



DEFINICIÓN DE ZONAS PARA  
MEDICIÓN DE CALIDAD DEL  
AIRE EN LAS REGIONES TULA,  
TOLUCA Y YECAPIXTLA-HUEXCA-  
CUAUTLA.



**MEDIO AMBIENTE**

SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES



**INECC**

INSTITUTO NACIONAL  
DE ECOLOGÍA Y  
CAMBIO CLIMÁTICO

## DIRECTORIO

**Dra. María Amparo Martínez Arroyo**

Directora General del INECC

**Dr. Luis Gerardo Ruíz Suárez**

Coordinador General de Contaminación y Salud Ambiental

**Biól. Rodolfo Iniestra Gómez**

Director de Investigación de Calidad del Aire y Contaminantes Climáticos

## ELABORACIÓN

**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

## ÍNDICE

<b>Introducción</b>	<b>1</b>
<b>Objetivo</b>	<b>1</b>
<b>Caracterización de zonas de estudio</b>	<b>2</b>
Descripción de la región de Tula	2
Descripción de la región Valle de Toluca	5
Descripción de la región Yecapixtla-Huexca-Cuautla	6
<b>Cuenca Atmosférica</b>	<b>9</b>
<b>Metodología para la definición de cuencas atmosféricas en la región</b>	<b>10</b>
<b>Divergencia y circulación atmosférica para la época seca</b>	<b>11</b>
<b>Circulación atmosférica horaria en la CRCM</b>	<b>15</b>
<b>Definición de cuencas atmosféricas de Tula, Valle de Toluca y Yecapixtla-Huexca-Cuautla</b>	<b>19</b>
<b>Resultados</b>	<b>22</b>
<b>Conclusiones</b>	<b>34</b>
<b>Anexo.</b>	<b>35</b>



# 1. INTRODUCCIÓN

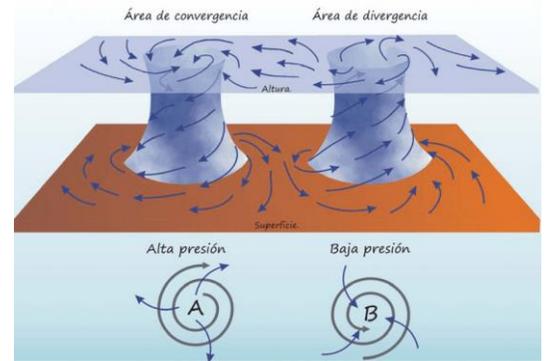
En el presente trabajo se presenta una descripción de las regiones de Tula de Allende, Valle de Toluca y Yecapixtla-Huexca-Cuautla, con un enfoque que caracteriza la climatología de estas zonas y hace énfasis en la meteorología y circulación de vientos que prevalece en las mismas.

El análisis de campos de viento que se realiza está fundamentado en el uso de la divergencia y convergencia (Figura 1), utilizados como parámetros que gobiernan la circulación del viento. Asumiendo que el transporte de emisiones por el viento es hacia las zonas de convergencia, donde se esperaría una mayor presencia de contaminantes atmosféricos. Por lo cual, en una primera etapa se delimitaron las cuencas atmosféricas donde se localizan las regiones arriba mencionadas, utilizando para ello los resultados de Zavala *et al.* obtenidos en el estudio ECAIM, quien concluye que los bordes de las cuencas atmosféricas pueden establecerse en las zonas con valor de convergencia igual a cero (es decir los límites de la cuenca), y que éstos son los puntos de transición donde se inicia la convergencia.

Posteriormente a la delimitación de las cuencas, con base en las zonas de convergencia en cada cuenca, se definieron las áreas de la cuenca atmosférica hacia donde se espera que sean transportados los contaminantes; y se establecieron estas áreas como zonas candidatas en las cuales se pueden instalar puntos para mediciones de calidad del aire.

Con la finalidad de mostrar resultados concluyentes sobre las cuencas determinadas, también se incluyeron las condiciones climatológicas mensuales esperadas en cada localidad; así como información de la velocidad y dirección del viento de la climatología regional, y la dirección electrónica donde se puede consultar el pronóstico diario de velocidad y dirección de viento esperados y ejemplos por día y hora, así como el acceso al mismo.

