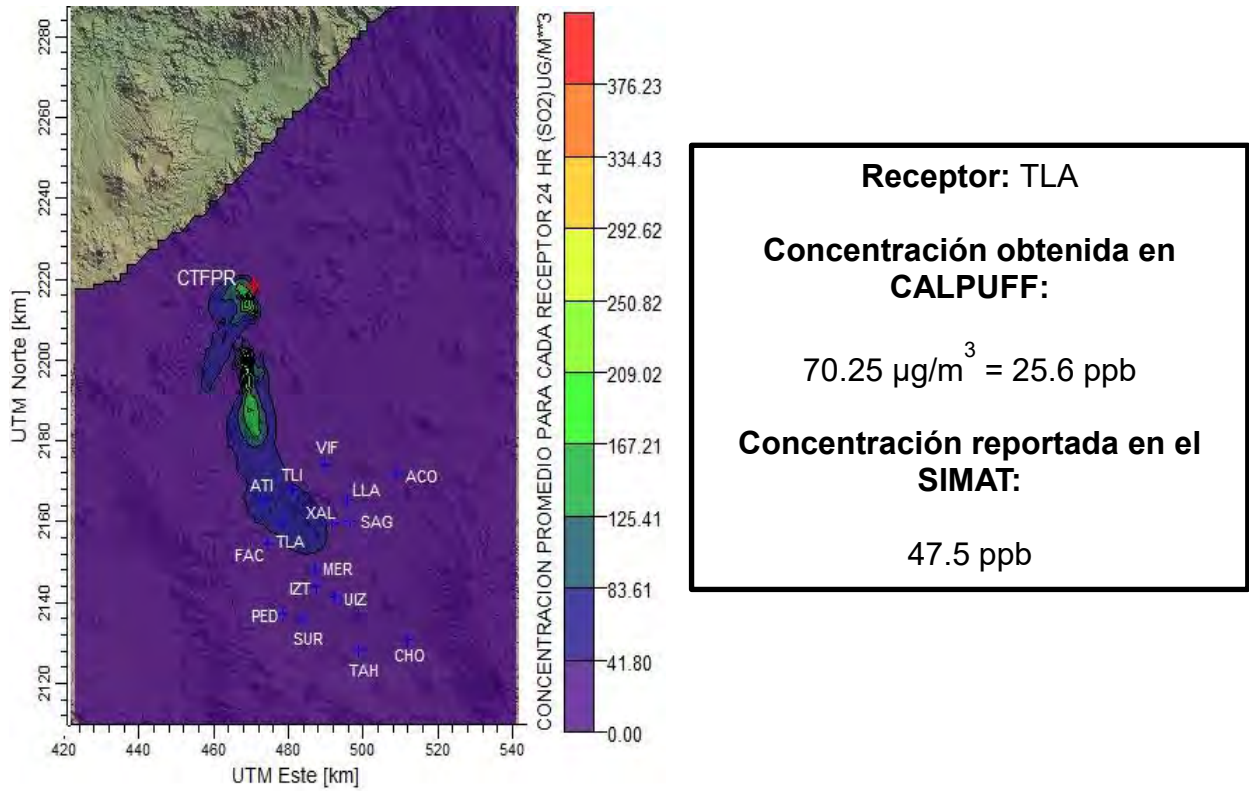


Figura 5.10. Isolíneas de concentración de SO_2 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) para el 5 de mayo de 2011

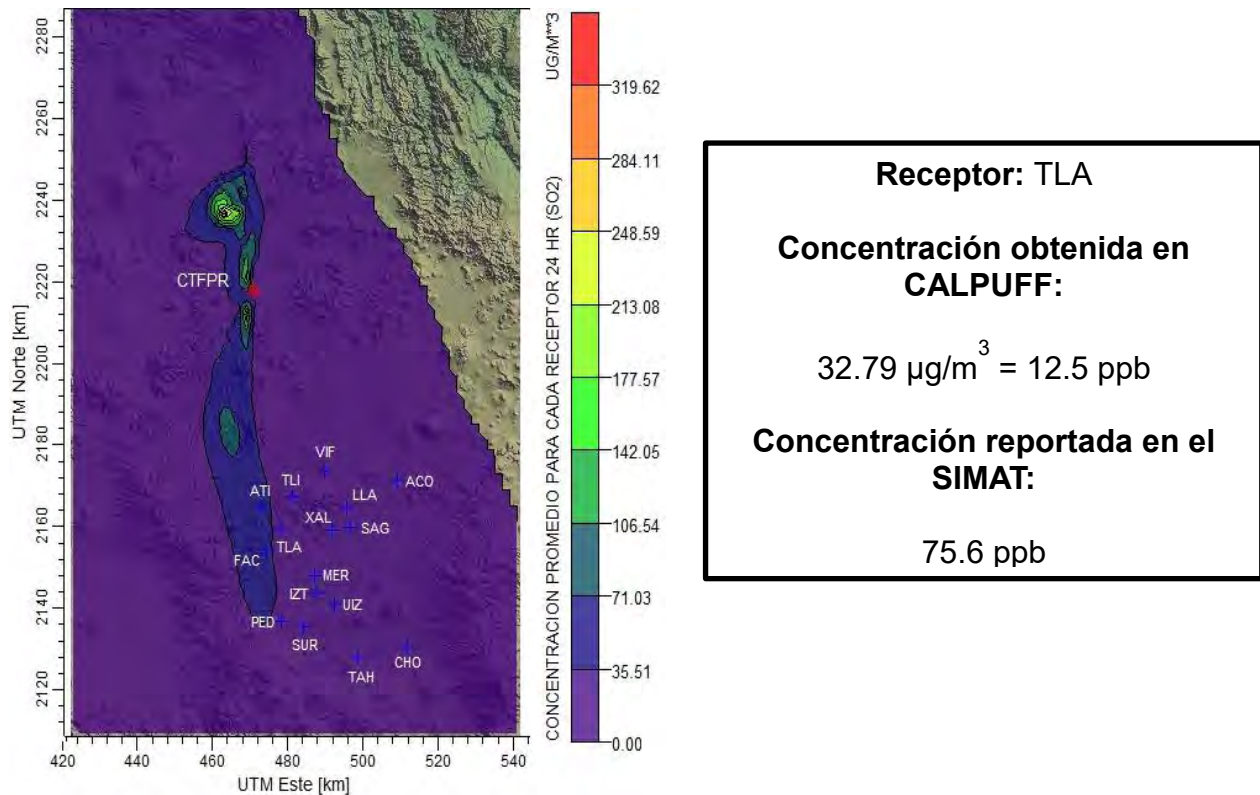


Figura 5.11. Isolíneas de concentración de SO_2 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) para el 1 de diciembre de 2010

Receptor: Tultitlan (TLI)

La Figura 5.12 muestra la gráfica de comparación de concentración de SO₂ obtenida con CALPUFF y la registrada en el SIMAT en el periodo de estudio en el receptor TLI. Se observan las mayores concentraciones en enero y algunos máximos en diciembre y mayo. La tendencia entre lo obtenido en CALPUFF y lo reportado en el SIMAT tiene un comportamiento similar.

Las Figuras 5.13 y 5.14 muestran las isolíneas de concentración de SO₂ para el día de mayor concentración en el receptor TLI obtenido en CALPUFF y en el SIMAT, respectivamente. En la primera figura se observa el impacto de la pluma en el receptor TLI, mientras que en la segunda existe también una dispersión del contaminante, sin embargo la pluma se observa a unos kilómetros de la ubicación del receptor. En ambos casos se observa una dirección predominante del viento de Norte a Sur.

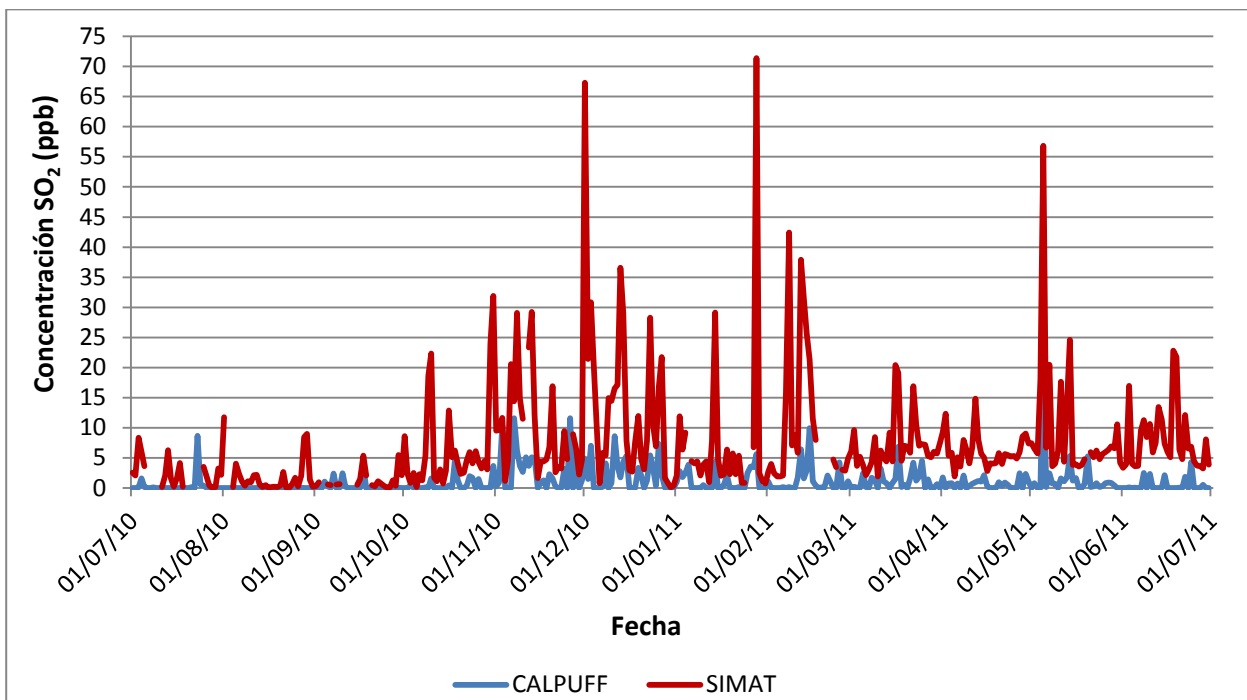


Figura 5.12. Concentración de SO₂ obtenida con el modelo CALPUFF y la medida en la estación de monitoreo Tultitlan

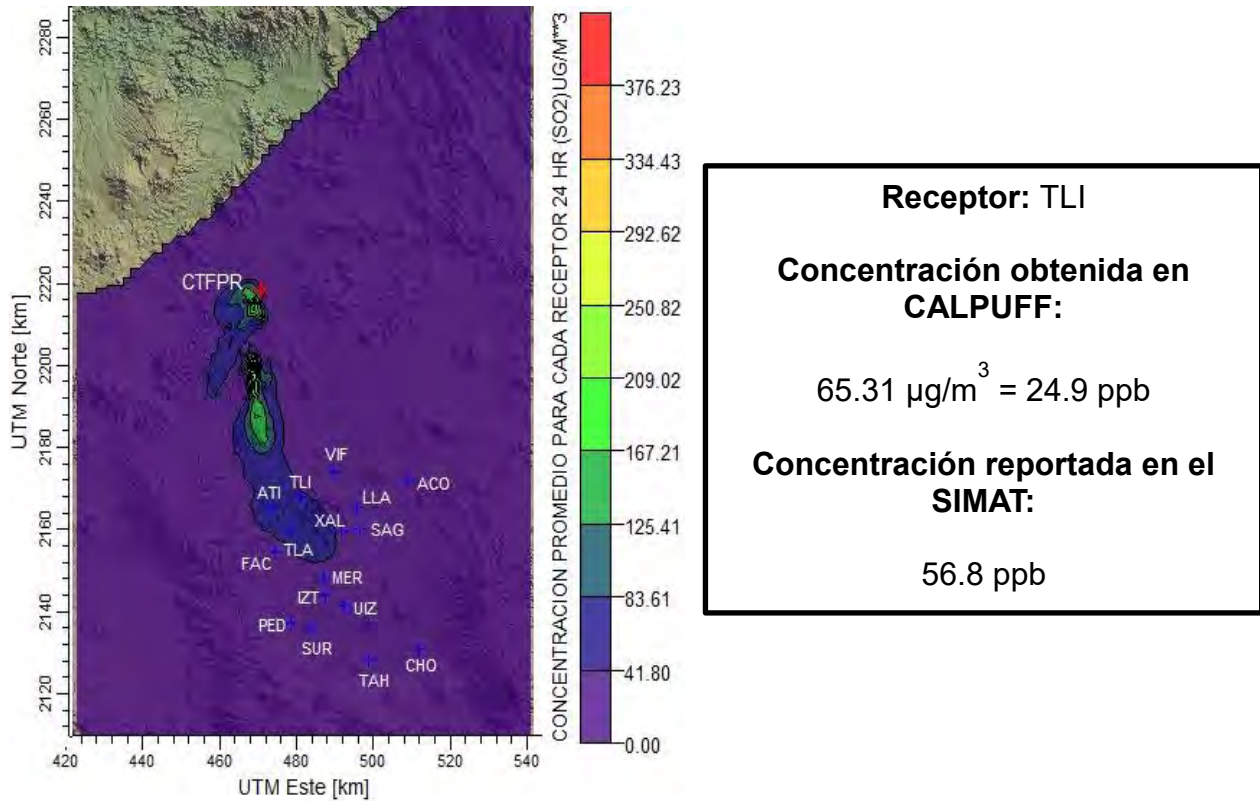


Figura 5.13. Isolíneas de concentración de SO₂ (μg/m³) para el 5 de mayo de 2011

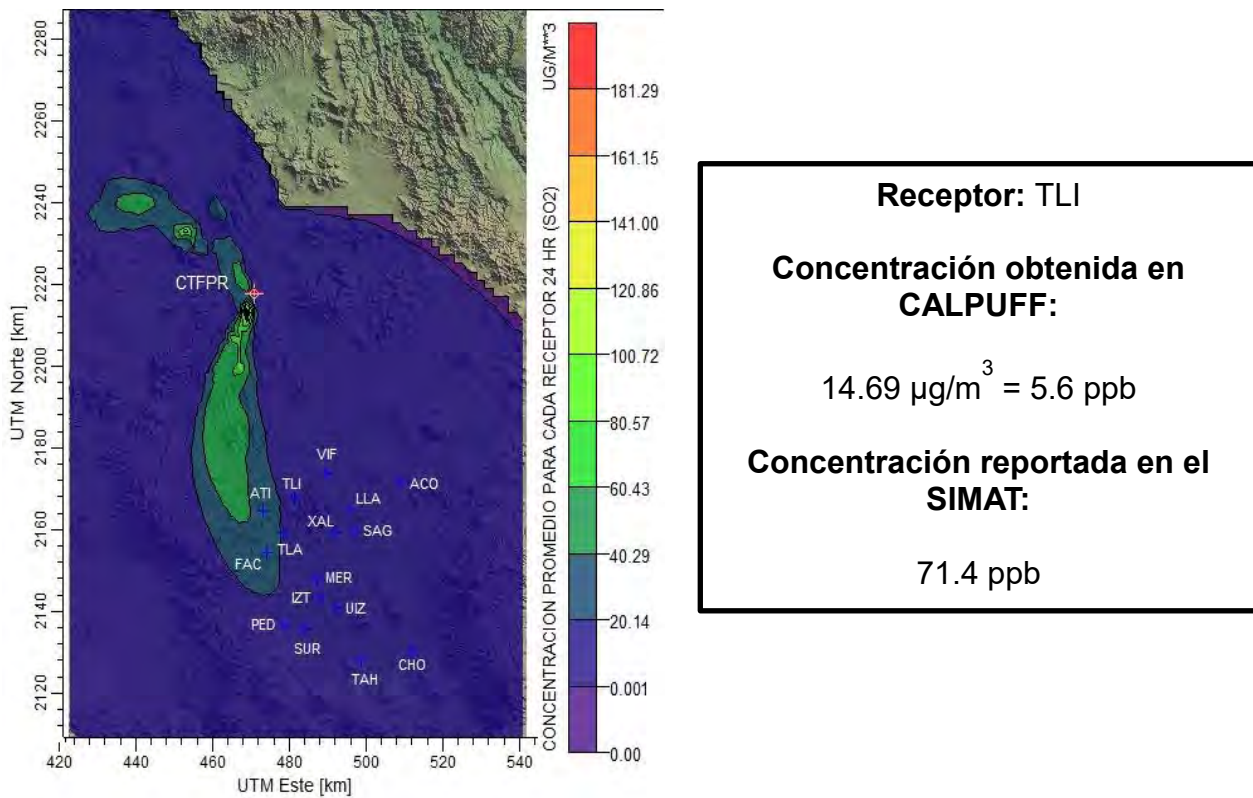


Figura 5.14. Isolíneas de concentración de SO₂ (μg/m³) para el 28 de enero de 2011

REGIÓN NORESTE

Receptor: San Agustín (SAG)

La Figura 5.15 muestra la gráfica de comparación de concentración de SO₂ obtenida con CALPUFF y la registrada en el SIMAT en el periodo de estudio en el receptor SAG. Se observan las mayores concentraciones en enero y algunos máximos en diciembre y mayo. La tendencia de la comparación de concentraciones tiene un comportamiento similar.

Las Figuras 5.16 y 5.17 muestran las isolíneas de concentración de SO₂ para el día de mayor concentración en el receptor SAG obtenido en CALPUFF y SIMAT, respectivamente. En la primera figura se observa la dispersión del contaminante con dirección al receptor SAG y se observa la pluma a unos kilómetros de éste; en la segunda existe también una dispersión del contaminante de Norte a Sur, por lo que hubo un registro de concentración de SO₂ en todos los receptores.

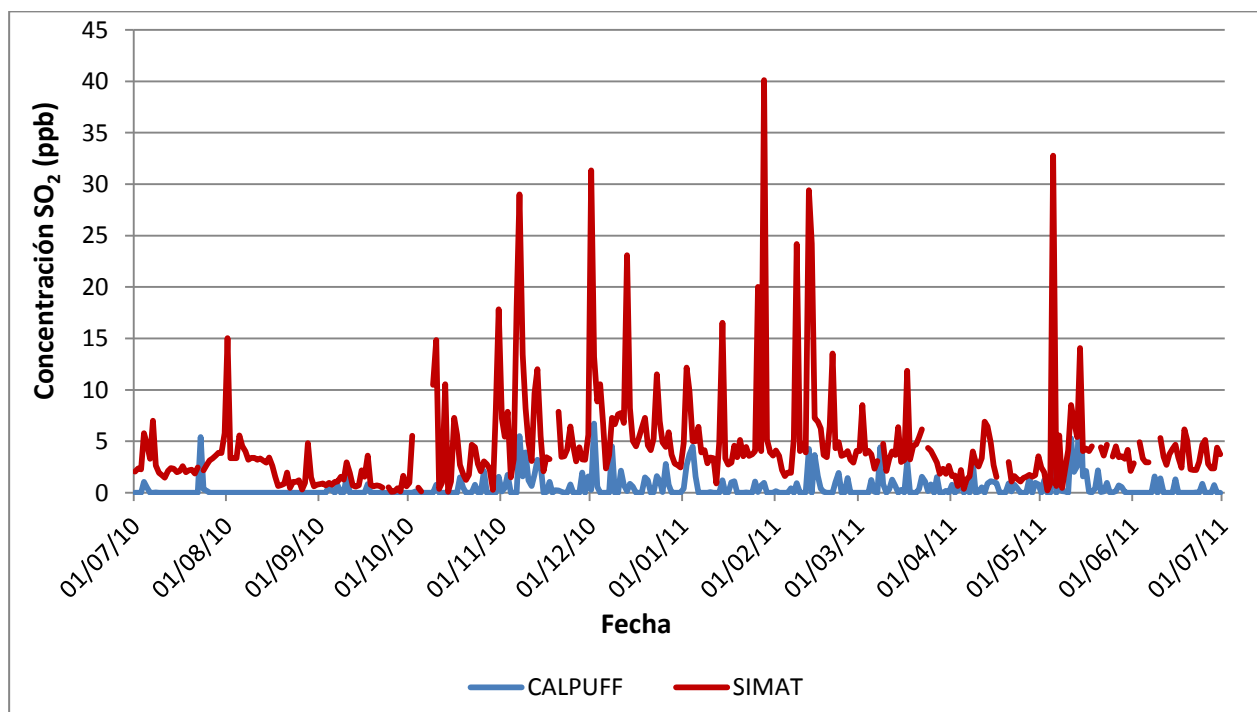
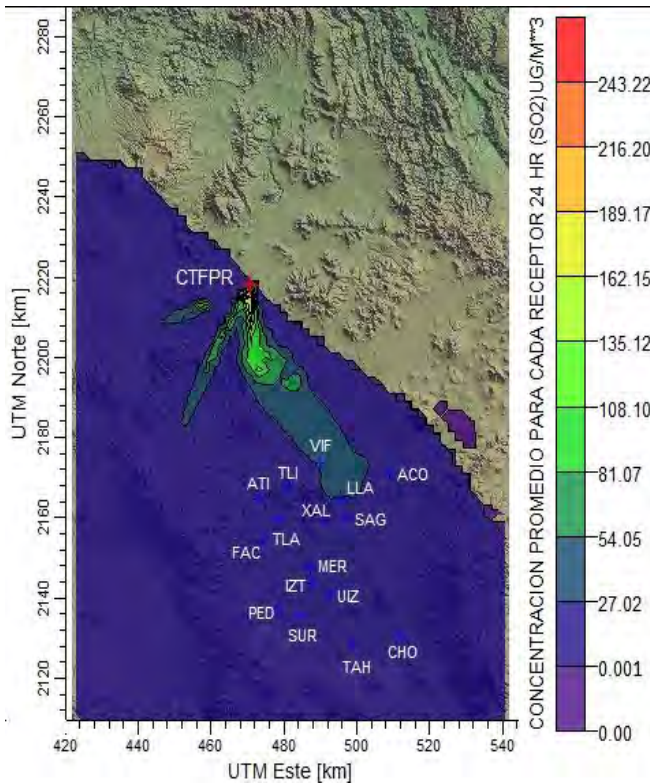


Figura 5.15. Concentración de SO₂ obtenida con el modelo CALPUFF y la medida en la estación de monitoreo San Agustín



Receptor: SAG

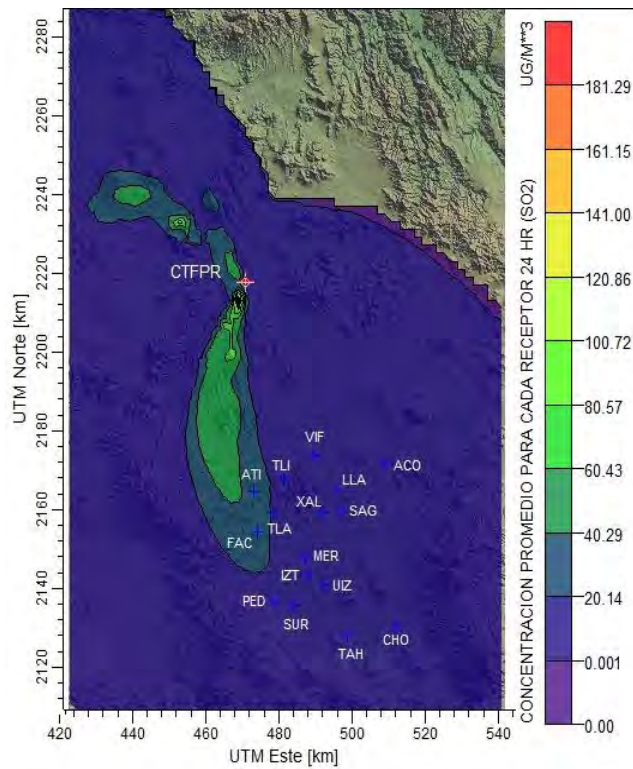
Concentración obtenida en CALPUFF:

$26.36 \mu\text{g}/\text{m}^3 = 10.05 \text{ ppm}$

Concentración reportada en el SIMAT:

14.1 ppb

Figura 5.16. Isolíneas de concentración de SO_2 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) para el 14 de mayo de 2011



Receptor: SAG

Concentración obtenida en CALPUFF:

$2.57 \mu\text{g}/\text{m}^3 = 0.98 \text{ ppb}$

Concentración reportada en el SIMAT:

40.1 ppb

Figura 5.17. Isolíneas de concentración de SO_2 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) para el 28 de enero de 2011

Receptor: Xalostoc (XAL)

La Figura 5.18 muestra la gráfica de comparación de concentración de SO₂ obtenida con CALPUFF y la registrada en el SIMAT en el periodo de estudio en el receptor XAL. Se observan las mayores concentraciones en mayo y algunos máximos en enero y febrero. Se obtuvo que el día de mayor concentración en CALPUFF correspondió al día de mayor concentración en el SIMAT (5 de mayo de 2011), lo que proporciona evidencia de que ese día, la principal fuente de contribución en este receptor fue la CTFPR.

La Figura 5.19 muestra las isolíneas de concentración de SO₂ para el día de mayor concentración en el receptor XAL, tanto en CALPUFF como en el SIMAT. En la figura se muestra la dispersión del contaminante hacia XAL y el impacto que hubo de la pluma en sus coordenadas.

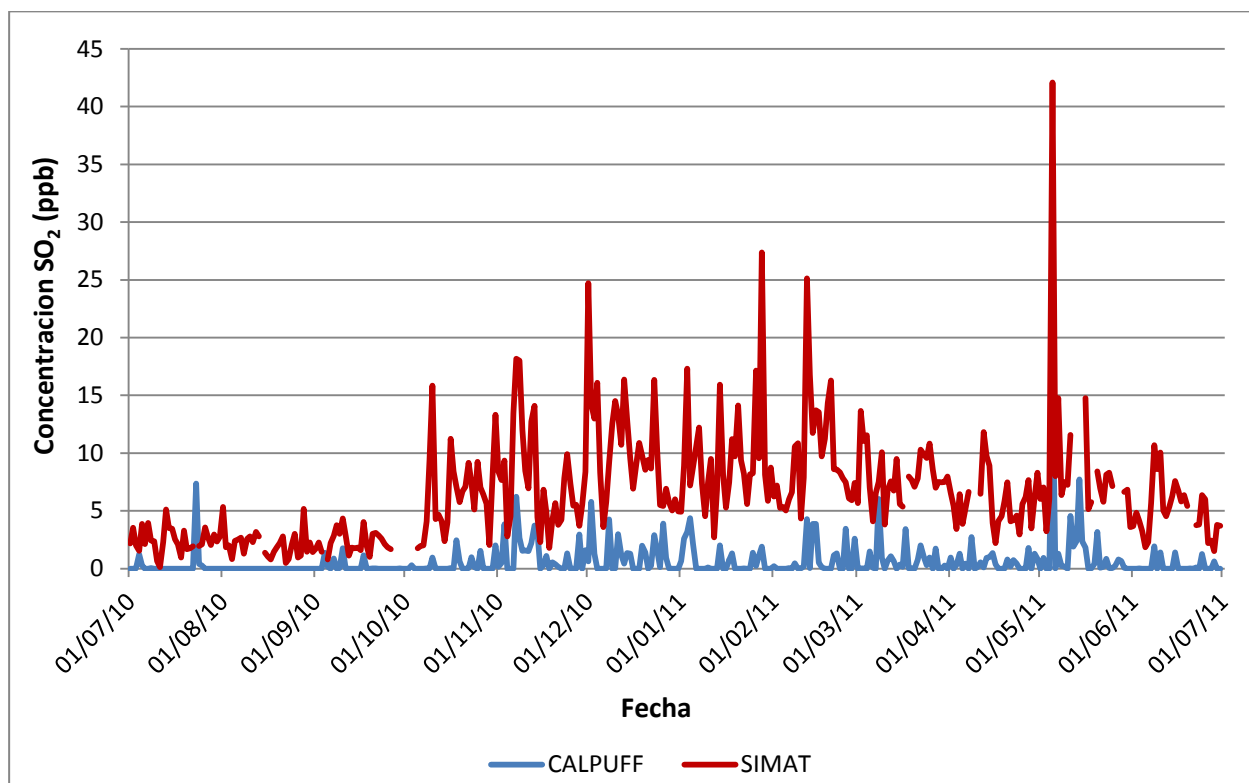


Figura 5.18. Concentración de SO₂ obtenida con el modelo CALPUFF y la medida en la estación de monitoreo Xalostoc

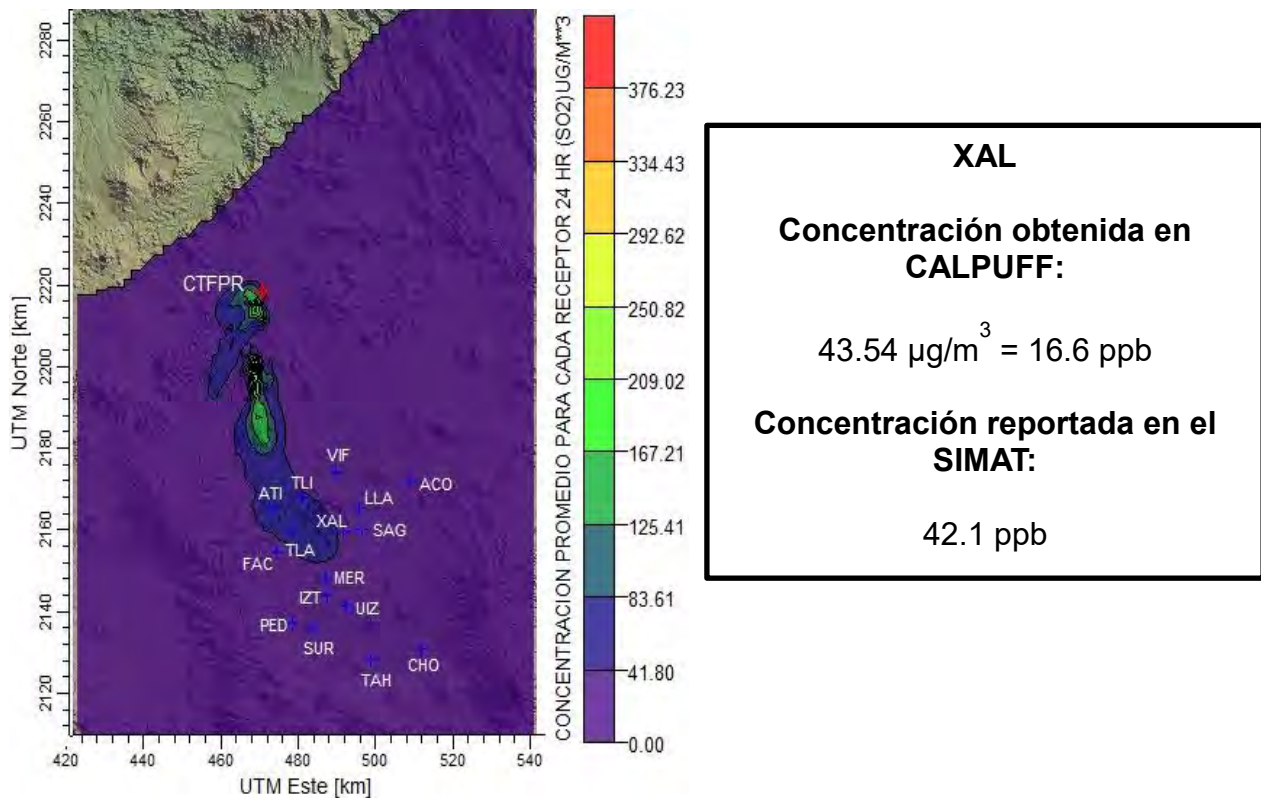


Figura 5.19. Isolíneas de concentración de SO₂ (µg/m³) para el 5 de mayo de 2011

REGIÓN: CENTRO

Receptor: Iztacalco (IZT)

La Figura 5.20 muestra la gráfica de comparación de concentración de SO₂ obtenida con CALPUFF y la registrada en el SIMAT en el periodo de estudio en el receptor IZT. Se observan las mayores concentraciones en noviembre y algunos máximos en febrero y mayo. La tendencia de la comparación de concentraciones sigue un comportamiento similar.

