





#### DIRECTORIO

### Dra. María Amparo Martínez Arroyo

Directora General del INECC

#### **Dr. Luis Gerardo Ruiz Suárez**

Coordinación General de Contaminación y Salud Ambiental

#### M. en C. José Abraham Ortinez Álvarez

Director de Economía Sectorial

### ELABORACIÓN

#### M. en C. José Abraham Ortínez Álvarez

Director de Economía Ambiental y Recursos Naturales

#### M. en I. Francisco Hernández Ortega

Subdirector de Modelación y Salud

#### M. en G. Josefina Gabriel Morales

Jefa del Departamento de Modelación Ambiental y Salud

D. R. © Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. Enero 2021.

Boulevard Adolfo Ruíz Cortines No. 4209 Col. Jardines en la Montaña, Alcaldía Tlalpan, Ciudad de México C.P. 14210.

https://www.gob.mx/inecc

### CONTENIDO

Resumen	4
Marco de referencia	6
Descripción de la zona de estudio	6
Descripción de la actividad generadora de emisiones contaminantes en Tlachaloya	
Descripción del proceso de quemado de cables y sus emisiones	8
Producción y tipos/usos de cables	9
Modelación numérica de la dispersión atmosférica	11
Esquema de simulación con el sistema de modelación CALPUFF	12
Modelo meteorológico CALMET	13
Modelo WRF	14
Objetivo	
Procedimiento	15
Análisis de resultados	23
Conclusiones	29

### **RESUMEN**

Con el fin de estimar el impacto y alcance geográfico que tienen las emisiones de partículas generadas por la actividad de quemado de cable para la recuperación de cobre en Tlachaloya segunda sección, Estado de México; se modeló la dispersión de PM2.5 mediante el ensamble WRF-CALMET/CALPUFF, simulando las condiciones meteorológicas de marzo 2017, 2018 y 2019.

Se estimó que las partículas generadas en dicha actividad pueden transportarse a una distancia de 13 km hacia el este u oeste, 10 km hacia el norte y 5 km hacia el sur fuera de los límites de Tlachaloya.

La zona de mayor impacto se determinó a 1.4 km al este de la localidad mencionada; siendo las concentraciones máximas de PM2.5 (promedio de 24 horas) estimadas de 12.84  $\mu g/m^3$ , 19.32  $\mu g/m^3$  y 9.94  $\mu g/m^3$  en marzo 2017, marzo 2018 y marzo 2019, respectivamente, todas por debajo de la norma correspondiente.

### **MARCO DE REFERENCIA**

#### Descripción de la zona de estudio

La localidad de Tlachaloya Segunda Sección está situada en el Municipio de Toluca, Estado de México, unos 18 km al Norte de la Ciudad de Toluca de Lerdo y a 2573 metros de altitud (Figura 1). Cuenta con 5,829 habitantes, de los cuales el 34.35% (mayores de 12 años) está ocupada laboralmente (el 54.71% de hombres y el 13.76% de mujeres). En Tlachaloya Segunda Sección hay 1260 viviendas, de ellas, el 97.75% cuentan con electricidad y en general más del 84 % tiene los servicios básicos.¹ La SEDESOL clasificó en el 2010 a esta localidad con un grado de marginación alto y un grado de rezago social bajo.².

El uso del suelo es predominantemente agrícola y se cultiva principalmente maíz. Tlachaloya posee dos cuerpos de agua: la presa Antonio Alzate y un bordo de agua en la comunidad de San Carlos, ambos cuerpos de agua presentan una importante contaminación. La presa en particular fue construida para captar el agua proveniente del

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> https://mexico.pueblosamerica.com/i/tlachaloya-segunda-seccion/

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> http://www.microrregiones.gob.mx/catloc/contenido.aspx?refnac=151060099

Río Lerma, y proveer de la misma a un importante número de municipios del Estado de México y la Ciudad de México.

Francisco Cuautitlán Ecatepec Tlainepantia de Baz de Juárez Mexico City Chimalhuacán Coyoacán Xochimilco Toluca Metepe Milpa Alta Covarrubias Parque Industrial El Es San Pablo Autopar San Nicolas Totoltepec Cuemavaca Calixtlahuaca Ixtapan de la Sal

Figura 1. Ubicación de Tlachaloya segunda sección, respecto a Toluca de Lerdo y Ciudad de México.

**Fuentes:** Map Data C OpenStreetMap contributors. CC-BY-SA y https://mexico.pueblosamerica.com/i/tlachaloya-segunda-seccion/

### Descripción de la actividad generadora de emisiones contaminantes en Tlachaloya.

De acuerdo con lo descrito por Machicao <sup>3</sup>, la principal actividad de los pobladores desde la época prehispánica, hasta algunos años posteriores a la construcción de la cortina de la presa aledaña a la localidad, fue la pesca; actividad que se vio reducida por la contaminación del Río Lerma, hasta desaparecer casi por completo a principios de la década de los 80 ´s. Al perder su principal actividad económica, la población buscó una alternativa para subsistirla, y comenzó a dedicarse a la separación y quema de cable y otros desechos de residuos electrónicos para la obtención de subproductos como el cobre. Dicha actividad tuvo un ascenso importante a partir del año 2000, siendo en la actualidad una de las principales actividades económicas de la comunidad.

Un porcentaje considerable de la población del poblado Tlachaloya, Estado de México, se dedican a la compra-colecta-pepena de productos o residuos electrónicos (RE) que han concluido su vida útil, para desensamblarlos y reciclarlos. De esta forma, las piezas útiles son

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> A. C. Machicao (2013). Diagnóstico situacional de la salud ambiental en una comunidad expuesta a contaminantes de residuos electrónicos, a partir de la percepción del riesgo. Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de San Luís Potosí.

vendidas, mientras que el resto es quemado. A través de ésta última actividad también consiguen subproductos para su posterior venta, como el cobre, éste lo obtienen a través de la quema de los materiales como los cables de plástico. Como consecuencia de esta última práctica, las personas de la comunidad están expuestas crónicamente a una amplia gama de sustancias tóxicas como metales pesados y compuestos orgánicos persistentes.