**Figura 1.** Convergencia y divergencia atmosféricas.



La convergencia en la atmósfera se refiere a un agolpamiento del aire en una determinada zona, como consecuencia de su desplazamiento. Ese agolpamiento lleva a la acumulación de una gran masa de aire en una región. Por otro lado, la divergencia es todo lo contrario. Debido al movimiento de las masas de aire, éste se dispersa y da lugar a zonas con muy poca masa de aire<sup>1</sup>.

## 2. Objetivo

Caracterizar las regiones Tula, Toluca y Yecapixtla-Huexca-Cuautla para definir zonas candidatas para realizar mediciones de calidad del aire.

<sup>1</sup> <https://www.meteorologiaenred.com/divergencia-y-convergencia.html>

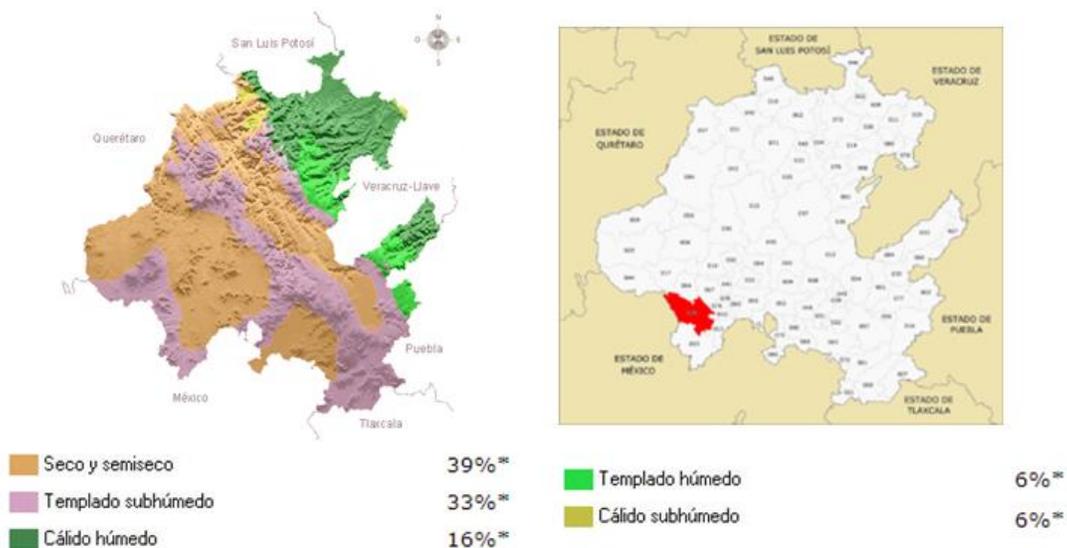
### 3. Caracterización de zonas de estudio

#### Descripción de la región de Tula

El municipio de Tula de Allende conforma parte del estado de Hidalgo, la cabecera municipal es la localidad que lleva el mismo nombre. El municipio se localiza entre los paralelos 19° 55' y 20° 11' de latitud norte; los meridianos 99° 15' y 99° 32' de longitud oeste. Tiene una extensión de 336.1 km<sup>2</sup>. En el límite norte colinda con los municipios de Chapantongo, Tepetitlán y Tezontepec de Aldama; al este con Tezontepec de Aldama, Tlaxcoapan, Atitalaquia y Atotonilco de Tula; al sur con el municipio de Tepeji del Río de Ocampo y al oeste con el Edo. de México (Figura 2).

El municipio de Tula de Allende se localiza en el extremo suroeste del Estado de Hidalgo; la superficie que ocupa forma parte de la Subprovincia fisiográfica denominada Lagos y Volcanes de Anáhuac. En la porción centro y occidente del municipio el terreno se caracteriza por el predominio de formas montañosas, la de mayor elevación corresponde al cerro Moctezuma que se localiza en el norte del municipio, cuya altura máxima sobre el nivel del mar es de poco más de 2700 metros. Al centro-oeste se halla otra estructura montañosa que alcanza una altura de 2,500 msnm. El terreno situado entre ambos cerros conforma una llanura de pendiente ligera, donde la altitud varía entre los 2,300 msnm, cerca del límite oeste del municipio, y los 2,100 msnm, esto en las cercanías de la presa Endhó. En la porción sureste del municipio el relieve se caracteriza por el predominio de lomeríos de formas redondeadas y pendientes suaves. Por otra parte, el valle formado por el río Tula marca el límite entre la superficie montañosa y la superficie llana dentro del municipio; en la porción centro-este es donde se registra la altitud más baja y los terrenos con menor inclinación; precisamente ahí se asienta el área urbana de Tula de Allende, con un intenso uso agrícola en su mayor parte.