Las Figuras 5.21 y 5.22 muestran las isolíneas de concentración de SO₂ para el día de mayor concentración en el receptor IZT obtenido en CALPUFF y en el SIMAT, respectivamente. En la primera figura se observa la dispersión del contaminante con dirección hacia el receptor IZT y el impacto de la pluma a unos kilómetros del receptor; en la segunda existe también una dispersión del contaminante que llevó a registrar una concentración de SO₂ en todos los receptores.

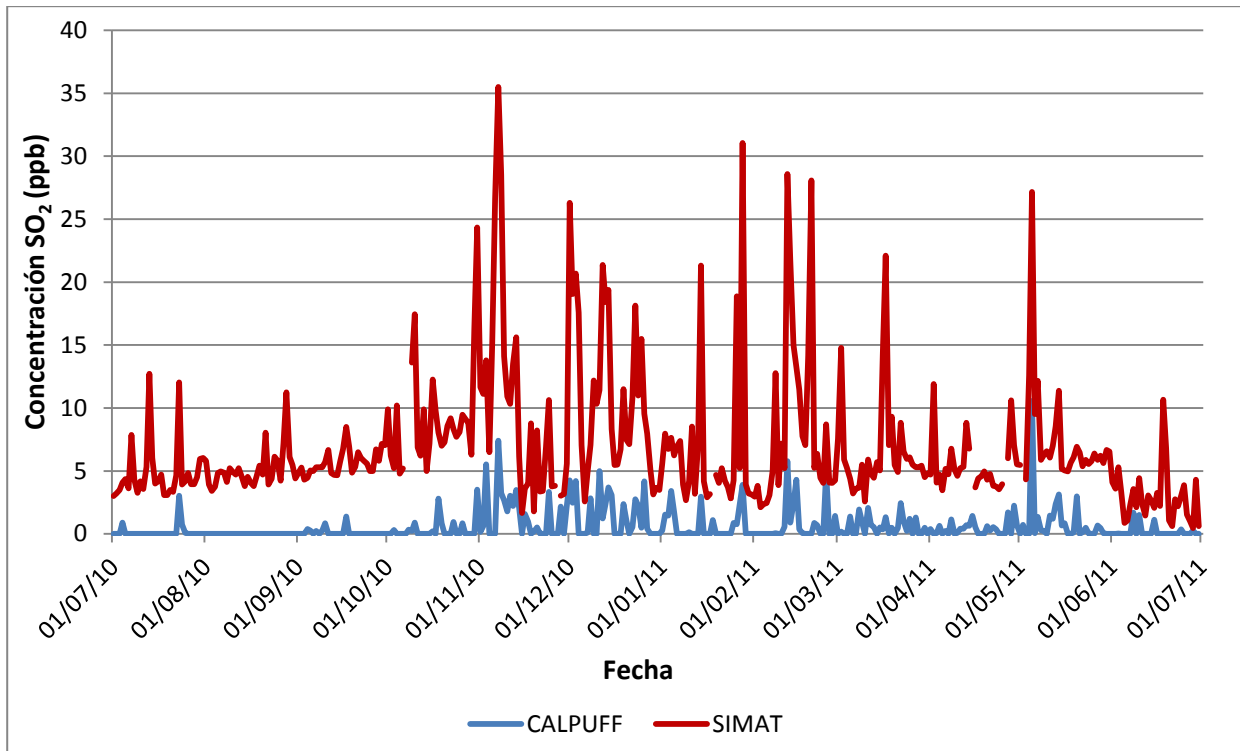


Figura 5.20. Concentración de SO₂ obtenida con el modelo CALPUFF y la medida en la estación de monitoreo Iztacalco

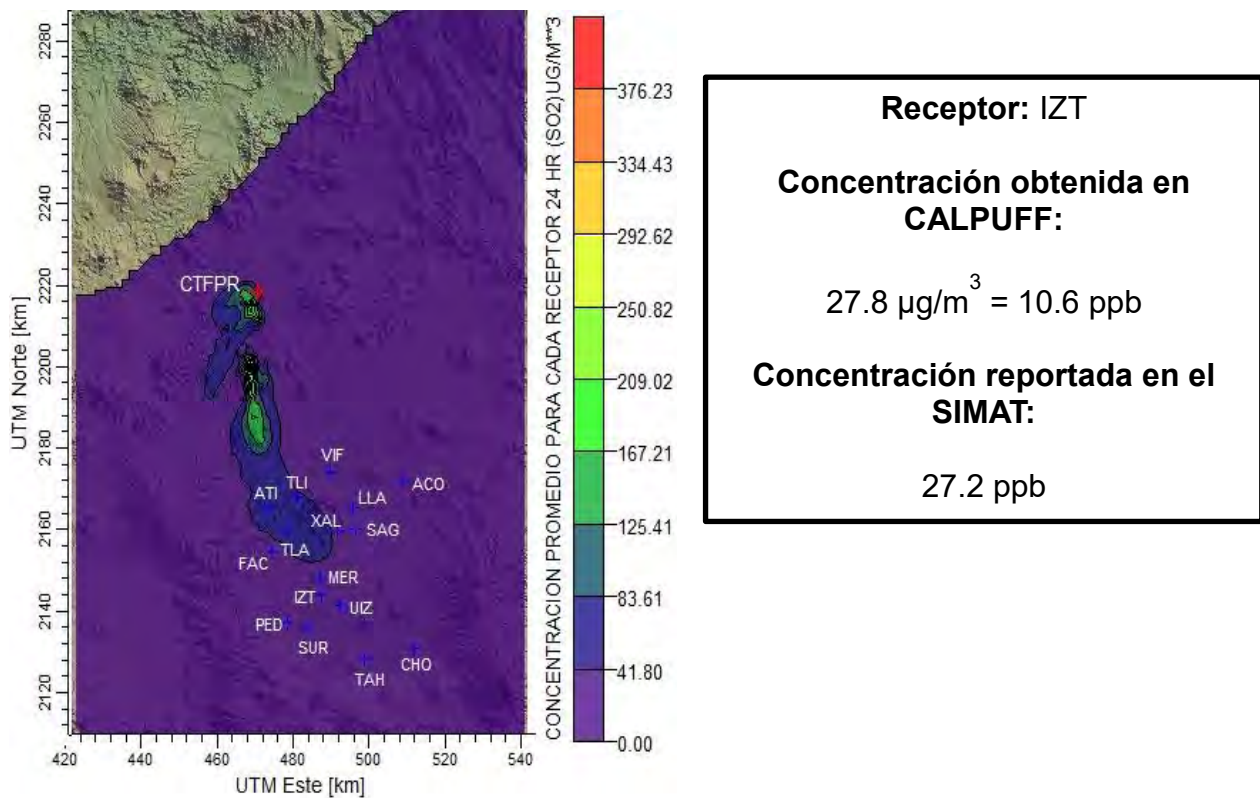


Figura 5.21. Isolíneas de concentración de SO₂ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) para el 5 de mayo de 2011

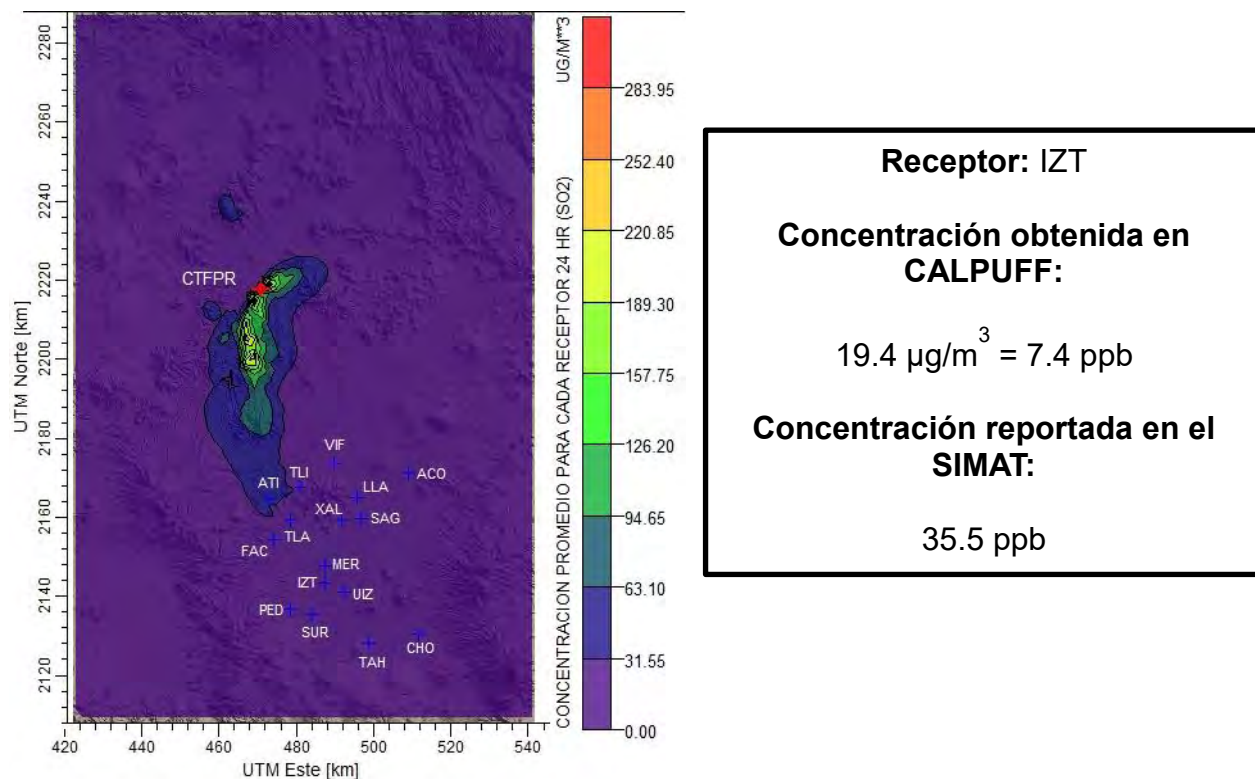


Figura 5.22. Isolíneas de concentración de SO₂ (μg/m³) para el 7 de noviembre de 2010

Receptor: Merced (MER)

La Figura 5.23 muestra la gráfica de comparación de concentración de SO₂ obtenida con CALPUFF y la registrada en el SIMAT en el periodo de estudio en el receptor MER. Se observan las mayores concentraciones en febrero y máximos en diciembre y mayo. La tendencia de la comparación de concentraciones sigue un comportamiento similar.

Las Figuras 5.24 y 5.25 muestran las isolíneas de concentración de SO₂ para el día de mayor concentración en el receptor MER obtenido en CALPUFF y SIMAT, respectivamente. En la primera figura se observa la dispersión del contaminante con dirección hacia el receptor MER y la pluma a unos kilómetros de él; en la segunda, la dispersión del contaminante se realizó en distinta dirección a la ZMCM, lo que llevó a registrar una concentración de SO₂ solo en algunos receptores del Noroeste y Noreste, más no en MER lo cual proporciona evidencia que la CTFPR no fue la fuente principal de contribución para el 20 de febrero de 2011 en la región Centro de la ZMCM.

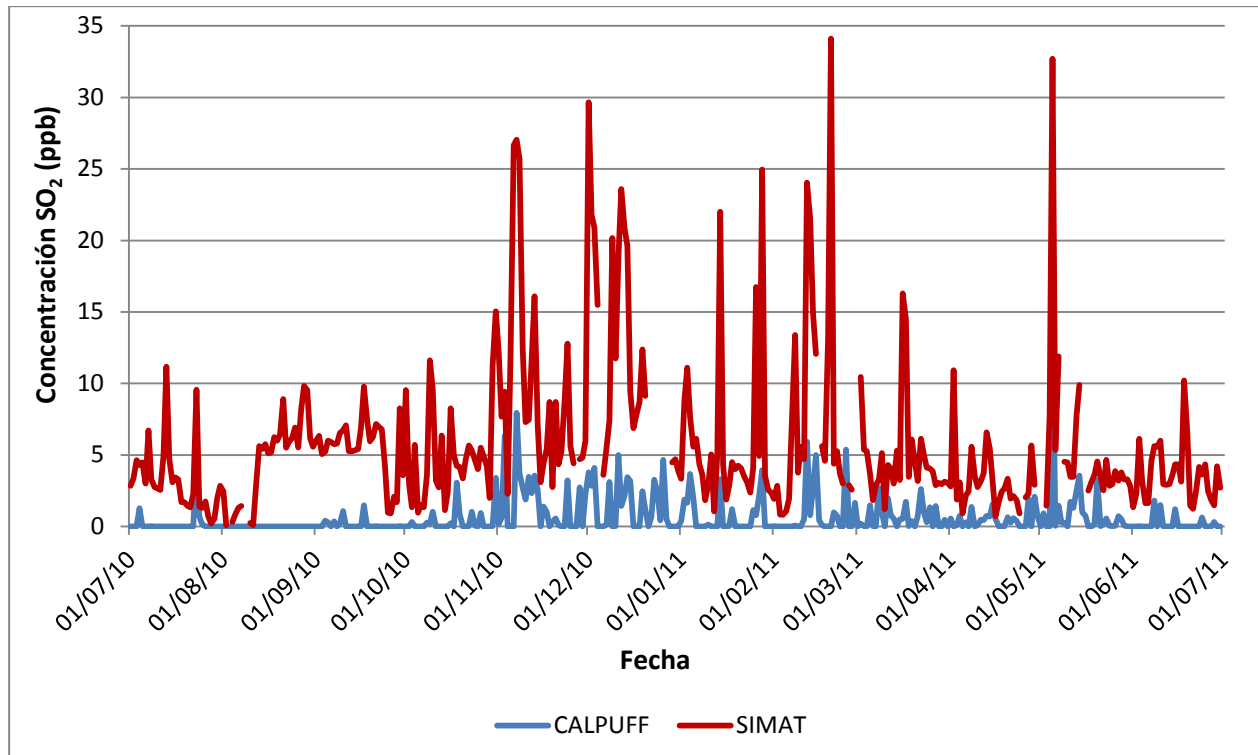


Figura 5.23. Concentración de SO₂ obtenida con el modelo CALPUFF y la medida en la estación de monitoreo Merced

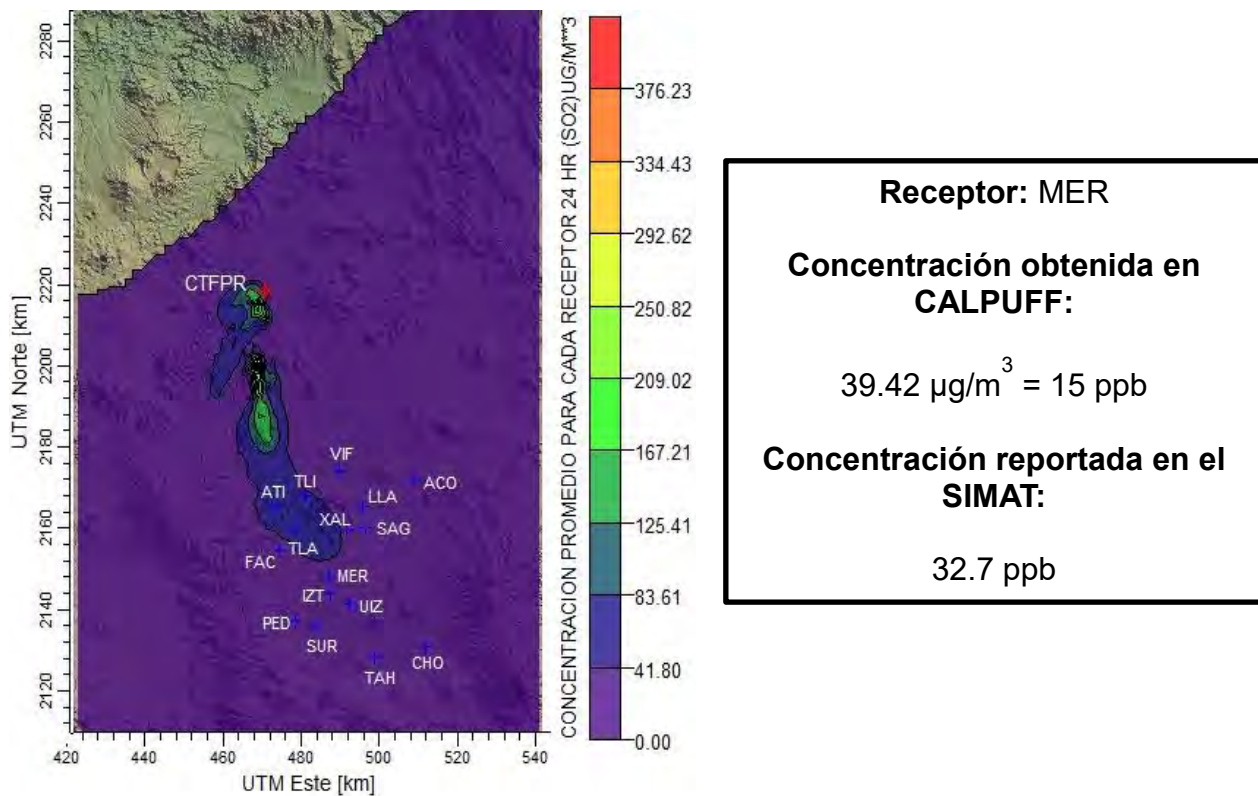


Figura 5.24. Isolíneas de concentración de SO₂ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) para el 5 de mayo de 2011

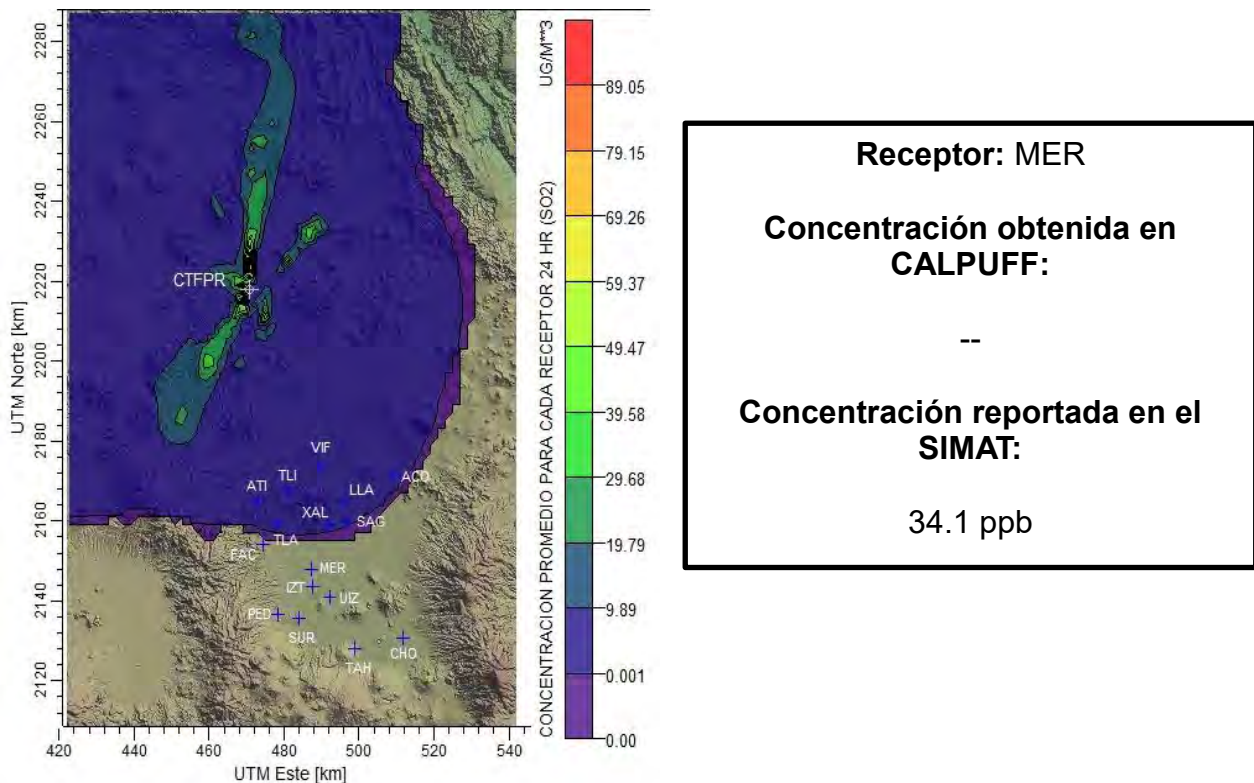


Figura 5.25. Isolíneas de concentración de SO₂ (μg/m³) para el 20 de febrero de 2011

REGIÓN: SUROESTE

Receptor: Pedregal (PED)

La Figura 5.26 muestra la gráfica de comparación de concentración de SO₂ obtenida con CALPUFF y la registrada en el SIMAT en el periodo de estudio en el receptor PED. Se observan las mayores concentraciones en diciembre y algunos máximos en febrero y mayo. Se obtuvo que el día de mayor concentración en CALPUFF correspondió al día de mayor concentración en el SIMAT (1 de diciembre de 2010), lo que proporciona evidencia de que ese día la principal fuente de contribución en este receptor fue la CTFPR.

La Figura 5.27 muestra las isolíneas de concentración de SO₂ para el día de mayor concentración en el receptor PED, tanto en CALPUFF como en el SIMAT. Se muestra la dispersión del contaminante con dirección de Norte a Sur y el impacto de la pluma a unos kilómetros del receptor PED.

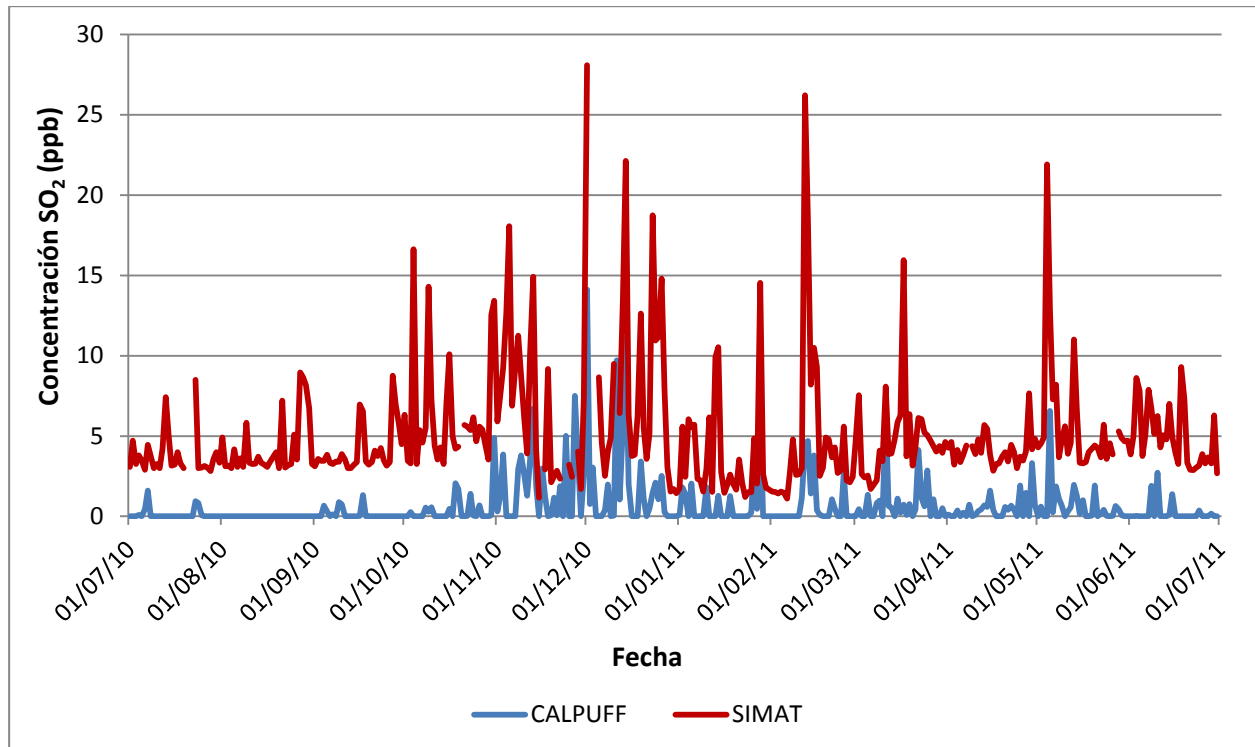


Figura 5.26. Concentración de SO₂ obtenida con el modelo CALPUFF y la medida en la estación de monitoreo Pedregal

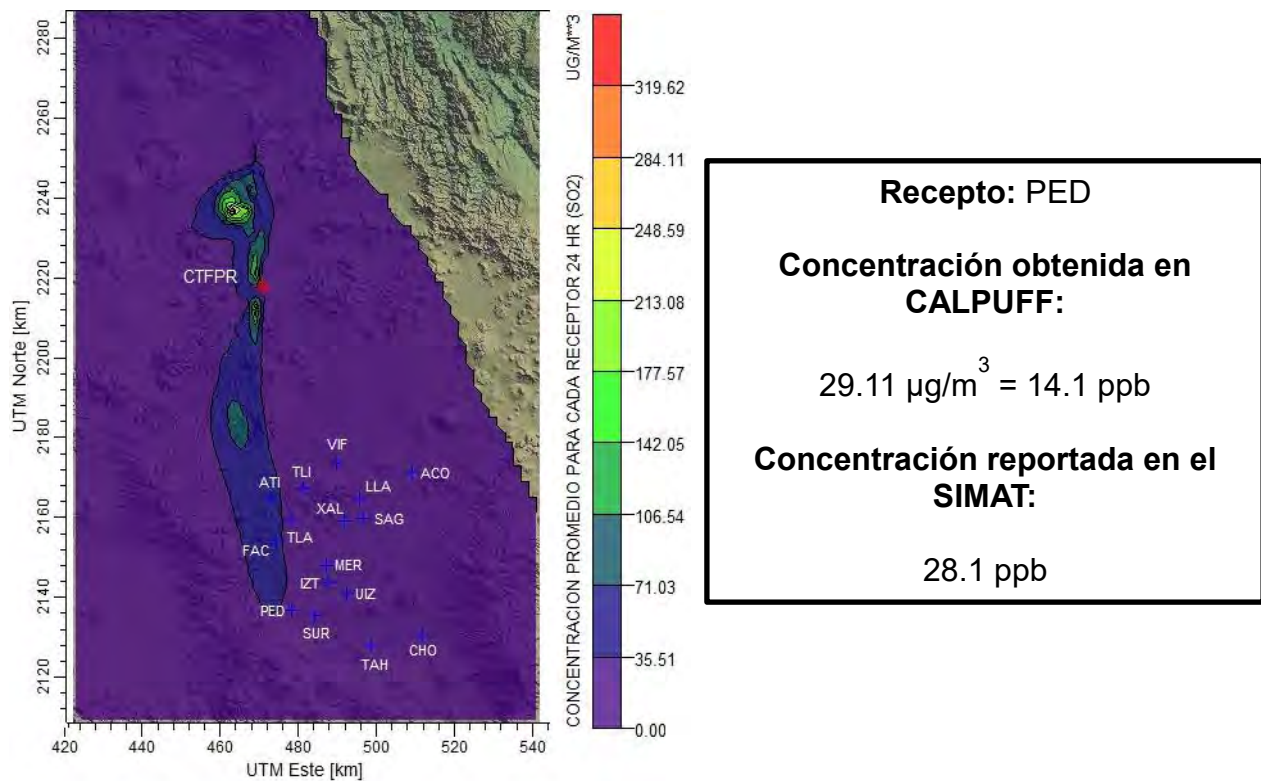


Figura 5.27. Isolíneas de concentración de SO₂ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) para el 1 de diciembre de 2010

Receptor: Santa Úrsula (SUR)

La Figura 5.28 muestra la gráfica de comparación de concentración de SO₂ obtenida con CALPUFF y la registrada en el SIMAT en el periodo de estudio en el receptor SUR. Se observan las mayores concentraciones en diciembre y algunos máximos en febrero y mayo. El día de mayor concentración en CALPUFF correspondió al día de mayor concentración en el SIMAT, lo que proporciona evidencia de que el 1 de diciembre de 2010 la principal fuente de contribución en este receptor fue la CTFPR.