Machicao también encontró en su investigación que el negocio de reciclaje está organizado a nivel familiar y no a nivel comunitario, no obstante que un número importante de sus miembros se dedica a dicho negocio. Según esta autora, el procedimiento que siguen los que se dedican a este negocio es el siguiente:

Viajan en busca de RE a distintos estados de la República y los materiales son trasladados a Tlachaloya. Posteriormente separan los componentes (clasificación y limpieza), en este punto pueden suceder dos cosas: por un lado, lo que no les sirve lo tiran o lo queman para minimizar los residuos y por el otro, lo que sí les sirve, como fierros, tornillos, etc., lo venden; o bien queman el cable de los aparatos electrónicos para obtener el cobre y vender el "producto limpio" a depósitos más grandes. El plástico residual lo utilizan como combustible para cocinar. Es una dinámica de compra y venta, donde no todas las personas están expuestas a los mismos niveles de contaminación, ya que no todos llevan a cabo las mismas tareas.

El cable se quema principalmente para obtener el cobre, sin embargo, también pueden disponer y quemar otros materiales que les sean útiles como motores, computadoras, plásticos, etc.; realizando esta actividad sin ninguna protección.

#### Descripción del proceso de quemado de cables y sus emisiones.

La llamada recuperación térmica de los cables de cobre consiste en la quema a la intemperie de los recubrimientos de plástico de cables e hilos eléctricos, con objeto de recuperar cobre usado y otros componentes. Se trata de un proceso que requiere mano de obra, y suele ser una actividad individual y a pequeña escala, sin medidas para reducir las emisiones al aire. Esta quema se suele realizar en bidones o directamente en el suelo. No se controla la temperatura ni se emplean medios para adicionar oxígeno y lograr la combustión completa de los compuestos de plástico.

El revestimiento de plástico de los cables de cobre está mayormente compuesto de cloruro de polivinilo (PVC), por lo que la quema del forro plástico libera varios contaminantes, además de PCDD/PCDF (producidos por incineración incompleta de plásticos clorados), como el monóxido de carbono, el dióxido de azufre, hidrocarburos aromáticos policíclicos, cloruro de hidrógeno, metales pesados y cenizas. La incineración es incompleta debido a las bajas temperaturas (250°C a 700°C) a la que se realiza el quemado de cable, por lo que se generan hidrocarburos y material particulado. Durante el proceso también se liberan

estabilizadores de plomo, que suelen contener las matrices de polímero de PVC del revestimiento plástico de los cables. Asimismo, se libera plomo adicional cuando se queman cables de cobre revestidos de plomo.<sup>4</sup>

En cuanto a las emisiones cuantitativas que genera la combustión abierta e incontrolada de deshechos electrónicos y cables, Gullett *et al.* <sup>5</sup>, describe la composición que obtuvo de dichas emisiones (Tabla 1) al realizar la caracterización de emisiones de cenizas volantes; calculando una emisión de 15 y 17 g/kg de partículas al quemar placas de circuitos y cables aislados, respectivamente.

**Tabla 1.** Emisiones de material particulado y composición elemental de cenizas volantes producidas al quemar cable de cobre.

Elemento	Concentración (µg/g)	Factor de emisión (mg/kg)
Sb	8000	140
Br	9815	171
Cl	44950	785
Cu	6070	106
Pb	55200	964
K	1465	25.6
Na	2455	42.9
S	173	3.02
Sn	4650	81.2
Zn	5620	98.2
No identificado o carbón	843900	14740
Material Particulado	44.2 (mg/m³)	17500

Fuente: B. Gullett y W. Linak (2007).

#### Producción y tipos/usos de cables

La producción anual de cable de cobre en México, durante el periodo 2013 a 2016, se mantuvo entre las 27,479 y las 28,970 ton. Y en los últimos años, tanto exportaciones como importaciones varían su composición desde productos semi-elaborados hasta cables de

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Secretaría del Convenio de Estocolmo sobre los contaminantes orgánicos persistentes. (2017). Directrices sobre mejores técnicas disponibles y orientación provisional sobre mejores prácticas ambientales; Conforme al Artículo 5 y Anexo C del Convenio de Estocolmo sobre Contaminantes Orgánicos Persistentes. Recuperación del cobre de cables por combustión lenta. Ginebra. Suiza.

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> B. Gullett y W. Linak. Characterization of air emissions and residual ash from open burning of electronic wastes during simulated rudimentary recycling operations. J Mater Cycles Waste Manag (2007) 9:69–79.

energía aislados con papel y plomo, que requieren una alta técnica y grado de elaboración. En este sentido, se pueden resaltar los siguientes tipos de cables <sup>6</sup>:

- Cables industriales. Para instalaciones en interiores, exteriores y subterráneas.
- Cables de distribución (baja y media tensión). Acometida y distribución aérea o subterránea
- Cables domésticos. Instalaciones interiores.
- Cables de seguridad, mando y control. Instalaciones en edificios públicos y de control de la industria.
- Cables especiales. Automoción e iluminación, instrumentación y control, cables de manutención, cables para industrias petroquímicas, cables para la Marina, cables de balizas.

Respecto a su presentación comercial, el cable suele venderse en carretes o cajas de 100 m<sup>7</sup>. Al respecto, la Tabla 2 presenta el peso estimado del cable según su calibre y tipo; observándose que uno de los más vendidos, es el cable de calibre 12, que tiene un peso de 42 kg/km, es decir que el cable de dicho calibre tipo THHW-LS deslizable en un carrete de 100 m pesaría 4.2 kg.