Figura 2. Distribución de climas del Estado de Hidalgo, con la ubicación del municipio de Tula de Allende <sup>2</sup>



<sup>2</sup> <http://www.cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/hgo/territorio/clima.aspx?tema=me&e=13>

Dada la ubicación geográfica del municipio de Tula de Allende, dentro del Eje Neovolcánico Transversal, la estructura geológica de su territorio es de origen volcánico, el 78.7% de la superficie municipal corresponde al periodo neógeno caracterizado por la intensa actividad volcánica registrada, sobre todo, en el occidente de México. En el municipio de Tula, lo anterior se manifiesta en la composición litológica de los cerros o áreas montañosas ubicadas en la porción occidental, las cuales están constituidas de basalto. Mientras que la formación de los terrenos llanos corresponde al periodo cuaternario, donde el material litológico predominante consiste en conglomerado polimíctico, lo que significa que las rocas que conforman el conglomerado son de composición variada. En la porción sureste del municipio, en los terrenos de mayor altitud, el material litológico es de basalto, mientras que, en las partes inferiores contiguas a ésta, el material rocoso es de caliza. En los valles de los ríos Tula y Rosas (afluente del río Tula) el tipo de roca es suelo aluvial.

La hidrología superficial del municipio se caracteriza por la presencia significativa de ríos, aunque la mayoría son intermitentes. El río Tula es perenne y el de mayor longitud dentro del municipio; sus afluentes como el río Rosas y el río Tecolote (provenientes de las partes altas del oeste del municipio), han sido la base para la construcción de la presa Endhó. Desde el siglo XVII el río Tula se provee de las aguas desalojadas de la Ciudad de México; cuando se comenzó a desalojar el agua ésta era de origen pluvial, pero en las últimas décadas se empezó a verter al mismo caudal las aguas residuales, por lo que en la actualidad el río Tula es uno de los más contaminados del país.

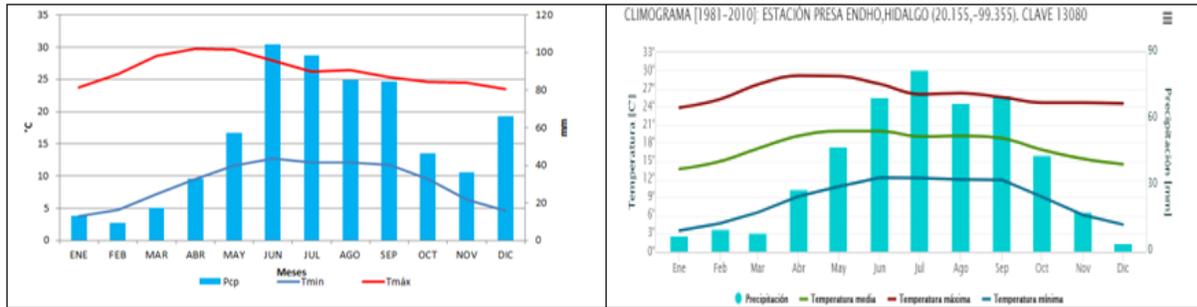
La mayor parte del territorio del municipio de Tula de Allende ha sido ocupada por actividades humanas, la más extensa la agrícola por su uso del suelo, ya que ocupa el 50.5% de la superficie total: Las áreas agrícolas de la porción occidental son de temporal, mientras que las de la porción oriental son de riego, éstas son irrigadas con las aguas de la presa Endhó. El 8.5% del suelo es ocupado por los asentamientos humanos, porcentaje equivalente a 28.9 km<sup>2</sup>, de los cuales el área urbana de Tula de Allende ocupa 14.7 km<sup>2</sup>; la mayoría de los asentamientos se distribuye en la porción oriental del municipio. Tanto las áreas agrícolas como las áreas ocupadas por los asentamientos humanos se desarrollan y asientan en terrenos llanos con ligera inclinación. El municipio de Tula de Allende tiene temperaturas máximas con valores de 24 a 27.9 grados, la media entre un rango de 16 a 19.9 grados y para las mínimas es de 8 a 11.9 grados. Por su parte, la precipitación histórica en este municipio se encuentre entre los 536 a 668 mm (Figura 3).