La Figura 5.29 muestra las isolíneas de concentración de SO₂ para el día de mayor concentración en el receptor SUR, tanto en CALPUFF como en el SIMAT. En la figura se muestra la dispersión del contaminante con dirección hacia el Norte y hacia el Sur de la CTFPR y el impacto de la pluma a unos kilómetros del receptor SUR.

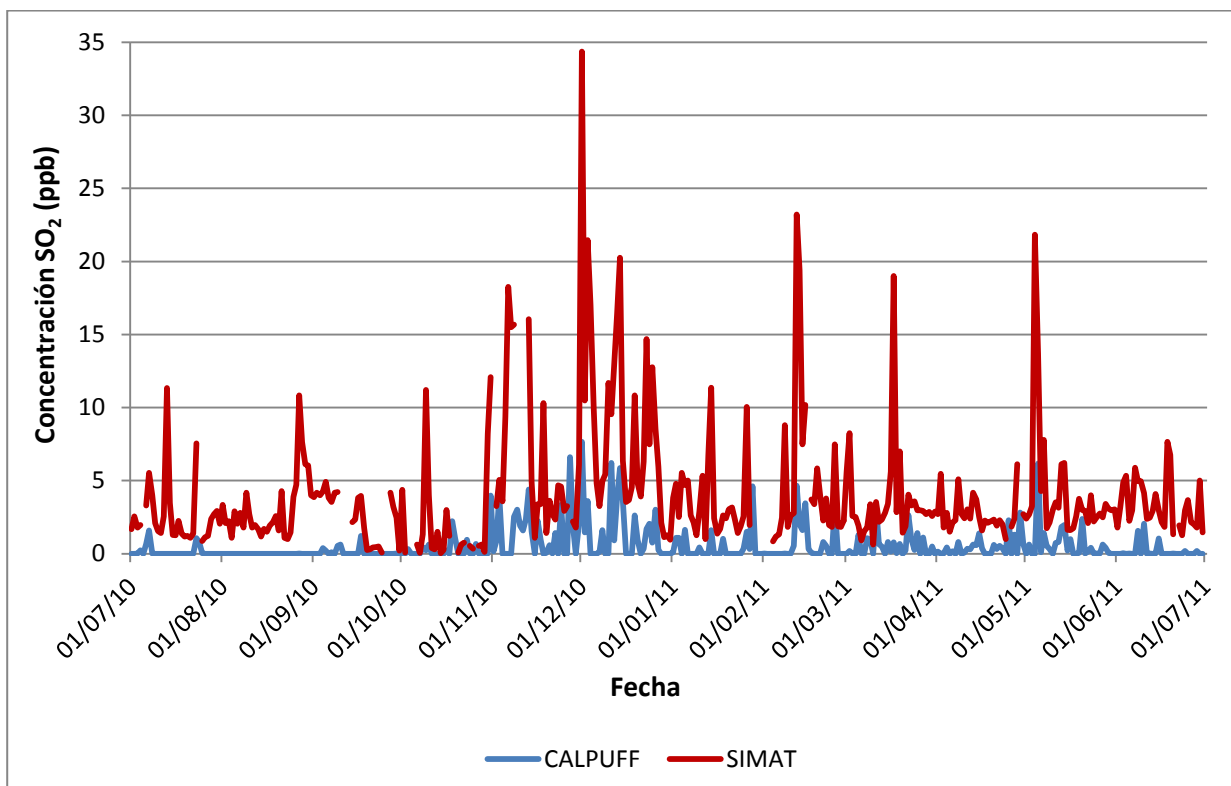


Figura 5.28. Concentración de SO₂ obtenida con el modelo CALPUFF y la medida en la estación de monitoreo Santa Úrsula

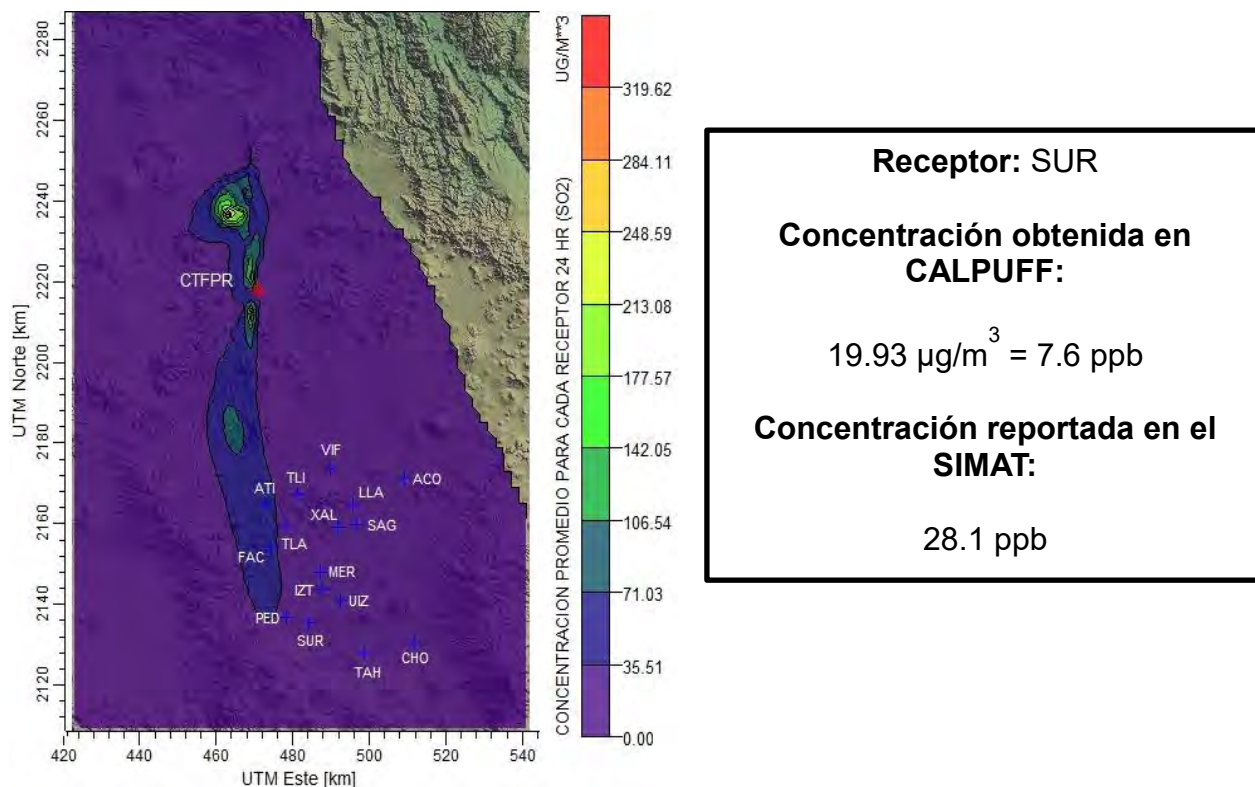


Figura 5.29. Isolíneas de concentración de SO_2 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) para el 1 de diciembre de 2010

REGIÓN SURESTE

Receptor: Tláhuac (TAH)

La Figura 5.30 muestra la gráfica de comparación de concentración de SO_2 obtenida con CALPUFF y la registrada en el SIMAT en el periodo de estudio en el receptor TAH. Se observan las mayores concentraciones en febrero y máximos en diciembre y marzo. El día de mayor concentración en CALPUFF correspondió al día de mayor concentración en el SIMAT, lo que proporciona evidencia de que el 12 de febrero de 2011 la principal fuente de contribución en este receptor fue la CTFPR.

La Figura 5.31 muestra las isóneas de concentración de SO_2 para el 12 de febrero de 2011, el cual fue el día de mayor concentración en el receptor TAH, tanto en CALPUFF como en el SIMAT. Se observa que hubo un mayor impacto en los receptores del Noroeste de la ZMCM, sin embargo, existió una dispersión que llevó al registro de concentración de SO_2 en el receptor TAH.

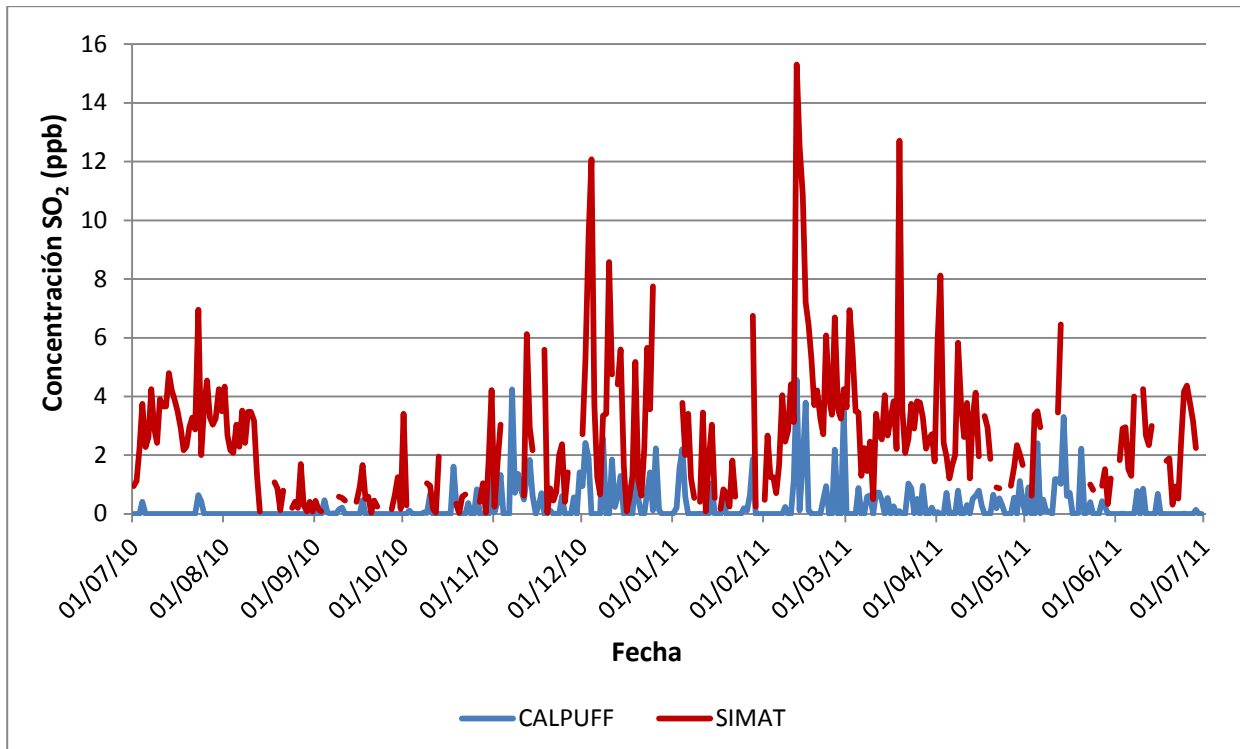


Figura 5.30. Concentración de SO₂ obtenida con el modelo CALPUFF y la medida en la estación de monitoreo Tláhuac

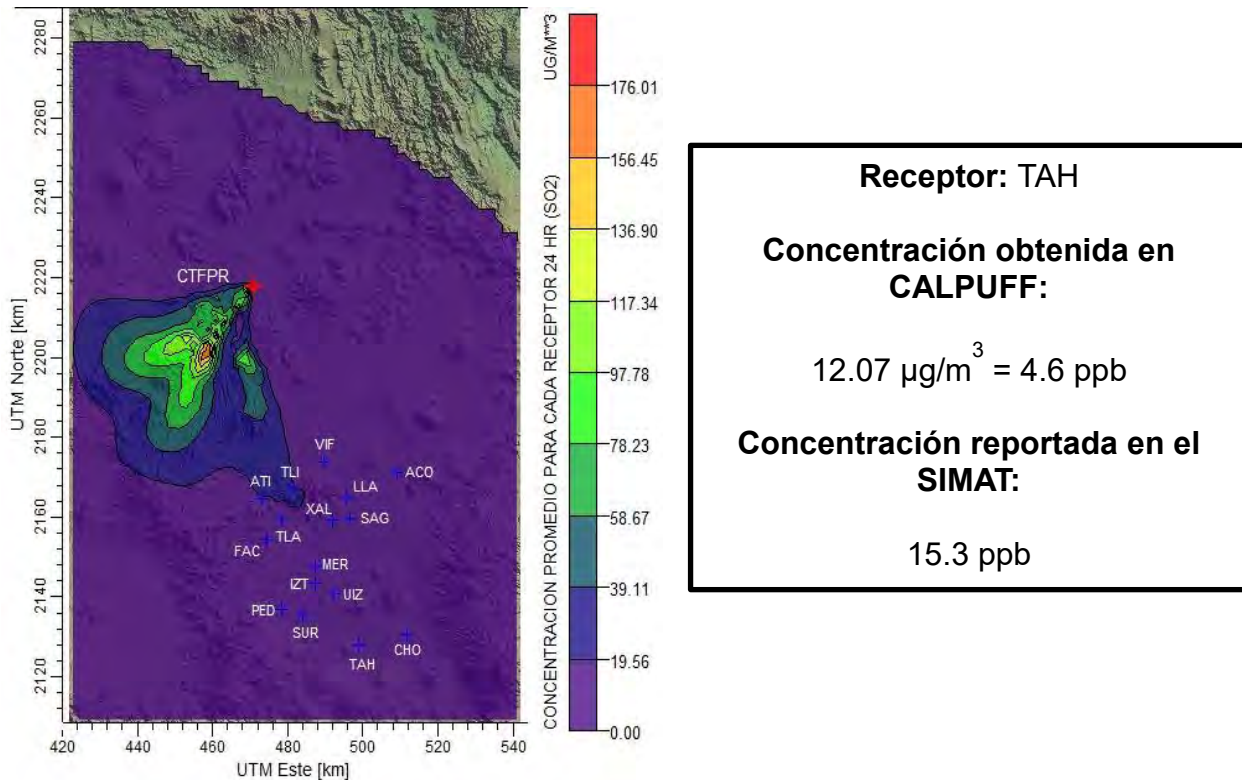


Figura 5.31. Isolíneas de concentración de SO₂ (µg/m³) para el 12 de febrero de 2011

Receptor: UAM Iztapalapa (UIZ)

La Figura 5.32 muestra la gráfica de comparación de concentración de SO₂ obtenida con CALPUFF y la registrada en el SIMAT en el periodo de estudio en el receptor UIZ. Se observan las mayores concentraciones en noviembre y algunos máximos en enero y febrero. El día de mayor concentración en CALPUFF correspondió al día de mayor concentración en el SIMAT (7 de noviembre de 2010), lo que proporciona evidencia de que ese día la principal fuente de contribución en este receptor fue la CTFPR.

La Figura 5.33 muestra las isolíneas de concentración de SO₂ para el 7 de noviembre de 2010, el cual fue el día de mayor concentración en el receptor UIZ, tanto en CALPUFF como en el SIMAT. Se muestra el impacto que hubo de la pluma al Noroeste de la ZMCM, sin embargo, existió una dispersión del contaminante que cubre la totalidad del dominio y que llevó al registro de concentración de SO₂ en el receptor UIZ.

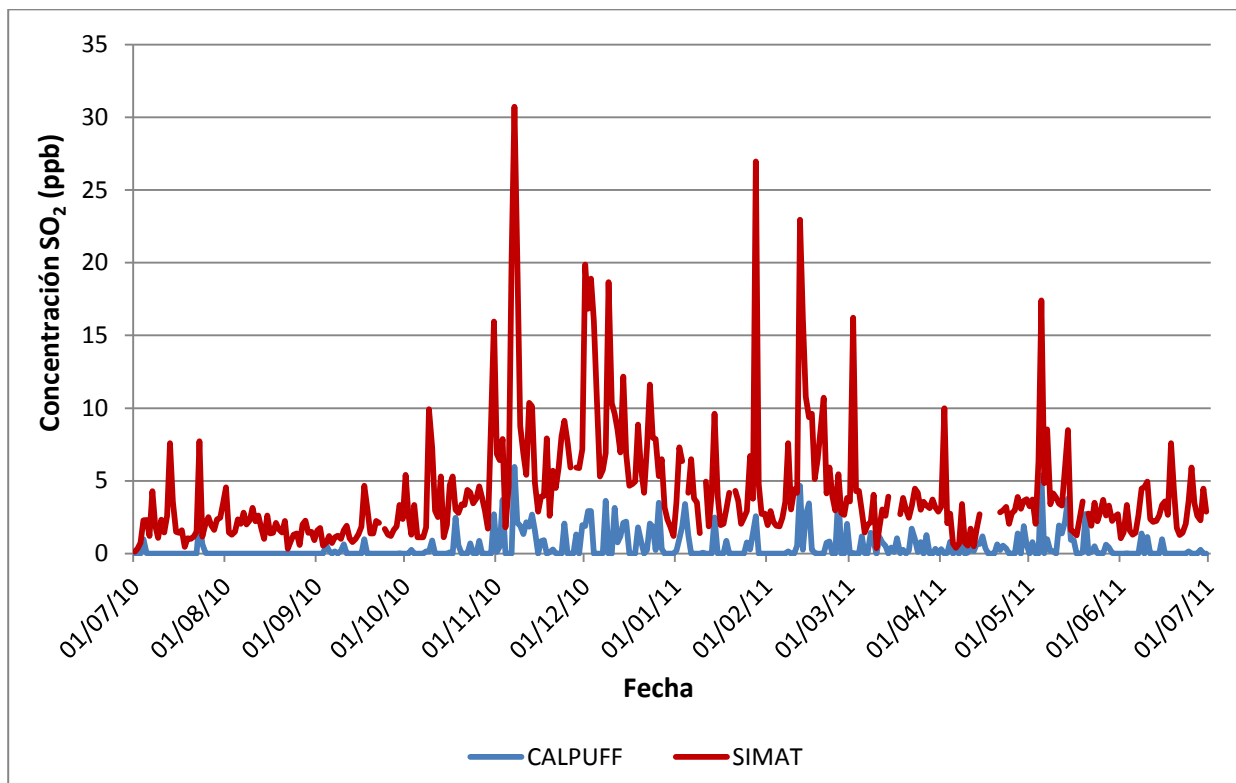


Figura 5.32. Concentración de SO₂ obtenida con el modelo CALPUFF y la medida en la estación de monitoreo UAM Iztapalapa

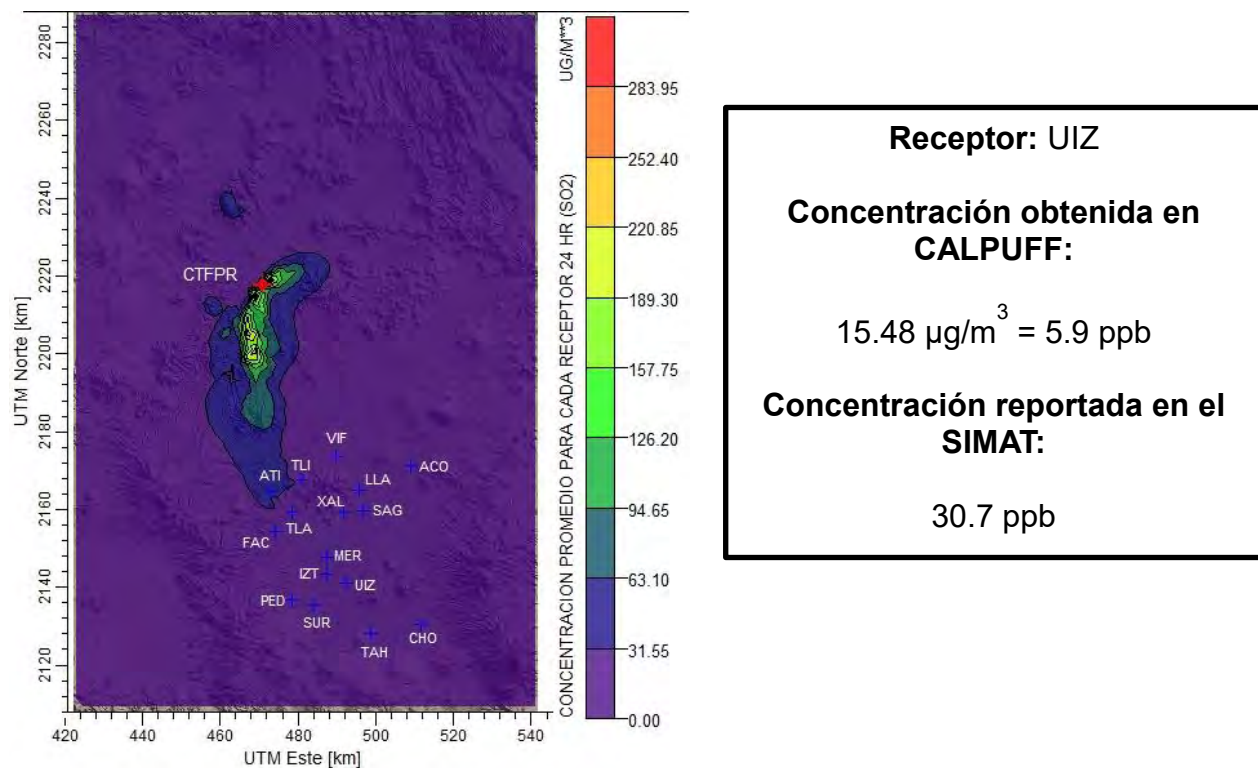


Figura 5.33. Isolíneas de concentración de SO₂ (µg/m³) para el 7 de noviembre de 2010

En la Tabla 5.4 se resumen las fechas con mayor concentración de SO₂ (ppb), en los distintos receptores discretos que corresponden a las estaciones de monitoreo del SIMAT. Mediante esta tabla se realizaron las rosas de viento de la sección 5.6.1 de este documento.

Tabla 5.4. Días con mayor concentración de SO₂ en las diferentes regiones de la ZMCM

Región	Estación de monitoreo	Fecha con mayor conc. de SO ₂ (CALPUFF)	Conc. (ppb)	Fecha con mayor conc. de SO ₂ (SIMAT)	Conc. (ppb)
Noroeste	Atizapán (ATI)	14/Dic/10	29.2	1/Dic/10	55.8
	FES Acatlán (FAC)	1/Dic/10	20.3	1/Dic/10	59.3
	Tlalnepantla (TLA)	5/May/11	25.6	1/Dic/10	75.6
	Tultitlán (TLI)	5/May/11	24.9	28/Ene/11	71.4
Noreste	San Agustín (SAG)	14/May/11	10.05	28/Ene/11	40.1
	Xalostoc (XAL)	5/May/11	16.6	5/May/11	42.1
Centro	Iztacalco (IZT)	5/May/11	10.6	7/Nov/10	35.5
	Merced (MER)	5/May/11	15	20/Feb/11	34.1
Suroeste	Pedregal (PED)	1/Dic/10	14.1	1/Dic/10	28.1
	Santa Úrsula (SUR)	1/Dic/10	7.6	1/Dic/10	34.4
Sureste	Tláhuac (TAH)	12/Feb/11	4.6	12/Feb/11	15.3
	UAM Iztapalapa (UIZ)	7/Nov/10	5.9	7/Nov/10	30.7

5.4.2. Receptores agrupados

Con el fin de comparar el comportamiento de las concentraciones de SO₂ para cada una de las regiones en la ZMCM, se agruparon los receptores de acuerdo a la región en la que se encuentran. Las Figuras 5.34 a 5.43 muestran las concentraciones de SO₂ obtenidas en CALPUFF y las monitoreadas por el SIMAT ordenadas por regiones: Noroeste, Noreste, Centro, Suroeste y Sureste.

REGIÓN NOROESTE

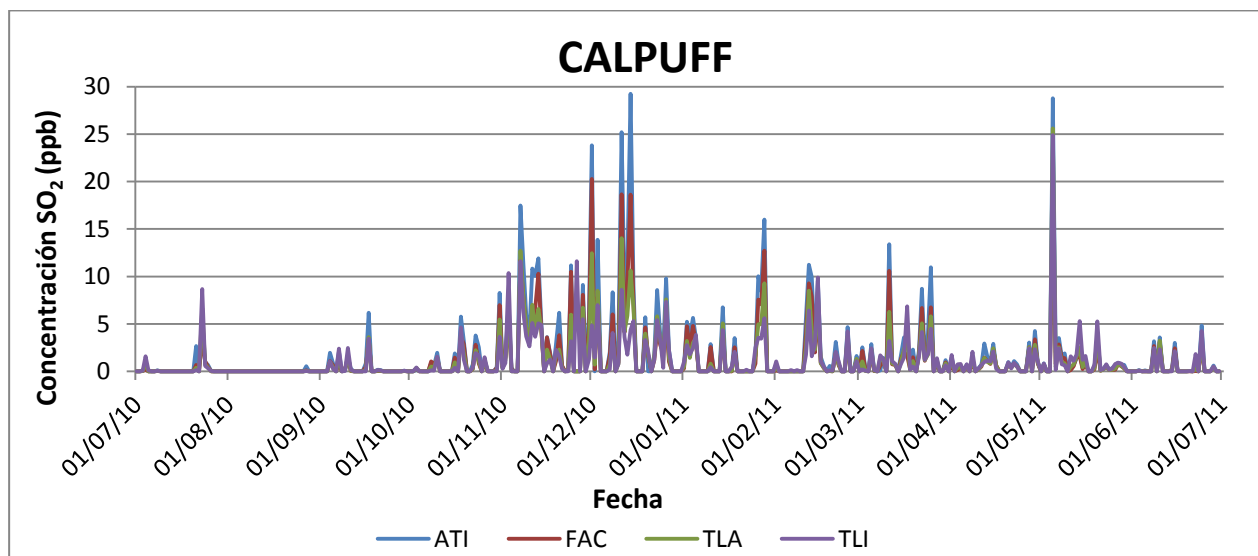


Figura 5.34. Concentraciones de SO₂ en los receptores de la región Noroeste obtenidas con el modelo CALPUFF

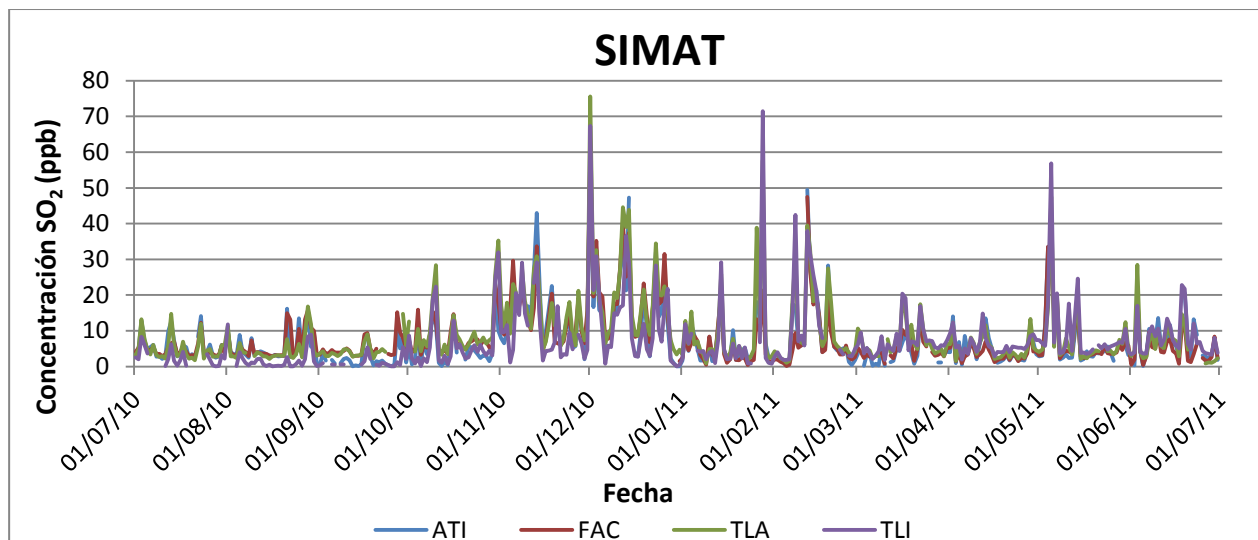


Figura 5.35. Concentraciones de SO₂ medidas en las estaciones de monitoreo de la región Noroeste reportadas por el SIMAT

