ESTUDIO SOBRE LA INFLUENCIA DE LA CENTRAL TERMOELÉCTRICA DE TULA, HIDALGO, EN LA CALIDAD DEL AIRE REGIONAL

Iniciativa Climática de México

Febrero, 2021

Resumen ejecutivo

La generación eléctrica ocasiona uno de los mayores problemas de contaminación debido a dos principales causas, el gran volumen anual de combustibles que se consumen y queman; y la larga vida útil de estos proyectos, en muchos casos superior a los cincuenta años.

Estas causas hacen que las regiones próximas a las plantas sufran graves efectos en la calidad del aire, agua y suelo; y que las poblaciones próximas, generalmente rurales con limitados recursos sufran un importante deterioro en su salud y calidad de vida debido a la exposición crónica a los contaminantes.

El problema del deterioro de la calidad del aire que respiran los habitantes de la cuenca de Tula existe desde hace varias décadas. Los primeros estudios datan de la década de los 80; habiendo sido complementados y ampliados extensamente hasta la actualidad.

Con el fin de continuar ampliando el trabajo de investigación y monitoreo se presenta este estudio. En él se realiza la modelación de las emisiones contaminantes de la Central Termoeléctrica de Tula (CTT) a través de la herramienta AERMOD. Esta herramienta se utiliza para evaluar la calidad del aire, determinar la proporción de las emisiones y contaminantes sujetos a regulación normativa, e identificar las zonas y poblaciones, que, a causa de las direcciones de viento predominantes, se ven más afectads por las plumas de contaminantes.

Los resultados obtenidos a través de simulaciones muestran que, si la CTT tiene un régimen de operación similar a 2019 para los siguientes años, las violaciones a las normas sobre Calidad del Aire de la Secretaría de Salud, tanto anteriores como actuales, son graves y ponen en riesgo la salud de los habitantes de la zona de influencia de las emisiones de la CTT.

Actualmente la CTT infringe la NOM-086-SEMARNAT-SENER-SCFI-2005 por casi duplicar el contenido en azufre permitido; e igualmente infringe el permiso de generación emitido por la Comisión Reguladora de Energía (CRE) donde únicamente se autoriza a la CTT al empleo de gas natural.

El mantenimiento o aumento de empleo de combustóleo en la CTT, ha expuesto y continúa exponiendo a las localidades Pradera del Llano, Teocalco, El Llano y otras que se encuentran en una zona de mayor riesgo, a limites superiores a los permitidos por la NOM-022-SSA1-2010 y por consecuente de la vigente NOM-022-SSA1-2019.

Índice

Resumen ejecutivo		1
Índice		2
1.	**Introducción**	3
2.	**Calidad del aire y enfermedades respiratorias**	4
3.	**Termoeléctrica de Tula, Hidalgo**	5
4.	**Marco Metodológico**	8
5.	**Modelación de Termoeléctrica de Tula, Hidalgo**	9
6.	**Resultados**	13
7	**Discusión**	28
8	**Conclusiones**	29
9.	**Recomendaciones**	29
10.	**Referencias**	30
11.	**Anexos**	34

1. Introducción

La contaminación ambiental es un problema de salud mundial con serias implicaciones negativas para el ser humano. Tan solo en el 2019 la contaminación atmosférica ocupó el cuarto factor de riesgo de muerte a nivel mundial (HEI, 2020). Sin embargo, grupos vulnerables como niños, adultos en edades avanzadas, personas con problemas de salud preexistentes o incluso carencias sociales son los que se ven principalmente afectados debido a dicho problema (EEA, 2020).

Según la OMS, la contaminación atmosférica es responsable de 6.67 millones de muertes al año por accidentes cardiovasculares, enfermedades cardíacas, cáncer de pulmón y enfermedades respiratorias crónicas (HEI, 2020; OMS, 2021). Nuevas evidencias señalan que la exposición a largo plazo a la contaminación atmosférica se ha relacionado con un mayor riesgo de muerte por COVID-19 (Félix-Arellano et al., 2020; Pozzer et al., 2020). El riesgo por muerte de COVID-19 aumenta un 8% por cada aumento de 1 µg/m3 de exposición a PM2.5 (Pozzer et al., 2020)

Por otro lado, la contaminación atmosférica es responsable de grandes pérdidas económicas reflejadas en gastos médicos de más de 21 mil millones de dólares a nivel mundial en 2015; pérdida de productividad económica derivada de enfermedades relacionadas con la contaminación y muerte prematura; así como el costo de la degradación del medio ambiente. (Landrigan, 2016)

Existen múltiples fuentes de contaminación ambiental como quema de combustibles para la cocción de alimentos, uso de vehículos, centrales eléctricas de carbón o gas natural, actividades agrícolas, incendios forestales, incineración de residuos y procesos industriales (Hu et al., 2020; OMS, 2021). Sin embargo, las diferencias de exposición entre los grupos de población pueden estar relacionadas con disparidades en el desarrollo, la aplicación y el cumplimiento de leyes, reglamentos y políticas medioambientales (OPS & OMS, 2016).

A pesar de todo lo que se sabe sobre los efectos de la contaminación atmosférica en la salud, el progreso logrado ha sido escaso o nulo en muchas partes del mundo (HEI, 2020). Si bien la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible reconoce la gravedad de la contaminación ambiental en tres de sus indicadores, la eliminación global de dicha problemática requiere de un liderazgo ambicioso, nuevos recursos sustanciales por parte de la comunidad internacional e importantes cambios sociales (Landrigan, 2016).

Particularmente en México, más de 49 mil muertes en el 2017 fueron atribuidas a la contaminación ambiental (CIEP, 2019). Es la octava causa de muerte, después de factores como la dieta, el sobrepeso, la hipertensión, el alcohol y las drogas, el tabaquismo y la falta de ejercicio (Larsen, 2015). Además, según el Banco Mundial, México tuvo en el 2013 una pérdida en bienestar de casi 38 mil millones de dólares (1.89% del PIB) debido a la contaminación ambiental, así como pérdidas en producción laboral de 1,815 millones de dólares (0.09% del PIB) (TWB, 2016).

Particularmente, la cuenca de Tula ha recibido atención en los últimos años debido a la contaminación atmosférica originada por la Central Termoeléctrica de Tula, llegando incluso

a ser catalogada como el Chernobyl mexicano. El uso de combustóleo con alto contenido de azufre para la generación de electricidad ha provocado que altas concentraciones de dióxido de azufre lleguen incluso hasta la zona norte de la ciudad de México, empeorando la calidad del aire a nivel regional. Por lo anterior, este proyecto tiene como propósito conocer las concentraciones de dióxido de azufre a nivel del suelo para compararlas con la norma de salud correspondiente mediante la modelación de la dispersión de dicho contaminante generado por el uso de combustóleo en la Central Termoeléctrica de Tula Francisco Pérez Río.

2. Calidad del aire y enfermedades respiratorias

La contaminación atmosférica es un problema de índole global impulsada por la rápida expansión de las megaciudades, la globalización de la producción industrial, la proliferación de plaguicidas y productos químicos tóxicos y el creciente uso de vehículos de motor (Landrigan, 2016).

La contaminación atmosférica puede definirse como la introducción de sustancias químicas, partículas o materiales biológicos en la atmósfera que causan molestias, enfermedades o la muerte en seres humanos; afectan a otros organismos vivos tales como cultivos alimentarios; así como dañan el entorno natural o construido (Choudhary & Garg, 2015).

Mientras que algunas causas de la contaminación atmosférica son totalmente naturales, tales como emisiones de plantas y biomasa del océano, gas volcánico o la resuspensión de polvo en zonas áridas, la intensidad de las actividades humanas también contribuye al problema (Williams, 2016; Li & Mallat, 2018).

Algunas fuentes antropogénicas incluyen el uso de motores de combustión interna; la quema de combustibles en hogares e industria para la producción de energía; actividades industriales como construcción, minería, fabricación de cemento o fundición; actividades agrícolas; así como erosión de carreteras, abrasión de frenos o neumáticos, entre otras (Li & Mallat, 2018).

La calidad del aire se evalúa midiendo las concentraciones de seis contaminantes: materia de partículas finas (PM2.5, concentración en masa de partículas con diámetros ≤2.5 μm), materia de partículas gruesas (PM10, concentración en masa de partículas con diámetros ≤10 μm), ozono (O3), dióxido de nitrógeno (NO2), dióxido de azufre (SO2) y monóxido de carbono (CO) (EPA, 2018).

Particularmente, el SO2 es el principal contaminante que se genera durante la combustión de combustibles fósiles como el combustóleo en plantas generadoras de electricidad debido al alto contenido de azufre. Ahora bien, como el SO2 es hidrosoluble, al estar en contacto con agua forma ácido sulfúrico, precursor de la lluvia ácida (Mateos-Díaz, 2016).

La exposición a contaminantes ambientales a corto plazo exacerba los síntomas de enfermedades agudas como patologías respiratorias y cardiovasculares, complicaciones neuropsiquiátricas, irritación de los ojos o enfermedades de la piel; mientras que las exposiciones a largo plazo son probablemente los principales causantes de enfermedades crónicas como el cáncer (Ghorani-Azam et al., 2016; Zhong et al., 2019).

3. Termoeléctrica de Tula, Hidalgo

La Central Termoeléctrica de Tula (CTT) “Francisco Pérez Ríos” es una empresa paraestatal de la Secretaría de Energía que comenzó sus actividades en 1975 y actualmente es operada por CFE. Se localiza a 83 km al noroeste de la Ciudad de México, a 8 km al sur de la Ciudad de Tula y a la altura del kilómetro 27.5 de la carretera Jorobas-Tula (Moreno-Torres, 2017). La CTT tiene una capacidad instalada de 2.095 GW y en el 2015 fue la instalación industrial con mayor generación eléctrica a nivel nacional (SENER, 2017a citado por Moreno-Torres, 2017). La CTT cuenta actualmente con cinco unidades generadoras de electricidad de vapor convencional y uso dual de combustible a partir de gas natural y combustóleo (CFE, 2020b citado por Hernandez-Moreno, 2020).

Sin embargo, debido al uso de combustible fósil con alto contenido de azufre (4% peso), la CTT representa una de las principales fuentes de emisión de partículas PM2.5 y óxidos de azufre en el país (Sosa et al., 2013; Hernandez-Moreno, 2020). Aunado a lo anterior, la CTT junto con la refinería Miguel Hidalgo aportan casi el 90% del SO2 y el 80% del NOx de la emisión total en el Estado de Hidalgo (IMP, 2006 citado por Rivera et al., 2009).

a. Antecedentes

El problema del deterioro de la calidad del aire y sus externalidades negativas en los habitantes de la cuenca de Tula existe desde hace varias décadas. Desde 1989, durante la formulación del Programa Ambiental de México, la región TVA fue clasificada como zona crítica (ZC) en materia de contaminación atmosférica tanto por sus características topográficas, demográficas, climáticas y meteorológicas, así como también por su actividad industrial (INECC, 2016 citado por Moreno-Torres, 2017).

Desde el año 2000 la red de monitoreo atmosférico de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM) viene informando de concentraciones inusualmente altas de SO2 durante la noche en la parte norte de la zona metropolitana sin poder atribuirse a actividades industriales inusuales en la redonda. Dicha situación comenzó a cuestionar si la zona industrial de Tula era responsable del empeoramiento de la calidad del aire en la ZMCM (Rivera et al., 2009).

Durante el periodo de julio a diciembre del 2003, la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) y la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) realizaron una evaluación de las externalidades ambientales causadas por la generación de electricidad en trece termoeléctricas mexicanas, entre ellas la CTT. La evaluación utilizó la versión QUERI del módulo AIRPACTS. El estudio identificó a la CTT como la zona con mayores concentraciones de contaminantes de los trece lugares evaluados (CEPAL & SEMARNAT, 2004).

El estudio de CEPAL & SEMARNAT (2004) calculó un valor máximo de concentración promedio anual de 226.2 µg/m3 de SO2 en el punto receptor de la zona de la CTT, superando la concentración máxima permitida por las normas oficiales mexicanas. Asimismo, la evaluación económica indicó que 67.4 millones de dólares al año representan los costos totales de externalidades por contaminantes en la CTT, de los cuales 50 millones de dólares anuales corresponden a los costos externos por exposición al SO2.

Sin embargo, no fue hasta febrero de 2004 cuando las autoridades ambientales federales y el Gobierno del Estado de Hidalgo instalaron las primeras estaciones de la Red de Monitoreo Atmosférico del Estado de Hidalgo (REHIMAT) (CENICA, 2008).

Los primeros estudios formales en la región de Tula datan del año 2005. A través de ejercicios de modelación inversa, el anterior Gobierno del Distrito Federal observó altas concentraciones de dióxido de azufre en las estaciones de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA) provenientes de la región Tula-Tepeji-Zumpango (CENICA, 2008).

En el año 2006, a partir del proyecto MILAGRO (Megacity Initiative: Local and Global Research Observations) se midieron intensamente durante cuatro semanas las concentraciones de contaminantes atmosféricos en la región de Tula para determinar su impacto potencial en el sector norte de la Ciudad de México. Las mediciones realizadas por la estación Tepeji señalaron que la concentración de dióxido de azufre excedió los valores indicados por la norma en dos ocasiones, mientras que el ozono excedió los límites durante una ocasión. (Rivera et al., 2009; Sosa et al., 2013)

Del 20 de octubre al 5 de diciembre de 2008 se realizó la Campaña de Monitoreo de Calidad del aire en la región Tula-Tepeji-Zumpango. Dicha campaña de monitoreo fue realizada durante 45 días por medio de 6 unidades móviles y tenía como objetivo determinar con mayor certeza la ubicación de estaciones de monitoreo. A partir de estas mediciones se concluyó que el problema de la contaminación del aire en la cuenca de Tula era de índole regional, ya que involucra a otras poblaciones del estado de Hidalgo y del Valle de México. Durante dicho monitoreo se identificaron altas concentraciones de óxido nítrico y dióxido de azufre, donde este último rebasó los límites de la norma de calidad del aire en una ocasión. De igual forma, se identificó que la pluma de dióxido de azufre emitida en el Valle de Tula era dispersada sobre la ladera poniente de la ciudad de México y por el norte de la ZMCM. (CENICA, 2008; Rivera et al., 2009)

Para el año 2008, la REHIMAT contaba con 8 estaciones, de las cuales 6 eran manuales y 2 automáticas. No obstante, la ubicación de dichos sitios de monitoreo resultó insuficiente para reflejar la calidad del aire en la cuenca de Tula (CENICA, 2008).