En la época de lluvias el estado de Hidalgo se encuentra bajo la influencia de sistemas meteorológicos tropicales. El paso constante de ondas y ciclones tropicales aportan la humedad más importante del año en forma de nublados y lluvias abundantes. En la época seca-fría el desplazamiento de frentes fríos y masas de aire polar son los sistemas meteorológicos predominantes; cuando estos fenómenos son intensos, Hidalgo se ve afectado con sistemas anticiclónicos (tiempo atmosférico estable y seco), originando condiciones desfavorables para la dispersión de los contaminantes.

En cuanto a la precipitación histórica y temperatura ambiente (máxima y mínima), la información de la estación meteorológica de Tula de Allende en el periodo de 1950 a 2005 (Figura 3) muestra que las temperaturas más altas se presentan en los meses de abril y mayo, con valores 30 grados; mientras que el promedio anual de la temperatura máxima es de 27.8 °C. En cuanto a las temperaturas más frías, éstas se ubican en el mes de enero, con un valor de 3.8 grados y un promedio anual de 10.6 °C. Por otro lado, el análisis de los niveles de precipitación pluvial más elevados en Tula de Allende señala que de junio a septiembre pueden registrarse valores de 85 a

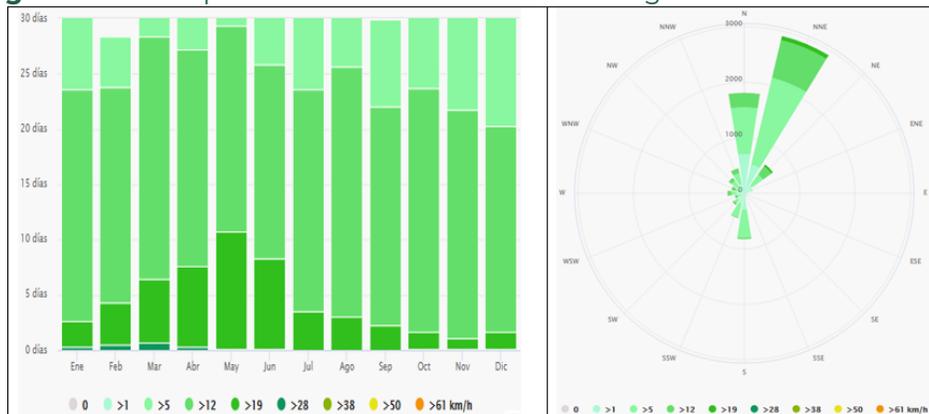
104 mm, periodo considerado como la temporada de lluvias, con un promedio histórico de 626.2 mm de lluvia anual.

**Figura 3.** Climatología de 1950 a 2005 de Tula de Allende (izq.) y presa Endhó (derecha), Hgo. Fuente: Servicio Meteorológico – CONAGUA <sup>3</sup>



La estación de Tula de Allende, cercana a la presa Endhó, presenta tendencias similares, lo cual sugiere que las regiones donde se encuentran estas localidades comparten características meteorológicas (Figura 3), prevaleciendo en ambas un clima predominantemente templado subhúmedo. Las estimaciones con NOAA Environment Modeling System (NEMS) <sup>4</sup> muestran que en el periodo enero a abril pueden presentarse velocidades de viento por arriba de 28 km/h, aunque en la región prevalecen vientos con velocidades mayores a 5 m/h y es el periodo Octubre a febrero en el que se aprecian velocidades de viento de menor magnitud. La dirección del viento prevaleciente es del nor-noreste y en menor proporción del norte, aunque también puede presentarse viento del sur (Figura 4).

**Figura 4.** Viento predominante modelado en la región de Tula de Allende <sup>5</sup>



<sup>3</sup> <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/climogramas-1981-2010>

<sup>4</sup> <https://content.meteoblue.com/ro/specifications/weather-model-theory>

<sup>5</sup> [https://www.meteoblue.com/es/tiempo/historyclimate/climatmodelled/tula-de-allende\\_m%c3%a9xico\\_3515064](https://www.meteoblue.com/es/tiempo/historyclimate/climatmodelled/tula-de-allende_m%c3%a9xico_3515064)

## Descripción del Valle de Toluca

La zona del Valle de Toluca se ubica al centro-norte de la porción occidental del Estado de México. El territorio del Estado se caracteriza por poseer una morfología dominada por un paisaje de sierras, pero precisamente la zona de estudio corresponde a los terrenos planos del occidente del Estado; fisiográficamente pertenece a la Subprovincia Lagos y Volcanes de Anáhuac, al sur y al sureste limita con el volcán Nevado de Toluca (o Xinantécatl), al este noreste con la Sierra de las Cruces y el límite oeste rodea al Cerro La Guadalupana.