REGIÓN NORESTE

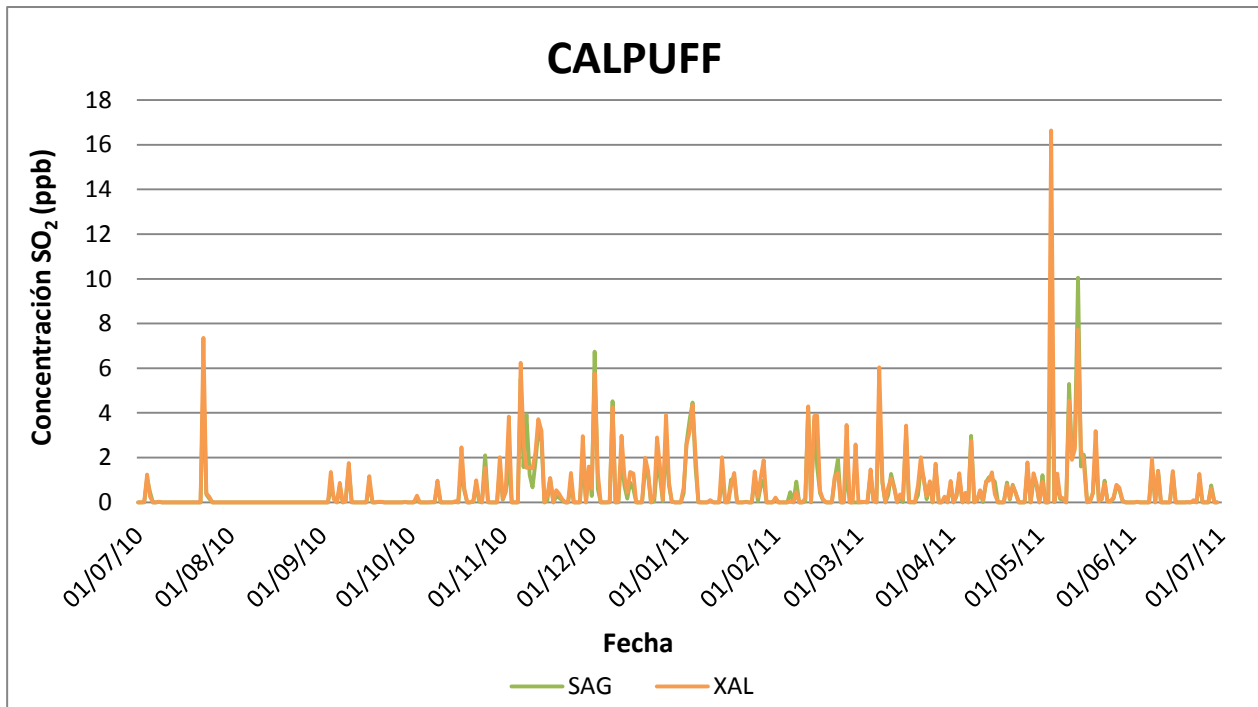


Figura 5.36. Concentraciones de SO₂ en los receptores de la región Noreste obtenidas con el modelo CALPUFF

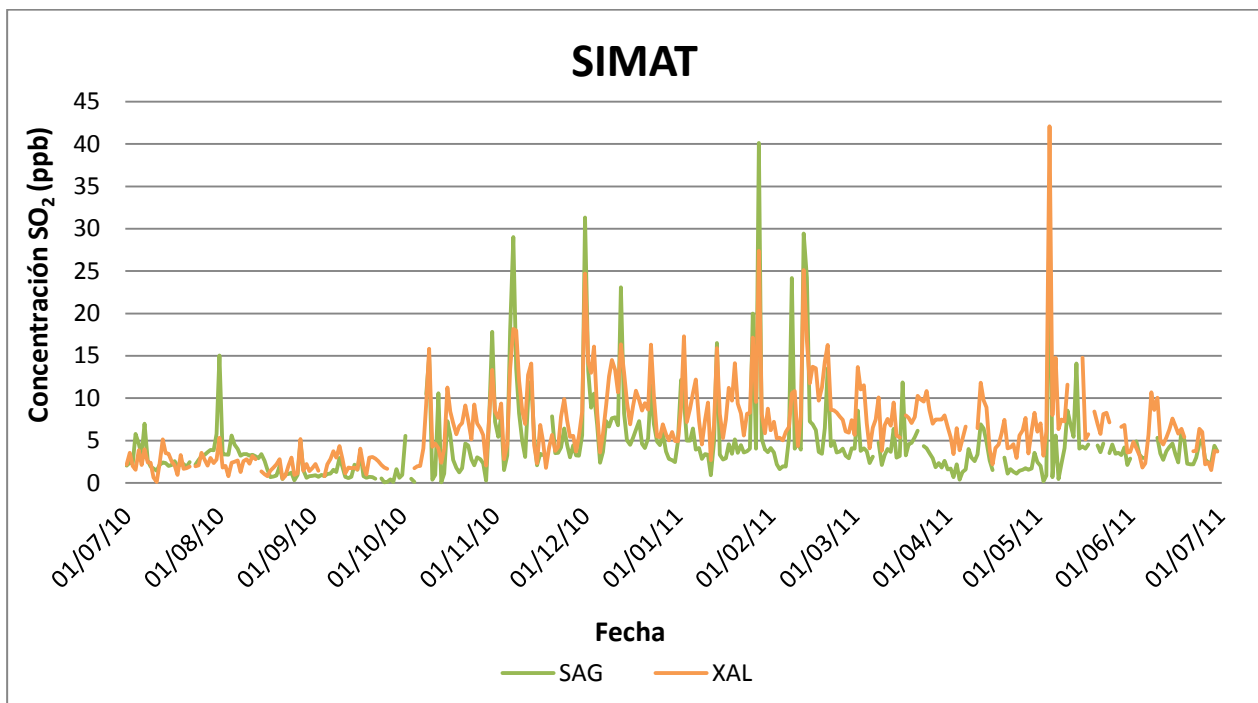


Figura 5.37. Concentraciones de SO₂ medidas en las estaciones de monitoreo de la región Noreste reportadas por el SIMAT

REGIÓN CENTRO

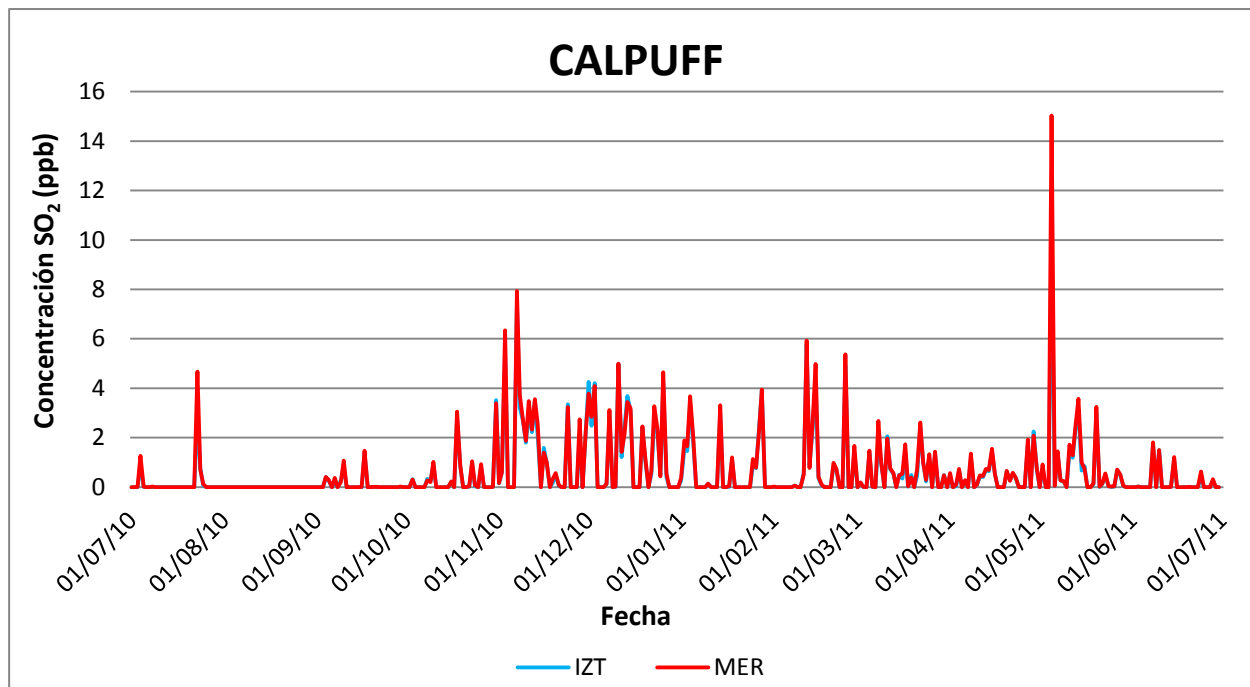


Figura 5.38. Concentraciones de SO₂ en los receptores de la región Centro obtenidas con el modelo CALPUFF

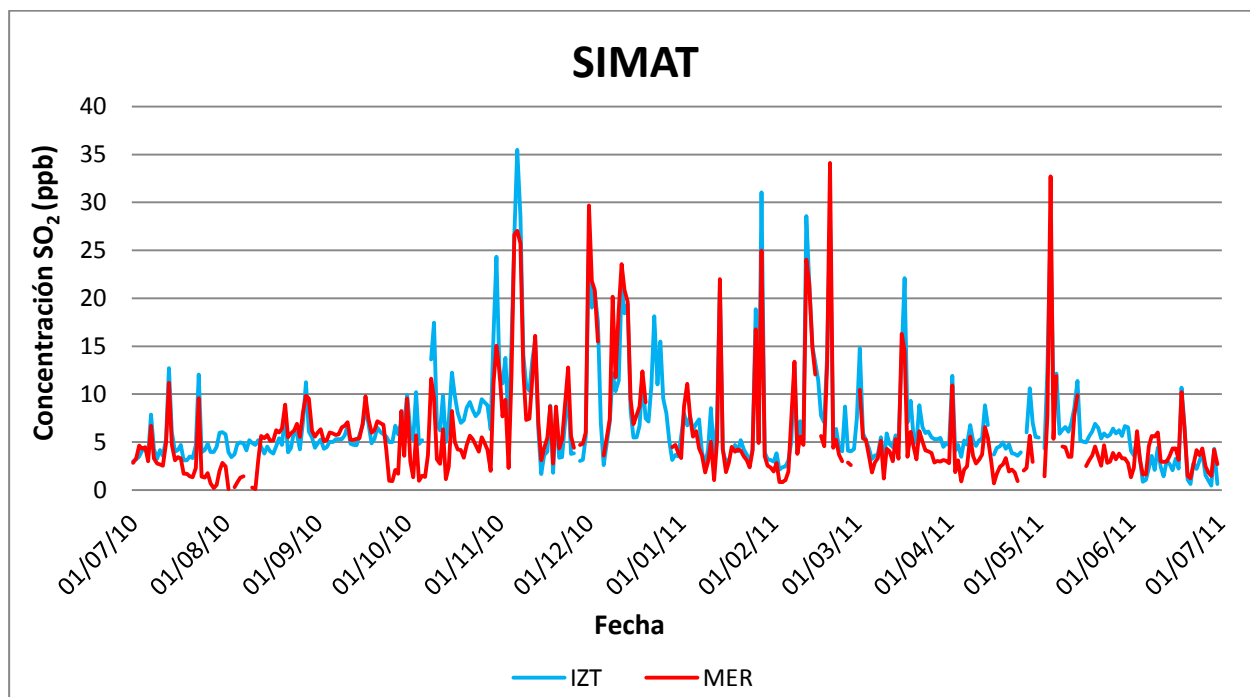


Figura 5.39. Concentraciones de SO₂ medidas en las estaciones de monitoreo de la región Centro reportadas por el SIMAT

REGIÓN SUROESTE

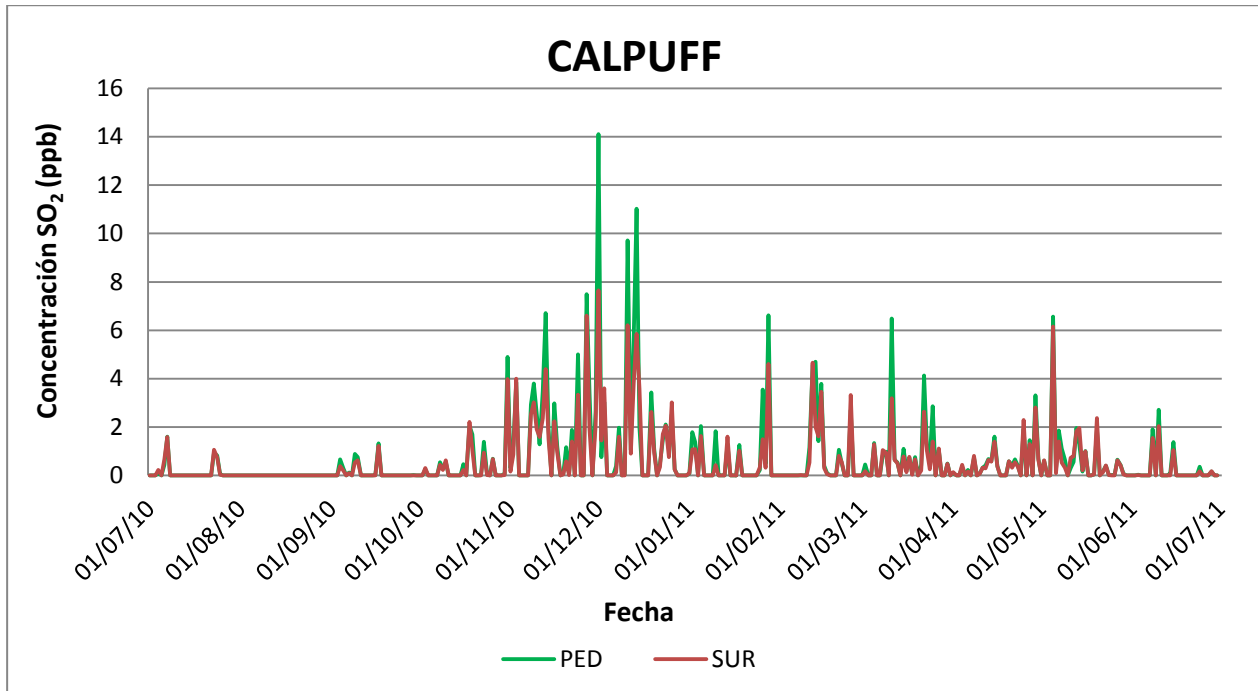


Figura 5.40. Concentraciones de SO₂ en los receptores de la región Suroeste obtenidas con el modelo CALPUFF

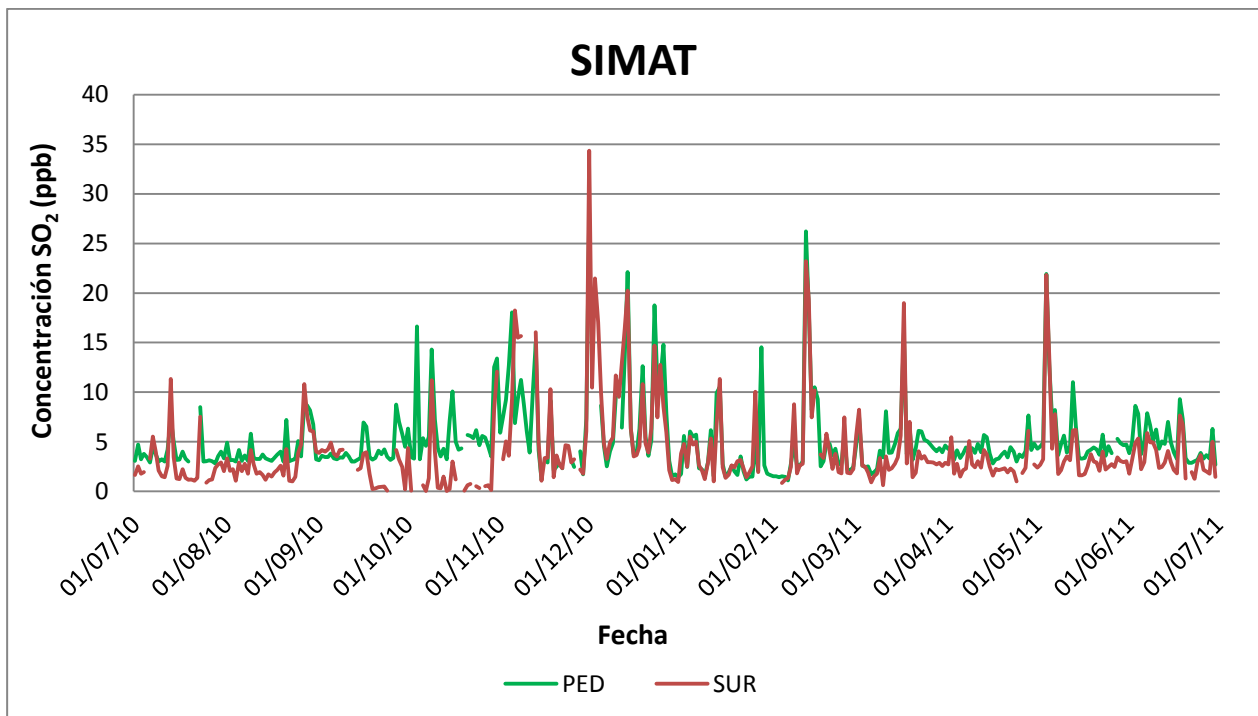


Figura 5.41. Concentraciones de SO₂ medidas en las estaciones de monitoreo de la región Suroeste reportadas por el SIMAT

REGIÓN SURESTE

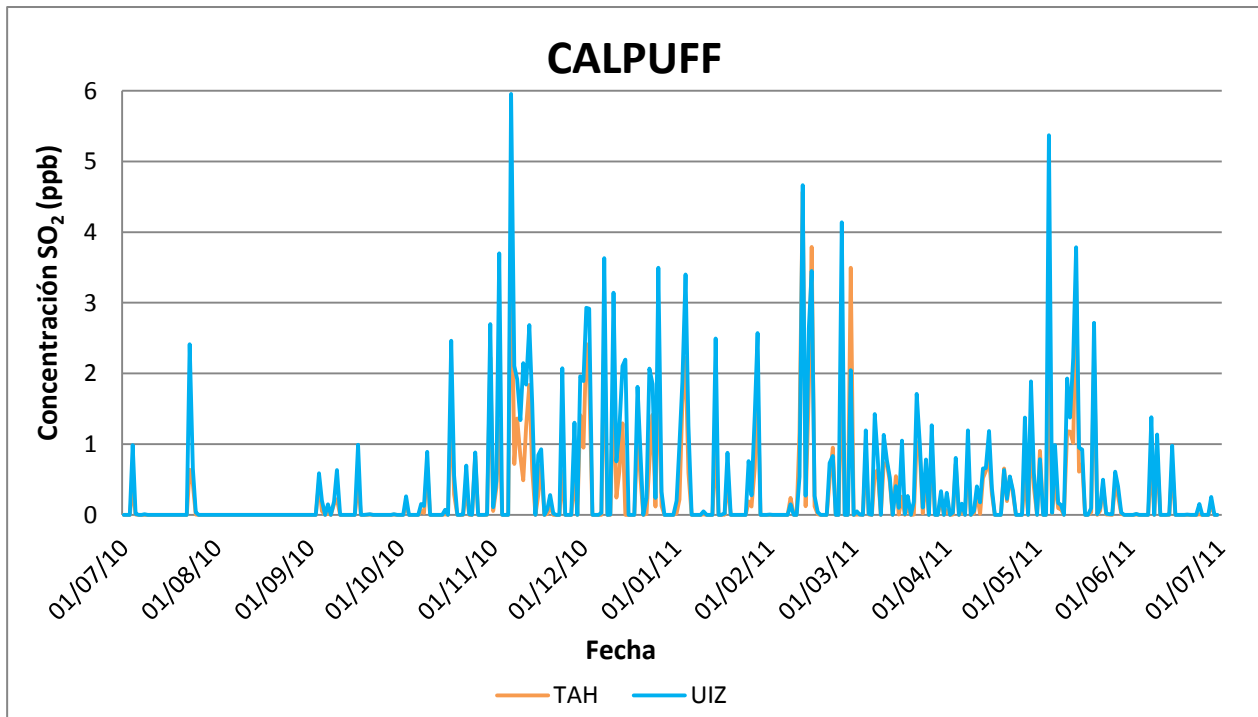


Figura 5.42. Concentraciones de SO₂ en los receptores de la región Sureste obtenidas con el modelo CALPUFF

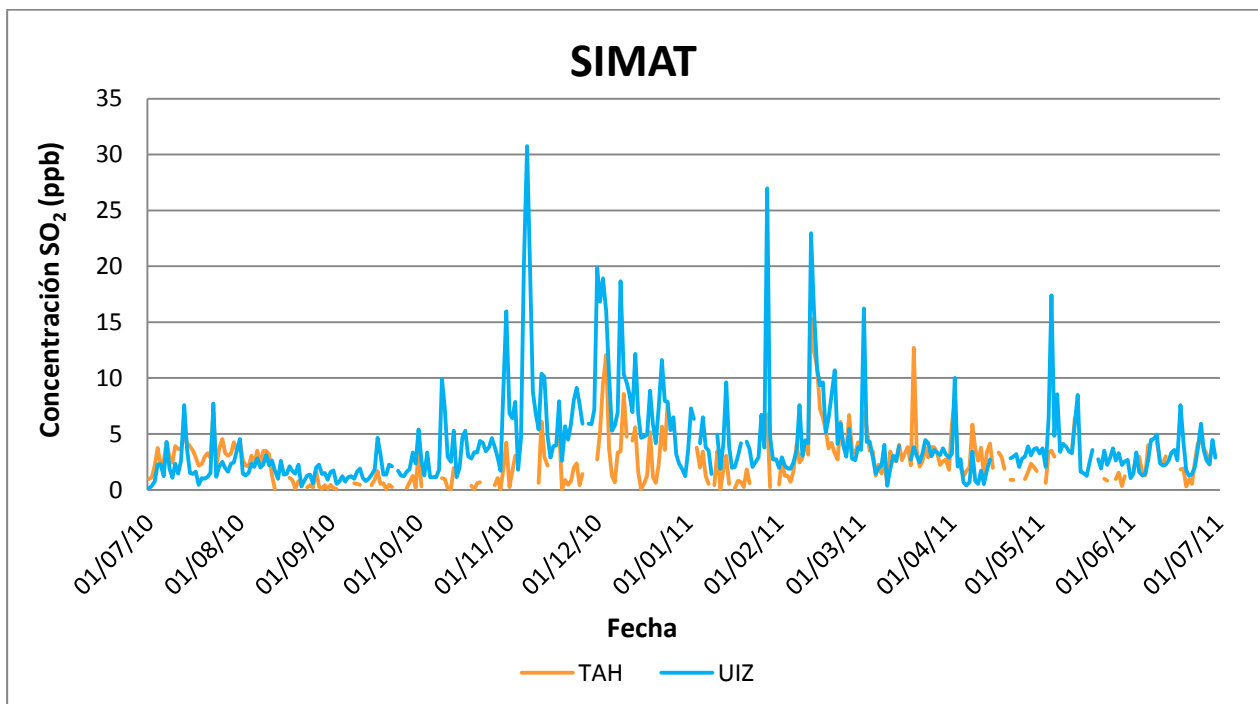


Figura 5.43. Concentraciones de SO₂ medidas en las estaciones de monitoreo de la región Sureste reportadas por el SIMAT

A partir de las gráficas anteriores de comportamiento de concentraciones de SO₂ en las distintas regiones de la ZMCM, se observó una tendencia similar tanto para las obtenidas en CALPUFF como para las registradas por el SIMAT.

En cuanto a la temporalidad, para los meses de julio a octubre se presentaron las menores concentraciones. Las mayores concentraciones se observaron de noviembre a febrero, y algunos episodios en mayo.

Respecto a la espacialidad, se obtuvieron las mayores concentraciones de SO₂ en la región Noroeste de la ZMCM y las menores concentraciones del contaminante se obtuvieron en la región Sureste.

5.5. Contribuciones de SO₂ por parte de la CTFPR a la ZMCM

En las Figuras 5.44 a 5.55, se muestran las isolíneas de concentración para los días de mayor contribución obtenidos en el periodo para cada receptor de la ZMCM. Las figuras se encuentran ordenadas de acuerdo a su región en la ZMCM: Noroeste, Noreste, Centro, Suroeste y Sureste

REGIÓN NOROESTE

Receptor: Atizapán (ATI)

La Figura 5.44 muestra las isólinas de concentración de SO₂ para el día de mayor contribución encontrado en el receptor ATI en el periodo de estudio.

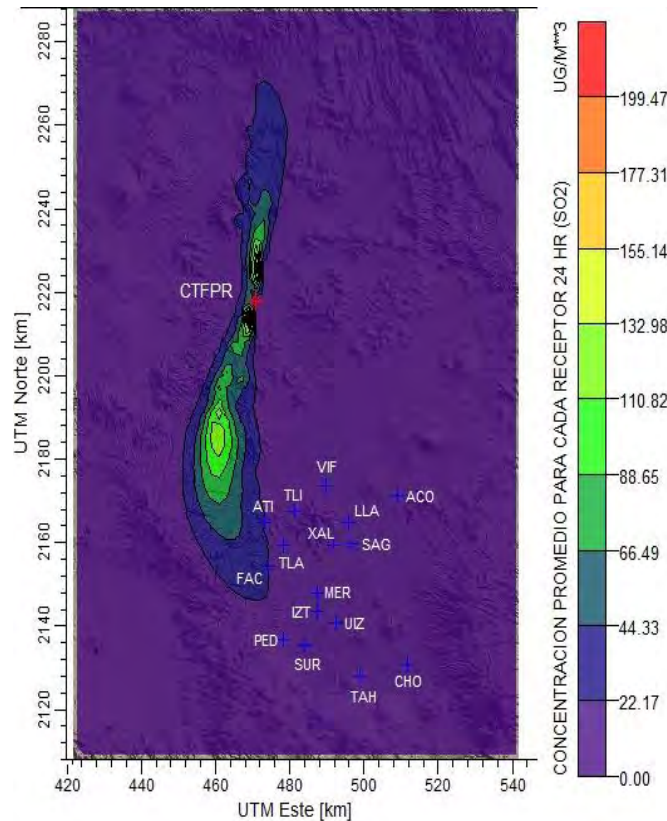


Figura 5.44. Isólinas de concentración de SO₂ (µg/m³) para el 24 de noviembre de 2010.

La figura anterior muestra las isólinas de concentración que tuvieron impacto en el receptor ATI. La concentración estimada por CALPUFF en este receptor fue de 11.2 ppb (29.38 µg/m³) y la registrada por el SIMAT fue de 11.9 ppb, obteniendo una contribución del 94.03% para el 24 de noviembre de 2010.

Receptor: FES Acatlán (FAC)

La Figura 5.45 muestra las isólineas de concentración de SO₂ para el día de mayor contribución encontrado en el receptor FAC en el periodo de estudio.

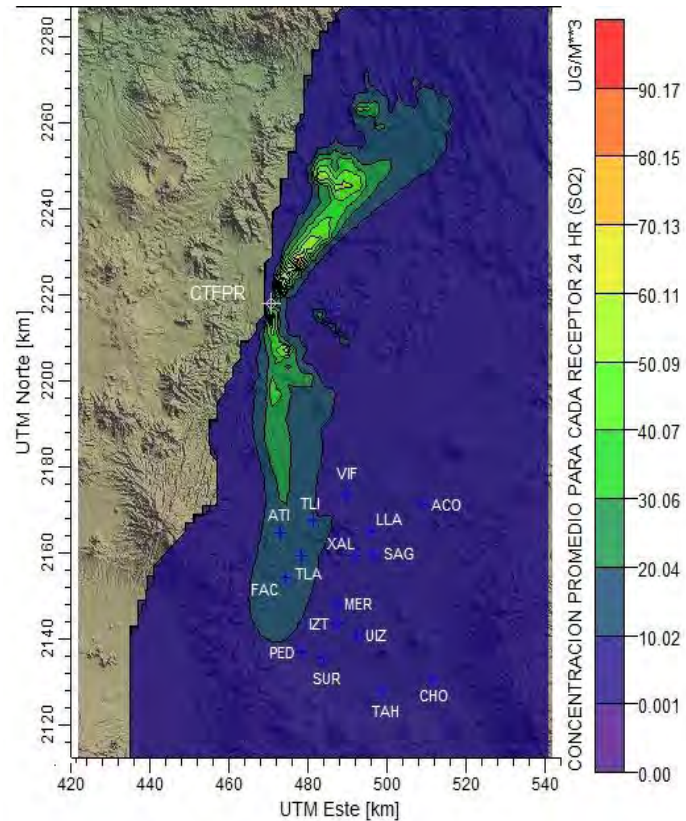


Figura 5.45. Isólineas de concentración de SO₂ (µg/m³) para el 28 de noviembre de 2010

La figura anterior muestra las isólineas de concentración que tuvieron impacto en el receptor FAC. La mayor parte del dominio presenta una dispersión del contaminante, observándose que la pluma se dirige hacia el Norte y hacia el Sur de la CTFPR. La concentración estimada por CALPUFF en este receptor fue de 8.1 ppb (21.25 µg/m³) y la registrada por el SIMAT fue de 9.8 ppb, obteniendo una contribución del 82.5% para el 28 de noviembre de 2010.

Receptor: Tlalnepantla (TLA)

La Figura 5.46 muestra las isolíneas de concentración de SO₂ para el día de mayor contribución encontrado en el receptor TLA en el periodo de estudio.