Mateos-Diaz (2016) estimó para el año 2010 las emisiones contaminantes de la CTT a partir de la metodología de factores de emisiones para combustóleo y gas natural. El estudio identificó que el uso de gas natural como combustible reducía un 99.98% el SO2, 43.15% el NOX y 39.92% el CO2 que se generaría a partir del uso de combustóleo.

Moreno-Torres (2017) realizó una modelación de dispersión CALPUFF de la CTT para el periodo de julio 2010 a junio 2011 con el propósito de estimar la concentración de dióxido de azufre en la ZMCM. Posteriormente se realizó una comparación de las estimaciones con la información de la calidad del aire reportada por las doce estaciones de monitoreo del SIMAT previamente seleccionadas. La modelación de Moreno-Torres observó una tendencia similar a los valores registrados por las estaciones de monitoreo del SIMAT durante el periodo de estudio. Se identificó que las mayores concentraciones se observaron en el periodo de noviembre a febrero, así como algunos picos de concentración en mayo 2011. De igual forma, la región noroeste de la ZMCM registró la mayor concentración de dióxido de azufre, mientras que la región centro y noreste registraron las menores concentraciones. Además, los

resultados del modelo de dispersión de CALPUFF indicaron que la NOM-022-SSA1-2010 fue rebasada 104 días del periodo de estudio en la zona de influencia de la CTT. Sin embargo, al realizar la comparación con las concentraciones registradas por las estaciones de monitoreo de la ZMCM, ningún día fue superado el valor límite de la norma, es decir, 0.11 ppm en 24 horas.

Alvarado-Vázquez (2020) modeló el depósito atmosférico húmedo de sulfatos y nitratos de 40 eventos de junio a septiembre 2010 provenientes de la CTT por medio del modelo CALPUFF. El estudio concluyó que la CTT tiene una contribución promedio de 9.71% en los depósitos de sulfato. Aunado a lo anterior, se sugirió que los municipios de Tepeji del Río, Tula de Allende y Atitalaquia presentan mayor susceptibilidad.

Por otro lado, Hernández-Moreno (2020) realizó la modelación de la calidad del aire para el periodo del 11 al 16 de mayo de 2019 basado en tres escenarios distintos: generación de electricidad en la CTT a partir del uso de combustóleo con 3.5% de azufre, combustóleo con 2% de azufre, así como el uso exclusivo de gas natural como combustible alternativo. Si bien se utilizó el modelo WRF-Chem para modelar todos los contaminantes involucrados en la calidad del aire, el estudio se enfocó en los cambios de concentración de dióxido de azufre, ozono y partículas PM2.5.

El inventario de emisiones realizado por Hernández-Moreno estimó una reducción superior al 99.9% de las emisiones de óxidos de azufre a partir de la generación de energía eléctrica por medio de gas natural en comparación con los escenarios donde se utilizaba combustóleo con azufre. Si bien se identificó un aumento considerable en las partículas de CO al hacer uso de gas natural para la generación de electricidad, el uso de dicho combustible alternativo promovió que la generación de partículas PM10 y PM2.5 disminuyera en un 98%, mientras que los cambios en ozono troposférico resultaron neutros. Con respecto a la sustitución de combustóleo de 3.5% por 2% de azufre, el estudio demostró que el cambio genera solamente disminuciones marginales en la concentración de contaminantes.

De igual manera, Hernández-Moreno señaló que las emisiones generadas por la CTT pueden repercutir en la calidad del aire de la ciudad de México cuando los vientos de la cuenca de Tula perduran por una fracción mayor en las horas del día. Aunado a lo anterior, el estudio presentó una estimación de los impactos en la salud asociados con una mejora en la calidad del aire a partir del modelo BenMAP (Environmental Benefits Mapping and Analysis Program). Anualmente, entre 8,935 y 14,256 muertes prematuras de la cuenca Tula a la cuenca Valle de México podrían ser evitadas gracias a la reducción de partículas PM2.5 en el ambiente debido a la sustitución de combustóleo por gas natural.

b. Situación actual y justificación

La situación anterior referente a la CTT ha traído repercusiones en la salud de los habitantes de la región. En el 2008, la Secretaría de Salud indicó que la zona central de Tula tuvo la incidencia de infecciones respiratorias agudas más alta de México (Secretaría de Salud de Hidalgo, 2008 citado por Sosa et al., 2013).

De igual forma, Melgar-Paniagua et al., (2013) indicó que el aumento de la morbilidad y la mortalidad respiratoria en la región de Tula estaban asociadas a los cambios semanales de

la contaminación atmosférica por PM; concluyendo que una reducción de los contaminantes atmosféricos procedentes de fuentes industriales beneficiaría la calidad de vida y la salud de la población expuesta.

A pesar de que la NOM-016-CRE-2016 señala que en el corredor industrial de Tula sólo debe utilizarse combustóleo con un máximo contenido de azufre de 2%, el combustible empleado por la CTT presentaba más de 3.5% de azufre en el 2019 (CFE, 2020a citado por Hernandez-Moreno, 2020). De igual forma, existen evidencias de que algunos efectos en la calidad del aire del Valle de México provienen del complejo industrial Tula debido a las tasas de emisión de SO2 (García-Escalante et al., 2014 citado por Hernandez-Moreno, 2020).

4. Marco Metodológico

Un modelo de dispersión de contaminantes atmosféricos puede considerarse como el intento de predecir o simular, a través de medios físicos o numéricos, la concentración ambiental de contaminantes criterio que se encuentran en la atmósfera de un dominio (Collett & Oduyemi, 1997; Holmes & Morawska, 2006). Gracias a dichos modelos es factible relacionar directamente la concentración de contaminantes ambientales con sus fuentes emisoras o precursores (López et al., 2005).

Los modelos de dispersión se utilizan para evaluar la calidad del aire, determinar la proporción de las emisiones de diferentes fuentes en la contaminación atmosférica total o identificar las principales direcciones de las acciones destinadas a la reducción de las emisiones (Rzeszutek & Szulecka, 2021). La implementación de estos modelos suele depender de la escala temporal y espacial de la previsión (global, regional, urbana, local), de las características del dominio, de la estructura del campo de emisión, de la composición de los principales compuestos contaminantes y de la propia aplicación en la que se van a utilizar los resultados de los modelos (Holnicki et al, 2015)

El modelo de dispersión de contaminantes atmosféricos AERMOD es uno de los modelos más reconocidos para la evaluación del impacto local de la calidad del aire (Rzeszutek & Szulecka, 2021). AERMOD es un modelo de dispersión de pluma en estado estacionario que mide la dispersión de fuentes estacionarias de tipo industrial en distancias de hasta 50 km (Cimorelli et al., 2005).

El primer concepto de este modelo fue desarrollado en 1991 por la Agencia de Protección Medioambiental de Estados Unidos (EPA) y la Sociedad Meteorológica Americana (AMS) al incorporar los conocimientos de la capa límite planetaria (Planet boundary limit en inglés) (Perry et al., 2005). En 1996 se presentó la primera versión del modelo AERMOD (Cimorelli et al., 1996). Desde el año 2005, el modelo AERMOD sustituyó oficialmente al modelo ISC3 utilizado por la EPA (EPA, 2005).

El modelo de dispersión AERMOD se recomienda para efectos normativos a escala local tanto en terrenos planos como complejos (EPA, 2017). Asimismo, el modelo AERMOD considera la influencia de corrientes de aire procedentes de edificios y aumenta la turbulencia vertical para reflejar la capa límite de tipo convectivo presente en entornos urbanos durante la noche (Cimorelli et al., 2003).

El uso de modelos avanzados de dispersión de contaminantes, como el AERMOD, es una práctica establecida en los países desarrollados, ya que se dispone de suficientes datos de entrada. Sin embargo, en los países en desarrollo, la aplicación de estos modelos se ve limitada debido a la falta de datos suficientes y fiables (Gulia et al., 2015).

De acuerdo con Rzeszutek y Szulecka (2021), una de las características básicas de los modelos de dispersión de contaminación atmosférica es la necesidad de datos de entrada de series temporales. La incertidumbre de dichos datos de entrada determinará la exactitud de los resultados. Por lo tanto, es necesario llevar a cabo estudios para determinar la incertidumbre de los modelos de dispersión a partir de diferentes datos de entrada.

AERMOD cuenta con dos procesadores de datos de entrada que constituyen elementos reguladores del modelo. Por un lado, se encuentra AERMET, un preprocesador de datos meteorológicos que incorpora la dispersión del aire basándose en la estructura de la capa límite planetaria y en conceptos de dimensionamiento. Por otro lado, se encuentra AERMAP, un preprocesador de datos de relieve que incorpora terrenos complejos a partir de datos digitales de elevación (EPA, 2021).

5. Modelación de Termoeléctrica de Tula, Hidalgo

Se caracterizaron las fuentes de emisión fijas de la CTT con base en el documento de CFE proporcionado a la Plataforma Nacional de Transparencia con el folio de solicitud: 1816400031520. Con ello se estableció el número de chimeneas, la altura de salida de los gases, la temperatura de salida de gases, así como la generación y consumo de combustibles anual para el año 2019.

Tabla 1. Características de fuentes de emisión en CTT. Fuente (Transparencia, 2020), Folio de Solicitud: 1816400031520.

Unidad	Generación bruta anual [MWh]	Consumo de Combustóleo anual [m^3]	Consumo de Gas Natural anual [m^3]	Punto de Emisión	Altura de Chimenea [m]	Diámetro de Chimenea [m]	Temperatura de gases de chimenea [K]*
U1	1,661,801.67	297,254.07	139,417,393	Chimenea 1	65	3.4	427.97
				Chimenea 2	65	3.4	428.15
U2	1,780,954.85	288,834.18	176,553,960	Chimenea 3	65	3.4	453.97
				Chimenea 4	65	3.4	457.77
U3	1,446,010.61	273,938.61	97,684,488	Chimenea 5	65	5.3	475.05
U4	1,885,453.33	359,930.51	140,260,003	Chimenea 6	65	5.3	454.95
U5	705,976.74	142,391.78	30,280,706	Chimenea 7	56	5.4	435.05
Total	**7,480,197.20**	**1,362,349.15**	**584,196,550**				

*Se tomaron promedios de la información semestral presentada en el documento citado.

Tabla 2. Localización de puntos de emisión en proyección UTM zona 14. Fuente: Elaboración propia.

Punto de Emisión	Coordenada X [m]	Coordenada Y [m]
Chimenea 1	471011.02	2217816.74
Chimenea 2	471010.06	2217804.12
Chimenea 3	471008.63	2217773.72
Chimenea 4	471007.77	2217761.48
Chimenea 5	471003.28	2217671.91
Chimenea 6	471000.31	2217628.80
Chimenea 7	470994.86	2217557.39

Con el fin de obtener datos horarios de consumo de combustible en la CTT, se descargaron datos de generación por hora del Observatorio para la Transición Energética (OBTREN, 2021) para la tecnología “Térmica Convencional”. Los datos obtenidos corresponden al año 2019, desde la primera hora del 1 de enero hasta la última del 31 de diciembre.

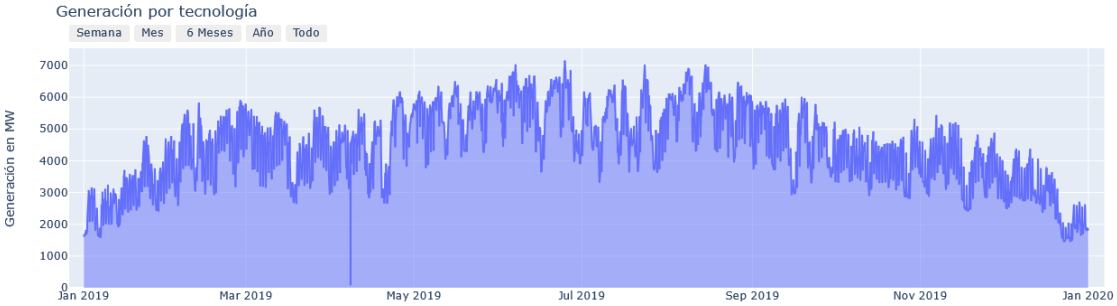


Figura 1. Generación por hora para 2019 de tecnología Térmica Convencional en México. Fuente: (Obtren, 2021).

Estos datos fueron comparados con la generación anual total, y se usaron como patrón para determinar la generación horaria de la CCT. Se estimó la generación horaria de la CTT que se tomó como la generación bruta de cada unidad. Cabe mencionar que se consideró un 8% extra a la generación bruta para incluir la energía destinada para usos propios, según lo reportado en el PRODESEN 2018-2032 (SENER, 2019).

Como método para la estimación del combustible consumido por hora, fue necesario estimar la contribución energética por tipo de combustible, utilizando los datos de consumo de la Tabla 1. También se utilizaron los poderes caloríficos del combustóleo y el gas natural, establecidos por la CONUEE en su “Lista de Combustibles 2019 que se considerarán para identificar a los usuarios con un patrón de alto consumo, así como los factores para determinar las equivalencias en términos de barriles equivalentes de petróleo”.

Tabla 3. Poder calorífico de combustibles utilizados en CTT. Fuente: (CONUEE, 2019).

Combustible	Poder calorífico neto
Gas Seco	38.268 MJ/m^3
Combustóleo	6565 MJ/bl (41,294 MJ/m^3)

Como se puede observar en la Tabla 4, el combustóleo tiene una contribución importante en todas las unidades de generación, siendo la Unidad 5 la que porcentualmente consume más de este combustible, con un 83.5% de su producción proveniente del petrolífero.

Tabla 4. Contribución por combustible a la generación eléctrica en la CTT. Fuente: Elaboración propia con datos de CFE.

Unidades	Energía Térmica de Combustóleo (GJ)	Energía Térmica por Gas Natural (GJ)	Contribución energética de Combustóleo	Contribución energética de gas natural	Régimen térmico de la unidad de generación (GJ/MWh)
U1	12,274,809.57	5,335,224.80	69.70%	30.30%	10.60
U2	11,927,118.63	6,756,366.94	63.84%	36.16%	10.49
U3	11,312,020.96	3,738,189.99	75.16%	24.84%	10.41
U4	14,862,970.48	5,367,469.79	73.47%	26.53%	9.97
U5	5,879,926.16	1,158,782.06	83.54%	16.46%	10.51

Posteriormente se calculó el régimen térmico de cada unidad utilizando la Ecuación *1* y los valores establecidos en la Ecuación *1*.

$$RT\left[\frac{GJ}{MWh}\right] = \frac{\forall[m^3] \cdot PCI\left[\frac{GJ}{m^3}\right]}{E[MWh]}$$

Ecuación 1

Donde:

$\forall$: Volumen.
RT: Régimen térmico.
E: Energía eléctrica.
PCI: Poder calorífico inferior.