La región presenta un rango altitudinal que varía entre los 3,100 y los 2,600 msnm, la parte más prominente corresponde a las partes bajas del volcán Nevado de Toluca, de este modo la altitud los terrenos desciende hacia el norte y noreste, donde se registra sólo una altitud de 2,600 msnm.

Dado el origen volcánico de la estructura rocosa de la zona del Valle de Toluca, las elevaciones que la rodean, así como elevaciones de poca altura que se encuentran dentro del Valle, están constituidas de andesita-basalto. Las partes más bajas y casi planas que se extienden a manera de franja, a lo largo del límite este y norte de la zona de estudio, se componen de aluvión conformado por gravas, arenas, cenizas y arcillas <sup>6</sup>. En las partes cercas a las laderas bajas del volcán Nevado de Toluca, el material predominante es del tipo lahar-toba andesítica <sup>7</sup>.

Por otra parte, la zona del Valle de Toluca queda comprendida dentro de la cuenca del río Lerma, éste corre en dirección sureste-noroeste, rodea por el este-noreste al área urbana de Toluca; y se alimenta de algunos afluentes que descienden del Nevado de Toluca, por el lado oeste de la ciudad de Toluca. Al centro de la zona de estudio se forman dos pequeñas lagunas, la más cercana a la ciudad de Toluca es alimentada por el río Lerma; más hacia el oeste se encuentra otra laguna cuyo aporte proviene del río Oyamel.

En los últimos años, el Río Lerma “recibe aportaciones importantes de las aguas residuales de Toluca y poblaciones vecinas, así como del corredor industrial Toluca-Lerma, representando una de las cuencas más contaminadas del país en su tramo Lerma-Atlacomulco”.

Gran parte del territorio de la zona del Valle de Toluca es ocupado por la agricultura de temporal (poco más del 90 % de la superficie total). El segundo uso de mayor extensión lo constituyen las áreas urbanas o asentamientos humanos. Sólo en la porción sur, al oeste del Valle, se registran pequeños fragmentos de bosque de pino, los menos en buen estado de conservación y otros con presencia de vegetación secundaria.

La climatología del Valle de Toluca muestra temperaturas máximas de 25 °C en el periodo abril-mayo, en la región Centro-norte; y de aproximadamente 30 °C en la región sureste; con temperaturas mínimas en diciembre-enero que pueden bajar de 0 °C en el Centro y norte del Valle (Calixtlahuaca-Capulhuac), pero de 9 °C en el Sureste (Zictepec). Por su parte, los meses con mayor precipitación (>40 mm) son de mayo a octubre (Figura 5).

En cuanto al viento en la zona (Figura 5, parte inferior), éste tiene su mayor intensidad de enero a abril, cuando pueden presentar velocidades mayores a 28 km/h, siendo de mayo a agosto cuando se espera que las velocidades prevalecientes sean superiores a 12 km/h o menores. En cuanto a la

<sup>6</sup> Carta Geológica Minera Ciudad de México E14-2, Estado de México, Tlaxcala, D. F., Puebla, Hidalgo, Morelos. Servicio Geológico Mexicano, Pachuca, México. 2002.

<sup>7</sup> INEGI, Anuario Estadístico y Geográfico de México, 2017, Instituto Nacional de Estadística y Geografía, Aguascalientes, México. 2017.

dirección del viento, prevalece el de componente de nor-noreste, con presencia también de viento del noreste, norte y este-noreste.