Tabla 2.	Características	de cables	por su calib	re.
----------	-----------------	-----------	--------------	-----

DESIGNACIÓN AWG/kcmil	NÚMERO DE HILOS	ÁREA mm²	DIÁMETRO NOMINAL mm	ESPESOR DE AISLAMIENTO mm	DIÁMETRO EXTERIOR mm	PESO APROXIMADO kg/km	CAPACIE	OAD DE COF AMPERE	RRIENTE
	ALA	MBRES TIPO	THW-LS /	THHW-LS DESI	LIZABLE		60° C	75° C	90° C
14	1	2,08	1,63	0,76	3,2	27,0	20	20	25
12	1	3,31	2,05	0,76	3,6	40,0	25	25	30
	C.A	ABLES TIPO	THW-LS / TI	HHW-LS DESLI	ZABLE		60° C	75° C	90° C
14	19	2,08	1,85	0,76	3,4	29,0	20	20	25
12	19	3,31	2,33	0,76	3,9	42,0	25	25	30
10	19	5,26	2,95	0,76	4,5	62,0	30	35	40
8	19	8,37	3,71	1,14	5,9	104,0	40	50	55
6	19	13,3	4,67	1,52	7,6	168,0	55	65	75
4	19	21,2	5,89	1,52	8,8	248,0	70	85	95
2	19	33,6	7,42	1,52	10,3	372,0	95	115	130
1/0	19	53,5	9,47	2,03	13,2	599,0	125	150	170
2/0	19	67,4	10,62	2,03	14,3	737,0	145	175	195
3/0	19	85,0	11,94	2,03	15,6	909,0	165	200	225
4/0	19	107	13,41	2,03	17,0	1 126,0	195	230	260

<sup>&</sup>lt;sup>6</sup> S. Chávez, C. Cuevas, A. Escobar, C. Navarro y M. F. Nuñez (2016). México, exportador de "cables de cobre a Colombia". Tesina. Centro de estudios científicos y tecnológicos "Benito Juárez". Ciudad de México.

 $<sup>^7 \</sup> https://ftp3.syscom.mx/usuarios/ftp/2016/06/10/bd4a6/Alambres\%20y\%20cables\%20THW-LS\_THHW-LS\%20Indiana.pdf$ 

Fuente: Indiana, wire & cable.

# MODELACIÓN NUMÉRICA DE LA DISPERSIÓN ATMOSFÉRICA

Los modelos de dispersión relacionan cuantitativamente las emisiones con las concentraciones ambientales de los contaminantes atmosféricos. Uno de los sistemas de modelación más utilizados son los modelos de dispersión Gaussianos, que permiten estimar la concentración de un determinado contaminante en cualquier punto de la zona de impacto de la emisión liberada para un tiempo t, por medio de la Ecuación 1 8, 9...

$$c(x, y, z, t) = \frac{M}{8 \pi Dt^{3/2}} \exp \left\{ -\frac{x^2 + y^2 + z^2}{4Dt} \right\}$$

Donde el origen del sistema de coordenadas utilizado se ubica en el punto de descarga de la fuente; el eje x se define haciéndolo coincidir con la dirección del viento; el eje z con la altura; c corresponde a la concentración en el punto que se desea calcular ésta; M a la emisión de la chimenea y D al coeficiente de difusión del contaminante en el aire. El modelo asume que la difusión de la emisión de contaminante en el aire, de acuerdo con la Ley de Fick, genera una distribución normal del contaminante en torno al eje de simetría dado por el eje x. La Ecuación I cuenta con versiones más complejas que consideran tanto la distancia de la fuente al punto donde se quiere calcular la concentración, como las condiciones de estabilidad de la atmósfera en ese momento y lugar, dado que ambos parámetros influyen directamente en la concentración a calcular.

Los modelos de este tipo, en general, representan como un conjunto de puffs a las emisiones vertidas, considerando la variación de las mismas en el tiempo, y que éstas son transportadas como paquetes por los vientos dominantes, a medida que se van expandiendo y difundiéndose en el aire. Además, el modelo numérico puede considerar

<sup>&</sup>lt;sup>8</sup> Crank, J. (1986). *The Mathematics of Diffusion*. Oxford, Inglaterra: Oxford Science Publications.

<sup>&</sup>lt;sup>9</sup> Cussler, E. L. (1984). *Diffusion: Mass Transfer in fluid systems*. Nueva York, Estados Unidos: Cambridge University Press.

tanto las reacciones químicas que ocurren en el interior del puff, como la deposición seca o húmeda de los contaminantes. <sup>10</sup>

#### Esquema de simulación con el sistema de modelación CALPUFF

El modelo de numérico seleccionado para simular la dispersión de partículas fue el sistema CALPUFF. Dicho modelo ha sido uno de los sistemas recomendados por la U.S. Environmental Protection Agency (USEPA) para su uso en aplicaciones regulatorias que involucran transporte de contaminantes. Este sistema y sus módulos completos pueden ser descargados desde la página electrónica: http://www.src.com/calpuff/download/mod6\_codes.htm

La plataforma de modelación CALPUFF, incluye el sistema de dispersión CALPUFF, el modelo meteorológico CALMET y programas relacionados para estimar la topografía y uso de suelo en alta resolución. La plataforma CALMET/CALPUFF fue desarrollada por Sigma Research Corporation como parte de un proyecto para diseñar y elaborar un sistema de modelación generalizado de calidad del aire en estado no estacionario y para uso regulatorio. El sistema cuenta con las siguientes características de operación:

- Simulación de dispersión de emisiones de fuentes puntuales y de área, con variaciones en el tiempo.
- Modelar dominios tanto a decenas como a cientos de kilómetros de una fuente.
- Realizar simulaciones para periodos de tiempo desde una hora a un año.
- Aplicable tanto a contaminantes inertes como a los sujetos a remoción lineal y mecanismos de conversión química.
- Aplicable a terrenos complejos o irregulares.

CALPUFF es un modelo Gaussiano Lagrangiano de transporte y dispersión que sigue la trayectoria (en estado no estacionario) de los puffs de contaminantes emitidos por las fuentes en análisis, simulando su dispersión y procesos de transformación a lo largo de su trayectoria. Como resultado de la modelación con CALPUFF, se estiman las concentraciones horarias en la ubicación de los receptores definidos en la simulación o bien en toda la malla utilizada.