Cabe mencionar que en el PRODESEN 2018 – 2033 reporta un régimen térmico de 21 GJ/MWh para la CTT (SENER, 2019). Este valor la identifica como una planta menos eficiente con respecto al cálculo realizado en el presente estudio.

El consumo horario de combustible se estimó despejando el volumen ($\forall$) de la Ecuación *1* y utilizando la energía eléctrica generada según lo calculado en pasos anteriores.

$$\forall[m^3] = \frac{E[MWh] \cdot RT\left[\frac{GJ}{MWh}\right]}{PCI\left[\frac{GJ}{m^3}\right]}$$

Ecuación 2

Estimación de emisiones de SO_2

a) Factores de emisión

Para calcular las emisiones en cada una de las chimeneas se usaron los factores de emisión (FE) establecidos en el AP 42 de la Agencia de Protección de los Estados Unidos (EPA), utilizados comúnmente para el estudio de la calidad del aire. En la Tabla 6 se presenta la información recopilada del capítulo 1 sobre fuentes de combustión externa, para los combustibles: Gas natural y Combustóleo. Cabe mencionar que, para el caso del combustóleo, se utilizaron los factores de emisión de los compuestos pesados "No. 6 y No. 5" (mismo valor), ya que se consideró que el combustible utilizado en la CTT es de características similares por su alto contenido de azufre.

Tabla 5. Factores de emisión EPA de dióxido de azufre para fuentes fijas de combustión externa. Fuente: (EPA, 2020)

Combustible	Factor de Emisión		Clasificación del FE
Combustóleo	157S lb/10^3 gal	18.84S kg/m^3	A
Gas Natural	0.6 lb/16^6 scf	9.6 kg/10^6 m^3	A

Donde: S = porcentaje de azufre en el combustóleo. Factor de conversión de [lb/10^3 gal] a [kg/m^3] = 0.12; y para [lb/16^6 scf] a [kg/10^6 m^3] = 16.

Estimación de flujo volumétrico de gases de salida en chimenea

Para calcular la velocidad de salida de los gases fue necesario estimar primero el flujo volumétrico de los gases de salida de cada chimenea. Considerando al dióxido de carbono (CO_2), vapor de agua (H_2O) y nitrógeno diatómico (N_2) como los principales productos de la combustión. Se utilizaron la Ecuación 3 y la Ecuación 4, además de la información de los datos, para conocer el número de moles que resultarán de la quema de cada uno de los combustibles utilizados en las unidades de la CTT (combustóleo y gas natural) y con ello, estimar la cantidad de gases.

$$C_7H_{10} + 9.5\,O_2 + 35.7N_2 \rightarrow 7CO_2 + 5H_2O + 35.7N_2$$

Ecuación 3. Reacción de combustión del Combustóleo

$$CH_4 + 2\,O_2 + 7.52N_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O + 7.52N_2$$

Ecuación 4. Reacción de combustión del Gas Natural.

Tabla 6. Parámetros de conversión molar de combustibles utilizados en la CTT. Elaboración propia con datos de: (INECC, 2014) y (Atkins & Jones, 2006).

Parámetro	Combustóleo	Gas Natural
Consumo anual (m^3)	1,362,349.15	584,196,550
Densidad (kg/m^3)	995	0.7
Peso molecular (g/mol)	94	-
Volumen molecular (l/mol)	-	22.4*

* Volumen que ocupa un mol de gas en condiciones normales de presión y temperatura.

Posteriormente, y a partir del área de la chimenea, se calcularon las velocidades de salida de los gases para cada una de las fuentes de emisión de la CTT (Tabla 7).

Es importante mencionar que existen siete chimeneas en las cinco unidades de generación en la CTT. Las unidades 1 y 2 cuentan con dos chimeneas cada una, por lo que fue necesario dividir en partes iguales las estimaciones de tasa de emisión y flujo volumétrico de gases de salida de dichas unidades entre las chimeneas correspondientes 1,2,3 y 4. A continuación se presentan los promedios anuales para cada chimenea en la Tabla 7.

Tabla 7. Características de emisión de chimeneas en la CTT. Elaboración propia con datos de (CFE, 2020).

Unidad	Chimenea	Tasa de Emisión (g/s)	Flujo volumétrico de gases de salida (m^3/s)
1	1	373.97	127.60
	2	373.97	127.60
2	3	363.41	142.89
	4	363.41	144.08
3	5	589.29	243.01
4	6	905.71	312.42
5	7	377.69	110.42

6. Resultados

A partir del procesamiento de datos en el archivo meteorológico de la zona de estudios, se establece que los vientos predominantes soplan hacia el Suroeste de la CTT, tal como se puede observar en la Figura 2. Asimismo, se estableció que la velocidad promedio del viento en la zona se encuentra entre los 0.5 a 2.1 m/s, con una dominancia de casi un 42% del año; además de que existen “Calmas” en el viento solamente durante un 3.41% del año.

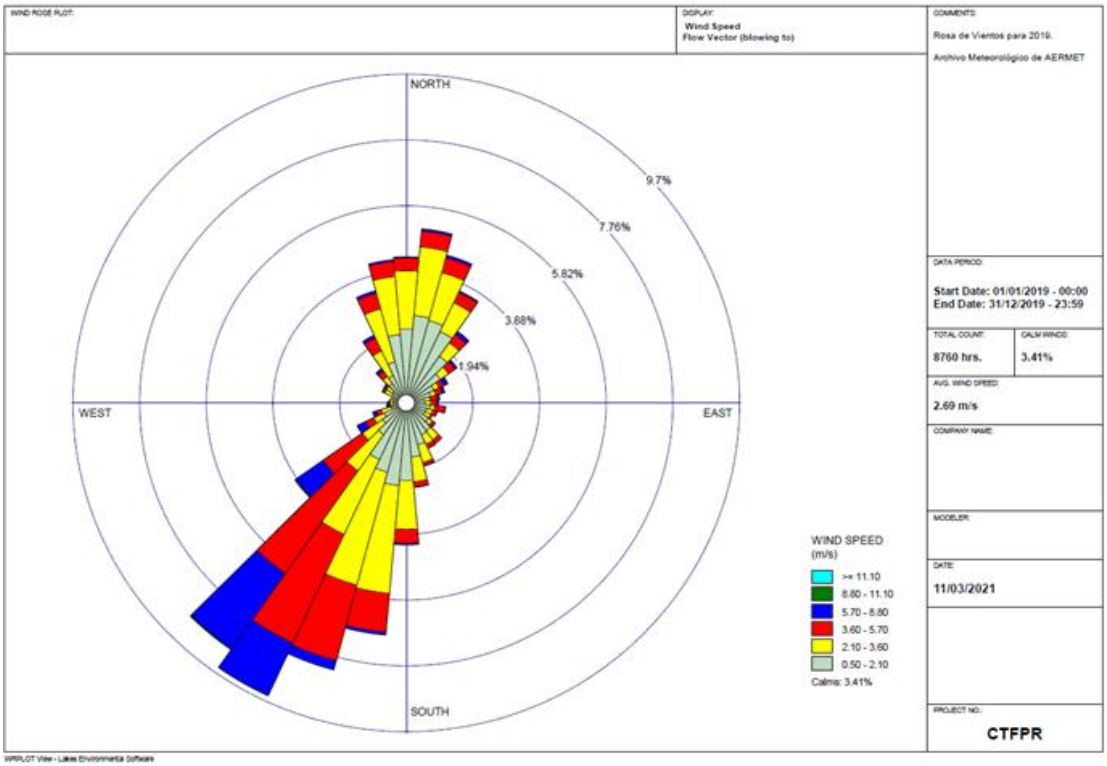


Figura 2. Rosa de vientos para zona de estudio de la CTT. Elaboración propia.

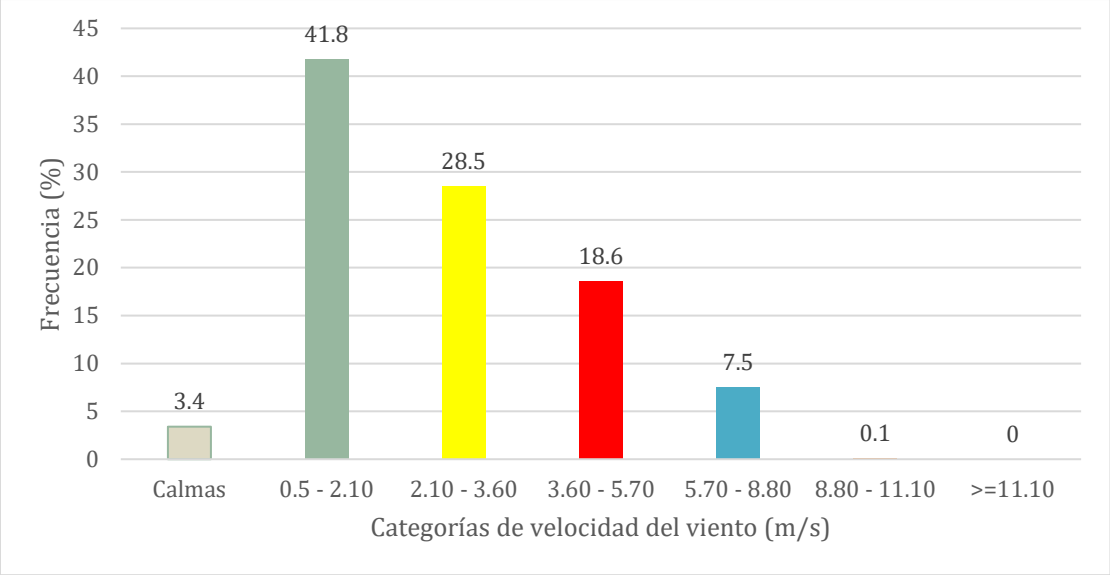


Figura 3. Distribución de frecuencia de vientos por categoría de velocidad. Elaboración propia.

Los parámetros mencionados anteriormente fueron empleados como insumos en el modelo AERMOD (Versión 1919), el cual se utilizó para predecir los niveles de concentración de dióxido de azufre (SO_2) provenientes de la CTT, durante promedios móviles de 8 horas, 24 horas y el promedio anual; siguiendo las especificaciones establecidas en la NOM-022-SSA1-2010. Cabe mencionar que se modelaron los primeros cinco valores más altos; sin embargo, las figuras con isolíneas presentadas en este estudio se refieren al valor más alto obtenido.

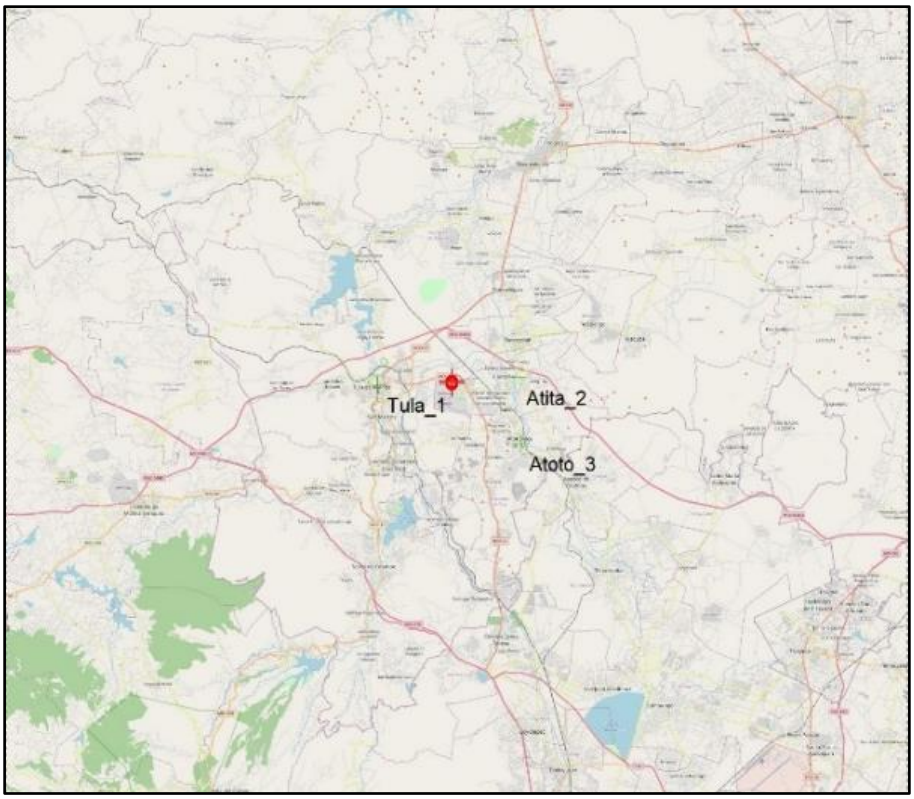


Figura 4. Receptores discretos en la zona de estudio para el análisis de concentración de SO_2, referentes a estaciones del SINAICA. Elaboración propia.

Para el análisis de las concentraciones de SO_2 en la zona de estudio, se establecieron receptores dentro del modelo para comparar con información del Sistema Nacional de Información de la Calidad del Aire (SINAICA) (Tabla 8. a la CTT son: Praderas del Llano, Unidad Habitacional de Antonio Osorio de León, Empleados PEMEX, El Llano, San Pedrito Alpuyeca, Tula de Allende, San Marcos, Ignacio Zaragoza, La Amistad, Bomintzha, Residencial Arboledas, Progreso, Tlamaco, Atotonilco de Tula, Cardonal, Atitalaquia, Tlalminulpa, Doxey, Tlaxcoapan y Teocalco (Tabla 8 y Figura 5).

Tabla 8. Estaciones del SINAICA tomadas como referencia. Elaboración propia con información (SINAICA, 2019).

Receptor	Coordenada UTM X (m)	Coordenada UTM Y (m)	Elevación (msnm)
Estación Atitalaquia	476791.68	2218152.70	2094.08
Estación Atotonilco	477093.42	2212243.91	2167.48
Estación Tula	464437.29	2217495.25	2036.00

La figura 5 muestra la ubicación de las localidades más próximas a la CTT: Praderas del Llano, Unidad Habitacional de Antonio Osorio de León, Empleados PEMEX, El Llano, San Pedrito Alpuyeca, Tula de Allende, San Marcos, Ignacio Zaragoza, La Amistad, Bomintzha, Residencial Arboledas, Progreso, Tlamaco, Atotonilco de Tula, Cardonal, Atitalaquia, Tlalminulpa, Doxey, Tlaxcoapan y Teocalco.