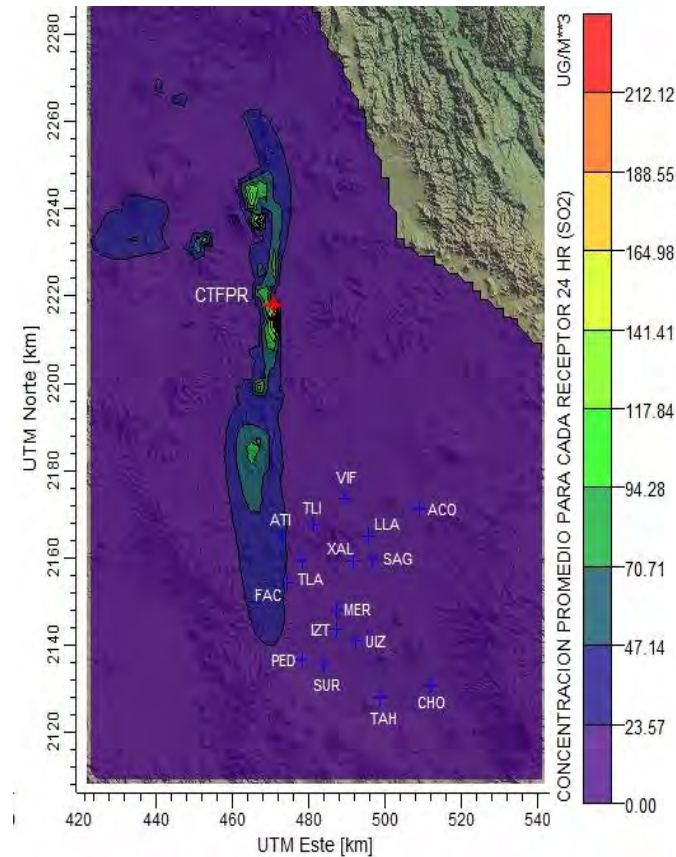


Figura 5.46. Isolíneas de concentración de SO₂ (µg/m³) para el 11 de marzo de 2011

La figura anterior muestra las isolíneas de concentración que tuvieron impacto a unos kilómetros del receptor TLA. La mayor parte del dominio presenta una dispersión del contaminante, observándose que la pluma se dirige hacia el Norte y hacia el Sur de la CTFPR. La concentración estimada por CALPUFF en este receptor fue de 6.3 ppb (16.52 µg/m³) y la registrada por el SIMAT fue de 7.7 ppb, obteniendo una contribución del 81.8% para el 11 de marzo de 2011.

Receptor: Tultitlan (TLI)

La Figura 5.47 muestra las isólineas de concentración de SO₂ para el día de mayor contribución encontrado en el receptor TLI en el periodo de estudio.

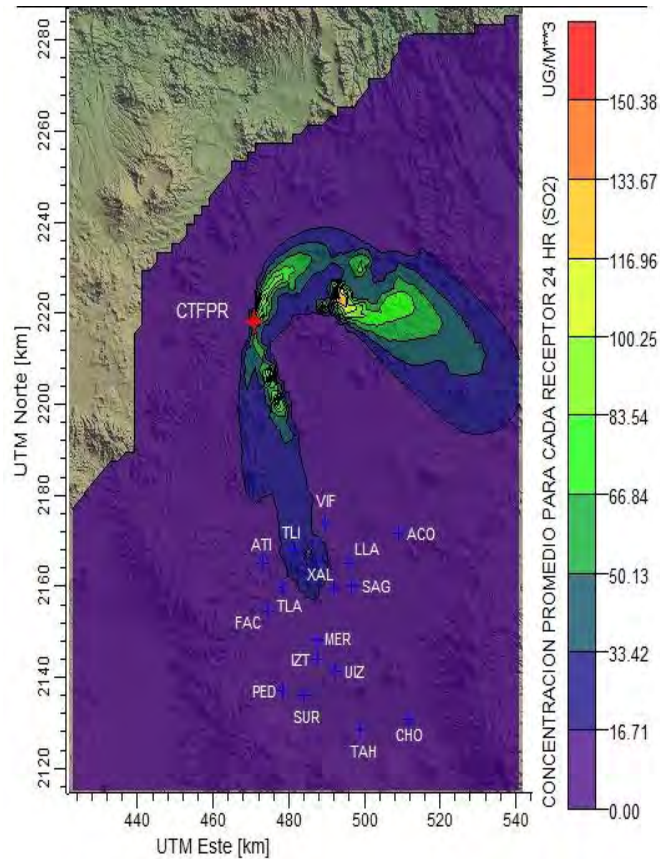


Figura 5.47. Isólineas de concentración de SO₂ (µg/m³) para el 3 de marzo de 2011

La figura anterior muestra las isólineas de concentración que tuvieron impacto en el receptor TLI. La mayor parte del dominio presenta una dispersión del contaminante, observándose que la pluma se dirige hacia el Noreste y hacia el Sur de la CTFPR. La concentración estimada por CALPUFF en este receptor fue de 10.4 ppb (16.52 µg/m³) y la registrada por el SIMAT fue de 11.6 ppb, obteniendo una contribución del 89.2% para el 3 de marzo de 2011.

REGIÓN NORESTE

Receptor: San Agustín (SAG)

La Figura 5.48 muestra las isólineas de concentración de SO₂ para el día de mayor contribución encontrado en el receptor SAG en el periodo de estudio.

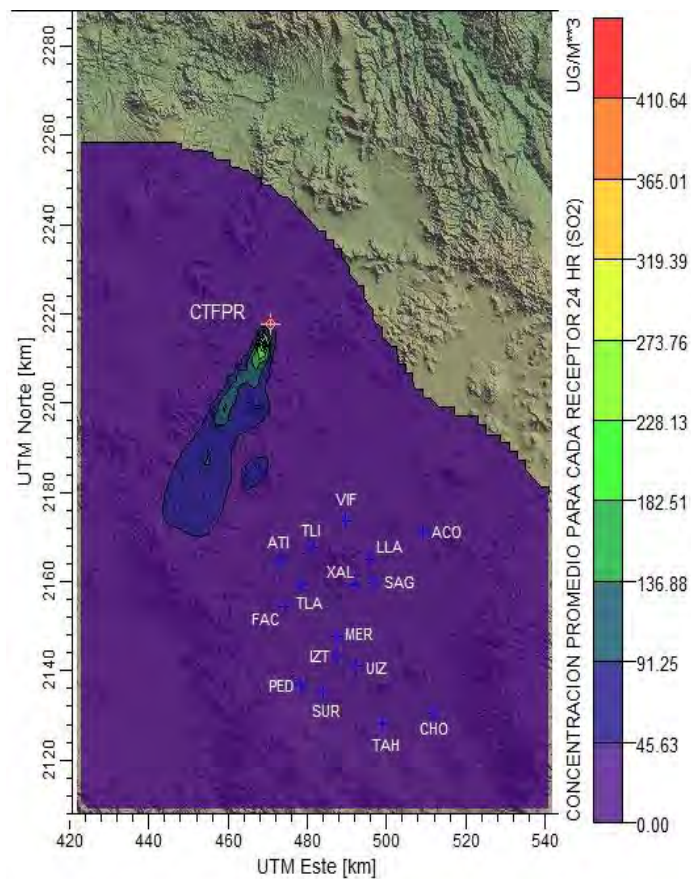


Figura 5.48. Isólineas de concentración de SO₂ (µg/m³) para el 4 de enero de 2011

La figura anterior muestra que la dirección de la pluma de concentración de SO₂ se dirige hacia el Suroeste de la CTFPR, sin embargo, existió una dispersión del contaminante a lo largo del dominio, lo que llevó a encontrar contribuciones en todos los receptores por parte de la CTFPR. La concentración estimada por CALPUFF en este receptor fue de 4.5 ppb (11.8 µg/m³) y la registrada por el SIMAT fue de 5 ppb, obteniendo una contribución del 89.4% para el 4 de enero de 2011.

Receptor: Xalostoc (XAL)

La Figura 5.49 muestra las isólineas de concentración de SO₂ para el día de mayor contribución encontrado en el receptor XAL en el periodo de estudio.

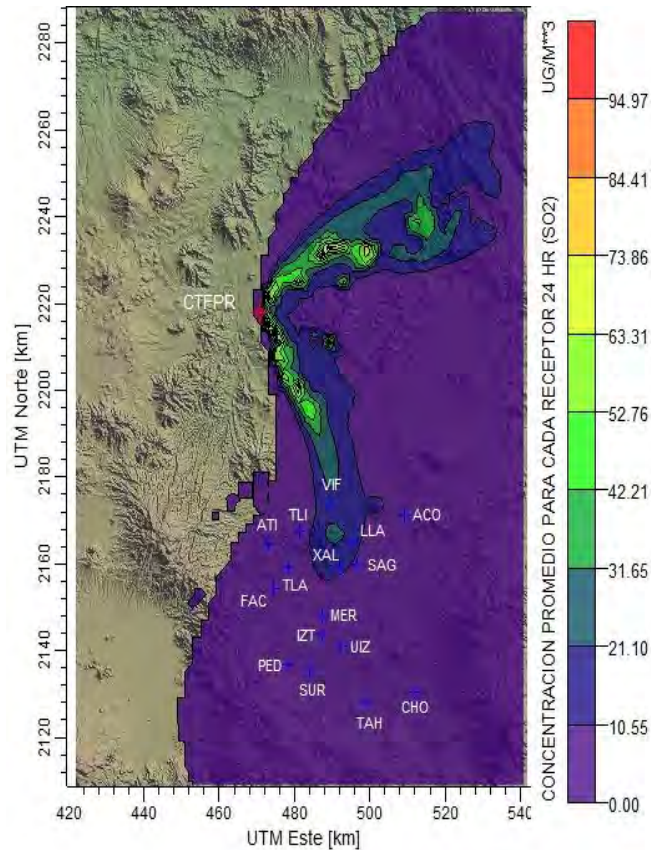


Figura 5.49. Isólineas de concentración de SO₂ (µg/m³) para el 8 de marzo de 2011

La figura anterior muestra las isólineas de concentración que tuvieron impacto en el receptor XAL. Todos los receptores fueron influenciados por la dispersión del contaminante, observándose que la pluma se dirige hacia el Noreste y hacia el Sureste de la CTFPR. La concentración estimada por CALPUFF en este receptor fue de 6.1 ppb (16 µg/m³) y la registrada por el SIMAT fue de 7.5 ppb, obteniendo una contribución del 80.6% para el 8 de marzo de 2011.

REGIÓN CENTRO

Receptor: Iztacalco (IZT)

La Figura 5.50 muestra las isolíneas de concentración de SO₂ para el día de mayor contribución encontrado en el receptor IZT en el periodo de estudio.

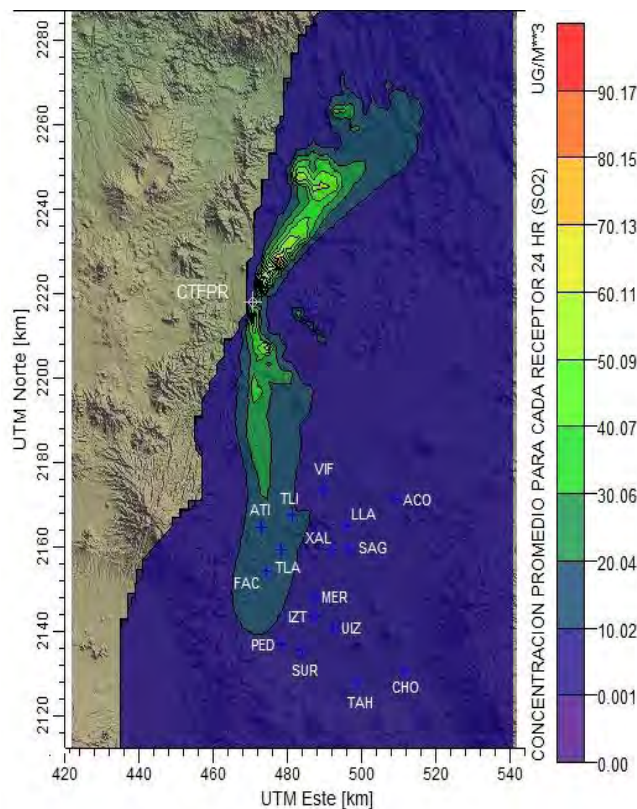


Figura 5.50. Isolíneas de concentración de SO₂ (µg/m³) para el 28 de noviembre de 2010

La figura anterior muestra la pluma de concentración de SO₂ con dirección hacia el Noreste y hacia el Sur de la CTFPR. Todos los receptores fueron influenciados por la dispersión del contaminante. Las isolíneas de concentración tuvieron impacto a unos kilómetros del receptor IZT. La concentración estimada por CALPUFF en este receptor fue de 2.2 ppb (5.77 µg/m³) y la registrada por el SIMAT fue de 3.04 ppb, obteniendo una contribución del 71.5% para el 28 de noviembre de 2010.

Receptor: Merced (MER)

La Figura 5.51 muestra las isolíneas de concentración de SO₂ para el día de mayor contribución encontrado en el receptor MER en el periodo de estudio.

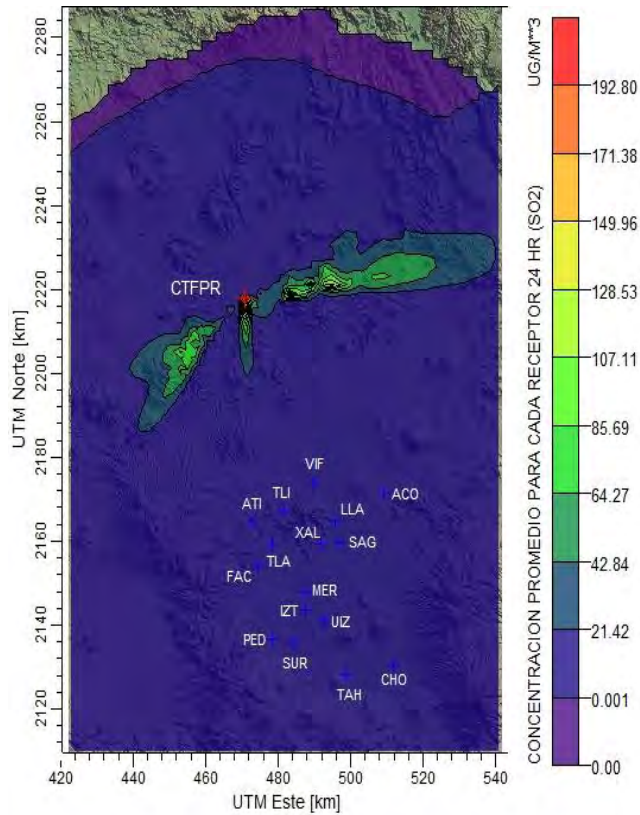


Figura 5.51. Isolíneas de concentración de SO₂ (µg/m³) para el 27 de abril de 2011

La figura anterior muestra que la dirección de la pluma de concentración de SO₂ se dirige hacia el Suroeste y Noreste de la CTFPR, sin embargo, existió una dispersión del contaminante a lo largo del dominio, lo que llevó a encontrar contribuciones en todos los receptores por parte de la CTFPR. La concentración estimada por CALPUFF en este receptor fue de 1.9 ppb (4.98 µg/m³) y la registrada por el SIMAT fue de 2.3 ppb, obteniendo una contribución del 83.8% para el 27 de abril de 2011.

REGIÓN SUROESTE

Receptor: Pedregal (PED)

La Figura 5.52 muestra las isolíneas de concentración de SO₂ para el día de mayor contribución encontrado en el receptor PED en el periodo de estudio.

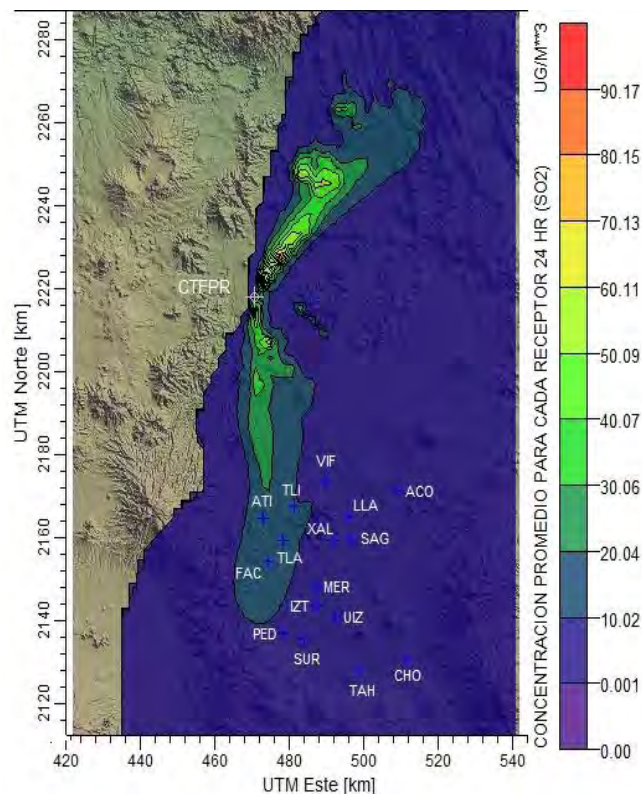


Figura 5.52. Isolíneas de concentración de SO₂ (µg/m³) para el 28 de noviembre de 2010

La figura anterior muestra la pluma de concentración de SO₂ con dirección hacia el Noreste y hacia el Sur de la CTFPR. Todos los receptores fueron influenciados por la dispersión del contaminante. Las isolíneas de concentración tuvieron impacto a unos kilómetros del receptor PED. La concentración estimada por CALPUFF en este receptor fue de 3.4 ppb (8.92 µg/m³) y la registrada por el SIMAT fue de 4 ppb, obteniendo una contribución del 84.3% para el 28 de noviembre de 2010.

Receptor: Santa Úrsula (SUR)

La Figura 5.53 muestra las isolíneas de concentración de SO₂ para el día de mayor contribución encontrado en el receptor SUR en el periodo de estudio.

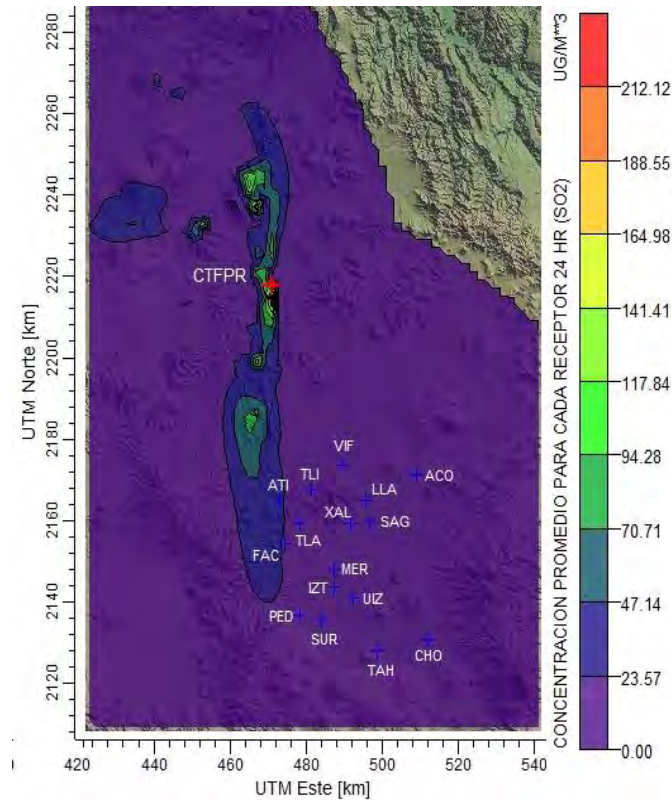


Figura 5.53. Isolíneas de concentración de SO₂ (µg/m³) para el 11 de marzo de 2011

La figura anterior muestra las isolíneas de concentración que tuvieron impacto a unos kilómetros del receptor SUR. La mayor parte del dominio presenta una dispersión del contaminante, observándose que la pluma se dirige hacia el Norte y hacia el Sur de la CTFPR. La concentración estimada por CALPUFF en este receptor fue de 3.2 ppb (8.39 µg/m³) y la registrada por el SIMAT fue de 3.5 ppb, obteniendo una contribución del 90.1% para el 11 de marzo de 2011.

REGIÓN SURESTE

Receptor: Tláhuac (TAH)

La Figura 5.54 muestra las isolíneas de concentración de SO₂ para el día de mayor contribución encontrado en el receptor TAH en el periodo de estudio.

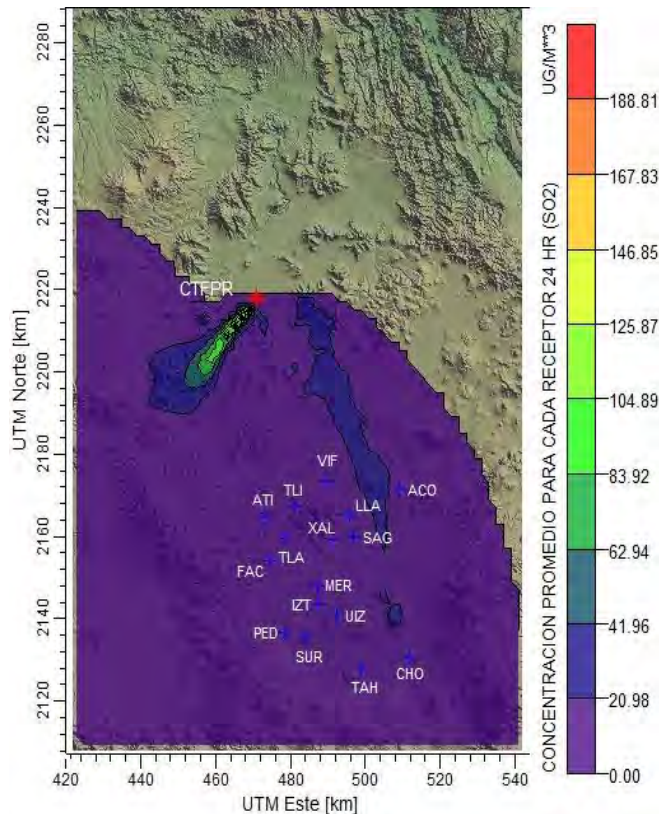


Figura 5.54. Isolíneas de concentración de SO₂ (µg/m³) para el 28 de febrero de 2011

La figura anterior muestra que la dirección de la pluma de concentración de SO₂ se dirige hacia el Suroeste y Sureste de la CTFPR, sin embargo, existió una dispersión del contaminante a lo largo del dominio, lo que llevó a encontrar contribuciones en todos los receptores por parte de la CTFPR. La concentración estimada por CALPUFF en este receptor fue de 3.5 ppb (9.18 µg/m³) y la registrada por el SIMAT fue de 4.3 ppb, obteniendo una contribución del 82.3% para el 28 de febrero de 2011.

Receptor: UAM Iztapalapa (UIZ)

La Figura 5.55 muestra las isolíneas de concentración de SO₂ para el día de mayor contribución encontrado en el receptor UIZ en el periodo de estudio.

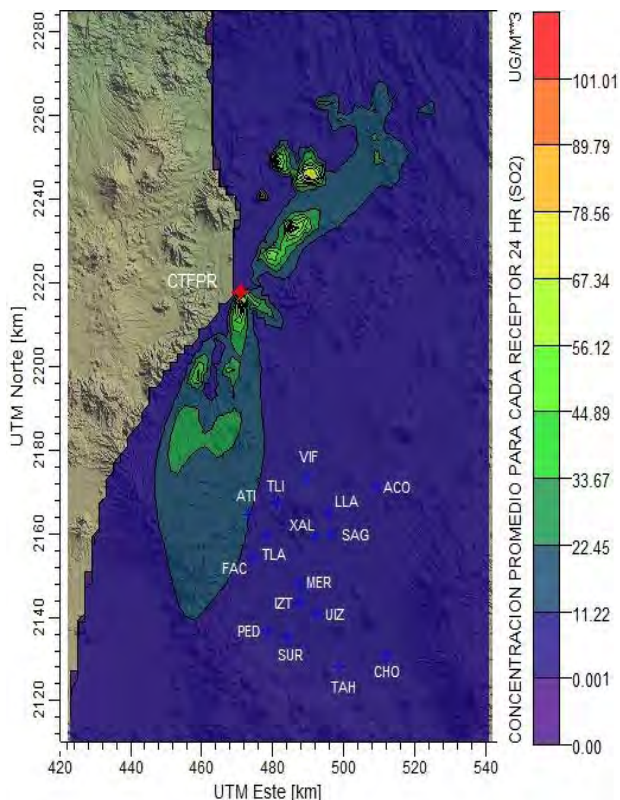


Figura 5.55. Isolíneas de concentración de SO₂ (µg/m³) para el 18 de octubre de 2010

La figura anterior muestra la pluma de concentración de SO₂ con dirección hacia el Noreste y hacia el Suroeste de la CTFPR. Todos los receptores fueron influenciados por la dispersión del contaminante. La concentración estimada por CALPUFF en el receptor UIZ fue de 2.5 ppb (6.56 µg/m³) y la registrada por el SIMAT fue de 3 ppb, obteniendo una contribución del 82.05% para el 18 de octubre de 2010.

En la Tabla 5.5 se resumen las fechas de mayor contribución de SO₂ a la ZMCM, así como su porcentaje respectivo para los distintos receptores discretos que corresponden a las estaciones de monitoreo del SIMAT. Mediante esta tabla se realizaron las rosas de viento de la sección 5.6.2 de este documento.

Tabla 5.5. Contribuciones porcentuales estimadas de los días con mayor contribución de SO₂ en las diferentes regiones de la ZMCM

Región	Estación de Monitoreo	Fecha con mayor contribución de SO ₂	Contribución (%)
Noroeste	Atizapán (ATI)	24/Nov/10	94.03
	FES Acatlán (FAC)	28/Nov/10	82.50
	Tlalnepantla (TLA)	11/Mar/11	81.83
	Tultitlán (TLI)	3/Nov/10	89.21
Noreste	San Agustín (SAG)	4/Ene/11	89.37
	Xalostoc (XAL)	8/Mar/11	80.58
Centro	Iztacalco (IZT)	28/Nov/10	71.5
	Merced (MER)	27/Abr/11	83.77
Suroeste	Pedregal (PED)	28/Nov/10	84.25
	Santa Úrsula (SUR)	11/Mar/11	90.13
Sureste	Tláhuac (TAH)	28/Feb/11	82.28
	UAM Iztapalapa (UIZ)	18/Oct/10	82.05

Las concentraciones estimadas con el modelo CALPUFF representan un porcentaje de contribución al total de SO₂ reportado por el SIMAT. Se encontraron valores de mayor contribución en el intervalo de 71.5 a 94.03%. Los días de mayor contribución encontrados fueron en los meses de noviembre a marzo para las regiones Noroeste, Noreste y Suroeste de la ZMCM.

Los porcentajes de contribución calculados con la estimación del modelo y la base de datos del SIMAT, muestran evidencia del impacto de las emisiones de SO₂ provenientes de la CTFPR a la ZMCM.

5.6. Rosas de viento

Las rosas de viento se realizaron para los días encontrados con mayor concentración y con mayor contribución de SO₂ en la ZMCM de julio de 2010 a junio de 2011.

Fueron obtenidas a partir de los Gráficos Interactivos de la sección de Estadísticas del sitio web de la Dirección de Monitoreo Atmosférico: <http://aire.cdmx.gob.mx>

5.6.1. Días con mayor concentración de SO₂

En las Figuras 5.56 a 5.60 se muestran las rosas de viento realizadas para las fechas con mayor concentración de SO₂ que se mostraron en la Tabla 5.4 para cada receptor discreto ordenado por región: Noroeste, Noreste, Centro, Suroeste y Sureste.