El sistema CALPUFF posee algoritmos tanto para simular efectos causados por la cercanía a las fuentes de emisión, como fumigación de la pluma, penetración parcial de la pluma a través de una inversión térmica, interacciones complejas con el terreno a nivel de sub-malla;

PÁG.10

<sup>&</sup>lt;sup>10</sup> Jorquera, H. (2008). Apuntes de Contaminación Atmosférica. Santiago, Chile.

también puede considerar efectos de mayor impacto como deposición seca y húmeda; transformaciones químicas; estructura de los vientos verticales; efectos de terrenos complejos; transporte sobre el agua y efectos de interacción con la costa; aspectos que le permiten abarcar un gran rango de circunstancias meteorológicas a ser modeladas.

#### Modelo meteorológico CALMET

CALMET corresponde a un modelo meteorológico que genera campos horarios de viento y temperatura, además de campos bidimensionales como el de altura de mezclado, las características de la superficie (usos del suelo) y las propiedades de dispersión. Este archivo generado es utilizado por CALPUFF como archivo de entrada de información meteorológica.

El modelo CALMET usa un sistema de mallas formado por NZ capas de NX por NY celdas cuadradas horizontales. Las dos componentes horizontales del viento (u y v) se encuentran definidas en cada uno de los vértices de malla, mientras que la componente vertical (w) se encuentra definida en las caras verticales de las celdas, obteniéndose así el campo de vientos tridimensional que requiere CALPUFF para simular la dispersión de los contaminantes. <sup>11</sup>

CALMET está compuesto por un modelo de generación de campos de viento de diagnóstico, y dos modelos micro-meteorológicos para capas límite sobre agua y tierra, respectivamente. El modelo de generación de campos de viento de diagnóstico de CALMET usa un procedimiento de dos pasos en el procesamiento de los campos de viento:

- o Paso 1: Se ajusta el campo de vientos de prueba elegido como inicial, para obtener el campo de vientos estimado, considerando:
  - Efectos cinemáticos del terreno.
  - Efectos debidos a las pendientes del terreno.
  - Efectos de bloqueo producidos por singularidades del terreno.
  - Minimización de la divergencia del campo de vientos, conservando la masa de los contaminantes emitidos.
- Paso 2: Se realiza un procedimiento de análisis objetivo, por medio de la introducción de las observaciones superficiales disponibles (en caso de tener datos para el sitio y periodo de estudio) al campo de vientos del Paso 1 para su corrección, obteniéndose así el campo de vientos final, a través de:

<sup>&</sup>lt;sup>11</sup> Fernau, M. E., Robe, F. R., Scire, J. S., & Yamartino, R. J. (2000). *A User's Guide for the CALMET Meteorological Model (Version 5)*. Concord, Estados Unidos.

- Interpolación, usando las observaciones superficiales y los valores definidos por el campo de vientos del Paso 1.
- Correcciones para reducir discontinuidades en el campo de vientos.
- Extrapolación de las velocidades de superficie y en altura para ajustar las velocidades verticales.
- Minimización de la divergencia del campo de vientos.

En caso de que se utilice un campo de vientos de pronóstico generado por alguno modelo meteorológicos externos (por ejemplo, WRF) para CALMET/CALPUFF, éste se puede ingresar a CALMET de tres formas:

- Como campo de vientos de prueba inicial.
- Como campo de vientos del Paso 1.
- Como datos observados.

Por último, los modelos micro-meteorológicos de CALMET para capas límite, se basan en diferentes conocimientos, dependiendo si corresponde a celdas sobre agua o tierra, como son:

- Los parámetros de calor superficial y flujos de momento.
- Campo de temperaturas tridimensional.
- Interpolación de precipitaciones.

#### Modelo WRF 12

El modelo meteorológico WRF (Weather Research and Forecasting) es un modelo de última generación, que se ha convertido en el más utilizado en el mundo durante los últimos años para el pronóstico de campos de variables meteorológicas a escala regional. Las características principales del modelo WRF giran alrededor de su dinámica no hidrostática y de su capacidad de permitir el uso de resoluciones espaciales de unos pocos kilómetros. Da la posibilidad de varias opciones de configuración y de parametrizaciones físicas para la convección, la Capa Límite Planetaria y la radiación, entre otros procesos hidrotermodinámicos <sup>13</sup>. El WRF ofrece una plataforma de pronóstico flexible y eficiente, al tiempo que proporciona los últimos avances de la física, los métodos numéricos y de asimilación de datos.

<sup>12</sup> http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/

<sup>&</sup>lt;sup>13</sup> A. Moya J. Ortega. Aplicación del modelo meteorológico WRF para el pronóstico de precipitaciones en período lluvioso de Cuba, 2014. Apunt. cienc . soc. 2015; 05 (01)

WRF fue desarrollado a partir de la colaboración del National Center for Atmospheric Research y la National Oceanic and Atmospheric Administration <sup>14</sup>. El modelo resuelve en una escala regional las ecuaciones dinámicas primitivas considerando la conservación de los flujos escalares y de masa a partir de condiciones iniciales y de contorno obtenidas de modelos de circulación global.

Para realizar esto último, WRF cuenta con varias estructuras dinámicas y numerosas parametrizaciones físicas que permiten representar distintos procesos, permitiendo aplicarlo en escalas geográficas que van desde las decenas hasta los cientos de kilómetros. En caso de así requerirlo el objetivo de la modelación, de todas las opciones dinámicas, la versión en coordenadas de masa denominada Advanced Research WRF (ARW) <sup>15</sup> es la que presenta características ideales para realizar el modelado "on-line" de la química atmosférica, esto mediante la versión correspondiente de WRF CHEM, lo cual está fuera del análisis del presente caso.

### **OBJETIVO**

Modelar la dispersión de partículas emitidas en la actividad del quemado de cable realizado en Tlachaloya, Estado de México.