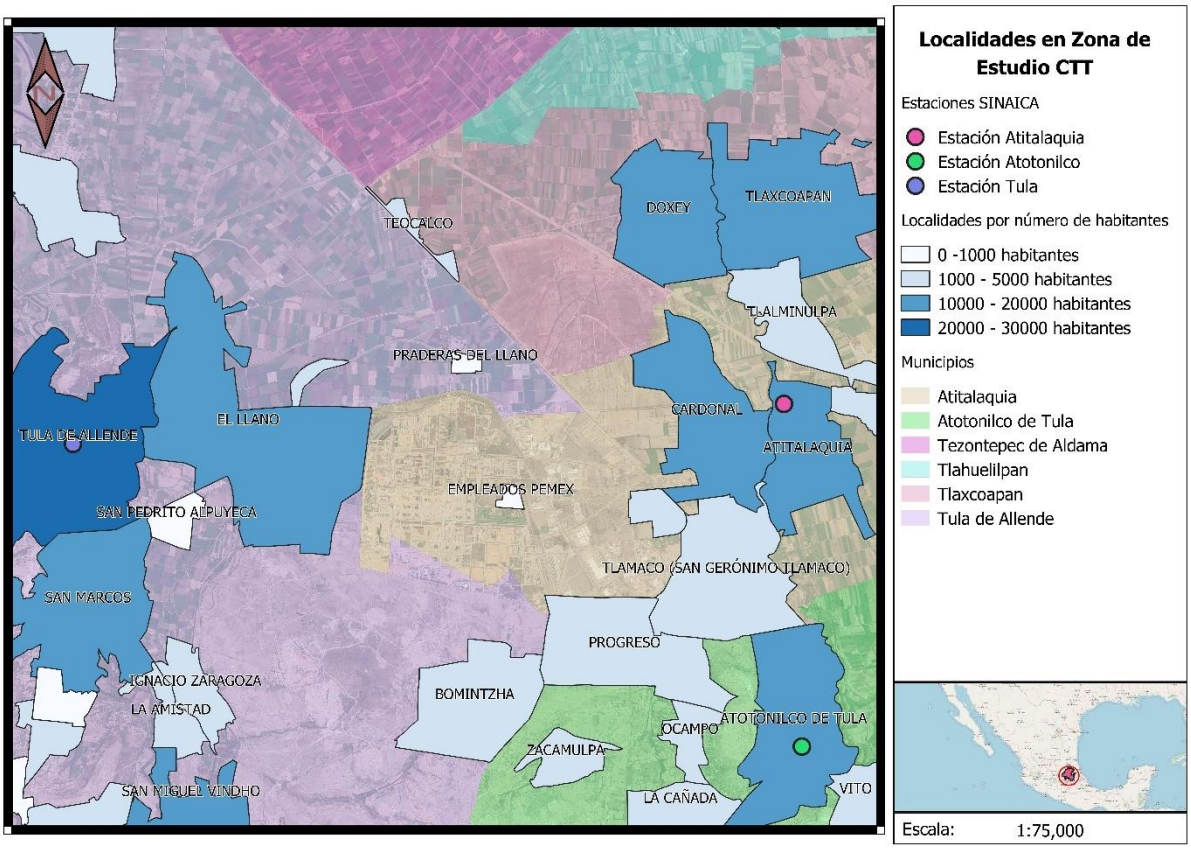


Figura 5. *Localidades de Hidalgo en la zona de estudio. Elaboración propia.*

Aunado a lo anterior, la tabla 5 presenta la población reportada para cada una de las localidades cercanas a la CTT. En el año 2019, un total de 121,135 personas se encontraban en la zona definida para el estudio, es decir, un radio de 5km al tomar como origen la ubicación de la CTT.

Tabla 5. Número de habitantes en localidades cercanas a la CTT. (INEGI, 2019).

#	Nombre	Localidad	Habitantes
1	Atitalaquia	Urbana	6,322
2	Atotonilco de Tula	Urbana	8,154
3	Bomintzha	Urbana	3,568
4	Cardonal	Urbana	9,090
5	Doxey	Urbana	7,066
6	El Llano	Urbana	14,559
7	Empleados PEMEX	Rural	296
8	La Amistad	Rural	1401
9	Ignacio Zaragoza	Rural	2,337
10	Praderas del Llano	Rural	138
11	Progreso	Urbana	2,460
12	Residencial Arboledas	Rural	1,103
13	San Marcos	Urbana	12,779
14	Teocalco	Rural	1,123
15	Tlalminulpa	Rural	2,486
16	Tlamaco (San Gerónimo Tlamaco)	Urbana	3,285
17	Tlacoaxpan	Urbana	14,241
18	Tula de Allende	Urbana	28,577
19	Unidad Habitacional Antonio Osorio de León (Bojay)	Rural	2,119
		Total	121,135

Topografía

Con la herramientoa “WebGIS” del módulo de terreno en el programa “AERMOD View” se estableció la topografía de la zona de estudio. Para ello, se descargaron los componentes de STRM3 (Shuttle Radar Topography Mission) de la NASA para el área de estudio. Con ello se obtiene un modelo de elevación a 30 m de resolución, resultando en las curvas de nivel y caracterización topográfica del terreno en el área de estudio (Figura 6).

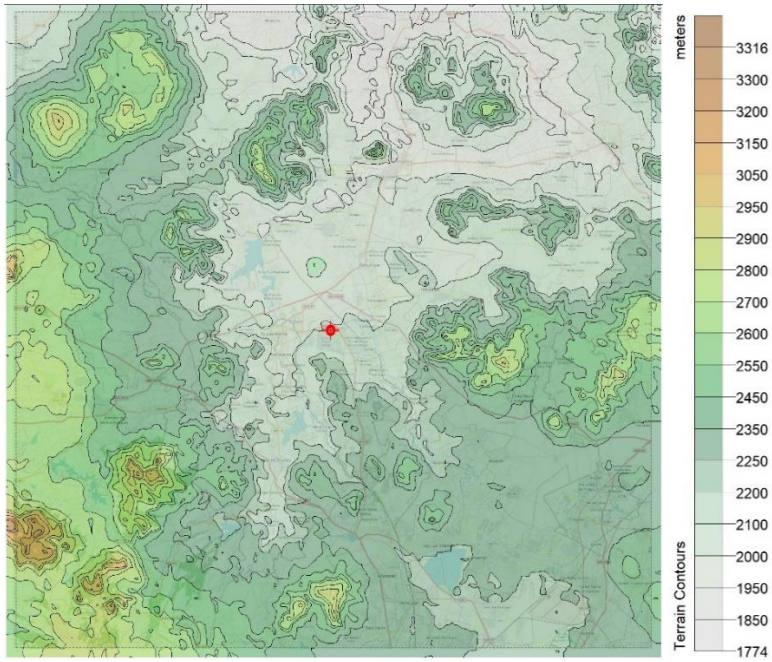


Figura 6. Topografía del área de estudio. Elaboración propia.

El punto de emisión se encuentra en casi el punto más bajo de un valle. Con los puntos más altos al Suroeste, mientras que al norte se extiende el valle.

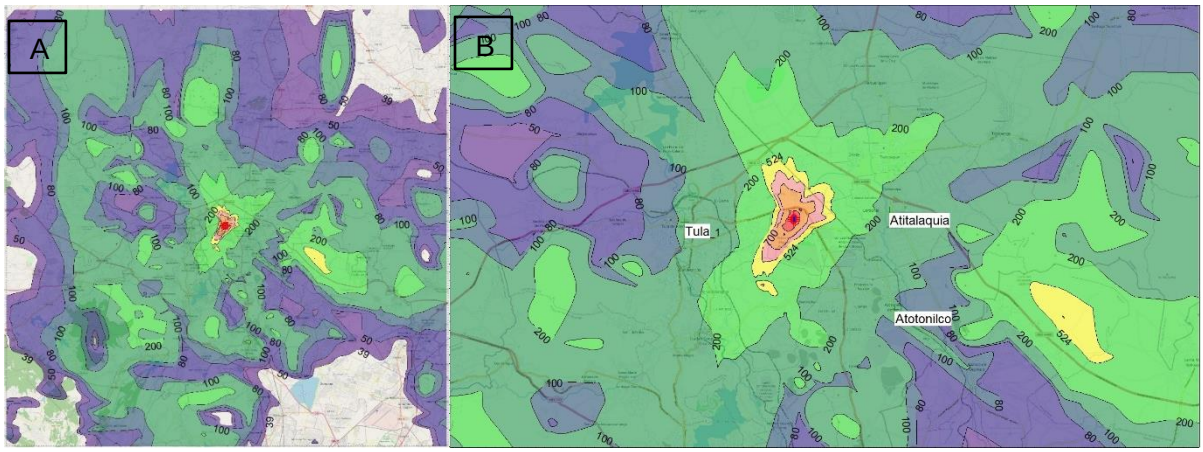
Normas sobre calidad del aire

En cuanto a las normas de salud, se tiene la situación de que la regulación del SO_2 en el aire se emitió en 2010 y se actualizó en 2019. Por ese motivo se hace una primera modelación comparando los resultados con la norma de 2010 y luego se hace otra modelación comparando con la norma de 2019. Esta última resulta más estricta que la anterior y los resultados reflejan esa diferencia.

Concentración de Dióxido de Azufre a 8 horas (Norma de 2010)

Las estimaciones mencionadas en secciones anteriores fueron utilizadas como insumos para modelar la dispersión de SO_2 emitido por la CTT en el área de estudio. El resultado arroja que, para un promedio de 8 horas, existen concentraciones de SO_2 por encima del valor máximo permisible según la NOM-022-SSA1-2010 que es de 524 µg/m^3 en un área de aproximadamente 18 km^2 alrededor del complejo industrial donde se encuentra la CTT (Figura 7-C).

También se observaron áreas importantes con elevadas concentraciones cercanas a la localidad de Apasco en el Estado de México (~10km^2), al sureste de los puntos de emisión; y cerca de la localidad de Bomintzha al sur de la CTT (1 km^2).



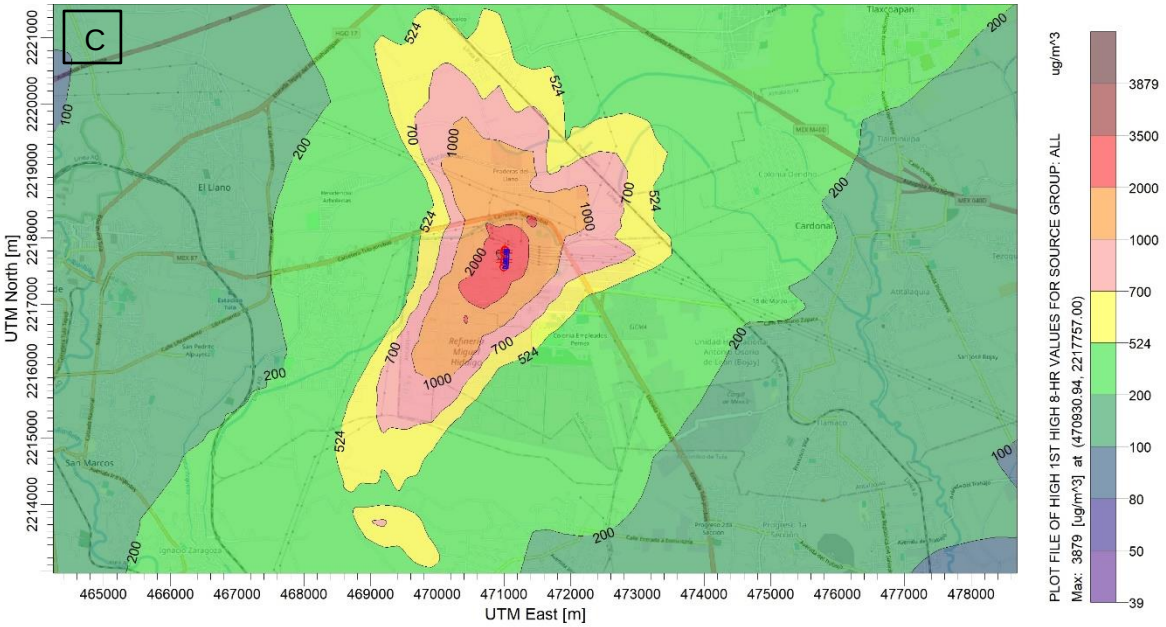


Figura 7. Isolíneas de concentración para valor máximo de concentración de SO_2 en un promedio de 8 horas (A: Área de Estudio 40km^2; B: Zona Tula-Apasco; C: Concentración en poblaciones aledañas). Elaboración propia.

Las concentraciones mostradas en la Figura 7 representan el valor máximo modelado. En esta tabla se muestran los 5 valores más altos que se presentaron en los receptores referentes a las estaciones de monitoreo del SINAICA en Atitalaquia, Atotonilco y Tula. Se concluye que, debido a su mayor cercanía al punto de emisión, las concentraciones en Atitalaquia y Tula siempre son mayores que las de Atotonilco. Mientras que, en este último, cuatro de los cinco valores se presentaron durante el mes de febrero.

Tabla 9. Concentraciones pico en receptores. Elaboración propia.

Orden	Concentración Pico (µg/m^3)	Receptor	Fecha de Evento Pico, Hora de Inicio
1	160.12	Estación Atitalaquia	29/05/2019, 8
1	123.21	Estación Atotonilco	28/02/2019, 24
1	104.79	Estación Tula	13/02/2019, 16
2	157.44	Estación Atitalaquia	16/04/2019, 24
2	93.29	Estación Atotonilco	13/02/2019, 16
2	102.80	Estación Tula	20/06/2019, 16
3	129.99	Estación Atitalaquia	13/02/2019, 16
3	91.90	Estación Atotonilco	05/02/2019, 16
3	99.64	Estación Tula	15/08/2019, 16
4	119.24	Estación Atitalaquia	20/06/2019, 16
4	87.13	Estación Atotonilco	20/06/2019, 16
4	95.50	Estación Tula	02/02/2019, 16
5	115.58	Estación Atitalaquia	15/08/2019, 16
5	85.42	Estación Atotonilco	23/02/2019, 16
5	88.75	Estación Tula	20/07/2019, 16

Tal como se aprecia en la figura 8, la localidad de Praderas del Llano (138 habitantes) se encuentra en una zona con concentraciones mayores a 1000 µg/m^3, cerca de dos veces más que el valor máximo permisible de la norma oficial de 524 µg/m^3 (SSA, 2010). También, las

localidades de Teocalco (1,123 habitantes) y El Llano (14,559 habitantes) presentan áreas con concentraciones mayores al límite máximo permitido en la legislación de 2010.