REGIÓN NOROESTE

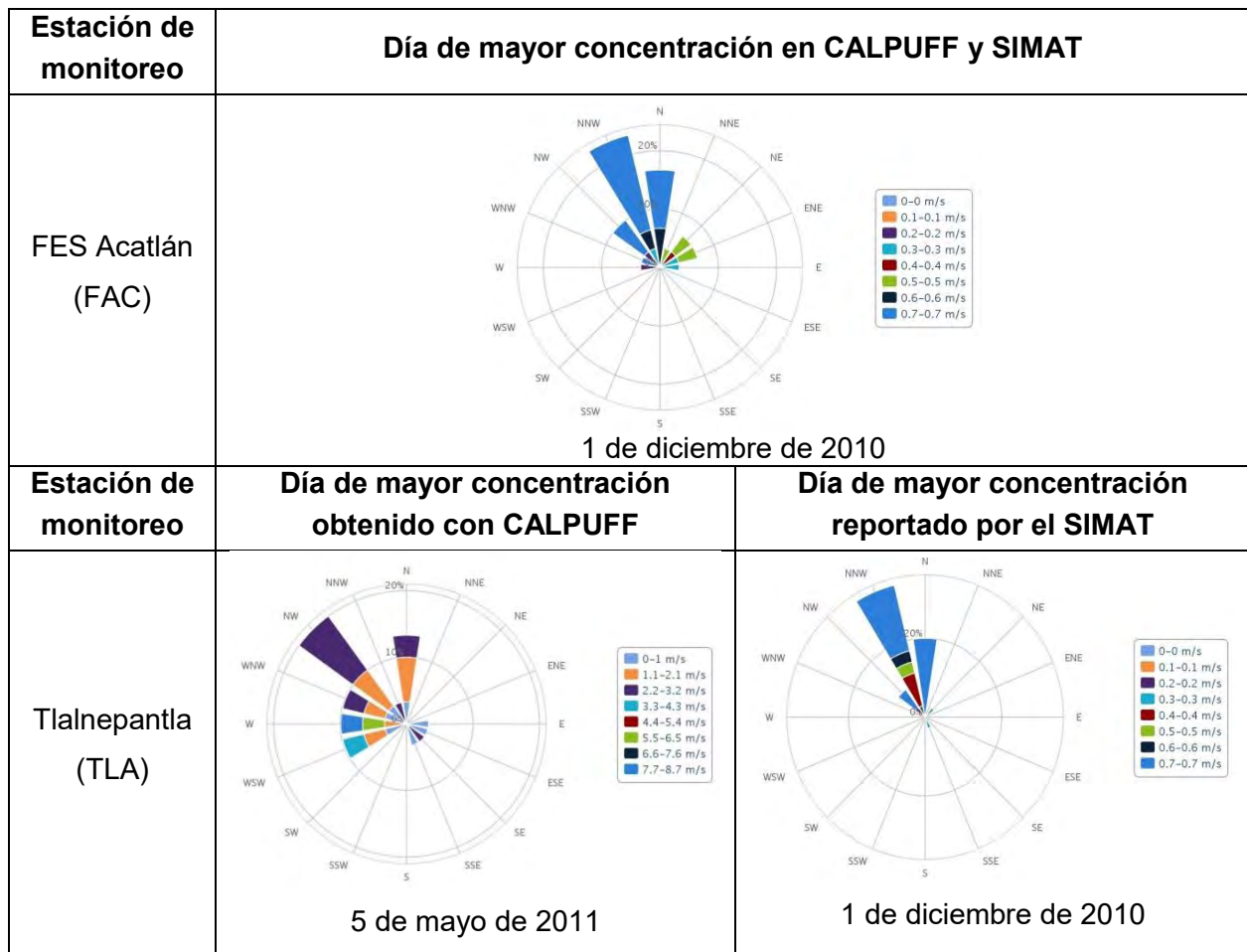


Figura 5.56. Rosas de viento para la región Noroeste de los días de mayor concentración de SO₂

REGIÓN NORESTE

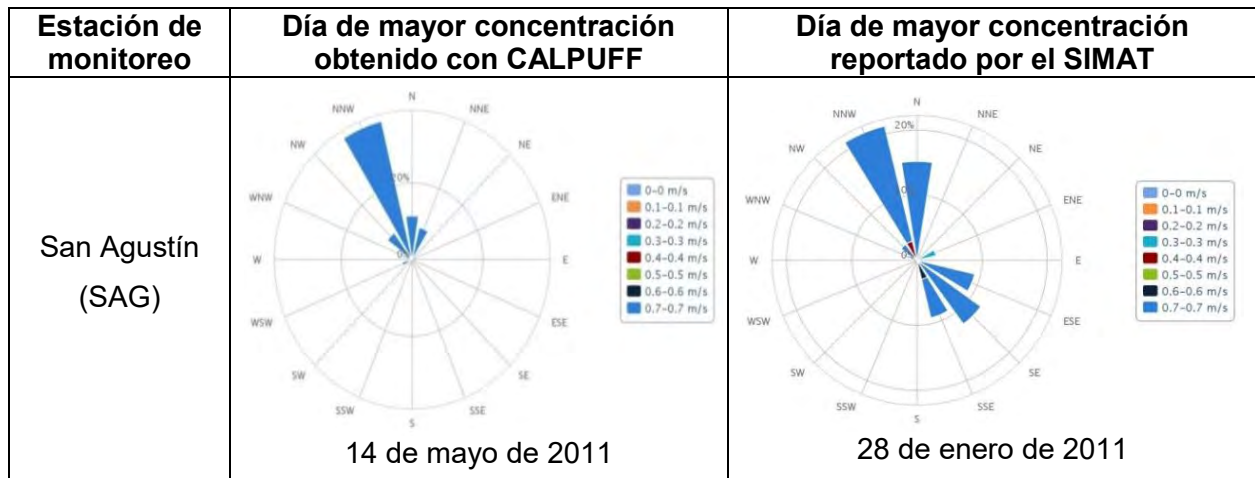


Figura 5.57. Rosas de viento para la región Noreste de los días de mayor concentración de SO₂

REGIÓN CENTRO

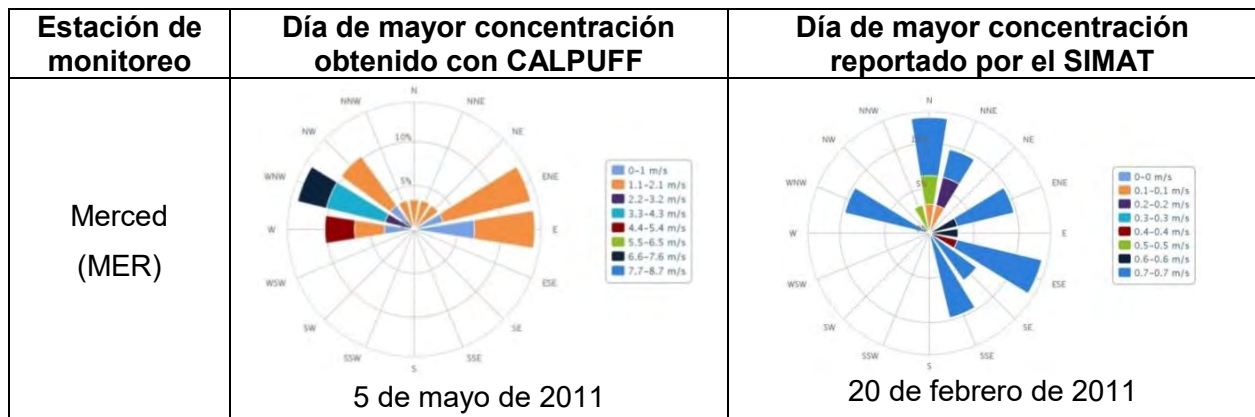


Figura 5.58. Rosas de viento para la región Centro de los días de mayor concentración de SO₂

REGIÓN SUROESTE



Figura 5.59. Rosas de viento para la región Suroeste de los días de mayor concentración de SO₂

REGIÓN SURESTE

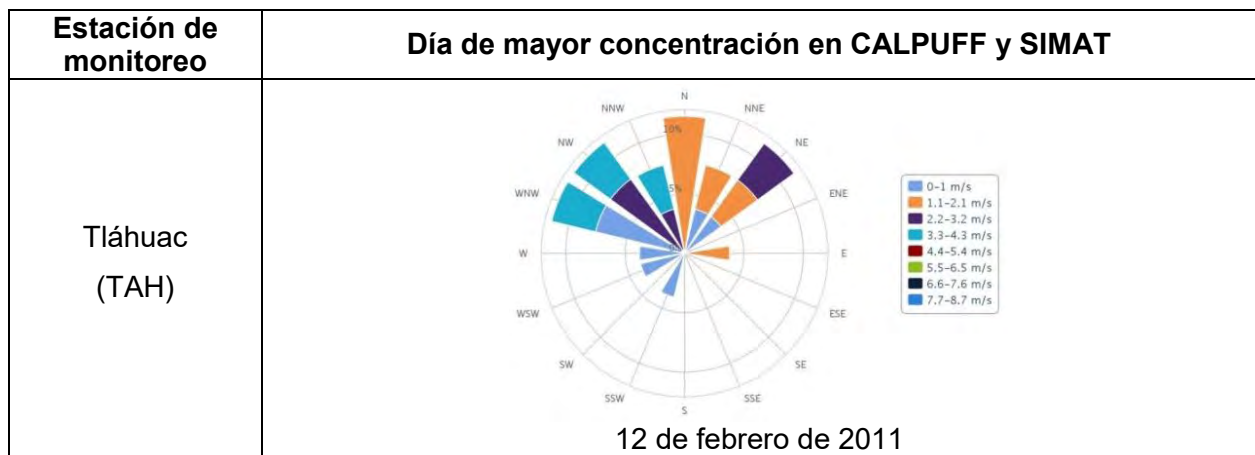


Figura 5.60. Rosas de viento para la región Sureste de los días de mayor concentración de SO₂

5.6.2. Días con mayor contribución de SO₂

En las Figuras 5.61 a 5.65 se observan las rosas de viento realizadas para las fechas de mayor contribución que se mostraron en la Tabla 5.5 para cada receptor discreto ordenado por región: Noroeste, Noreste, Centro, Suroeste y Sureste.

REGIÓN NOROESTE

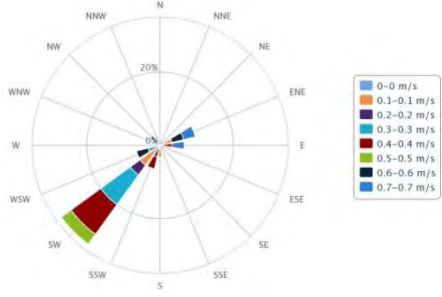
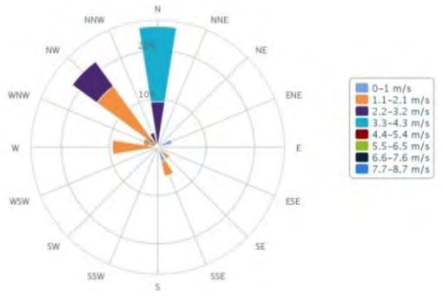
Estación de monitoreo	Día de mayor contribución estimado
FES Acatlán (FAC)	 <p>28 de noviembre de 2010</p>
Tlalnepantla (TLA)	 <p>11 de marzo de 2011</p>

Figura 5.61. Rosas de viento para la región Noroeste de los días de mayor contribución de SO₂

REGIÓN NORESTE

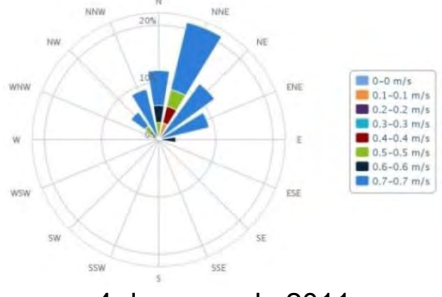
Estación de monitoreo	Día de mayor contribución estimado
San Agustín (SAG)	 <p>4 de enero de 2011</p>

Figura 5.62. Rosas de viento para la región Noreste de los días de mayor contribución de SO₂

REGIÓN CENTRO

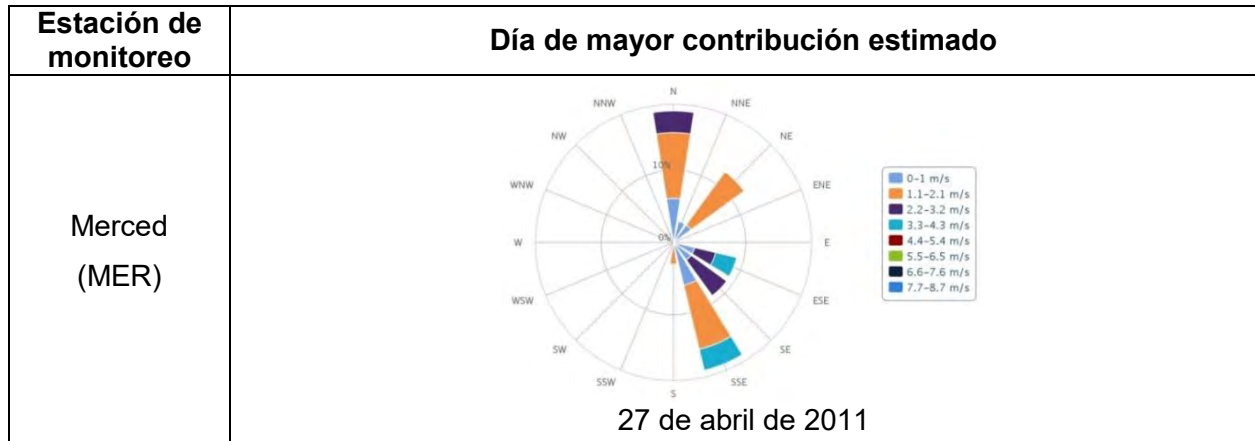


Figura 5.63. Rosas de viento para la región Centro de los días de mayor contribución de SO₂

REGIÓN SUROESTE

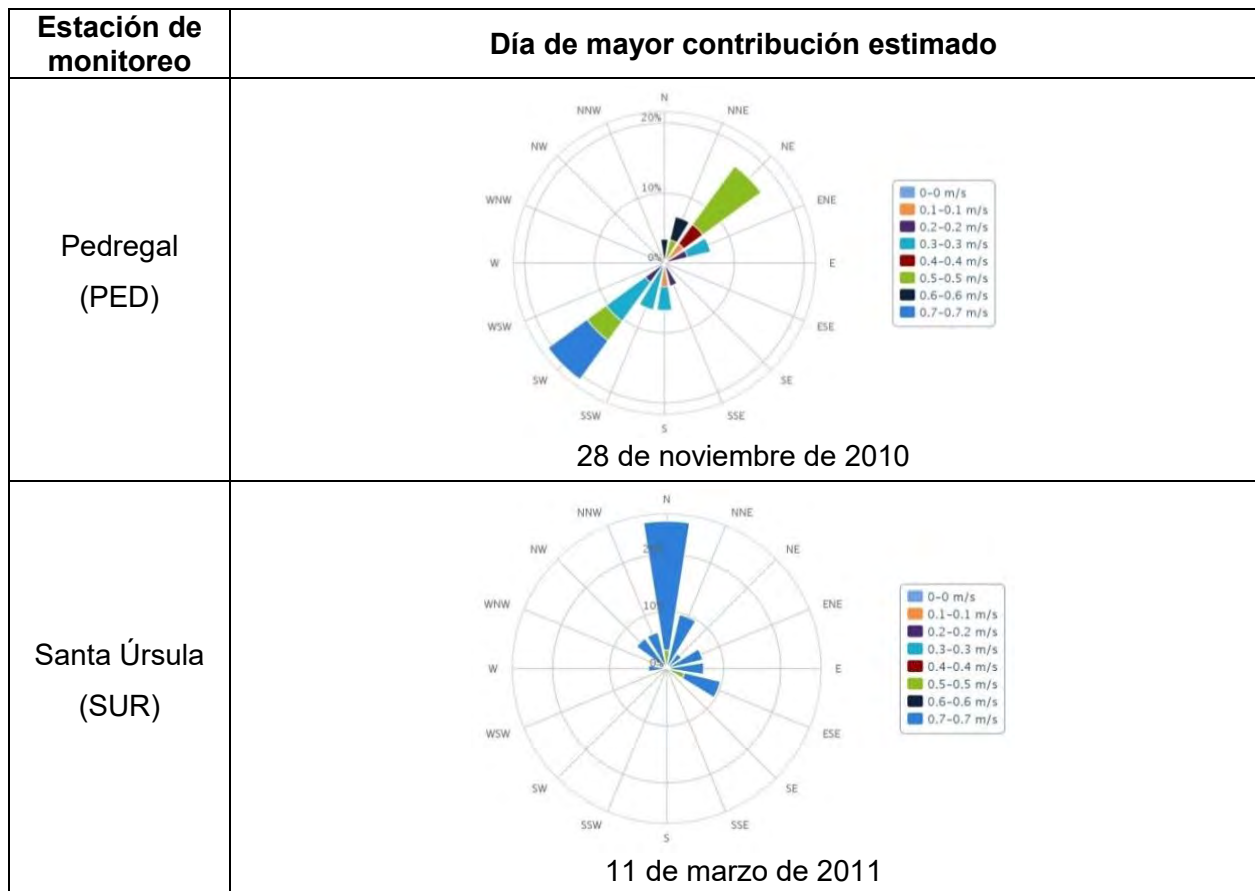


Figura 5.64. Rosas de viento para la región Suroeste de los días de mayor contribución de SO₂

REGIÓN SURESTE

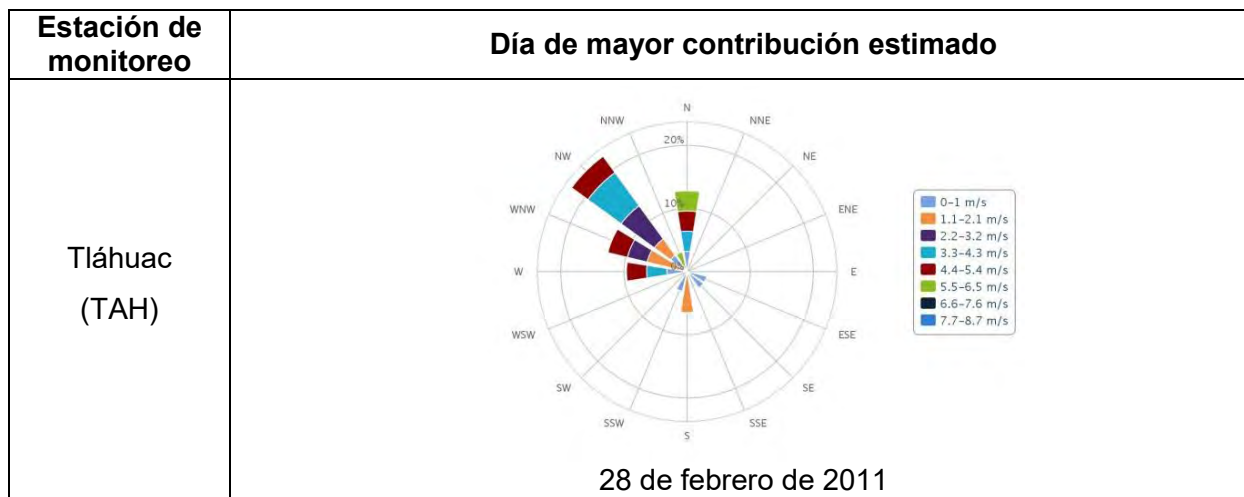


Figura 5.65. Rosas de viento para la región Sureste de los días de mayor contribución de SO₂

En las figuras anteriores se observó que la predominancia de los vientos fue en algunos casos del NNO, en otros del Norte y también del NNE hacia la estación de monitoreo, sugiriendo que la dirección del viento podría ser un indicativo de transporte de SO₂ a partir de la CTFPR tanto en los días de mayor concentración como en los días de mayor contribución.

5.7. Análisis estadístico de la distribución de datos

Con las emisiones estimadas mediante FE, las concentraciones obtenidas en CALPUFF y reportadas en el SIMAT y las contribuciones calculadas en los distintos receptores, se pudo identificar la región de la ZMCM más afectada por la CTFPR y un valor porcentual de contribución. Sin embargo, es de gran relevancia conocer cómo se distribuyen los datos y cuál es el comportamiento de los mismos. Para poder analizar la distribución de los datos de emisión, concentración y contribución, se presentan los resultados en diagramas de caja.

La Figura 5.66 presenta el diagrama de cajas para las emisiones de SO₂ (kg/día) generadas por la CTFPR. Se observa que la U1 fue la que emitió mayor cantidad de SO₂ a comparación de la U5 y esto se debe a que esa unidad junto con la U2 tuvo mayor consumo de combustóleo para el suministro de energía eléctrica y un mayor número de días en operación a diferencia del resto. En la Tabla 5.6 se muestran sus estadísticos descriptivos.

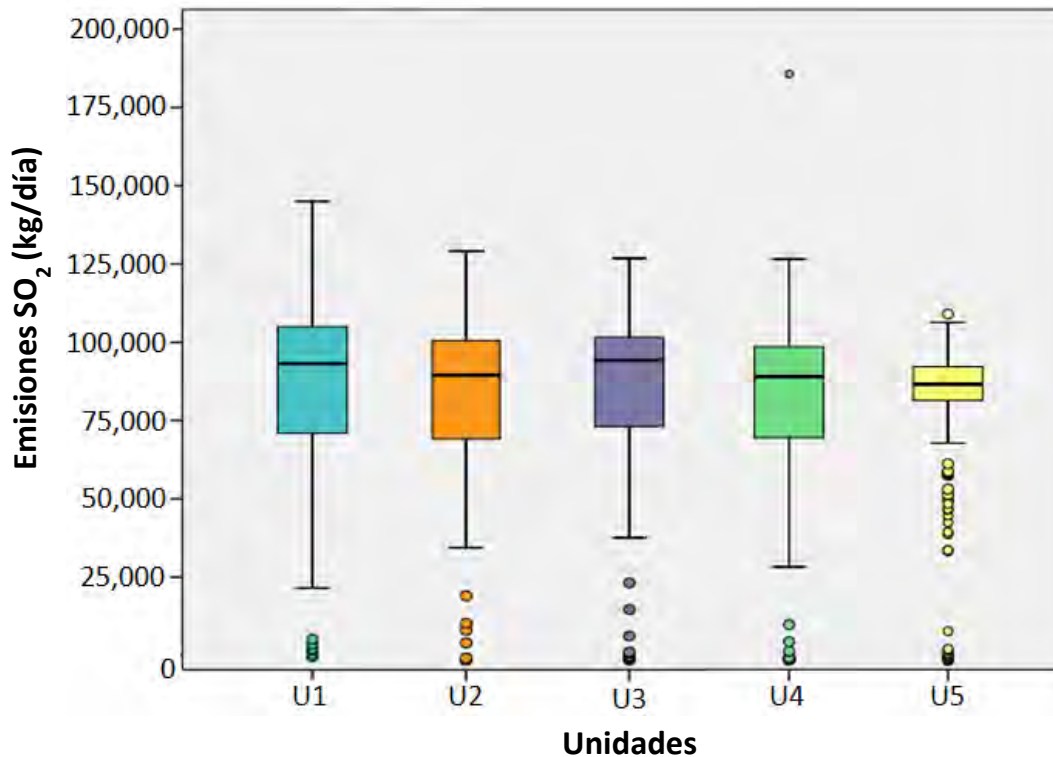


Figura 5.66. Diagrama de cajas para la emisión de SO₂ utilizando combustóleo, de julio de 2010 a junio de 2011

Tabla 5.6. Estadísticos descriptivos de emisión de SO₂ utilizando combustóleo, de julio de 2010 a junio de 2011

Unidad de generación	U1	U2	U3	U4	U5
Días en operación	317	330	304	287	236
Media (kg/día)	89,943.65	87,676.52	90,193.08	85,517.41	82,573.89
Mediana (kg/día)	94,613.56	92,637.54	97,444.70	92,114.38	89,689.89
Desviación estándar (kg/día)	24,198.65	22,179.73	23,761.44	26,220.80	24,755.36
Mínimo (kg/día)	1,067.33	358.79	354.71	324.68	7.75
Máximo (kg/día)	146,459.71	132,617.27	130,519.24	190,226.09	112,407.87
Percentil 25 (kg/día)	72,392.02	71,957.70	75,876.94	72,274.33	84,405.49
Percentil 75 (kg/día)	106,473.81	103,787.92	105,055.37	101,831.40	95,327.86
Incertidumbre (kg/día)	1,329.81	1,191.85	1,330.28	1,518.93	1,572.83

La Figura 5.67 presenta el diagrama de cajas de las concentraciones promedio 24 horas para SO₂ (ppb) en las distintas estaciones de monitoreo; el cual se realizó con la información reportada por el SIMAT y se observa que las concentraciones más altas fueron para las estaciones del Noroeste de la ZMCM a comparación de las del Sureste. En la Tabla 5.7 se muestran sus estadísticos descriptivos.

La Figura 5.68 presenta el diagrama de cajas de las concentraciones promedio 24 horas para SO₂ (ppb) en los distintos receptores discretos; el cual se realizó con la información obtenida en CALPUFF y se observan las concentraciones más altas en la región Noroeste de la ZMCM y las menores en el Sureste, siguiendo una tendencia muy parecida al diagrama de cajas de concentraciones del SIMAT (Figura 5.67). En la Tabla 5.8 se muestran sus estadísticos descriptivos.

La Figura 5.69 presenta el diagrama de cajas de las contribuciones de SO₂ (%) en los distintos receptores. Se observan las mayores contribuciones en la región Noroeste de la ZMCM y las menores en el Centro y Noreste. El Suroeste y Sureste tuvieron contribuciones con tendencia similar a las del Noroeste y esto pudo deberse a la presencia de montañas en estas regiones como lo son la Sierra del Ajusco ubicada en el Sur y la Sierra de las Cruces en el Oeste de la ZMCM, las cuales limitan la dispersión del contaminante. En la Tabla 5.9 se muestran sus estadísticos descriptivos.

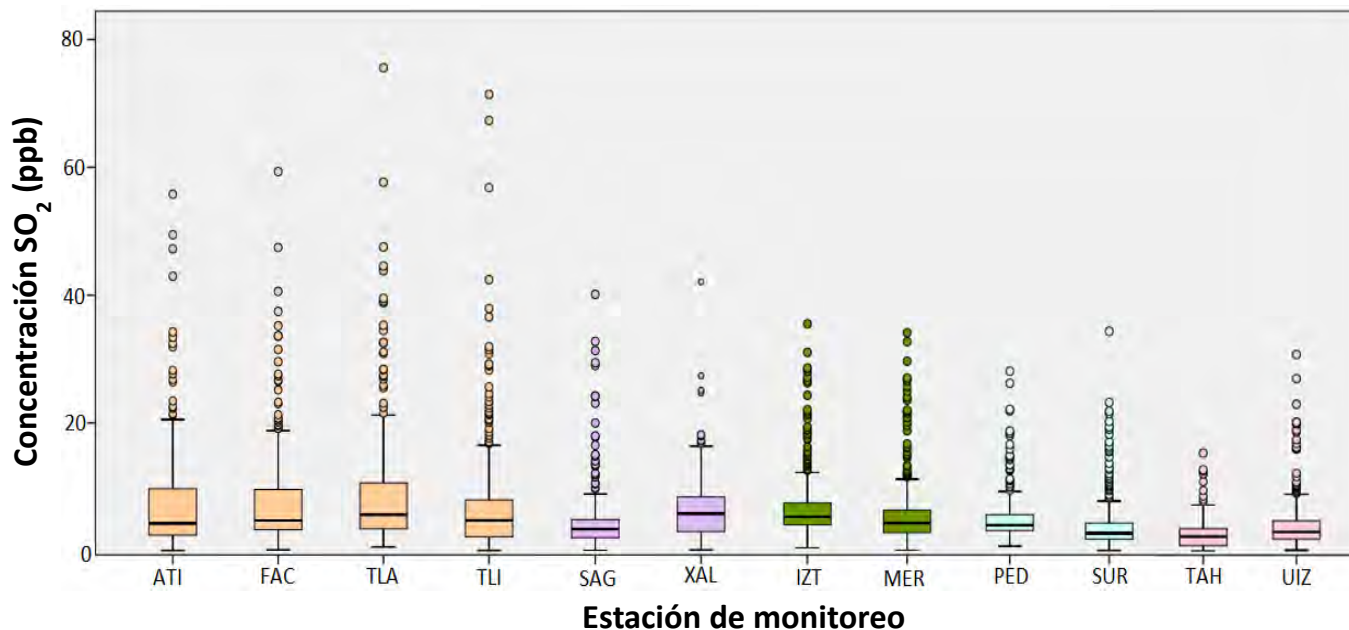


Figura 5.67. Diagrama de cajas de concentraciones promedio de 24 horas para SO₂ reportadas por el SIMAT en las 12 estaciones de monitoreo

Tabla 5.7. Estadísticos descriptivos de concentraciones promedio 24 horas para SO₂ reportadas por el SIMAT en las 12 estaciones de monitoreo

Región de la ZMCM	Noroeste				Noreste		Centro		Suroeste		Sureste	
Estación de Monitoreo	ATI	FAC	TLA	TLI	SAG	XAL	IZT	MER	PED	SUR	TAH	UIZ
Datos Totales	365	365	365	365	365	365	365	365	365	365	365	365
Datos Válidos	339	353	347	336	347	340	358	341	351	335	279	350
% Datos Válidos	92.9	96.7	95.1	92.1	95.1	93.2	98.1	93.4	96.2	91.8	76.4	95.9
Mediana (ppb)	4.29	4.75	5.65	4.76	3.39	5.80	5.31	4.33	4.00	2.75	2.25	2.98
Desviación estándar (ppb)	7.89	7.54	9.16	8.98	4.93	4.66	5.17	5.35	3.63	4.20	2.27	4.06
Mínimo (ppb)	0.04	0.13	0.83	0.04	0.08	0.13	0.46	0.08	1.11	0.04	0.04	0.13
Máximo (ppb)	55.79	59.33	75.59	71.42	40.13	42.09	35.50	34.13	28.09	34.35	15.30	30.74
Percentil 25 (ppb)	2.46	3.27	3.42	2.18	2.04	3.00	4.07	2.83	3.17	1.79	0.83	1.85
Percentil 75 (ppb)	9.71	9.60	10.67	7.95	4.90	8.42	7.50	6.38	5.68	4.38	3.50	4.72
Incertidumbre (ppb)	0.44	0.41	0.50	0.50	0.27	0.27	0.28	0.30	0.20	0.24	0.16	0.22