### **PROCEDIMIENTO**

La modelación de dispersión se realizó desarrollando las siguientes etapas:

Primero se llevó a cabo la aplicación de WRF para la modelación meteorológica a escala media. Para lo cual se definieron y emplearon dos coberturas geográficas (Figura 2), una anidada: la primera D1 (con resolución de 15 km y centrada en las coordenadas Latitud 20.97609999 y Longitud -98.7567003455), incluyó una región con la mayor parte del centro del territorio nacional y regiones costeras del Golfo de México y la costa Suroeste del Océano

<sup>&</sup>lt;sup>14</sup> Michalakes, J.G., McAtee, M., Wegiel, J. (2002). "Software Infrastructure for the Weather Research and Forecast Model", in proceedings of UGC 2002, June, Austin, Texas, 13pp. http://www.mmm.ucar.edu.ar/wrf/users/documents.

<sup>&</sup>lt;sup>15</sup> Wang, W., Bruyère, C., Duda, M., Dudhia, J., Gill, D., Lin, H-C., Michalakes, J., Rizvi, S., Zhang, X. (2009). Advanced Research WRF (ARW) Version 3 Modeling User's Guide, Mesoscale & Microscale Meteorology Division, National Center for Atmospheric Research (NCAR), USA. http://www.mmm.ucar.edu.ar/wrf/users/docs/arw v3.pdf.

Pacífico, así como la meseta central mexicana. Esto para captar la influencia de procesos meteorológicos de escala media en la región central del país.

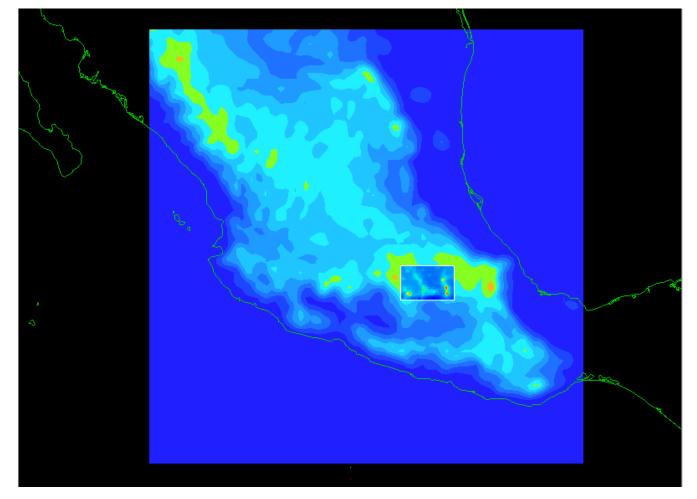


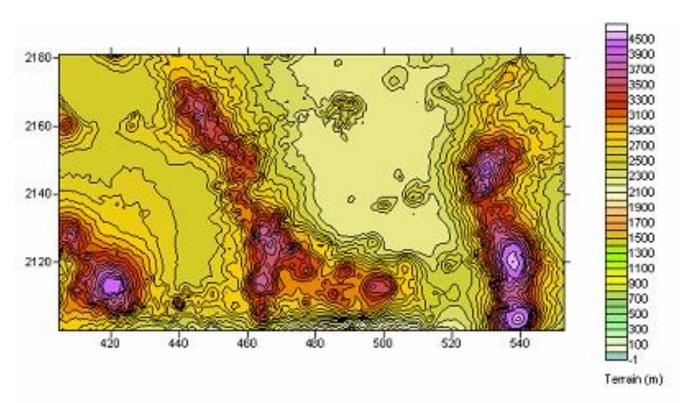
Figura 2. Dominio para la modelación meteorológica de escala media con WRF.

El segundo dominio (D2), anidado dentro del dominio 1, cubrió la región donde se ubican la cuenca del Valle de México y la Cuenca del Valle de Toluca. El segundo dominio se delimitó para representar la meteorología en escala regional, incluyendo la zona donde se ubica Tlachaloya segunda sección. Las dimensiones de cada dominio de WRF fueron las siguientes: D1, 91 nodos Este-Oeste, 91 nodos Norte-Sur y con resolución geográfica de 15 km; D2 56 nodos Este-Oeste, 36 nodos Norte-Sur y resolución geográfica de 3 km; asimismo, se emplearon 37 capas en la vertical para ambos dominios. Los periodos modelados en tiempo de Greenwitch fueron del 28 de febrero al 2 de abril de los años 2017, 2018 y 2019, cuyos tiempos de procesamiento fueron de más de un día natural empleando 20 núcleos a

D2

₽ÁG.14

2.2 GHz. La información para inicializar WRF fue descargada de <a href="https://rda.ucar.edu/datasets/ds083.3/">https://rda.ucar.edu/datasets/ds083.3/</a>



**Figura 3**. Dominio geográfico para los modelos CALMET/CALPUFF, con resolución geográfica de 1 km.

Para extraer y formatear la información meteorológica que requiere CALMET, se utilizó el sistema CALWRF, mismo que se empleó para leer las salidas del dominio 2 de cada corrida realizada con WRF.

El dominio de modelación de CALMET/CALPUFF fue definido con una cobertura que quedó incluida dentro del dominio D2 de WRF. En este sentido las características del dominio CALMET fueron: 149 columnas y 82 hileras, con celdas de 1 km y con origen en su vértice suroeste, el cual fue anclado en las coordenadas X= 404.2316 km y Y= 2099, 5645 km y proyectado a UTM con Datum WGS84.

En la vertical se definieron las siguientes 9 alturas (m): 0, 20, 50, 120, 500, 1200, 2000 y 5000. La información topográfica (con resolución de 30 m) para este dominio, fue obtenida del portal <a href="https://search.earthdata.nasa.gov/">https://search.earthdata.nasa.gov/</a> y se procesó con el sistema Terrel de CALMET/CALPUFF. Mientras que la información de uso de suelo se basó en las cartas de

INEGI <sup>16</sup>, a partir de las cuales se desarrolló la capa de usos de suelo empleada para el sistema CTGPROC.