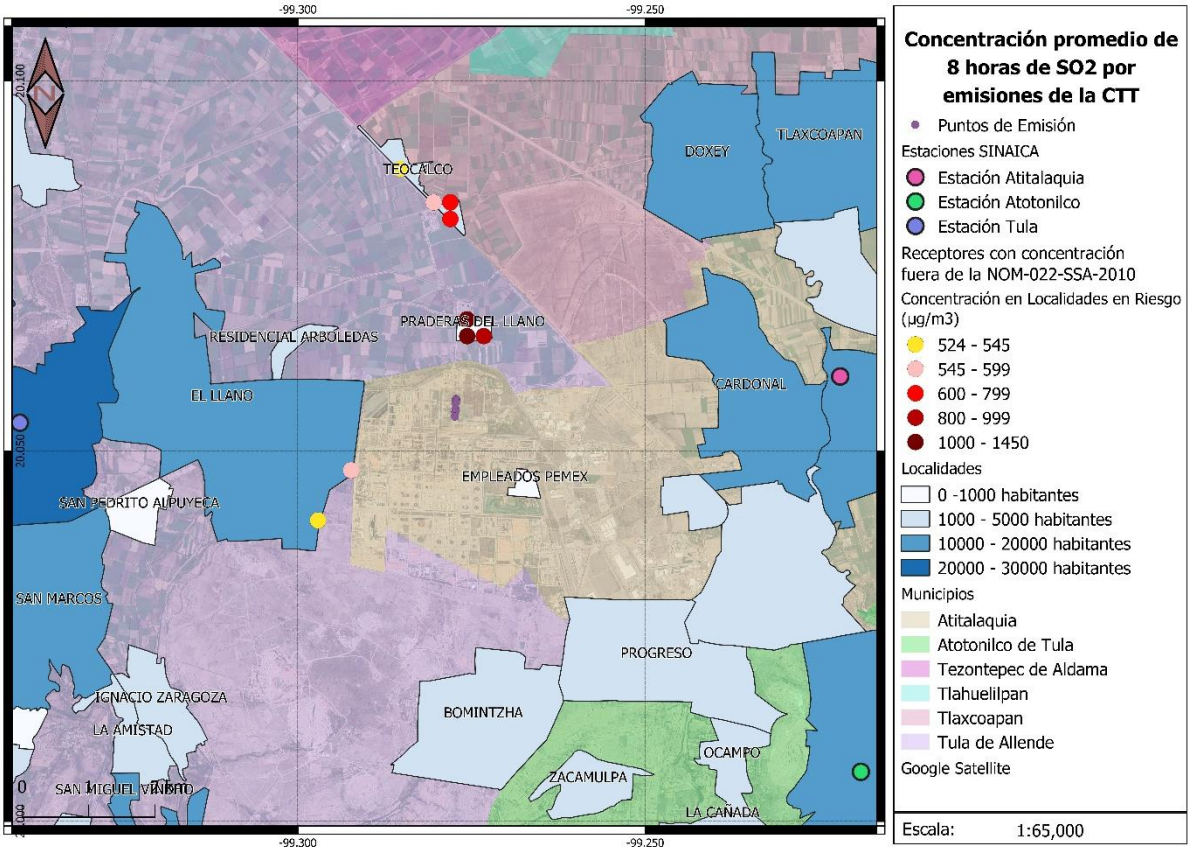
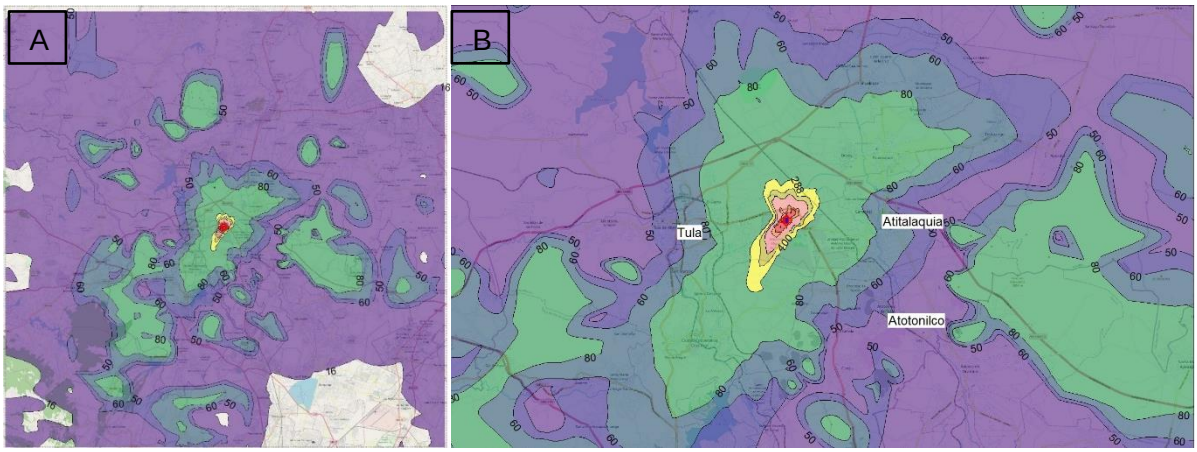


Figura 8. Receptores con valores fuera de los límites máximos permisibles de concentración de SO2 según la NOM-022-SSA1-20210. Elaboración propia con información de INEGI, 2019.

Concentración de Dióxido de Azufre a 24 horas (Norma de 2010)

Para el caso de la concentración en un promedio de 24 horas, el área con concentraciones mayores a la NOM-022 que corresponde a 288 µg/m^3, es de alrededor de 11.8 km^2. Igual que en el caso anterior, su figura se ve extendida hacia el Suroeste, siguiendo un patrón esperado según se observa la rosa de vientos de la zona de estudio (Figura 2).



C

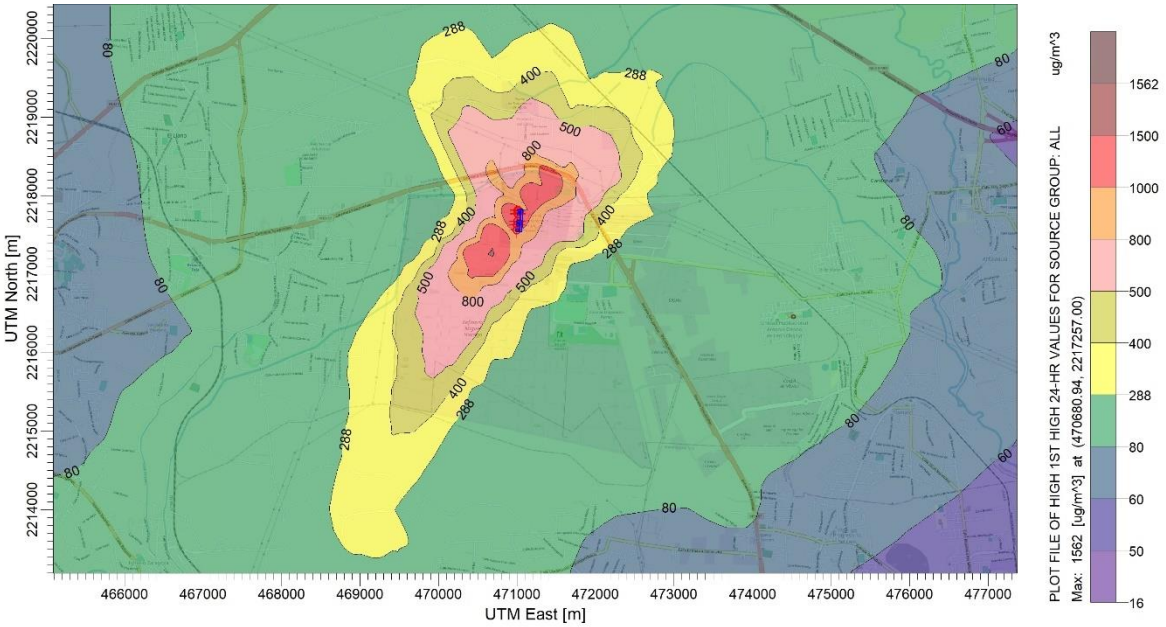


Figura 9. Isolíneas de concentración para valor máximo de concentración de SO_2 en un promedio de 24 horas (A: Área de Estudio 40km^2; B: Zona Tula-Apasco; C: Concentración en poblaciones aledañas). Elaboración propia.

Para este caso, se forman dos zonas de muy alta concentración dentro del complejo industrial de la refinería y la CTT. Las concentraciones detectadas en los receptores de referencia (estaciones del SINAICA) representan una quinta parte del límite máximo establecido en la norma de 2010 (288 µg/m^3) seguramente a causa de su localización.

Tabla 10. Concentraciones pico en receptores sensitivos. Elaboración propia.

Orden	Concentración Pico (µg/m^3)	Receptor	Fecha de Evento Pico, Hora de Inicio
1	67.72	Estación Atitalaquia	29/05/2019
1	52.53	Estación Atotonilco	28/02/2019
1	58.66	Estación Tula	20/06/2019
2	62.26	Estación Atitalaquia	14/02/2019
2	46.98	Estación Atotonilco	20/06/2019
2	45.33	Estación Tula	02/03/2019
3	61.51	Estación Atitalaquia	20/06/2019
3	42.92	Estación Atotonilco	17/11/2019
3	39.75	Estación Tula	19/06/2019
4	58.19	Estación Atitalaquia	16/04/2019
4	42.07	Estación Atotonilco	30/10/2019
4	39.15	Estación Tula	22/06/2019
5	53.16	Estación Atitalaquia	18/10/2019
5	40.14	Estación Atotonilco	24/06/2019
5	39.15	Estación Tula	01/05/2019

Para los promedios de 24 horas, como se puede observar en la tabla 10, la distancia de las estaciones al punto de emisión no tiene tanta influencia. Existen casos en los que la estación Atotonilco (a 8 km de la CTT) presenta en ocasiones concentraciones mayores a la estación de Tula (a 6km de la CTT) debido seguramente al patrón del viento.

Las localidades en riesgo por encontrarse en zonas donde la concentración de SO_2 es mayor a los límites máximos permisibles son Praderas del Llano y en un menor grado, los límites de

la localidad del Llano. Como se puede observar en la Figura 10, aunque la unidad habitacional de los Empleados PEMEX se encuentre muy cerca de las fuentes de emisión, las características meteorológicas permiten que la dispersión se extienda a zonas Noreste y Suroeste, dejando libre de muy altas concentraciones a esta localidad.

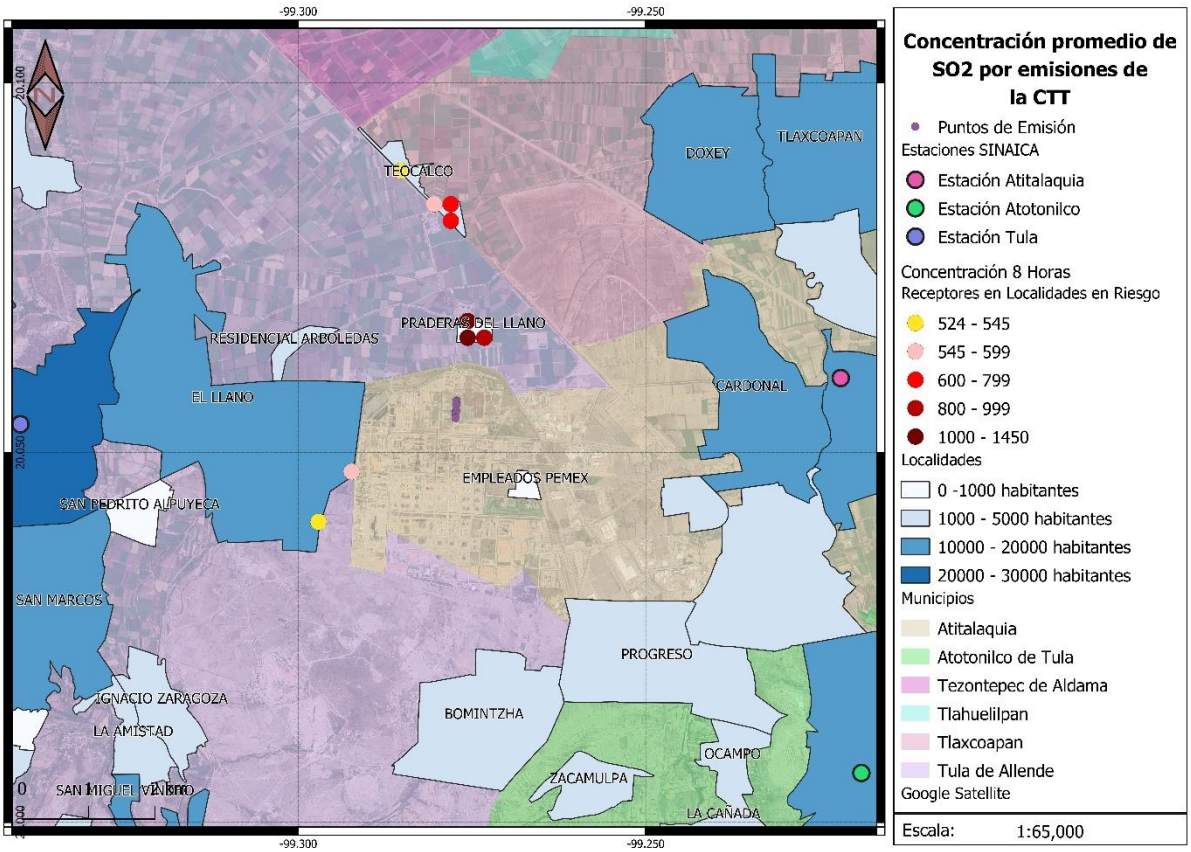


Figura 10. Receptores con valores fuera de los límites máximos permisibles de concentración de SO2 según la NOM-022-SSA1-2010. Elaboración propia.

Concentración promedio anual de Dióxido de Azufre (Norma 2010)

La concentración anual de SO_2 se encuentra limitada a 66 µg/m^3 según la NOM-022-SSA1-2010. El modelo presentó para este caso líneas de concentración más simétricas, sin embargo, aún se ven más extendidas hacia el sureste por las condiciones meteorológicas de la zona. La isolínea que contiene concentraciones mayores al límite cubre un área de más de 13 km^2; sin embargo, el valor límite para el gráfico (6 µg/m^3) cubre una menor área de la zona de estudio.