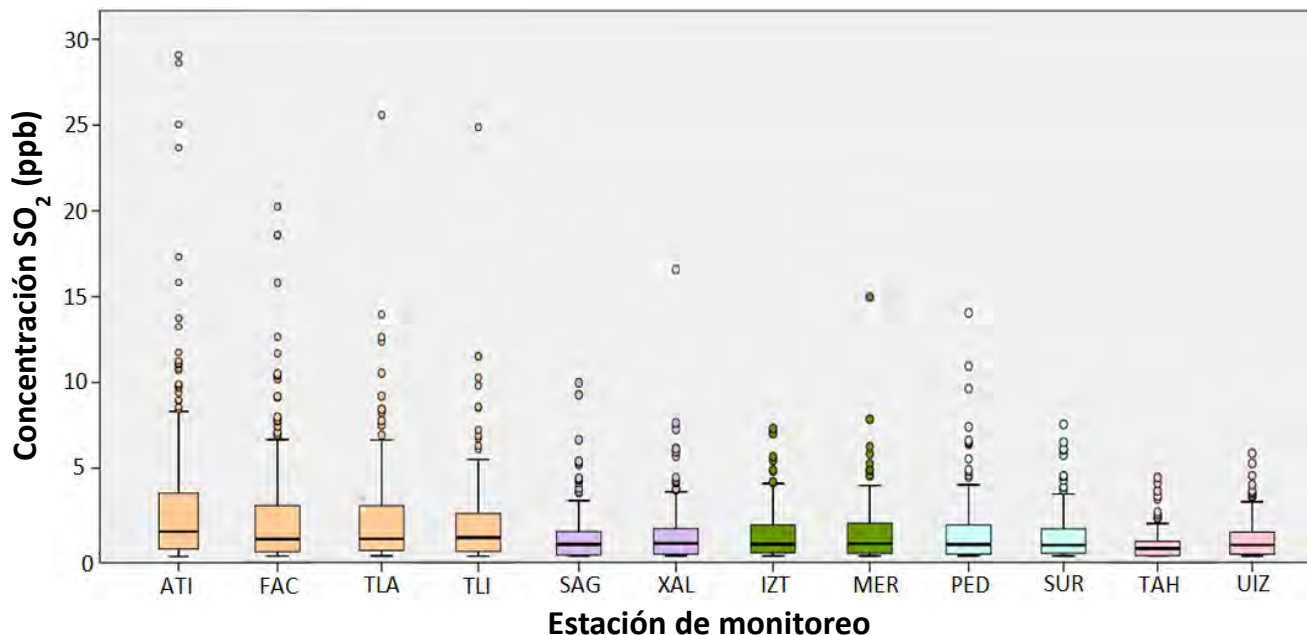


Figura 5.68. Diagrama de cajas para las concentraciones promedio 24 horas para SO₂ obtenidas en CALPUFF en los 12 receptores

Tabla 5.8. Estadísticos descriptivos de concentraciones promedio 24 horas para SO₂ obtenidos en CALPUFF en los 12 receptores

Región de la ZMCM	Noroeste				Noreste		Centro		Suroeste		Sureste	
Estación de Monitoreo	ATI	FAC	TLA	TLI	SAG	XAL	IZT	MER	PED	SUR	TAH	UIZ
Datos Totales	365	365	365	365	365	365	365	365	365	365	365	365
Datos Válidos	189	187	188	189	177	180	170	175	177	171	160	169
Mediana (ppb)	1.45	0.99	0.99	1.08	0.67	0.73	0.68	0.70	0.66	0.63	0.45	0.63
Desviación estándar (ppb)	4.95	3.54	3.14	2.82	1.54	1.85	1.44	1.80	2.04	1.43	0.85	1.15
Mínimo (ppb)	4E-04	4E-06	1E-07	2E-04	7E-09	4E-07	1E-05	4E-06	5E-06	2E-05	4E-06	2E-06
Máximo (ppb)	29.24	20.29	25.62	24.91	10.05	16.64	7.40	15.03	14.11	7.65	4.57	5.96
Percentil 25 (ppb)	0.43	0.25	0.31	0.25	0.06	0.10	0.18	0.14	0.10	0.14	0.03	0.10
Percentil 75 (ppb)	3.74	3.03	2.97	2.47	1.42	1.59	1.83	1.92	1.81	1.59	0.87	1.39
Incertidumbre (ppb)	0.36	0.26	0.23	0.20	0.12	0.14	0.11	0.14	0.15	0.11	0.067	0.088

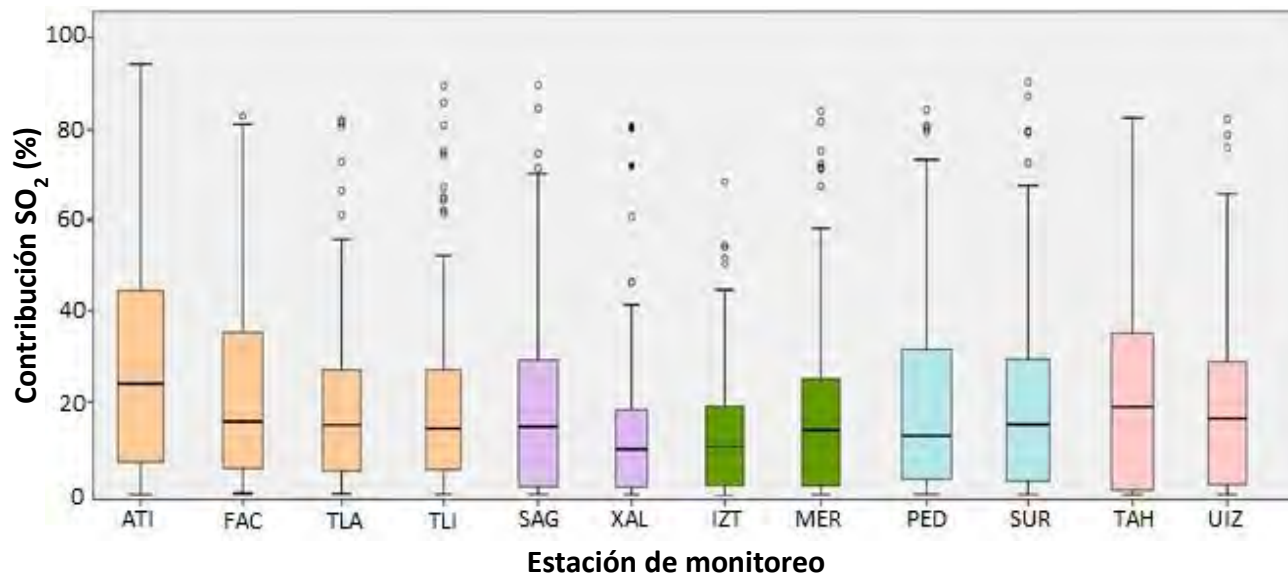


Figura 5.69. Diagrama de cajas para las contribuciones de SO₂ emitido por la CTFPR a la ZMCM

Tabla 5.9. Estadísticos descriptivos para las contribuciones de SO₂ emitido por la CTFPR a la ZMCM

Región de la ZMCM	Noroeste				Noreste		Centro		Suroeste		Sureste	
Estación de Monitoreo	ATI	FAC	TLA	TLI	SAG	XAL	IZT	MER	PED	SUR	TAH	UIZ
Días de contribución	189	187	188	189	177	180	170	175	177	171	160	169
Días comparados	166	179	180	171	168	163	166	161	167	153	118	160
Media (%)	29.71	22.94	18.75	19.63	19.94	13.96	14.49	18.25	19.55	20.24	22.38	19.00
Mediana (%)	24.19	16.05	15.01	14.50	14.91	9.91	11.07	14.07	12.68	15.42	19.15	16.60
Desviación estándar	26.27	21.47	17.68	18.92	20.89	16.49	14.69	18.73	19.89	20.33	21.85	18.63
Mínimo (%)	4.6E-03	2.2E-04	2.8E-06	1.0E-02	2.7E-07	9.2E-06	2.7E-04	1.2E-04	2.6E-04	2.4E-03	3.6E-04	8.0E-05
Máximo (%)	94.03	82.50	81.83	89.21	89.38	80.58	71.50	83.77	84.25	90.13	82.28	82.05
Percentil 25 (%)	7.05	5.13	4.96	5.47	1.61	1.42	2.10	1.90	3.30	2.93	0.95	2.06
Percentil 75 (%)	44.72	35.42	27.49	27.48	29.49	18.61	20.49	25.50	32.19	29.80	35.58	29.09
Incertidumbre (%)	2.00	1.29	0.79	0.83	1.41	0.71	1.14	1.48	1.32	1.37	1.45	0.98

6. EVALUACIÓN DE RESULTADOS

Mediante el perfil de concentración horaria de SO₂ con la información del SIMAT, se observó un incremento de las concentraciones de las 7 a las 13 hrs, lo que sugiere una elevada actividad matutina debido a la presencia de grandes parques industriales e intenso tránsito vehicular, el primero por la quema de combustibles y el segundo por la combustión de diésel tanto de industrias como vehículos de transporte.

La concentración máxima encontrada, entre las 10:00 y 11:00 de la mañana, puede asociarse al inicio de la actividad industrial de la zona conurbada, pero sobre todo puede atribuirse a las emisiones vehiculares primarias de transporte de pasajeros y carga, diferente al resto de los vehículos particulares. El aumento de la concentración durante la noche y la madrugada se debe a la disminución de la altura de la capa de mezcla y a que el viento generalmente proviene del Norte, favoreciendo el transporte y acumulación originado en el corredor industrial Tula-Tepeji.

La elección de la CTFPR como fuente potencial de contaminación atmosférica de la ZMCM fue debido a su ubicación dentro de la zona crítica más cercana a la zona metropolitana, además de que se encuentra a nivel nacional, entre las centrales con mayor generación eléctrica por el uso de combustóleo y entre las primeras en emisiones de SO₂.

Comparando el periodo de estudio, en 2011 hubo un mayor consumo de combustóleo que en 2010, habiendo mayores emisiones de SO₂ de la CTFPR de noviembre a junio, debido al consumo de combustóleo para satisfacer la demanda de energía eléctrica en la central. El promedio de emisiones, de julio de 2010 a junio de 2011, correspondió a 353.137 Ton/día.

Con las isóneas de concentración obtenidas del modelo de dispersión CALPUFF, se identificó un impacto por la CTFPR, en los distintos receptores de la ZMCM aproximadamente 180 días del periodo de estudio, es decir, casi la mitad del año la fuente tiene una contribución en el área metropolitana.

Se encontró que los días con episodios de concentraciones más altas de SO₂ estuvieron en los meses de noviembre a febrero, ya que las emisiones de la CTFPR estuvieron por arriba del promedio en esos meses debido a una mayor demanda de energía eléctrica por ser época de frío, además de que en invierno la altura de capa de mezcla disminuye y se estanca el contaminante en las distintas regiones de la ZMCM.

Analizando la ZMCM, la región que registró más días de impacto de la pluma proveniente de la CTFPR fue el Noroeste, el cual presentó también las mayores concentraciones de las cinco regiones de estudio, esto es porque la concentración disminuye conforme se aleja de la fuente, registrando menores concentraciones en el Sureste. Al igual, esta distribución depende de condiciones meteorológicas como por ejemplo, la dirección de viento, la humedad en la atmósfera, radiación solar y la reacción de transformación química de SO_2 , entre otras.

De julio a octubre sucedieron pocos episodios de dispersión de SO_2 con dirección a la zona metropolitana, afectando a zonas viento arriba de la CTFPR, sin embargo, tomando en cuenta las bajas emisiones por la central en esos meses, las concentraciones que se esperarían encontrar en esa zona serían más bajas que las estimadas en la ZMCM.

En algunos casos, las fechas de mayor concentración obtenidas en CALPUFF y las reportadas por el SIMAT coincidieron, tal es el caso de: FES Acatlán (FAC), Xalostoc (XAL), Pedregal (PED), Santa Úrsula (SUR), Tláhuac (TAH) y UAM Iztapalapa (UIZ). Los receptores que no coincidieron en fechas de mayor concentración tanto para CALPUFF como para el SIMAT fueron Atizapán (ATI), Tlalnepantla (TLA), Tultitlán (TLI), Iztacalco (IZT) y Merced (MER), sugiriendo que las concentraciones de esos días provinieron de fuentes distintas a la CTFPR, además de que la meteorología del área tuvo una influencia significativa.

En cuanto a las contribuciones, los días que se obtuvieron porcentajes bajos se atribuyen a emisiones de SO_2 de fuentes distintas a la CTFPR. Por otra parte, los días con porcentajes altos de contribución se debieron a que hubo altas emisiones de SO_2 (por arriba del promedio) de la CTFPR.

Se encontró un intervalo promedio de contribución en el periodo anual, de 13.96% a 29.71%; las mayores contribuciones resultaron en la región Noroeste en ATI (29.71%) y FAC (22.94%), en el Suroeste en SUR (20.24%) y en el Sureste en TAH (22.38%); las menores fueron en el Noreste en XAL (13.96%) y en el Centro en IZT (14.49%). El alto porcentaje de contribución en las regiones Noroeste y Sur se le atribuye a:

- El Noroeste es la región inmediata más cercana y de viento abajo a la CTFPR, a una distancia poco más de 40 km. Esta región se encuentra rodeada por el inicio de la cadena montañosa de la Sierra de las Cruces al Oeste y la Sierra de Guadalupe al Este, por lo que su orografía determina el estancamiento de SO_2 .

- La contribución al Sur se debe al acarreo del contaminante desde el Norte, ya que esas regiones están obstruidas por la Sierra del Ajusco al Sur y la Sierra de las Cruces al Oeste, existiendo una zona de convergencia que evita la dispersión de SO₂.
- En los sitios ubicados al Sur, existen un menor número de fuentes de emisión (de acuerdo a los inventarios de emisiones de la ZMCM) que impacten en su calidad del aire; por lo que la contribución será mayor por parte de la CTFPR que por parte de las pocas fuentes encontradas al Sur, que además no utilizan combustóleo con alto contenido de azufre.

Respecto a los bajos porcentajes de contribución de SO₂ que presentaron en la región Noreste y Centro fue debido a que tienen una influencia significativa de otras fuentes más cercanas (como por ejemplo, la región industrial de Xalostoc, en el municipio de Ecatepec) por lo que la contribución por parte de la CTFPR es menor en estas regiones, aunado a que no hay barreras físicas prominentes a sus alrededores que no permitan la dispersión del contaminante.

Con las rosas de viento realizadas de los días de mayor concentración y contribución, se encontró que la predominancia de los vientos fue del Noroeste hacia la estación de monitoreo y en algunos casos del Noreste. Estas direcciones de viento sugieren que cuando ocurren episodios de transporte de SO₂ desde Tula-Tepeji, la Sierra de Guadalupe representa una barrera física que impide el libre paso del viento y que hace que la pluma pueda ingresar por el Noroeste o por el Noreste, dependiendo las condiciones meteorológicas.

Se encontró un día de los analizados, el cual correspondió al 28 de noviembre de 2010, en que la dirección dominante del viento fue del Suroeste, sin embargo al observar las isolíneas de concentración de ese día, el contaminante se dispersó tanto viento abajo como viento arriba de la central, debido a que existen días en que la corriente de viento del Sur predomina sobre la corriente del Norte e impulsa los contaminantes hacia una dirección distinta a la ZMCM, afectando también a regiones por arriba de la CTFPR.

6.1 Comparación con la Norma de Calidad del Aire para SO₂

En esta sección se presentan gráficas del comportamiento de las concentraciones promedio de 24 horas para SO₂ y su comparación con la NOM de calidad del aire en ppm (Ver “Evaluación del promedio de 24 horas” del Anexo C de SEDEMA, 2012) de julio de 2010 a junio de 2011.

La Figura 6.1 muestra las concentraciones máximas diarias de SO₂ obtenidas por el modelo de dispersión CALPUFF en la zona de influencia de la CTFPR y su NOM de calidad del aire.

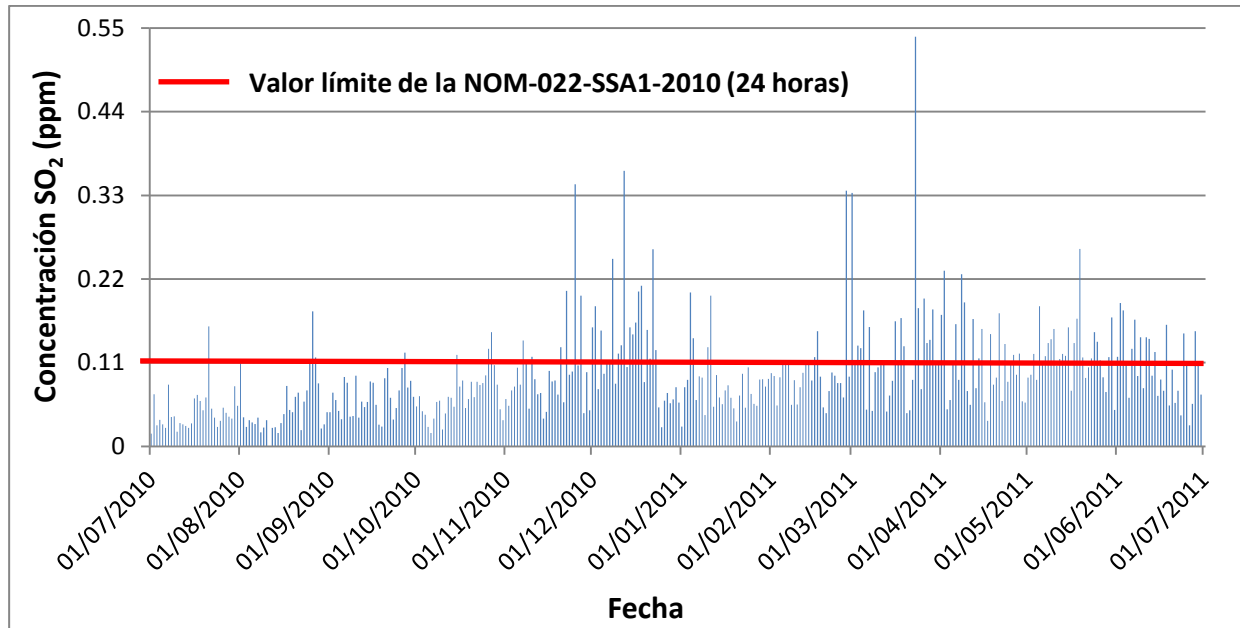


Figura 6.1. Concentraciones máximas diarias de SO₂ durante el periodo de julio de 2010 a junio de 2011 en la zona de influencia de la CTFPR

La Figura 6.2 muestra las concentraciones de SO₂ obtenidas en los 12 receptores en CALPUFF y su NOM de calidad del aire

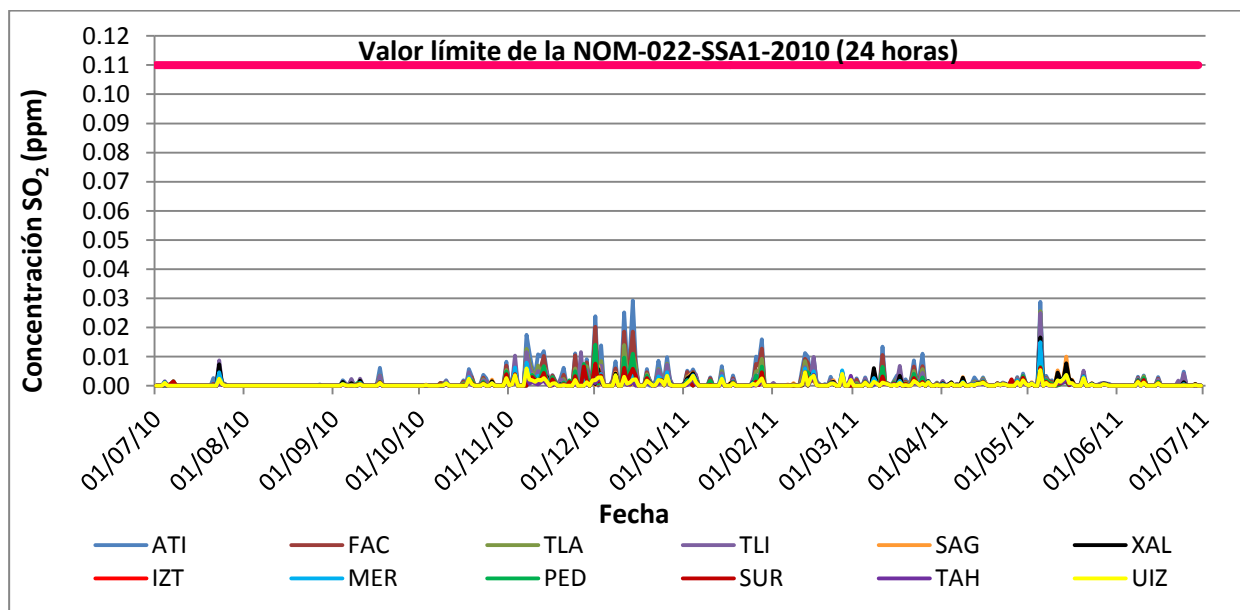


Figura 6.2. Concentraciones de SO₂ obtenidas en CALPUFF durante el periodo de julio de 2010 a junio de 2011 en los 12 receptores

La Figura 6.3 muestra la información de concentraciones de SO₂ reportada para las 12 estaciones de monitoreo del SIMAT y su NOM de calidad del aire.

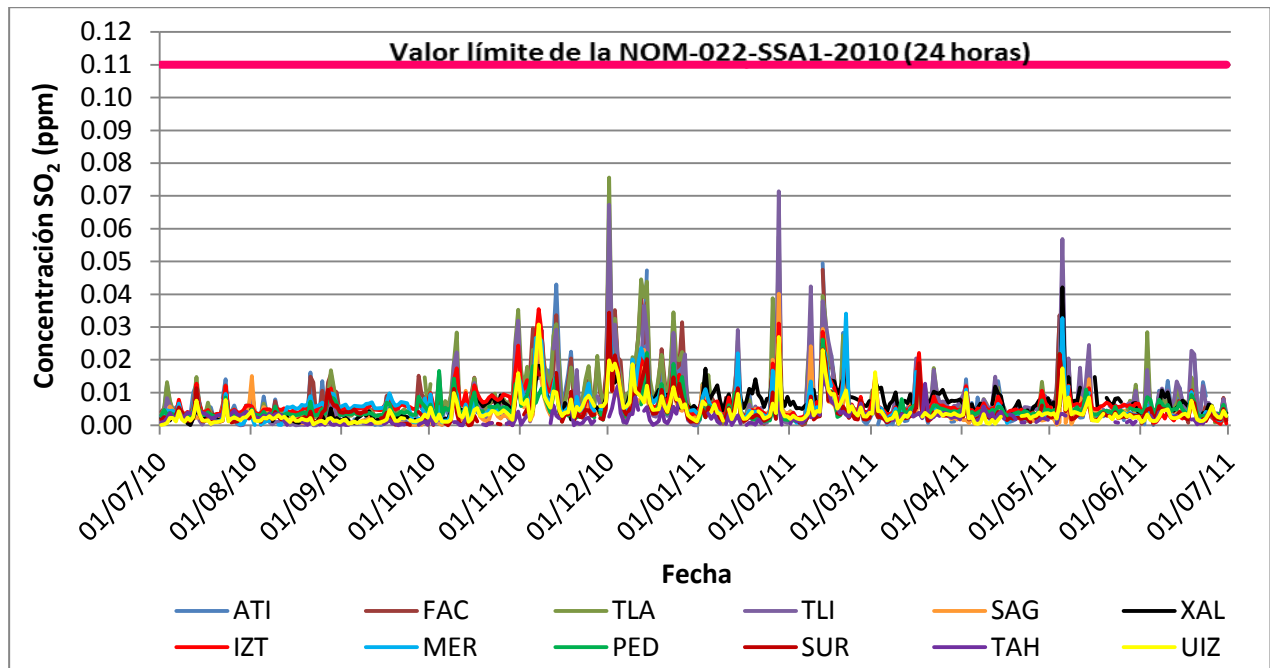


Figura 6.3. Concentraciones de SO₂ reportadas en el SIMAT durante el periodo de julio de 2010 a junio de 2011 en las 12 estaciones de monitoreo

Los resultados de la simulación aplicando el modelo de dispersión CALPUFF indicaron que la Norma Oficial Mexicana de Calidad del Aire para SO₂ fue rebasada 104 días, del 1° de julio de 2010 al 30 de junio de 2011, en la zona de influencia de la CTFPR, sin embargo, al momento de comparar las concentraciones en las distintas estaciones de monitoreo de la ZMCM, no rebasaron ningún día el valor límite de concentración de la norma (0.11 ppm en 24 horas) como medida de protección a la salud de la población.

7. MÉTODOS PARA EL CONTROL DE SO₂

La reducción de las emisiones de SO₂ se centra principalmente en la combustión de combustibles fósiles. Las disminuciones pueden obtenerse mediante algunos métodos industriales, tales como:

1. Sustitución de combustible con bajo contenido de azufre.
2. Uso de combustibles desulfurados.
3. Construcción de chimeneas altas para aumentar la dispersión atmosférica.
4. Desulfuración de gases de combustión (FGD, por sus siglas en inglés).

1. Sustitución de combustible con bajo contenido de azufre

La combustión de combustibles con alto contenido de azufre produce una mayor cantidad de partículas que se presentan en forma de hollín y que generalmente se depositan en la base de la chimenea; estas partículas pueden contener cierta cantidad de azufre por el elevado contenido de combustóleo, el cual al entrar en contacto con agua produce ácido sulfúrico que corroe las paredes metálicas, problema que se resuelve al sustituir el combustible por uno con bajo contenido de azufre (gas natural, gas natural licuado, petróleo o carbón con bajo contenido de azufre), ya que las cantidades de azufre obtenidas por su combustión son insignificantes comparadas con las producidas con combustóleo. Con la disminución de hollín, se previene que éste se acumule en las superficies de transferencia de calor, por lo que no actuará como un aislante y evitará un mayor consumo de combustible (Mateos, 2016).

Al producir una combustión más limpia y sin compuestos corrosivos de azufre, resulta ser un combustible menos agresivo a la caldera, lo cual puede verse reflejado en menos equipos sin funcionar y menores costos por mantenimiento (Arroyo, 2005).

2. Uso de combustibles desulfurados

La hidrodesulfuración (HDS) es un proceso químico catalítico destinado a eliminar el azufre (impureza contaminante) que se encuentra en el gas natural y en los productos refinados del petróleo, tales como gasóleo, gasolina, queroseno, Diésel o “fuel oils” y que se instala antes de los procesos que pueden afectar a sus catalizadores, es decir, es un tratamiento de precombustión.

El proceso de HDS consiste en someter al combustible líquido con hidrógeno a cierta presión y temperatura (150-160 psi; 300-400 °C), en presencia de un catalizador (por ejemplo: sulfuro de níquel-molibdeno, cobalto-molibdeno, volframio-molibdeno), de manera que los compuestos orgánicos sulfurados son transformados a ácido sulfhídrico, el cual es continuamente removido ya que es un inhibidor de las reacciones de HDS y envenena al catalizador. La desventaja de la tecnología HDS es el límite de eliminación de azufre del combustible, siendo éste de alrededor del 95%, aunado a los altos consumos de hidrógeno durante el proceso (Rodas et al., 2003).

3. Construcción de chimeneas altas para aumentar la dispersión atmosférica

La función de las chimeneas es descargar los contaminantes a suficiente altura para que exista una buena dispersión en la atmósfera antes de llegar al suelo. Las chimeneas más altas dispersan mejor los contaminantes debido a que éstos se transportan a través de una capa atmosférica más profunda antes de llegar al nivel del suelo.

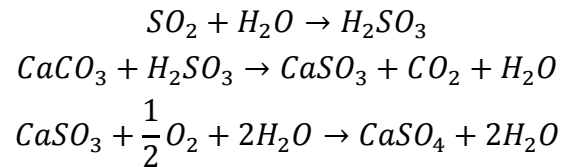
4. Desulfuración de gases de combustión

Consiste en hacer reaccionar el SO₂, formado en la combustión, con un compuesto que se les rocía en suspensión, ya sea acuosa o en polvo y lo descompone. Los reactivos más utilizados son carbonato de calcio, óxido de calcio, carbonato de sodio, hidróxido de calcio, óxido de magnesio o amoníaco. Los productos principales de la reacción de desulfuración son CO₂ y H₂O.

Los procesos de desulfuración se clasifican en vía húmeda y seca (PAHO, 2017; Velasco *et al.*, 2005):

- **Vía húmeda mediante lavado de gases:** Este tratamiento tiene 95% de eficacia en la desulfuración, es poco eficaz para los NO_x, nieblas de H₂SO₄ o de Hg.

Se lleva a cabo mediante una torre de absorción de los gases de combustión sobre una solución de cal (CaCO₃) en agua, dispersada por pulverización a presión y esparcida a contracorriente, con posterior oxidación forzada mediante difusores de aire inyectado en el tanque receptor del líquido para su recirculación. Así se genera lodos en suspensión que contienen yeso (CaSO₄ + 2H₂O) recuperable para su aprovechamiento en otros procesos industriales. La reacción de oxidación que describe este proceso es:



También se puede realizar el lavado de los gases de combustión mediante una solución de carbonato de sodio (Na₂CO₃) en agua, preferida en ocasiones por las industrias para evitar el manejo de lodos, sin embargo es más costosa que la vía húmeda con cal, genera Na₂SO₃ o Na₂SO₄ tras la oxidación forzada, que pueden ser vertidos como desechos, en caso de que no se superen los límites establecidos.

- **Vía seca mediante lavado de gases:** Es más económico que la vía húmeda, aunque consume una mayor cantidad de cal.

Se lleva a cabo mediante inyección de suspensión de cal o carbonato de sodio pulverizado caliente sobre el gas, con tiempo de contacto corto de entre 8 y 10 segundos antes del secado, a partir de lo cual la reacción es más lenta por formarse un recubrimiento superficial de los productos de la reacción sobre la cal (hasta el 90% de eficacia de reducción de concentración de SO₂ en las industrias) genera dos terceras partes de partículas de CaSO₃ y un tercio de CaSO₄ y polvos de ceniza que son secados completamente; todos estos productos son colectados mediante equipo de partículas o polvos.

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Para realizar estudios del impacto potencial en la calidad del aire se han desarrollado modelos de dispersión, los cuales simulan la atmósfera de una manera cercana a las condiciones reales de alguna zona de estudio. Existen una gran variedad de modelos con diferentes niveles de complejidad, sin embargo su selección depende del caso a analizar, de la disponibilidad y calidad de datos a utilizar en el modelo.