### **Descripción de la región Yecapixtla-Huexca-Cuatla**

La zona donde se encuentran Cuautla, el poblado de Huexca y Yecapixtla, corresponde a los municipios de Cuautla y Yecapixtla (al cual pertenece Huexca), respectivamente; mismos que se ubican al noreste del Estado de Morelos. El límite norte del municipio de Yecapixtla colinda con el Estado de México, al oeste limita con el municipio de Atlatlahucán, Morelos; al centro-oeste con el municipio de Cuautla, al este con el municipio de Ocuituco y al sureste y sur con los municipios de Zacualpan Temoac y Ayala, todos del Estado de Morelos. El territorio de Cuautla limita al norte, noroeste y centro-oeste con el territorio del municipio de Yautepec y al sur con el municipio de Ayala. La superficie ocupada por los municipios de Cuautla y Yecapixtla comprende 273.76 km<sup>2</sup>, cantidad que representa el 5.6% de la superficie total del Estado.

Desde el punto de vista fisiográfico, el territorio de ambos municipios se ubica en la Provincia del Eje Neovolcánico y, de manera más específica en la subprovincia Lagos y Volcanes de Anáhuac, la cual se caracteriza por la presencia de sierras de tipo volcánico y grandes aparatos volcánicos individuales en alternancia con amplias llanuras. Estas características se observan claramente en el territorio de los municipios de Yecapixtla y Cuautla, el cual se asienta en su totalidad en parte de las laderas bajas al sur-oeste del volcán Popocatepetl, por lo que la morfología local es más bien plana, con presencia de lomeríos bajos. Si se observa el territorio ocupado por ambos municipios como un bloque, comprendido entre los 1,260 y los 1,640 metros de altitud, el terreno presenta una ligera inclinación en dirección noreste-suroeste.

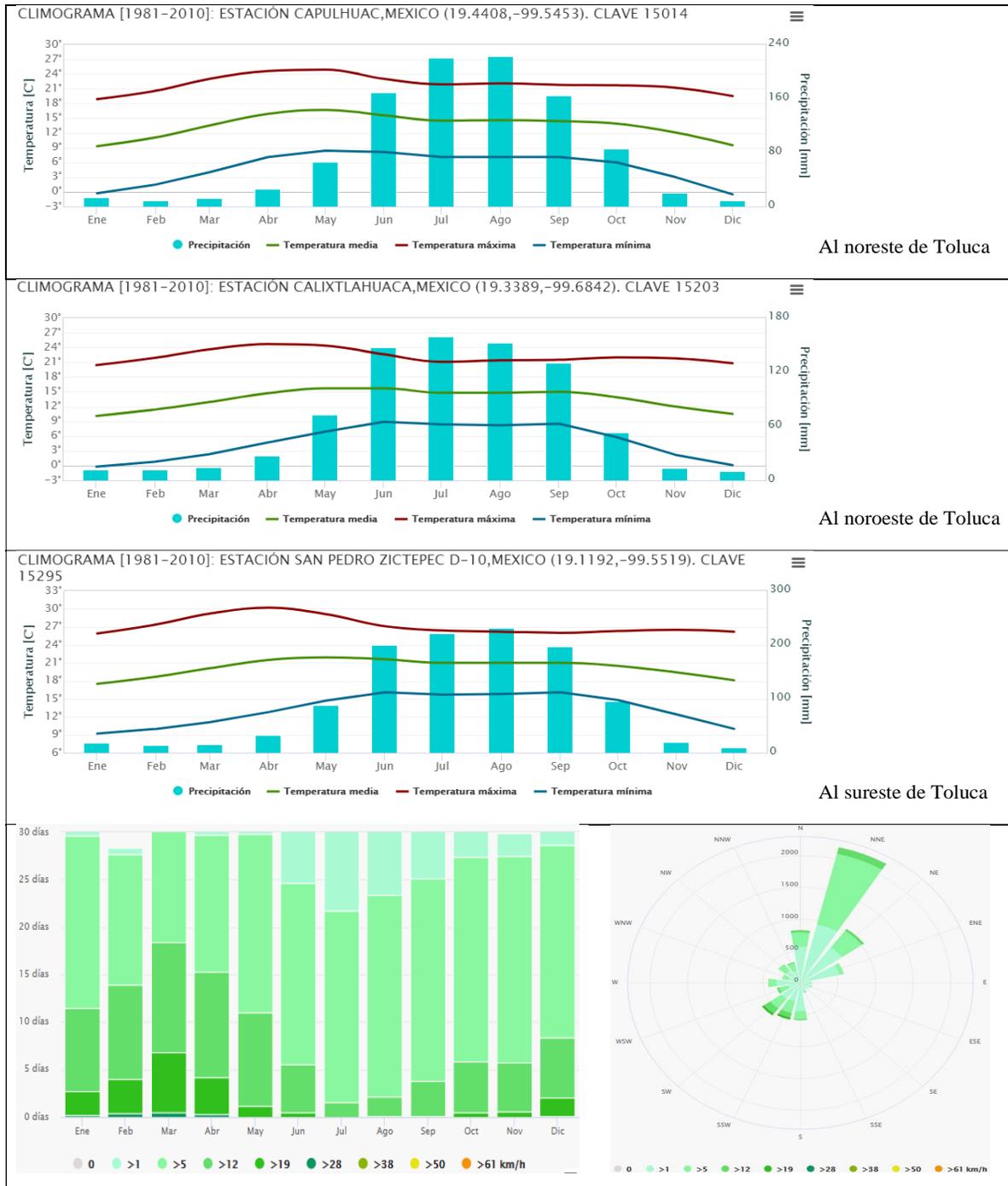
En la porción norte del municipio de Yecapixtla se encuentra un lomerío identificado como el cerro Yeteco, el cual alcanza una altitud de 2,100 msnm, que representa la parte de mayor elevación de la zona de estudio. En el resto del territorio del municipio de Yecapixtla, así como del correspondiente al municipio de Cuautla, la topografía es más bien plana, sobre todo en gran parte del territorio de Cuautla y en una franja de terreno paralela al límite occidental del municipio de Yecapixtla. En la porción centro-este de este municipio, se observa una topografía abrupta de los lomeríos ahí presentes, con fuerte disección del terreno marcada por valles o cortes profundos por donde escurren los ríos.