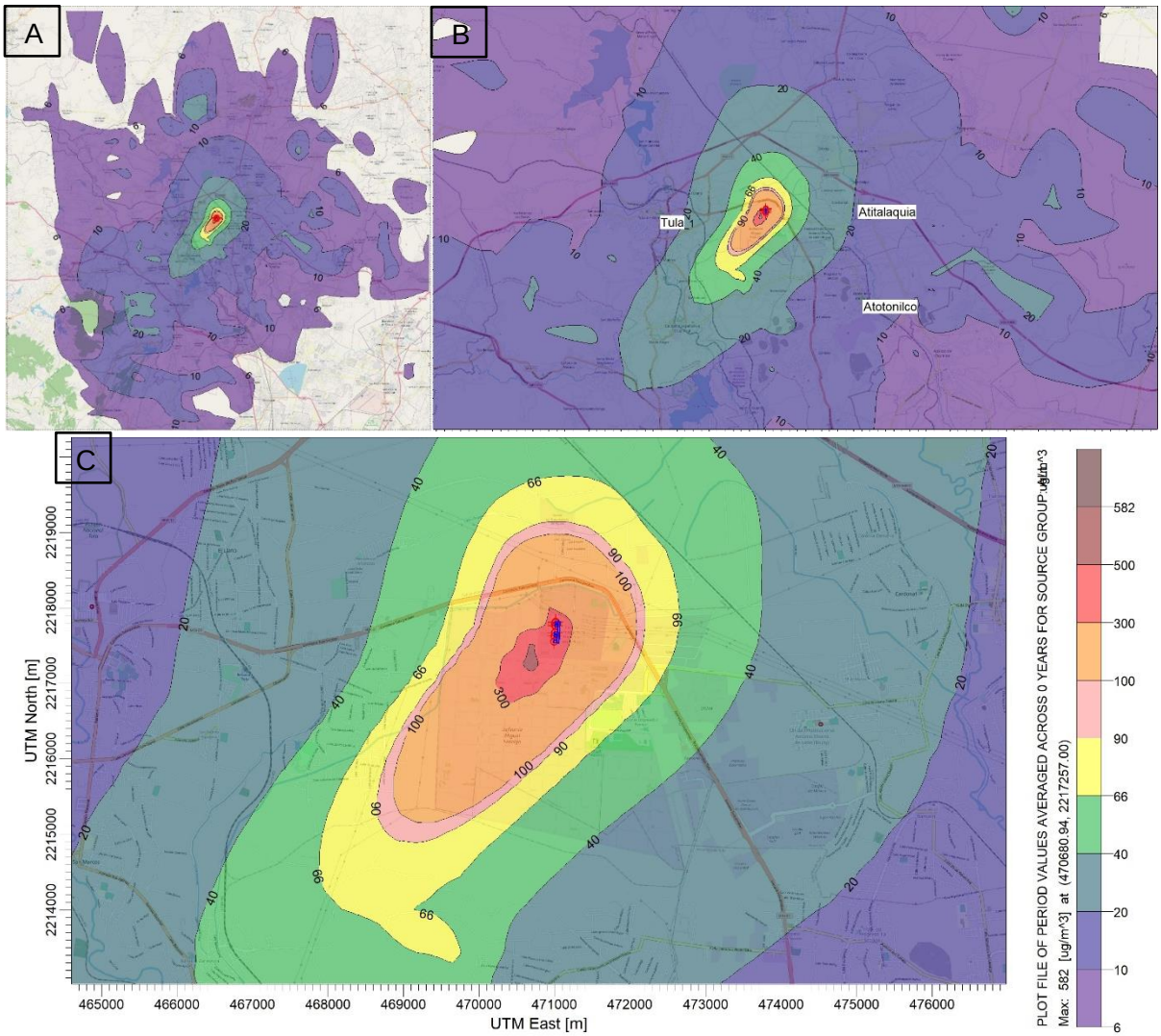


Figura 11. Concentración promedio anual de SO2 en zona de estudio. Elaboración propia

Sin embargo, como en los casos anteriores, los receptores referentes a las estaciones del SINAICA no perciben valores superiores al límite de la norma. Por otra parte, se estimó la contribución de las emisiones de la CTT en las mediciones de las estaciones de monitoreo. (Tabla 11).

Tabla 11. Concentraciones picos en receptores de estaciones SINAICA. Elaboración propia.

Concentración Pico (µg/m³)	**Concentración en estaciones SINAICA (µg/m³)**	**Contribución de CTT en SO_2 de mediciones de monitoreo en zona de estudio**	**Receptor**
19.05	23.15	82.3%	Estación Atitalaquia
12.79	15.45	82.8%	Estación Atotonilco
14.84	15.83	93.7%	Estación Tula

Tal como se aprecia en la figura 12, la concentración de SO_2 en su dimensión anual, es mayor que el límite máximo permisible de la NOM-022-SSA1-2010 en las localidades de Praderas del Llano, El Llano y la Unidad Habitacional de Empleados PEMEX.

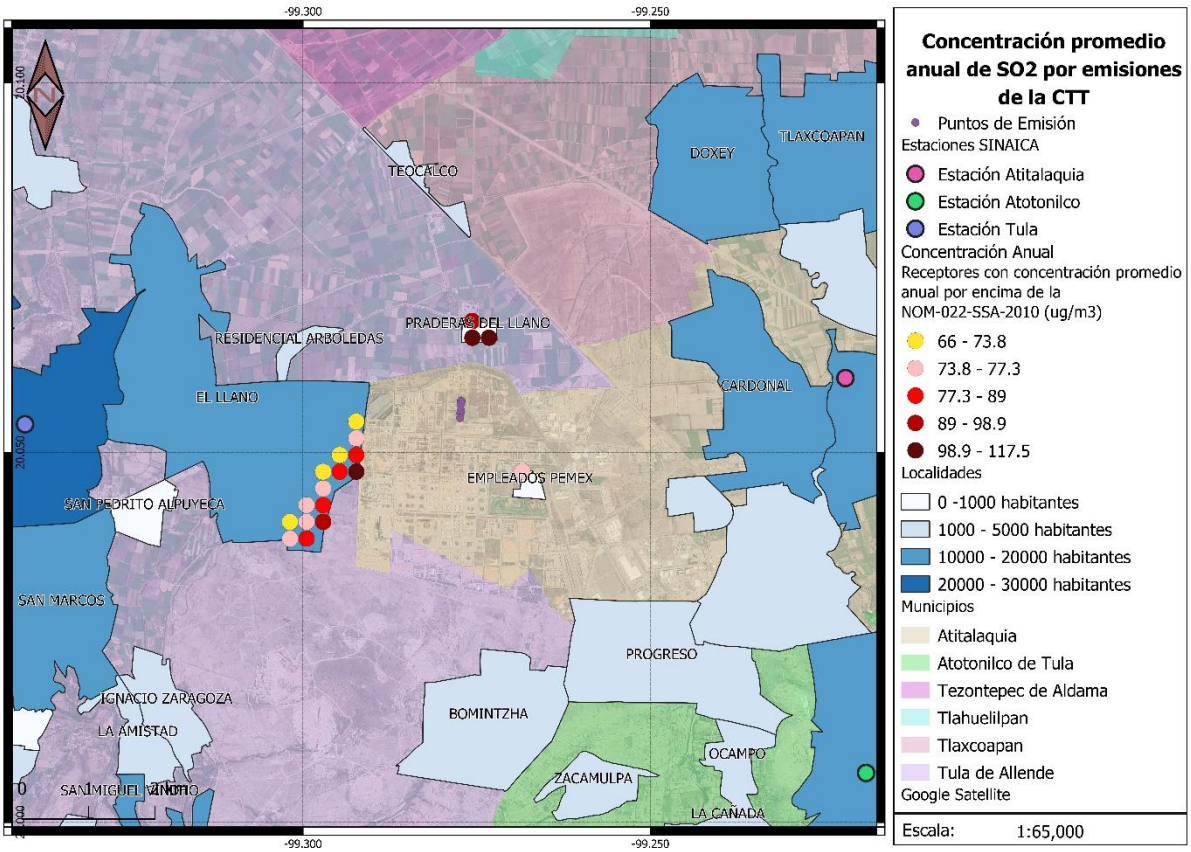


Figura 12. Localidades en riesgo por altas concentraciones según la NOM-022-SSA1-2010. Elaboración propia

Las concentraciones modeladas en los receptores de referencia localizados en Tula de Allende, Atotonilco de Tula y Atitalaquia no resultaron por encima de los límites permitidos por la NOM-022-SSA1-SEMARNAT-2010. Sin embargo, al realizar una comparación con los valores reportados por las estaciones de monitoreo respectivas del SINAICA, es posible atribuir más del 80% de la concentración promedio anual de SO_2 en dichos puntos a la quema de combustóleo en la CTT.

Aunado a lo anterior, las diferentes modelaciones de dispersión de SO_2 (concentración promedio en 8 horas, 24 horas y anual) identificaron áreas mayores a 10 km^2 donde se superaba el límite máximo permisible de la NOM de 2010. Particularmente, las localidades de Praderas del Llano, Teocalco y una pequeña parte de El Llano están localizadas en un área con alto grado de contaminación del aire por efecto del dióxido de azufre. De tal forma que, más de 1000 habitantes se consideran en riesgo por exposición continua a altas concentraciones de contaminantes atmosféricos.

Concentración de Dióxido de Azufre a 24 horas (Norma de 2019)

Es importante señalar que se consideraron los límites máximos permisibles señalados en la NOM-022-SSA-2010, debido a que su actualización de 2019 fue publicada en el Diario Oficial de la Federación el 20 de agosto de ese año, entrando en vigor 120 días naturales posteriores a su publicación. Por lo que su vigencia en 2019 no se considera representativa. En 2019, la actualización de la norma mexicana se adaptó al estándar primario de los valores de la EPA

americana. Sin embargo, se estableció también un límite para el promedio de 24 horas, el cual no existe en los NAAQS.

A continuación, se comparan los límites de concentración de SO_2 de la normatividad existente en el país, con la versión anterior de la NOM y los estándares internacionales en materia de SO_2. Como se puede observar en la Tabla 12, la NOM-022 del 2010 tiene valores muy altos, solamente los estándares anteriores a la actualización de 2010 de los Estándares Nacionales de Calidad del Aire de los Estados Unidos (NAAQS) son mayores. En contraste, la directriz de la OMS referente a la concentración de SO_2 en 24 horas (20 µg/m^3), el más bajo de todos, además de que fue establecido con base en las consideraciones de que los efectos nocivos sobre la salud están asociados a niveles de SO_2 muy inferiores a los aceptados normalmente (OMS, 2018).

Tabla 12. Comparativa de límites de concentración de SO_2. Fuente: (SSA, 2010; SSA, 2019; EPA, 2010; OMS, 2018).

Horas	NOM-022-SSA1-2010	NOM-022-SSA1-2019	NAAQS (EPA) 2010	AQG (OMS)* 2005
1 hora	-	196.5 µg/m^3 (0.075 ppm)	196.5 µg/m^3 (75 ppb)	-
8 horas	524 µg/m^3 (0.200 ppm)	-	-	-
24 horas	288 µg/m^3 (0.110 ppm)	104.8 µg/m^3 (0.04 ppm)	366.8 µg/m^3 ** (0.140 ppm)	20 µg/m^3 (0.007 ppm)
Anual	66 µg/m^3 (0.025 ppm)	-	78.6 µg/m^3 ** (0.03 ppm)	-

* La Guía de calidad del aire de la OMS (AQG) incorpora objetivos interinos de reducción de emisiones de SO_2 en promedio de 24 horas. El primero siendo de 125 µg/m3, mientras que el segundo objetivo interino de 50 µg/m3 se considera una meta razonable y posible para muchos países en desarrollo.

** Se refiere a los estándares previos a la actualización de 2010 de los NAAQS de la EPA.

En la Figura 13, se muestra el mismo modelo mencionado anteriormente, pero con el límite máximo permisible para el promedio de 24 horas establecido en la revisión de 2019 de la NOM-022 (104.8 µg/m^3). Para este caso, existe un polígono con concentraciones mayores al límite con una superficie mayor a 70 km^2 alrededor de la fuente de emisión. 13 localidades de Hidalgo se encuentran dentro del polígono mencionado: Teocalco, Praderas del Llano, Residencial Arboledas, Ignacio Zaragoza, La Amistad, Bominthza, Cardonal, Doxey, Bojay, Empleados PEMEX, Cardonal, Tlalminulpa y Tlaxcoapan.

En la zona del municipio de Apasco, Estado de México, existe otro polígono de tamaño considerable que rebasa los valores de concentración máxima. Sin embargo, los receptores de esta zona se encontraban muy espaciados por lo que no se midió la extensión de su superficie. Además de que no se identificaron localidades dentro de este polígono.

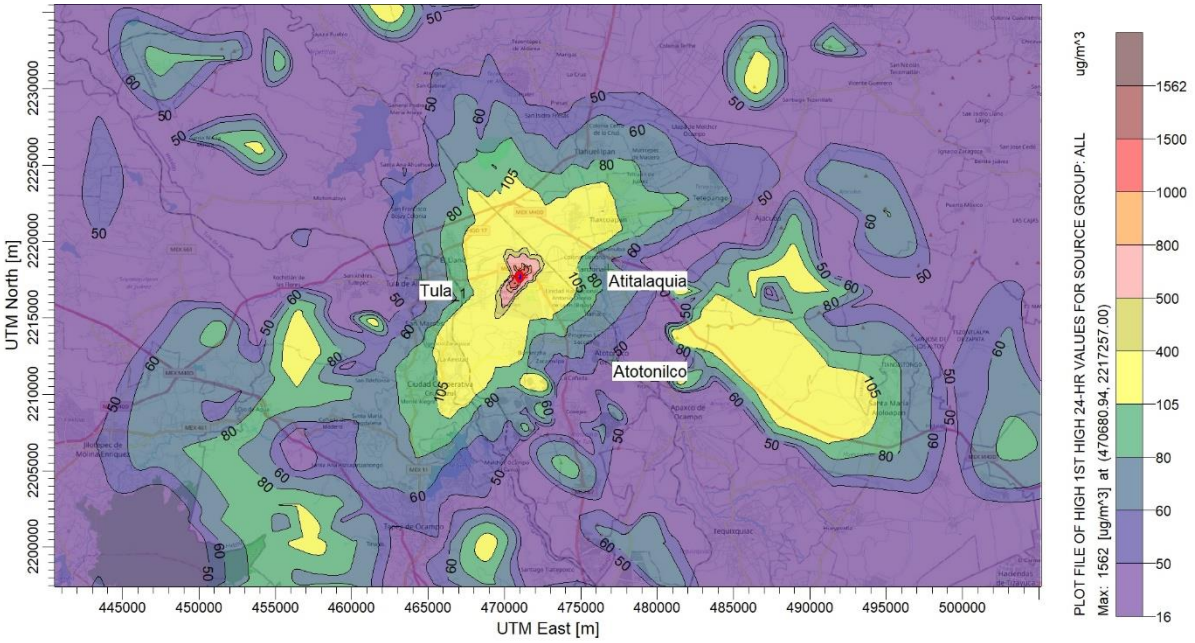


Figura 13. Límite máximo permisible de la NOM-022-SSA1-2019. Elaboración propia

La reducción de más del 50% en el nuevo límite de concentración por la revisión de la NOM-022 (104.8 µg/m^3) afecta a más del doble de localidades que su versión anterior (288 µg/m^3). Aun así, se destaca que éste es un valor mucho más alto que la directriz de la OMS, basada en las afectaciones a la salud por concentraciones mayores a 20 µg/m^3. Como se observa en la Figura 14, las concentraciones de la localidad de Praderas del Llano son aproximadamente 6 veces mayores al nuevo estándar mexicano.