Posteriormente, las salidas de Terrel y CTGPROC se procesaron con MAKEGEO para obtener el archivo de parámetros geográficos de entrada a CALMET. Finalmente se realizaron las corridas de meteorología de alta resolución con CALMET empleando la salida de MAKEGEO y cada una de las salidas del D2 generadas con WRF/CALWRF, para los periodos 1 de marzo al 1 de abril (tiempo local estándar) de 2017, 2018 y 2019, con tiempos de procesamiento de 1 día cada uno.

Además de los archivos de meteorología generados con CALMET, para realizar las modelaciones de dispersión con CALPUFF, se empleó la siguiente información:

A partir de una búsqueda en Tlachaloya segunda sección, empleando Google maps y Streetview, se identificaron siete puntos con indicios de actividad de quemado de cables (se observó restos de cables quemados y cenizas frente o adjunto a establecimientos de manejo de chatarra); tales sitios se ubican en las siguientes coordenadas:

#### a) 19.46501 y -99.649223; UTM 431860.3, 2152409.7



Fuente: Google maps y Street view

<sup>&</sup>lt;sup>16</sup> INEGI. (2017). Carta de Uso de Suelo y Vegetación, Serie VI, Continuo Nacional. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México, Disponible en: https://www.inegi.org.mx/temas/usosuelo/default.html#Descargas

#### b) 19.46481, -99.64723; UTM 432069.4; 2152386.8



Fuente: Google maps y Street view

#### c) 19.464634, -99.647097; UTM 432083.2, 2152367.3



Fuente: Google maps y Street view

#### d) 19.464552, -99.643565; UTM 432453.9, 2152356.8



Fuente: Google maps y Street view

#### e) 19.462157, -99.633325; UTM 433527.7, 2152087.8



Fuente: Google maps y Street view

#### f) 19.471823, -99.665339; UTM 430171.6, 2153170.1



Fuente: Google maps y Street view

#### g) 19.473246, -99.666543; UTM 430045.9, 2153328.1



Fuente: Google maps y Street view

**Tabla 3**. Ubicación de fuente de emisión. Cada sitio fue definido para CALPUFF como una fuente de área con las siguientes coordenadas de sus vértices:

Punto	Noroeste	Noreste	Suroeste	Sureste
а	431859, 2152410	431861, 2152410	431859, 2152408	431861, 2152408
b	432068, 2152387	432070, 2152387	432068, 2152385	432070, 2152385
С	432082, 2152368	432084, 2152368	432082, 2152366	432084, 2152366
d	432452, 2152357	432454, 2152357	432452, 2152355	432454, 2152355
е	433526, 2152087	433528, 2152087	433526, 2152085	433528, 2152085
f	430170, 2153171	430172, 2153171	430170, 2153169	430172, 2153169
g	430044, 2153329	430046, 2153329	430044, 2153327	430046, 2153327

Las emisiones por m² de cada sitio fueron definidas considerando la emisión determinada por Gullete et al. de 17 g de material particulado vertidos por kg de cable quemado, por hora; y que la cantidad de cable quemado por hora corresponde con un carrete (100 m) de cable calibre 12, cuyo peso sería de 4.2 kg. De esta forma se estimó que la emisión por hora fue de 71.4 g de partículas por hora o 0.019833 g/s por m².

Como se aprecia en las coordenadas de la Tabla 3, las áreas de cada polígono fueron de cuatro m². En cuanto al periodo de emisión, se delimitó que el quemado de cable es realizado de 5 a 8 AM, esto porque se encontraron notas periodísticas que mencionan a las horas avanzadas de la noche y las primeras horas de la mañana, como el periodo cuando la población percibe los humos provenientes de las fogatas con cable.

**Figura 4.** Humos por quemado de cable liberados en horario matutino y cerca de una escuela de nivel básico en Tlachaloya.



Fuente: https://edomex.quadratin.com.mx/denuncia-sigue-quema-de-cable-en-tlachaloya/

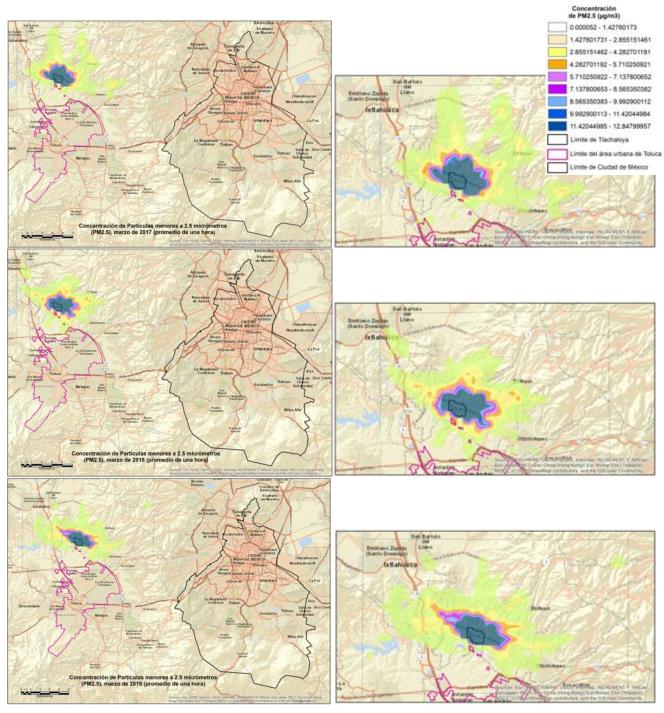
### **ANÁLISIS DE RESULTADOS**

Como se mencionó en el procedimiento, la modelación de dispersión de partículas se realizó considerando que la quema de cable se realiza diario y de manera continua en el periodo de las 5 a las 8 AM. Periodo en el cual se estimó con WRF que comúnmente la capa límite no rebasa los 400 m de altura en la región de Tlachaloya, lo cual limita la flotación de las emisiones y consecuentemente el transporte a grandes distancias. Asimismo, se apreció que, si bien la dirección del viento en marzo puede tener dirección hacia el norte y en menor medida hacia el sur, es mayor la frecuencia hacia el este de Tlachaloya.