Por otra parte, la estructura rocosa que conforma el cerro el Yeteco es de basalto, tiene su origen en el periodo Neógeno, caracterizado éste por las manifestaciones volcánicas que conformaron el Eje Neovolcánico Transversal. El resto del territorio del municipio de Yecapixtla, así como el perteneciente al municipio de Cuautla, presenta una composición rocosa de tipo lahar. Este tipo de roca se conforma a partir de “corrientes de lodo y escombros volcánicos que descienden por las laderas del volcán, incorporando más material hasta depositarse e inundar las zonas bajas”<sup>8</sup>.

---

<sup>8</sup> [CENAPRED, Memoria técnica del mapa de peligros del volcán Popocatepetl, 2016. Centro Nacional de Prevención de Desastres, Instituto de Geofísica, UNAM, México, 2016.](#)

Figura 5. Climatología<sup>9</sup> y viento<sup>10</sup> en el Valle de Toluca.



<sup>9</sup> <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/climogramas-1981-2010>

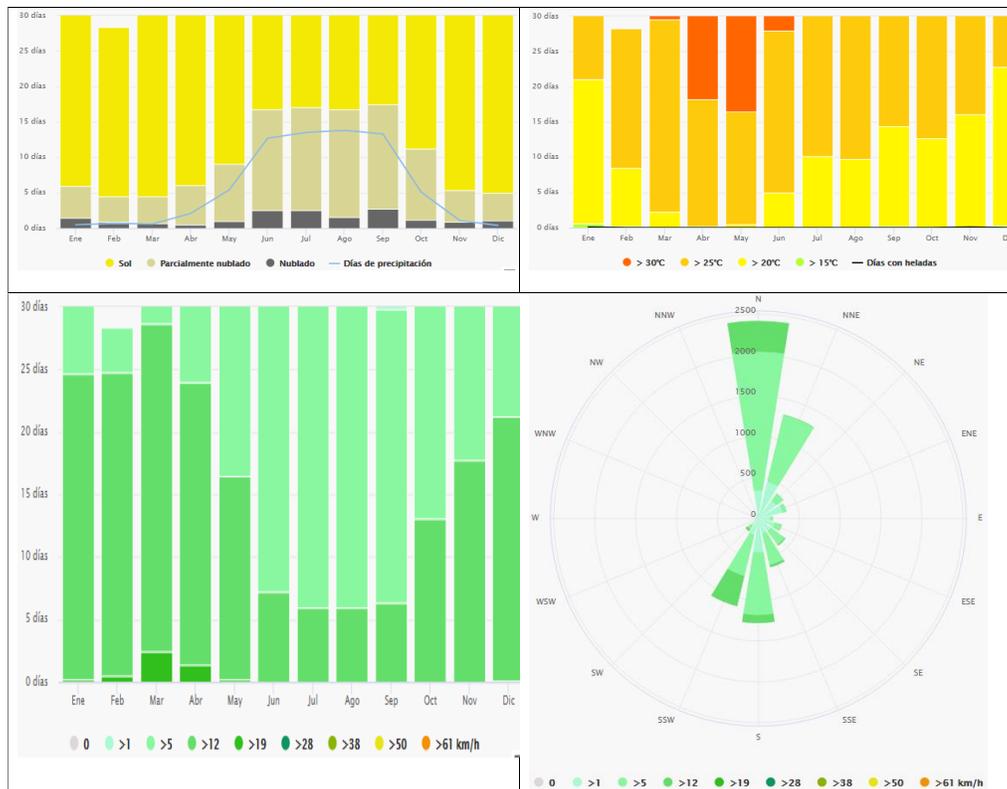
<sup>10</sup> [https://www.meteoblue.com/es/tiempo/historyclimate/climatemodelled/toluca-de-lerdo\\_m%c3%a9xico\\_3515302](https://www.meteoblue.com/es/tiempo/historyclimate/climatemodelled/toluca-de-lerdo_m%c3%a9xico_3515302)