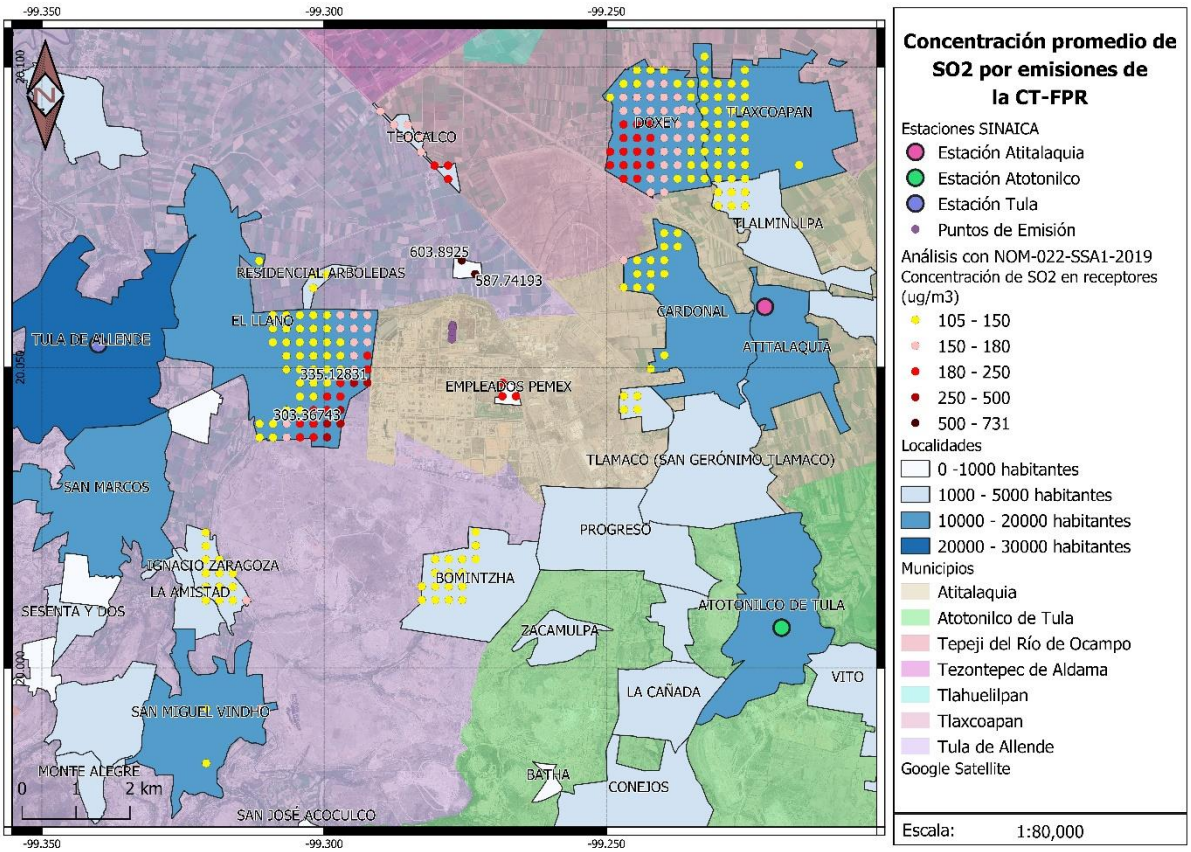


Figura 14. Concentración máxima en promedio de 24 horas, ajustada a los límites de la NOM-022-SSA1-2019. Elaboración propia.

Cabe mencionar que no solo el valor más alto de concentración modelado rebasa el límite máximo permisible y afecta a varias localidades de la zona de Tula. La Figura 15 muestra los siguientes 4 valores más altos resultantes del modelo, donde se sobrepasa la concentración máxima establecida por la NOM-022-SSA1-2019. En esta misma figura, se observa que las localidades de El Llano, Ignacio Zaragoza, Empleados PEMEX, Pradera del Llano, Teocalco y Doxey siempre cuentan con puntos que rebasan el límite máximo establecido.

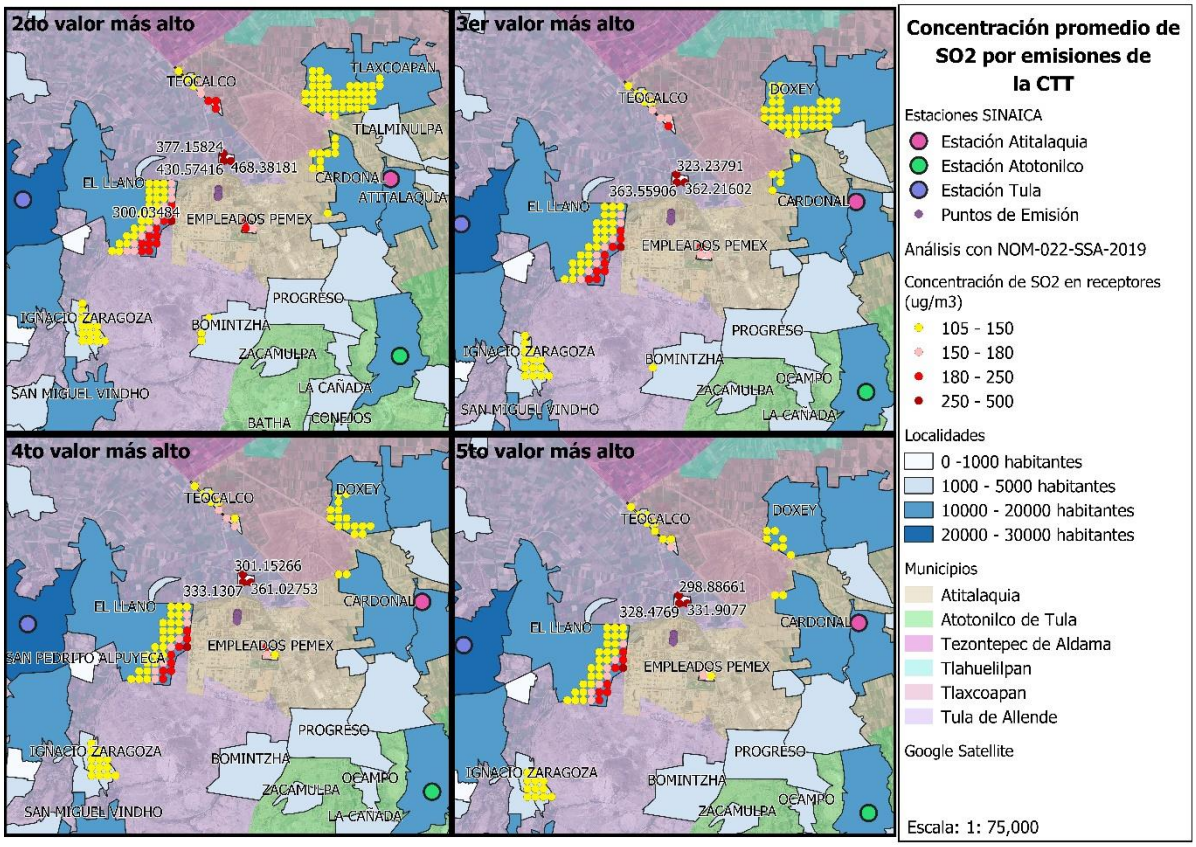


Figura 15. Localidades en riesgo por altas concentraciones de SO2 de la CTT según NOM-022-SSA1-2019. Elaboración propia.

Finalmente, como parte del modelo, se establecieron receptores espaciados en las regiones más alejadas al sur de la zona de estudio, con motivo de conocer la influencia de las emisiones de la CTT, en áreas cercanas a la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. Aunque se desconoce la localización puntual de la estación Cuautitlán (Tabla 13) de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA), se estableció como referencia para comparar las concentraciones de SO_2.

Tabla 13. Concentración promedio anual de 2019 para estación Cuautitlán. (RAMA, 2021)

ID Estación	Promedio Anual de concentración de SO_2	Influencia de la CTT
CUT (Cuautitlán)	4.821 µg/m³	66 %

En la Figura 16, se muestran los valores de concentración en receptores modelados en el área sur de la zona de estudio, cercana a la zona metropolitana. Se destaca que, aunque el límite inferior de isolíneas de concentración en la gráfica es de 6 µg/m³, sí se tiene registro de las concentraciones con tales valores en la zona.

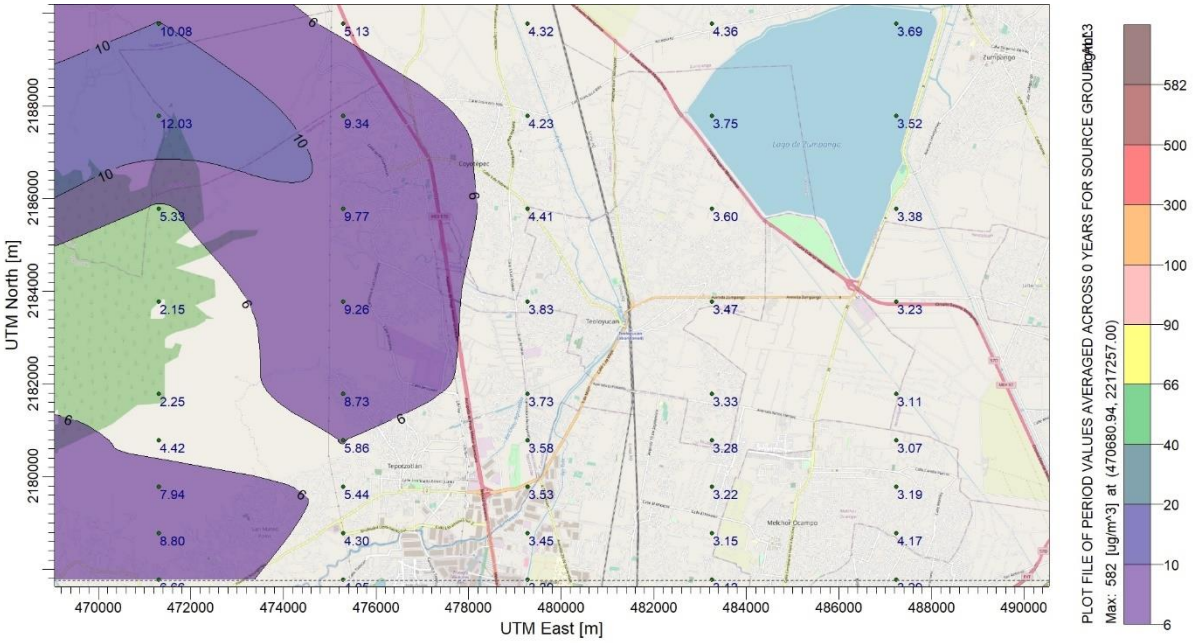


Figura 16. Concentración Promedio anual de SO_2 en la zona de monitoreo de la estación Cuautitlán. Elaboración propia.

7 Discusión

Por un lado, el título de permiso para la generación de energía eléctrica otorgado a la CTT (Clave E/1706/GEN/2015) por la CRE (resolución número RES/944/2015) establece que la central termoeléctrica está habilitada a operar con gas natural. No obstante, a partir de la solicitud de información en la Plataforma Nacional de Transparencia referente al uso de combustible por la CFE en la CTT, se identificó que al menos un 69% de la generación eléctrica de la CTT en el año 2019 fue a partir de combustóleo (Folio: 1816400077620).

Aunado a lo anterior, la NOM-086-SEMARANT-SENER-SCFI-2005 sobre especificaciones de los combustibles fósiles para la protección ambiental establece que los combustibles industriales líquidos no rebasarán el 2% en peso de contenido de azufre en zonas críticas. Considerando que el corredor de TVA es reconocido desde 1989 como dicha zona, el uso de combustibles con contenido de azufre superior al 2% queda estrictamente fuera de la normativa vigente. No obstante, a partir de la solicitud de información, se identificó que el valor reportado por CFE referente a la concentración de azufre utilizado en la CTT tenía un valor de 3.9% anual.

Con base al análisis energético de los combustibles utilizados por la CFE en la CTT, así como sus factores de emisión pertinentes, es posible identificar que más del 99% de las emisiones de SO2 (100,099 ton/año) generadas en la CTT se deben al uso de combustóleo. Sin embargo, su aporte energético solo se aproxima a un 70% de la generación anual total de la central.

Si bien el modelo de dispersión de SO_2 en AERMOD estimó las concentraciones del contaminante en un área de 6,400 km^2, el presente estudió se enfocó en el análisis de las emisiones para la zona más próxima a la fuente de emisión. Esta zona de estudió consistió en área de 81 km^2 con una población aproximada de 120 mil habitantes en 19 localidades.

8 Conclusiones

El estudio muestra que, si la planta tiene un régimen de operación similar a 2019 para los siguientes años, las violaciones a las normas sobre Calidad del Aire de la Secretaría de Salud, tanto anteriores como actuales, son graves y ponen en riesgo la salud de los habitantes de la zona de influencia de las emisiones de la CTT.

El uso del combustible líquido combustóleo con un contenido de azufre de 3.9% en la CTT ocasionó la emisión de más de 100 mil toneladas de SO_2 en el año 2019. Con lo anterior se infringe la NOM-086-SEMARNAT-SENER-SCFI-2005, en la que se establece un límite de 2% de contenido de azufre en combustibles líquidos industriales para Zonas Críticas. Además, el título de permiso para generación de energía eléctrica otorgado por la CRE a la CTT sólo autoriza el uso de gas natural; la operación en 2019 viola flagrantemente esta disposición.