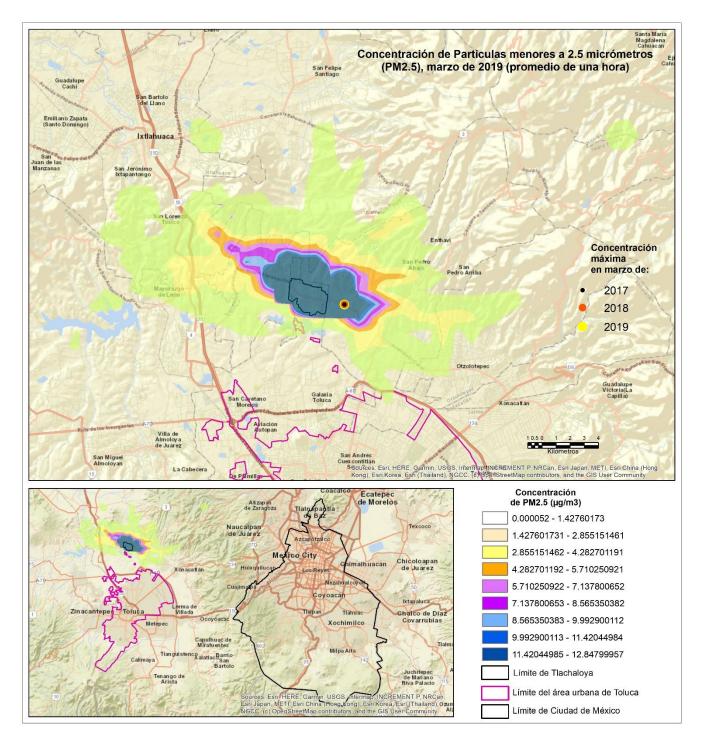
Los resultados de la dispersión de PM2.5 promedio horario (Figura 5) mostraron que el transporte de partículas en marzo tiene un alcance en general de 13 km al este u oeste, de 10 km hacia el norte y de 5 km hacia el sur, alrededor de Tlachaloya segunda sección. La Figura 6 muestra que las concentraciones máximas de PM2.5 de cada marzo se estimaron 1.4 km al este de la localidad de emisión; fuera de los límites de la Ciudad de México y la Ciudad de Toluca. Cabe resaltar que las concentraciones máximas estimadas para cada marzo fueron de 277  $\mu$ g/m³, 424  $\mu$ g/m³ y 234  $\mu$ g/m³ en 2017, 2018 y 2019, respectivamente.

Figura 5. Concentraciones máximas de PM2.5, promedio horario, modeladas en los meses de marzo 2017, 2018 y 2019. Durante los periodos simulados, no se estimó una dispersión de partículas emitidas en Tlachaloya segunda sección (polígono azul marino) que llegara a la Ciudad de Toluca o la Ciudad de México.

**Figura 5.** Concentraciones máximas de PM2.5, promedio horario, modeladas en los meses de marzo 2017, 2018 y 2019. Durante los periodos simulados, no se estimó una dispersión de partículas emitidas en Tlachaloya segunda sección (polígono azul marino) que llegara a la Ciudad de Toluca o la Ciudad de México.



**Figura 6.** Concentraciones máximas horarias de PM2.5 de cada mes de marzo: 2017, 2018 y 2019. En los tres meses, la concentración máxima se estimó 1.4 km al este de Tlachaloya.



Con la finalidad de ver si las emisiones de partículas podrían generar concentraciones ambientales de PM2.5 que rebasaran la norma de calidad del aire correspondiente (NOM-025-SSA1-2014), a partir de las concentraciones horarias de PM2.5 se estimaron los promedios horarios de las mismas. Al respecto, la Figura 7 muestra la distribución de las concentraciones de PM2.5 máximas de los promedios de 24 horas.

La Figura 7 permite observar que las concentraciones promedio de 24 horas tienden a tener una dispersión principalmente hacia el este de Tlachaloya, siendo el caso mas agudo marzo de 2018, cuando se estimaron concentraciones mayores a 12 µg/m³ al este y también dentro de los límites de Tlachaloya; mientras que en marzo 2017 tales niveles de partículas se modelaron con una menor cobertura geográfica, fuera de Tlachaloya, aunque también con rumbo al este de la misma. Por su parte, marzo 2019 mostró las menores concentraciones promedio 24 horas de los tres años, y si bien mantiene una tendencia de transporte de partículas como los marzos 2017 y 2018, es el mes que mostró una menor dispersión atmosférica de partículas hacia el sur (rumbo a Toluca).

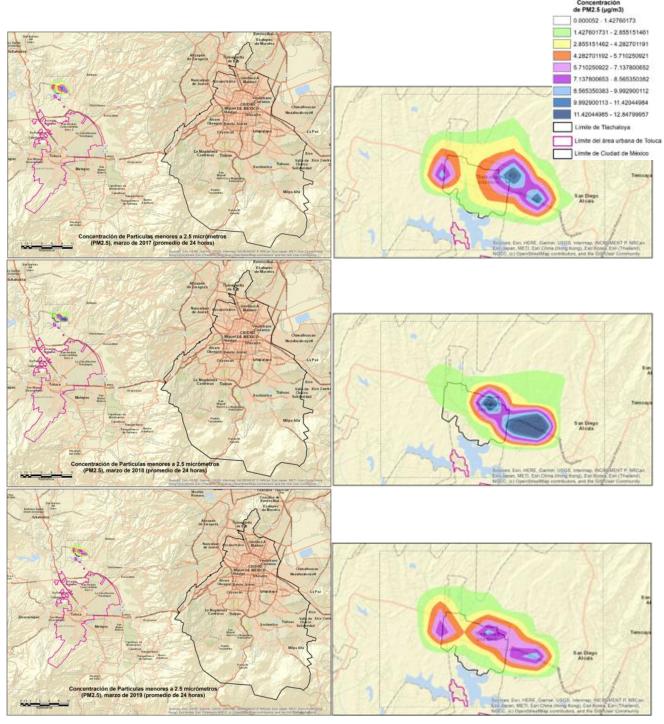
La Figura 8 permite observar resultados de la modelación sobre las máximas concentraciones promedios de 24 horas, de los meses de marzo (2017, 2018 y 2019). Como ilustra la figura mencionada, la zona de impacto se reduce substancialmente al utilizar este parámetro; ya que la misma tendría un alcance fuera de los límites de Tlachaloya segunda sección, de sólo 2.35 km al este, 1.1 km al oeste y al norte, y de 0.1 km hacia el sur.