El presente estudio contribuyó en la propuesta de una metodología para evaluar la calidad del aire en la ZMCM mediante la comparación de concentraciones de SO_2 proveniente de una fuente fija en operación estimadas con el modelo de dispersión CALPUFF y las reportadas por el SIMAT. Este método fue viable en el proceso de selección de un modelo apropiado para evaluar el impacto de una industria que hace uso de combustóleo como combustible principal.

8.1. Conclusiones

Mediante la revisión de información sobre calidad del aire para SO_2 en las estaciones de monitoreo del SIMAT y con base a un criterio de suficiencia de información establecido en normas ambientales, se seleccionaron 12 estaciones de monitoreo como válidas para considerarse en este estudio como receptores de SO_2 .

La aplicación del modelo de dispersión con un módulo de reacción química permitió simular la distribución y transformación de SO_2 a lo largo de un dominio, donde se localiza la CTFPR (Tula, Hidalgo) como fuente puntual de emisión y las estaciones de monitoreo del SIMAT (ZMCM) como receptores discretos del contaminante. Las concentraciones determinadas en las distintas coordenadas de los receptores fueron estimadas en promedios de 24 hrs para poder comparar con la NOM de calidad del aire.

Debido a que no se cuentan con factores de emisión propios para México, se aplicaron los desarrollados por la US EPA para el cálculo de emisiones de SO_2 , los cuales dan una estimación cercana de las emisiones de la CTFPR, requeridas por el modelo como datos de entrada para cada una de las siete chimeneas.

El periodo de estudio se seleccionó con base a los datos de consumo real de combustóleo y por unidad de generación proporcionados por la CTFPR y de acuerdo a los datos de meteorología procesados con el modelo MM5. Se utilizaron datos diarios ya que usar datos mensuales o anuales conllevaría un error asociado en el cálculo de emisiones y en el uso del modelo de dispersión para la estimación de concentraciones.

Al comparar las concentraciones de SO₂ se encontraron tendencias similares entre lo obtenido con el modelo y lo reportado por las estaciones de monitoreo del SIMAT, habiendo algunas coincidencias de las fechas con concentraciones más altas, lo que proporcionó evidencia de que la CTFPR fue la fuente de contribución principal en esos días.

Mediante las isóneas de concentración generadas por el modelo de dispersión, se observó un impacto por la fuente en los distintos receptores de la ZMCM, en un promedio de 180 días del periodo anual simulado. Se encontró que los días con más episodios de distribución de SO₂ fueron de noviembre a febrero. La más alta concentración encontrada con el modelo fue en el Noroeste, con un valor de 29.24 ppb en el receptor Atizapán y la más baja concentración encontrada fue en el Sureste con un valor máximo de 4.57 ppb en el receptor Tláhuac.

En cuanto a las contribuciones, se estimó un intervalo promedio en el periodo analizado entre 13.96% y 29.71%; las mayores contribuciones resultaron en la región Noroeste, en el Suroeste y en el Sureste y las menores fueron en el Noreste y en el Centro.

Se encontró que en la ZMCM los límites permisibles de concentración no fueron rebasados en ninguna de las estaciones de monitoreo, de acuerdo a la NOM-022-SSA1-2010, no representando un impacto potencial en la calidad del aire por SO₂ en la zona de estudio por la contribución de la CTFPR.

Se concluye que la ZMCM recibe influencia de las emisiones de la CTFPR, sin embargo, no es la única fuente que tiene una contribución en la calidad del aire determinada en cada una de las estaciones de monitoreo del área metropolitana; existen un mayor número de fuentes emisoras importantes de SO₂ en el mismo corredor industrial de Tula-Tepeji, así como fuentes locales y regionales de la zona de estudio.

8.2. Recomendaciones

Para obtener valores de emisiones más cercanos a la realidad, se recomienda el desarrollo de factores de emisión propios de las centrales termoeléctricas para sus condiciones de operación. Para esto es necesario realizar muestreos en fuente en varias instalaciones de forma aleatoria, que hagan uso del mismo combustible en el proceso de generación de electricidad.

Cuando se proponen medidas de reducción de emisiones, es necesario considerar la variación anual, mensual, estacional o por unidad de generación de las centrales. Una

forma de disminuir esta variación es contar con datos horarios tanto de consumo de combustóleo como de meteorología.

Una mejor aproximación de emisiones (usadas como datos de entrada en el modelo de dispersión) conlleva a una mejor estimación de concentraciones en los receptores, lo que permite no subestimar o sobrestimarlas. Para mejorar la estimación de concentraciones, se recomienda usar un dominio con una resolución espacial menor por cuadrícula en el modelo CALPUFF, así como contar con datos de concentraciones de fondo que influyan en la reacción de transformación de SO₂.

Para la simulación de concentraciones mediante el uso de modelos, se deben tomar en cuenta otras fuentes actuales de emisión que influyan en la calidad del aire de la zona de estudio. También es importante considerar fuentes futuras por construir o por operar, ya que así se pueden tomar medidas correctivas con anticipación para la prevención de emisiones de SO₂.

Para evitar el impacto en la calidad del aire por SO₂ se recomienda el uso de combustibles con bajo contenido de azufre y la reducción de carga en algunas unidades de generación de las centrales. Una tendencia actual para la reducción de SO₂ es el uso de tecnología de combustión dual o de ciclo combinado para sustituir el combustóleo por gas natural, considerando la instalación de equipos de seguridad para prevenir accidentes debido a la alta flamabilidad del combustible. En caso de que no sea factible el suministro del gas natural por aspectos técnicos o económicos que estos cambios requieren, se debe considerar si es viable la instalación de algún equipo de control para la reducción del contaminante.

Se recomienda realizar el monitoreo de la calidad del aire por SO₂ en las áreas en que se presentaron las máximas concentraciones (donde se rebasó la NOM) en la zona de influencia de la CTFPR, de acuerdo al modelo de dispersión CALPUFF, ya que estas concentraciones pueden ocasionar un impacto en la calidad del aire de las regiones aledañas a la central. En el caso de la ZMCM, es importante aumentar los sitios de medición en las regiones con mayor contribución encontrada (Noroeste y Suroeste), debido a que son las zonas con mayor influencia de las emisiones de SO₂ de la central.

Se sugiere realizar el pronóstico meteorológico de las condiciones no favorables para la dispersión del contaminante como lo son los vientos de calma y la altura de mezcla, con el fin de proponer estrategias específicas de prevención, minimización y control de SO₂ por la operación de la planta para evitar situaciones de incumplimiento a las NOM de calidad del aire en la zona de influencia.

BIBLIOGRAFÍA

AIE (2007). Agencia Internacional de Energía. Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico. “Manual de Estadísticas Energéticas”. París, Francia. 208 pp.

Arroyo, C. V. (2005). “Beneficios de la conversión a gas natural en calderas de vapor”. Perú, Lima. Consultado el 25 de junio de 2017 en: <http://www.cinydesac.com>

Arya, P. S. (1999). “Air Pollution Meteorology and Dispersion”. Chapter 3. Atmospheric Systems and Pollutant Transport. New York: Oxford University Press. 310 pp.

AWMA (1992). Air & Waste Management Association, “Air Pollution Engineering Manual”, Davis, W. T., John Wiley & Sons Inc., New York, U.S. pp. 246-248

Bravo, A. H.; Sosa, E. R.; Torres, J. R. (1992). “La contaminación atmosférica en México” Capítulo 2. Los criterios y metodologías para medir la calidad del aire. Comisión Nacional de Derechos Humanos. México, D.F. pp. 15-41

Bravo, A. H.; Sosa, E. R.; Magaña, R. V.; Caetano, D. E.; Sánchez, A. P.; Cureño, G. I.; Marín A.; Rosas S.; González P. (2010). “The correct use of dispersion models to simulate air quality impact in developing countries”. 103rd Air & Waste Management Association Conference. Calgary, Alberta. Canada.

Bravo, A. H.; Sosa, E. R.; Magaña, R. V.; Caetano, D. E.; Sánchez, A. P.; Jaimes, P. M.; Vázquez, C. G.; Fuentes, G. G.; Cureño, G. I.; Domínguez, M. C.; Vand der Putten, C. R. (2011). “Informe final: Monitoreo de contaminantes atmosféricos, incluyendo un trazador para identificar diferentes fuentes de emisión a/de la C.T. Francisco Pérez Ríos haciendo uso adecuado del modelo de dispersión CALPUFF, para sugerir estrategias específicas de prevención, minimización y control”. Sección de Contaminación Ambiental. Centro de Ciencias de la Atmósfera. Universidad Nacional Autónoma de México.

CCA (2011). Comisión para la Cooperación Ambiental de América del Norte. “Emisiones atmosféricas de las centrales eléctricas en América del Norte”. Québec, Canadá. Octubre. 61 pp.

CORINAIR (1996). Core and Inventory Air Emissions. “Combustion in energy & transformation industries: Emission Inventory Guidebook”. Combustion plants as point sources. European Environment Agency. February. B111 59 pp.

Correa, M. C. (2004). “Fenómenos químicos, Medellín”. 2ª Ed. Fondo Editorial Universidad EAFIT. Colombia. 313 pp.

Cureño, G. I. (2010). “Determinación de factores de emisión aplicables a México para centrales termoeléctricas que consumen combustóleo como combustible”. Tesis de Maestría. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México.

Cureño, G. I.; Bravo, A. H.; Sosa, E. R.; Qi Ying, G. C. (2011). “Comparison of two different air quality models (CALPUFF vs. CMAQ) to assess the air quality impact for the operation of a thermoelectric power plant in Mexico”. Air & Waste Management Association. Paper-A-484-AWMA. US.

Cureño, G.I.; Bravo, A. H.; Sosa, E. R. (2012). “The importance of the generation of emission factors for developing countries: Case of Mexico”. Journal of Environmental Science and Engineering. (1). pp. 495-502.

CFE (2015a). Comisión Federal de Electricidad. “Informe Anual 2014”. México D.F. 128 pp.

CFE (2015b). Comisión Federal de Electricidad. “Programa de Obras e Inversiones del Sector Eléctrico 2014-2028”. Subdirección de Programación. Coordinación de Planificación. México D.F. 292 pp.

CFE (2016). Comisión Federal de Electricidad. “Informe Anual 2015”. México D.F. 111 pp.

CFE (2017). Comisión Federal de Electricidad. “CFE y la electricidad en México. Generación: Termoeléctrica”. Consultado el 20 de abril de 2017 en <http://www.cfe.gob.mx>

CONAMA (2009). Comisión Nacional del Medio Ambiente. “Guía metodológica para la estimación de emisiones atmosféricas de fuentes fijas y móviles en el registro de emisiones y transferencia de contaminantes”. Andros Impresores. Santiago de Chile. Diciembre. 143 pp.

CRE (2015). Comisión Reguladora de Energía. Norma Oficial Mexicana de Emergencia. NOM-EM-005-CRE-2015. “Especificaciones de calidad de los petrolíferos”. México, D.F.

Cunningham, W. P.; Cunningham M. A. (2008). “Environmental Science: A Global Concern”, 10a. ed., Vol. 412. McGraw-Hill. Boston, MA. U.S.

DOF (2015). Diario Oficial de la Federación “Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente”. Última reforma publicada. DOF 09-01-2015. México, D.F.

Emanuel, K. A. (1991). “The theory of hurricanes. Annual Reviews” Fluid Mech. US. (23). pp. 179-196.

Fuentes, R. J. (2007). “Manual de actividades en un mantenimiento preventivo a turbina de vapor”. Tesis de Licenciatura. Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán. Universidad Nacional Autónoma de México. México.

Grell, G.A.; Dudhia, J.; Stauffer, D. R. (1994). “A description of the Fifth-generation Penn State/NCAR Mesoscale Modelo (MM5)”. NCAR Technical Note TN-398 + STR. December. 122 pp.

Hernández, E. (2014). “Beneficios ambientales para la conversión de combustóleo a gas natural en generadores de vapor”. Reporte de Estadía. Universidad Tecnológica de Tula Tepeji.

García, J. S. (2008). “Impacto del sector energético de Tula en la calidad del aire de la ZMVM”. Tesis de Licenciatura. Facultad de Química. Universidad Nacional Autónoma de México.

INE (2010). Instituto Nacional de Ecología “Manual 1. Principios de medición de la calidad del aire”. Capítulo 2. Conceptos básicos. México, D.F. 43 pp.

INECC (2015). Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. Coordinación General de Contaminación y Salud Ambiental. “Informe Nacional de Calidad del Aire 2014, México”. México, D.F. 242 pp.

INECC (2016). Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. Sistema Nacional de Información de Calidad del Aire. Red Hidalguense de Monitoreo Atmosférico del estado de Hidalgo. Consultado el 7 de agosto de 2016, <http://sinaica.ine.gob.mx>

INEGI (2009). Instituto Nacional de Estadística y Geografía. “Prontuario de información geográfica municipal en los Estados Unidos Mexicanos, Tula de Allende, Hidalgo”. México.

INEGI (2015). Instituto Nacional de Estadística y Geografía. “Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas (DENUE)”. Consultado el 6 de marzo de 2016 de: <http://www.inegi.org.mx>

Jacobson, M. Z. (2012). “Air pollution and global warming history, science and solutions”. Cambridge University Press. 2nd. Edition. US. 375 pp.

Jáuregui, E. (1988). “Local wind and air pollution interaction in the Mexico basin”. *Atmósfera*. México, D.F. Vol. 1. No. 3. pp. 131-140

Jáuregui, E. (2000). “El clima de la Ciudad de México” Temas selectos de geografía de México. Plaza y Valdez. México, D.F. Junio. 131 pp.

Kanda, I.; Basaldud, R.; Horikoshi, N.; Okazaki, Y.; Benítez Garcia, S. E.; Ortíz, A.; Ramos Benítez, V. R.; Cárdenas, B. y Wakamatsu, S. (2014). “Interference of sulphur dioxide to balloon-borne ECC ozone sensors over the Valley of Mexico”. *Atmospheric Measurement Techniques*. Discuss. 7:293-320. Doi: 10.5194/amtd-7-293-2014.

Levy, J.; Spengler, J. D. (2002). “Modeling the Benefits of Power Plant Emission Controls in Massachusetts”. *Journal of Air and Waste Management Association* Vol. 52. No. 1, pp. 5-18.

López, M. T.; Zuk, M.; Garibay, V.; Tzintzun, G.; Iniestra, R.; Fernández, A (2005). “Health impacts from power plant emissions in Mexico”. *Atmospheric Environment*. Vol. 39. No. 7. pp. 1199-1209

López, M. T. (2009). “Aplicación del modelo de dispersión CALPUFF para la estimación de concentraciones del PM_{2.5}”. Tesis de Maestría en Ingeniería. Posgrado de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México.

Magaña, R. V. (2004). “Los impactos del niño en México”. Centro de Ciencias de la Atmósfera. Universidad Nacional Autónoma de México. Secretaría de Gobernación. México, D.F. p. 229

Martines, L. E.; Lira, C. L. (2008). Centro Nacional de Meteorología. “Cálculo de la temperatura de punto de rocío a diferentes valores de presión”. Centro Nacional de Meteorología. Santiago de Querétaro, México. Octubre

Mateos D. E. (2016). “Emisiones a la atmósfera por consumo de combustóleo y por cambio a gas natural en una central termoeléctrica de interés”. Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México. México D.F. 150 pp.

McElroy, M.B. (2002). “The atmospheric environment: effects on human activity”. The chemistry of precipitation. Princeton University Press. New Jersey, US. p. 270

Méndez, V. F. (2007). “Control del sistema de combustión para una termoeléctrica convencional”. Tesis de Licenciatura. Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica. Instituto Politécnico Nacional.

MAVDT (1998). Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. “Guía Ambiental para Proyectos Carboeléctricos”. Santa Fé de Bogotá. Agosto. Consultado el 20 de abril de 2017 de <http://www.siame.gov.co>

McKnight, T. L.; Hess, D. (2000). Climate Zones and Types: The Köppen System. “Physical Geography: A Landscape Appreciation”. Prentice Hall. Upper Saddle River. New Jersey, US. pp. 200-201

Miller P. J.; Van Atten C.; Bradley M. & Associates (2004). “North American Power Plant Air Emissions”. Commission for Environmental Cooperation of North America”. Montreal, Canada.

Miranda, M. J. (2009). “Evaluación de la incertidumbre de datos experimentales”. Departamento de Física Experimental. Instituto de Física. Universidad Nacional Autónoma de México.

Molina, L.T., Molina, M.J. (2002). “Air Quality in the Mexico Megacity: An Integrated Assessment”. Springer Science & Business Media. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht, The Netherlands. Vol. 2. 385 pp.

OMS (2006). Organización Mundial de la Salud. “Guías de calidad de aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre”. Actualización mundial 2005. Resumen de la evaluación de riesgos. Ginebra, Suiza. 21 pp.

OMS (2016). Organización Mundial de la Salud. “Calidad del aire ambiente (exterior) y salud”. Septiembre. Consultado el 25 de junio de 2017 en <http://www.who.int>

PAHO (2017). Pan American Health Organization. “Capítulo 4. Tipos de hornos. Emisiones a la atmósfera y correcciones”. Consultado el 25 de junio de 2017 en: <http://www.bvsde.paho.org>

PEMEX (1998). Petróleos Mexicanos. “Hoja de datos de seguridad para sustancias químicas, combustóleo pesado”. México, D.F.

PEMEX (2000). Petróleos Mexicanos. “Hoja de datos de seguridad para sustancias químicas, gas natural”. México, D.F.

PEMEX (2017a). Petróleos Mexicanos. “Combustóleo pesado”. México, D.F., Consultado 15 de marzo de 2017, de <http://www.pemex.com>

PEMEX (2017b). Petróleos Mexicanos. “Gas natural”. México, D.F., Consultado el 15 de marzo de 2017, de <http://www.pemex.com/>

Radian (1996). “Manual del Programa de Inventario de Emisiones en México” Vol. III. Técnicas básicas de estimación de emisiones, Radian International, Sacramento, CA. Enero. 133 pp.

Radian (1997). “Manuales del Programa de Inventarios de Emisiones en México (Vol. II-VI)”, elaborado para la asociación de Gobernadores del Oeste Denver, Colorado. USA. Consultado el 15 de octubre de 2016 en <https://www3.epa.gov>

Rivera, C.; Sosa, G.; Wohrnschimmel, H.; de Foy, B.; Johansson, M.; Galle, B. (2009). “Tula industrial complex (Mexico) emissions of SO₂ and NO₂ during the MCMA 2006 field campaign using a mobile mini-DOAS system”. Atmospheric Chemistry and Physics. (9) pp. 6351–6361

Rodas G. A.; Blass A. G.; Panamá T. L. A. (2003). Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias. Boletín del Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE). “Tecnologías de desulfuración: pasado, presente y futuro”. México. Enero-marzo. 8 pp.

Sandoval, A. A. (1998). Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias. Boletín del Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE). Departamento de Difusión. “Los crudos mexicanos, sus características”. México. Mayo-junio.

SCFI (1978). Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. “Norma mexicana. NMX-AA-054-1978. Contaminación atmosférica – Determinación del contenido de humedad en los gases que fluyen por un conducto – Método gravimétrico”. México, D.F.

SCFI (1979). Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. “Norma mexicana. NMX-AA-055-1979. Contaminación atmosférica – Fuentes fijas – Determinación de bióxido de azufre en gases que fluyen por un conducto”. México, D.F.

SCFI (1980). Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. “Norma mexicana. NMX-AA-056-1980. Contaminación atmosférica – Fuentes fijas – Determinación de bióxido de azufre y neblinas de ácido sulfúrico en los gases que fluyen por un conducto”. México, D.F.

SCFI (1993). Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. “Norma mexicana. NMX-AA-009-SCFI-1993. Contaminación atmosférica – Fuentes fijas – Determinación de flujo de gases en un conducto por medio del Tubo de Pitot”. México, D.F.

Scire, J. S; Strimaitis, D. G.; Yamartino, B.J. (2000). “A User’s Guide for CALPUFF Dispersion Model”. Earth Tech, Inc. Concord, MA.

SECRE (2010). Secretaría de Energía, Comisión Reguladora de Energía. Norma Oficial Mexicana. NOM-001-SECRE-2010. “Especificaciones del gas natural”. México, D.F.

SEDEMA (1995). Secretaría del Medio Ambiente. “Informe anual de calidad del aire de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México 1994”. Dirección General de Ecología. México, D.F. Julio. 33 pp.

SEDEMA (2004). Secretaría del Medio Ambiente. “Inventario de emisiones de contaminantes criterio de la ZMVM 2004”. Dirección General de Gestión de la Calidad del Aire, Dirección de Programas de Calidad del Aire e Inventarios de Emisiones. México, D.F. 88 pp.

SEDEMA (2010). Secretaría del Medio Ambiente. “Inventario de emisiones de contaminantes criterio de la ZMVM 2008”. Dirección General de Gestión de la Calidad del Aire, Dirección de Programas de Calidad del Aire e Inventarios de Emisiones. México, D.F. 146 pp.

SEDEMA (2011). Secretaría del Medio Ambiente. “Calidad del aire en la Ciudad de México. Informe 2010”. Dirección General de Gestión de la Calidad del Aire, Dirección de Programas de Calidad del Aire e Inventarios de Emisiones. México, D.F. 163 pp.

SEDEMA (2012). Secretaría del Medio Ambiente. “Calidad del aire en la Ciudad de México. Informe 2011”. Dirección General de Gestión de la Calidad del Aire, Dirección de Programas de Calidad del Aire e Inventarios de Emisiones. México, D.F. 160 pp.

SEDEMA (2014a). Secretaría del Medio Ambiente. “Inventario de emisiones de contaminantes y de efecto invernadero 2012”. Dirección General de Gestión de la Calidad del Aire, Dirección de Programas de Calidad del Aire e Inventarios de Emisiones. México, D.F. 121 pp.

SEDEMA (2014b). Secretaría del Medio Ambiente. “Calidad del aire en la Ciudad de México Informe 2013”. Dirección General de Gestión de la Calidad del Aire, Dirección de Monitoreo Atmosférico. México, D.F. 141 pp.

SEDEMA (2015). Secretaría del Medio Ambiente. “Calidad del aire en la Ciudad de México Informe 2014”. Dirección General de Gestión de la Calidad del Aire, Dirección de Monitoreo Atmosférico. México, D.F. Junio. 120 pp.

SEDEMA (2016). Secretaría del Medio Ambiente de la CDMX. “Calidad del aire en la Ciudad de México Informe Anual 2015”. Dirección General de Gestión de la Calidad del Aire, Dirección de Monitoreo Atmosférico. Ciudad de México. Julio. 177 pp.

SEDEMA (2017). Secretaría del Medio Ambiente de la CDMX. “Base de datos – Red Automática de Monitoreo (RAMA)”. Consultado el 26 de abril de 2017, de: <http://www.aire.cdmx.gob.mx>

SEDESOL-CONAPO-INEGI (2012). Secretaría de Desarrollo Social, Consejo Nacional de Población, Instituto Nacional de Estadística y Geografía. “Delimitación de las Zonas Metropolitanas de México 2010”. México, D.F. Junio. 214 pp.

Seibert, P.; Beyrich, F.; Gryning, S.-E; Joffre, S.; Rasmussen, A.; Tercier P. (2000). “Review and intercomparison of operational methods for the determination of the mixing height”. Atmospheric Environment. Vol. 34. No. 7. pp. 1001-1027.

SEMARNAT (1993). Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Norma Oficial Mexicana. NOM-038-SEMARNAT-1993. “Métodos de medición para determinar la concentración de bióxido de azufre en el aire ambiente y los procedimientos para la calibración de los equipos de medición”. México, D.F.

SEMARNAT-CCA (2001). Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, Comisión para la Cooperación Ambiental de América del Norte. “Guía para la correcta selección y empleo de métodos de estimación de emisiones de contaminantes”. México, D.F. 384 pp.

SEMARNAT (2011). Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Norma Oficial Mexicana NOM-085-SEMARNAT-2011. “Contaminación atmosférica – Niveles máximos permisibles de emisión de los equipos de combustión de calentamiento indirecto y su medición”. México, D.F.

SEMARNAT (2013). Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. “Informe de la situación del Medio Ambiente en México. Compendio de Estadísticas Ambientales. Indicadores Clave y de Desarrollo Ambiental. Edición 2012”. México. 361 pp.

SEMARNAT (2017). Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. “Glosario del compendio de estadísticas ambientales 2010”. Consultado el 8 de mayo de 2017 en: <http://aplicaciones.semarnat.gob.mx>

SEMARNATH (2014). Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales del Gobierno del Estado de Hidalgo. “Actualización del Programa Sectorial de Medio Ambiente y Recursos Naturales 2011-2016”. Hidalgo, México. 92 pp.

SEMARNAT-INE (2005). Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología. “Inventario Nacional de Emisiones 2005”. Subsecretaría de Gestión para la Protección Ambiental. México, D.F.

SEMARNAT-INE (2008). Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología. “Inventario Nacional de Emisiones 2008”. Subsecretaría de Gestión para la Protección Ambiental. México, D.F.

SEMARNAT-INECC (2016). Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. Contaminación y salud ambiental. “Elementos metodológicos para elaborar los programas de calidad del aire de las ciudades y zonas metropolitanas del país. Informe final”. Diciembre. México D.F. pp. 50-51

SEMARNAT-SENER-SCFI (2005). Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, Secretaría de Energía, Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. Norma Oficial Mexicana. NOM-086-SEMARNAT-SENER-SCFI-2005. “Especificaciones de los combustibles fósiles para la protección ambiental”. México, D.F.

SENER (2014). Secretaría de Energía. “Prospectiva del Sector Eléctrico 2014-2028”. México D.F. 163 pp.

SENER (2016). Secretaría de Energía. “Prospectiva del Sector Eléctrico 2016-2030”. Ciudad de México. 127 pp.

SENER (2017a). Secretaría de Energía. “Estadísticas del portal de electricidad”. Consultado el 8 de mayo de 2017 de: <http://egob2.energia.gob.mx>

SENER (2017b). Secretaría de Energía. “Programa de Desarrollo Del Sistema Eléctrico Nacional (PRODESEN) 2017-2031”. Ciudad de México. 378 pp.

SIE (2017). Sistema de Información Energética. “Glosario de términos usados en el Sector Energético”. Consultado el 17 de abril de 2017, de <http://sie.energia.gob.mx>

SSA (2010). Secretaría de Salud. Norma Oficial Mexicana. NOM-022-SSA1-2010, Salud ambiental. “Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto al dióxido de azufre (SO₂). Valor normado para la concentración de dióxido de azufre (SO₂) en el aire ambiente, como medida de protección a la salud de la población”. México, D.F.

US EPA (1995a). United States Environmental Protection Agency. 40 CFR (Code of Federal Regulations). Part 76. “Acid Rain Nitrogen Oxides Emission Reduction Program”, Section 76.2 “Definitions”. Washington, US.

US EPA (1995b). United States Environmental Protection Agency. “Introduction of the Compilation of Air Pollutant Emission Factors, Volume I: Stationary and Area Sources. AP-42”, 5th. ed. Washington, U.S.

US EPA (1997). United States Environmental Protection Agency. 40 CFR (Code of Federal Regulations). Part 51. Subpart BB. Data Requirements for Characterizing Air Quality for the Primary SO₂ NAAQS. Appendix W to part 51. “Guideline on Air Quality Models”. Washington, US.

US EPA (1998a). United States Environmental Protection Agency. "Volume I. Chapter I: External Combustion Sources, Section 1.1 Bituminous and Subbituminous Coal Combustion. AP-42" 5th. ed. Washington, U.S.

US EPA (1998b). United States Environmental Protection Agency. "Volume I. Chapter I: External Combustion Sources, Section 1.3 Fuel Oil combustion. AP-42" 5th. ed. Washington, U.S.

US EPA (1998 c). United States Environmental Protection Agency. "Volume I. Chapter I: External Combustion Sources, Section 1.4. Natural Gas Combustion. AP-42" 5th. ed. Washington, U.S.

US EPA (2010). United States Environmental Protection Agency. 40 CFR (Code of Federal Regulations). Parts 50, 53 and 58. "Primary National Ambient Air Quality Standards for Sulfur Dioxide; Final Rule". Vol. 75, No. 119 Federal Register p. 35520. U.S. June.

US EPA (2012). United States Environmental Protection Agency. 40 CFR (Code of Federal Regulations). Part 50. "Secondary National Ambient Air Quality Standards for Sulfur Dioxide; Final Rule". Vol. 77, No. 64 Federal Register p. 20218. U.S. April.

US EPA, AP-42 (2016). United States Environmental Protection Agency. "Compilation of Air Pollution Emission Factors, Volume I: Stationary Point and Area Sources", 5th. ed. Washington, U.S. Consultado el 28 de octubre de 2016 en: <https://www.epa.gov/>

US EPA (2017). United States Environmental Protection Agency. "Air Pollution Emissions Overview" Consultado el 15 de diciembre de 2016 en: <https://www3.epa.gov/>

Velasco, H. C.; Rodríguez, N. (2005). "Tecnologías de desulfuración de gases". Revista Metalúrgica, No. 26. Universidad Técnica de Oruro. Bolivia. Junio. pp. 29-41

Zhou, Y.; Levy, J.; Hammitt, J.K.; Evans, J.S (2003). "Estimating Population Exposure to Power Plant Emissions Using CALPUFF: A Case Study in Beijing, China". Atmospheric Environment. Vol. 37. No. 6. pp.815–826.

Zuk, M.; Garibay, V.; Iniestra, R.; López, M.T.; Rojas, L.; Laguna, I. (2006). "Introducción a la evaluación de los impactos de las termoeléctricas de México: un estudio de caso en Tuxpan, Veracruz". Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología. México. Octubre. 126 pp.