Las características meteorológicas y topográficas de la Zona Crítica del Corredor TVA dirigen la dispersión de contaminantes hacia el Sur lo cual contribuye al deterioro de la calidad atmosférica de la Zona Metropolitana del Valle de México como ha sido demostrado en otros estudios.

Particularmente, los habitantes de las localidades Pradera del Llano, Teocalco y El Llano se encuentran en una zona de riesgo muy alta por presencia de concentraciones fuera de los límites máximos permisibles según la NOM-022-SSA1-2010 y por consecuente de la vigente NOM-022-SSA1-2019, ya que repercute directamente en la calidad de vida de más de mil personas debido a la alta exposición de contaminantes atmosféricos.

Los estándares de concentración límite de SO_2 en México fueron actualizados en 2019, ajustándose a lo establecido por la EPA desde 2010 para los promedios horarios de concentración. La comparativa de las concentraciones modeladas según la normatividad aplicable al caso de estudio y la normatividad vigente resulta en un mayor número de localidades en riesgo por exposición a altas mayores al límite normado. Aunado a esto, es importante considerar que la directriz de la OMS es aún 5 veces más estricta que lo establecido en la NOM-022-SSA1-2019.

9. Recomendaciones

- Estimar externalidades referentes al impacto a la salud (mortalidad, morbilidad) y ambiente.
- Hacer modelaciones multianuales
- Expandir modelación y análisis a otros contaminantes criterio como material particulado y óxidos de nitrógeno.
- Tomar las medidas legales correspondientes ante la violación a la normatividad en materia de emisiones y de concentración de contaminantes en el aire respirable.
- Colocar estaciones de monitoreo en puntos clave según la rosa de vientos, para reportar en tiempo real concentración de SO_2.

- Contar con los datos de generación horaria de la CTT para el año 2020 para analizar concentraciones en zona de estudio según la normatividad vigente.

10. Referencias

Alvarado-Vázquez, I., A. (2020). Diseño de la red de depósito atmosférico en la zona crítica de Tula-Vito-Apasco. UNAM. México.

Atkins, P. W., & Jones, L. (2006). *Principios de Química.* Nueva York: Editorial Médica Panamericana.

Centro de Investigación Económica y Presupuestaria CIEP. (20 de agosto 2019). Las finanzas públicas del cambio climático. Origen, costos y alternativas de los gases de efecto invernadero. Disponible online en: https://ciep.mx/las-finanzas-publicas-del-cambio-climatico-origen-costos-y-alternativas-de-los-gases-de-efecto-invernadero/ (15 de marzo 2021).

CEPAL & SEMARNAT. (2004). Evaluación de las externalidades ambientales de la generación termoeléctrica en México. México.

Choudhary, M. P., Garg, V. (2013). Causes, Consequences and Control of Air Pollution. All India Seminar on Methodologies for Air Pollution Control, held at MNIT.

Cimorelli A J, Perry S G, Lee R F, Paine R J, Venkatram A, Weil J C and Wilson R B 1996 Current progress in the AERMIC model development program 89th Annual Meeting Air and Waste Management Association (Pittsburgh, PA)

Cimorelli, A. J., , S. G. Perry, , A. Venkatram, , J. C. Weil, , R. J. Paine, , R. B. Wilson, , R. F. Lee, , and W. D. Peters. (2003). AERMOD description of model formulation. U.S. Environmental Protection Agency Rep. EPA 454/R-03-002d, 85 pp.

Cimorelli, A. J., Perry, S. G., Venkatram, Al., Weil, J. C., Paine, R. J., Wilson, R. B., Lee, R. F., Peters, W. D., Brode, R. W. (2005). AERMOD: A Dispersion Model for Industrial Source Applications. Part I: General Model Formulation and Boundary Layer Characterization. Journal of Applied Meteorology 44(5). DOI: 10.1175/JAM2227.1

CONUEE. (2019). *Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía.* Retrieved 02 16, 2021, from Lista de Combustibles 2019 que se considerarán para identificar a los usuarios con un patrón de alto consumo, así como los factores para determinar las equivalencias en términos de barriles equivalentes de petróleo: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/428334/Lista_de_combustibles_2019.pdf

Collett, R. S., & Oduyemi, K. (1997). Air quality modelling: a technical review of mathematical approaches. *Meteorological Applications*, *4*(3), 235-246. https://doi.org/10.1017/S1350482797000455

CRE. (31 de Diciembre de 2015). *Comisión Reguladora de Energía.* Obtenido de Permisos de Generación.

DGCENICA. (2008). Informe final de la Campaña de Monitoreo de la Calidad del Aire de la Región Tula-Tepeji-Zumpango.

Environmental Protection Agency EPA. (2018). Technical Assistance Document for the Reporting of Daily Air Quality – the Air Quality Index. Disponible online en: https://www.airnow.gov/sites/default/files/2020-05/aqi-technical-assistance-document-sept2018.pdf (15 de marzo 2021).

EPA. (2020, 09 25). *AP 42.* Retrieved 02 10, 2021, from https://www.epa.gov/air-emissions-factors-and-quantification/ap-42-compilation-air-emissions-factors#5thed

European Environment Agency EEA. (2018). Air pollution: how it affects our health. Disponible online en: https://www.eea.europa.eu/themes/air/health-impacts-of-air-pollution (15 de marzo 2021).

Félix-Arellano EE, Schilmann A, Hurtado-Díaz M, et al. Quick review: air pollution and morbi-mortality by Covid-19. salud publica mex. 2020;62(5):582-589.

Ghorani-Azam, A., Riahi-Zanjani, B., Balali-Mood, M. (2016). Effects of air pollution on human health and practical measures for prevention in Iran. J Res Med Sci. 1;21:65. doi: 10.4103/1735-1995.189646. PMID: 27904610; PMCID: PMC5122104.

Gulia, S., Shrivastava, A., Nema, A. K., Khare, M. (2015). Assessment of Urban Air Quality around a Heritage Site Using AERMOD: A Case Study of Amritsar City, India.

Health Effects Institute HEI. (2020). State of Global Air 2020. Special Report. Boston, MA:Health Effects Institute.

Hernández-Moreno, A. (2020). Modelado de impactos transcuenca en escenarios de cambio de combustible para la generación de energía. Estudio de caso Termoeléctrica “Francisco Pérez Ríos”. UAM. México.

Holmes N S and Morawska L 2006 A review of dispersion modelling and its application to the dispersion of particles: An overview of different dispersion models available Atmos. Environ. 40 5902–28

Holmes, N., Morawska, L. (2006) A Review of Dispersion Modelling and its Application to the Dispersion of Particles: An Overview of Different Dispersion Models Available. Atmospheric Environment, 40(30), pp. 5902-5928.

Holnicki P, Kałuszko A and Trapp W 2016 An urban scale application and validation of the CALPUFF model Atmos. Pollut. Res. 7 393–402

Holnicki, P., Nahorski, Z. Emission Data Uncertainty in Urban Air Quality Modeling—Case Study. *Environ Model Assess* **20,** 583–597 (2015). https://doi.org/10.1007/s10666-015-9445-

https://ciep.mx/las-finanzas-publicas-del-cambio-climatico-origen-costos-y-alternativas-de-los-gases-de-efecto-invernadero/

Hu, W., Downward, G., Wong, J.Y.Y. *et al.* Characterization of outdoor air pollution from solid fuel combustion in Xuanwei and Fuyuan, a rural region of China. *Sci Rep* **10,** 11335 (2020). https://doi.org/10.1038/s41598-020-68229-2

INECC. (2014). *Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático.* Factores de Emisión para los diferentes tipos de combustibles fósiles y alternativos que se consumen en México: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/110131/CGCCDBC_2014_FE_tipos_combustibles_fosiles.pdf

INEGI. (2019). *Conjunto de datos vectoriales de información topográfica escala 1:250000 Serie VI.* Aguascalientes: INEGI.

Landrigan, P. J. (2016). Air pollution and health. Volume 2, Issue 1, E4-E5, https://doi.org/10.1016/S2468-2667(16)30023-8

Larsen, B. (2015). Air Pollution in Mexico. Disponible online en: https://www.copenhagenconsensus.com/sites/default/files/mexico_resources_air_pollution.pdf (16 de marzo 2021

Li, M., Mallat, L. (2018). Health impacts of air pollution. Scor Paper N°42. Disponible online en: https://www.scor.com/sites/default/files/sp42-air_pollution.pdf

López, M.T., Zuk, M., Garibay, V., Tzintzun, G., Iniestra, R., Fernández, A. (2005). Health impacts from power plant emissions in Mexico. Atmospheric Environment 39 (2005) 1199–1209

Maninder P. S. Thind, Christopher W. Tessum, Inês L. Azevedo, Julian D. Marshall. Fine Particulate Air Pollution from Electricity Generation in the US: Health Impacts by Race, Income, and Geography. *Environmental Science & Technology*, 2019; DOI: 10.1021/acs.est.9b02527

Mateos-Díaz, E. (2016). Emisiones a la atmósfera por consumo de combustóleo y por cambio a gas natural en una central termoeléctrica de interés. UNAM. México.

Melgar-Paniagua, EM., Vega-Rangel, E., Del Razo, LM., Lucho-Constantino, CA., Rothenberg, SJ., De Vizcaya-Ruiz, A. (2013). Distributed lag associations between respiratory illnesses and mortality with suspended particle concentration in Tula, a highly polluted industrial region in Central Mexico. International Archives of Occupational and Environmental Health. 86(3):321-332. DOI: 10.1007/s00420-012-0768-2

Moreno-Torres, E. (2017). 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. UNAM. México.

OBTREN. (2021). *Observatorio para la Transición Energética*. Retrieved Febrero 27, 2021, from Generación: https://obtrenmx.org/generacion_sen

Organización Mundial de la Salud OMS. (2021). Contaminación ambiental del aire. Disponible online en: https://www.who.int/teams/environment-climate-change-and-health/air-quality-and-health/ambient-air-pollution#:~:text=Ambient%20air%20pollution%20accounts%20for,quality%20levels%20exceed%20WHO%20limits (15 de marzo 2021).

Organización Panamericana de la Salud OPS & Organización Mundial de la Salud OMS. (2016). Calidad del aire. Disponible online en: https://www.paho.org/es/temas/calidad-aire (15 de marzo 2021).

Perry, S. G., Cimorelli, A. J., Paine, R. J., Brode, R. W., Weil, J. C., Venkatram, A., Wilson, R. B., Lee, R. F., & Peters, W. D. (2005). AERMOD: A Dispersion Model for Industrial Source Applications. Part II: Model Performance against 17 Field Study Databases, Journal of Applied Meteorology, 44(5), 694-708. Retrieved Mar 20, 2021, from https://journals.ametsoc.org/view/journals/apme/44/5/jam2228.1.x

Pozzer, A., Dominici, F., Haines, A., Witt, C., Münzel, T., Lelieveld, J. (2020). Regional and global contributions of air pollution to risk of death from COVID-19, *Cardiovascular Research*, Volume 116, Issue 14, Pages 2247–2253, https://doi.org/10.1093/cvr/cvaa288

RAMA. (2021). *Calidad del Aire Ciudad de México*. Retrieved from Red Automática de Monitoreo Atmosférico: http://www.aire.cdmx.gob.mx/default.php?opc=%27aKBh%27

Rivera, C., Sosa, G., Wöhrnschimmel, H., de Foy, B., Johansson, M., and Galle, B.: Tula industrial complex (Mexico) emissions of SO_2 and NO_2 during the MCMA 2006 field campaign using a mobile mini-DOAS system, Atmos. Chem. Phys., 9, 6351–6361, https://doi.org/10.5194/acp-9-6351-2009, 2009.

Rzeszutek, M., Szulecka, A. (2021). IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 642 012014

SEMARNAT. (2006 de Enero de 30). *NOM-086-SEMARNAT-SENER-SCFI-2005.* Obtenido de Diario Oficial de la Federación: http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=2107972&fecha=30/01/2006

SENER. (2019). *Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional 2018 – 2032.*

SINAICA. (2019). *Sistema Nacional de Información sobre la Calidad del Aire*. Retrieved from https://sinaica.inecc.gob.mx/smca.php?sid=40

Sosa, G., Vega, E., González-Avalos, E., Mora, V., López-Veneroni, D. (2013). Air Pollutant Characterization in Tula Industrial Corridor, Central Mexico, during the MILAGRO

SSA. (2010). 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.* Diaro Oficial de la Federación.

SSA. (2019). NOM-022-SSA1-2019. *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.* Diario Oficial de la Federación.

Study. BioMed Research International, vol. 2013, Article ID 521728, 13 pages. https://doi.org/10.1155/2013/521728

The World Bank TWB. (2016). The cost of air pollution: strengthening the economic case for action (English). Washington, D.C. Disponible online en: http://documents.worldbank.org/curated/en/781521473177013155/The-cost-of-air-pollution-strengthening-the-economic-case-for-action (17 de marzo 2021).

Transparencia. (2020). *Instituto Nacional de Acceso a la Información.* Folio: 1816400031520

Transparencia. (2020). *Portal Nacional de Transparencia.* Obtenido de Folio: 1816400077620.

U.S. Environmental Protection Agency. (1995). User instructions. Vol. I, User's Guide for the Industrial Source Complex (ISC3) Dispersion Models (revised). U.S. Environmental Protection Agency, EPA-454/b-95-003a.

U.S. EPA 2017 Revisions to the guideline on air quality models: Enhancements to the AERMOD dispersion modeling system and incorporation of approaches to address ozone and fine particulate matter vol 82 (Federal Register, 40 CFR Part 51, Appendix W)

University of Washington. (2019, November 20). Emissions from electricity generation lead to premature deaths for some racial groups. *ScienceDaily*. Retrieved February 8, 2021 from www.sciencedaily.com/releases/2019/11/191120131354.htm

Venkatram, A. Coauthors 2001. A complex terrain dispersion model for regulatory applications. Atmos. Environ. 35:4211–4221.

Williams, M. (14 de abril 2016). What causes air pollution. Disponible online en: https://phys.org/news/2016-04-air-pollution.html (15 de marzo 2021).

Zhong, M., Saikawa, E., Avramov, A., Chen, C., Sun, B., Ye, W., Keene, W. C., Yokelson, R. J., Jayarathne, T., Stone, E. A., Rupakheti, M., and Panday, A. K. (2019). Nepal Ambient Monitoring and Source Testing Experiment (NAMaSTE): emissions of particulate matter and sulfur dioxide from vehicles and brick kilns and their impacts on air quality in the Kathmandu Valley, Nepal, Atmos. Chem. Phys., 19, 8209–8228, https://doi.org/10.5194/acp-19-8209-2019.

11. Anexos