En cuanto a las máximas concentraciones promedio de 24 horas de cada mes modelado, se estimaron en 12.84 μg/m³, 19.32 μg/m³ y 9.94 μg/m³ para marzo 2017, marzo 2018 y marzo 2019, respectivamente; todas 1.4 km al este de los límites de Tlachaloya segunda sección.

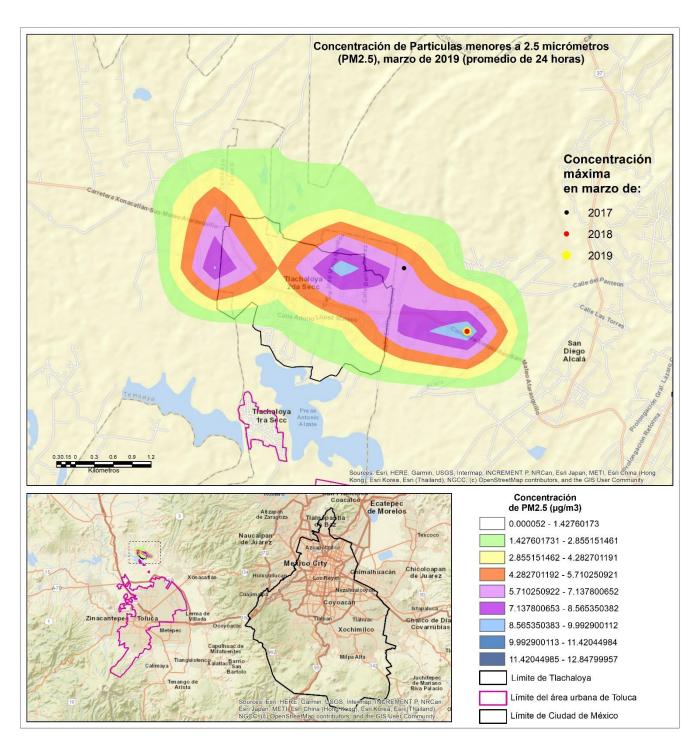
Si bien con el presente trabajo se buscó representar la quema de cable en Tlachaloya segunda sección como una actividad cotidiana, es necesaria información de campo que dé mayor detalle sobre sitios donde se realiza esta actividad y sobre todo de la cantidad de cable que se quema, la duración de los eventos y la hora del día en que se realiza esto. Los sitios seleccionados en este estudio se restringieron a aquellos identificados en una visualización remota con Street view sobre las vialidades principales de la localidad, pero al ser una actividad familiar, es probable que se presente en más lugares y menos visibles.

También es necesario tener más información sobre las cantidades de cable quemado por evento, ya que en notas periodísticas pudo verse la mención de eventos con presencia de humaredas que afectan a una parte importante de la población y en periodos de varias horas. Finalmente, también conocer con más exactitud la hora del día de esta actividad es necesario, dado que la región atmosférica de mezclado se va ampliando hacia la tarde, lo cual podría favorecer el transporte de partículas a mayor distancia en eventos de quema de cable vespertinos.

**Figura 7.** Concentraciones máximas de PM2.5, promedio de 24 h, modeladas en los meses de marzo 2017, 2018 y 2019. Durante los periodos simulados, no se estimó una dispersión de partículas emitidas en Tlachaloya segunda sección (polígono azul marino obscuro) que llegara a la Ciudad de Toluca o la Ciudad de México.



**Figura 8.** Concentraciones máximas promedio de 24 h de PM2.5 considerando marzo 2017, 2018 y 2019.



### **CONCLUSIONES**

De acuerdo con las referencias revisadas, el quemado de cable en Tlacahloya es una actividad principalmente a nivel familiar, no comunitario; la cual incluye traer residuos electrónicos de otras entidades del país, clasificar y limpiar los mismos, vender los materiales comercializables y quemar el cable y partes electrónicas para obtener el cobre y venderlo. El plástico residual puede llegar a usarse como combustible para cocinar. En este contexto, quienes participan en esta actividad, pueden estar expuestos a diferentes dosis de contaminantes como PCDD, PCDF, CO, SO2, PAHs y partículas, entre otros.

La modelación de dispersión de partículas durante marzo 2017, 2018 y 2019 mostró que éstas pueden ser transportadas alrededor de los límites de Tlachaloya segunda sección, a una distancia de 13 km al este y oeste, 10 km hacia el norte y 5 km hacia el sur. La zona de mayor impacto por PM2.5 se determinó a 1.4 km al este de Tlachaloya, donde no está establecida ninguna población con alta concentración de habitantes.

Las máximas concentraciones de PM2.5 promedio de 24 horas estimadas fueron de 12.84  $\mu g/m^3$ , 19.32  $\mu g/m^3$  y 9.94  $\mu g/m^3$  en marzo 2017, marzo 2018 y marzo 2019, respectivamente; todas a 1.4 km al este de los límites de Tlachaloya segunda sección, y distantes de los límites de la Ciudad de Toluca y más aún de la Ciudad de México. Concentraciones que en ningún de los meses simulados rebasaron la concentración límite de PM2.5 establecida en la NOM-025-SSA1-2014: 45  $\mu g/m^3$  promedio de 24 horas.