Dada la configuración del relieve descrito, el patrón topográfico que se observa en la región es de una serie de pisos altitudinales, que conforme están más cerca al cerro el Yeteco son más agostos; y conforme se alejan en dirección hacia Cuautla, se incrementa la amplitud de los pisos, por lo que el terreno a ser más plano. Al norte del poblado de Huexca, específicamente al noreste, el relieve se observa más abrupto o escabroso, donde se hallan los valles más profundos; ahí los pisos altitudinales son muy estrechos, al parecer en esta zona confluyeron corrientes de lodo provenientes varias direcciones.

Las estimaciones de los últimos 30 años (Figura 6) modeladas por meteoblue<sup>11</sup> con el sistema NEMS muestran que las temperaturas máximas de 29 °C se presentan en el periodo abril-mayo, siendo este último el mes más caluroso; a su vez, las temperaturas mínimas se observan en enero con alrededor de 8 °C. Mientras que la precipitación alcanza su mayor intensidad en el mes de septiembre, aunque desde junio ya se presentan precipitaciones con más de 25 mm. Finalmente, la mayor intensidad del viento se observa de febrero a abril, con la máxima velocidad en marzo y la mínima en el periodo julio a septiembre. Como se observa en la Figura 6, prevalece viento del norte y nor-noreste en la Zona, y el viento con componente del sur y sur-suroeste es de menor proporción.

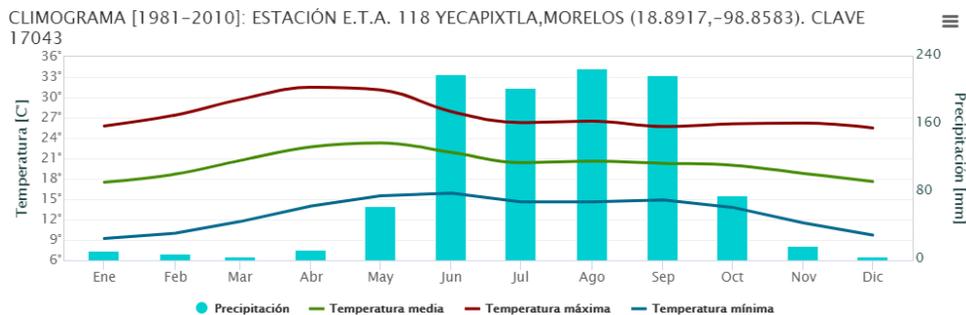
La estimación anteriormente descrita concuerda con la climatología para la estación meteorológica de Yecapixtla (Figura 7), donde se presentan las temperaturas máximas en el bimestre abril-mayo, el periodo con lluvias más intensas de junio a septiembre y las temperaturas más frías en enero, dando con ello certidumbre a las estimaciones del modelo NEMS.

**Figura 6.** Climatología estimada para Huexca, basada en modelaciones con NEMS.



<sup>11</sup> [https://www.meteoblue.com/es/tiempo/historyclimate/climatemodelled/huexca\\_m%c3%a9xico\\_3526945](https://www.meteoblue.com/es/tiempo/historyclimate/climatemodelled/huexca_m%c3%a9xico_3526945)

Figura 7. Climatología en la localidad de Yecapixtla Morelos <sup>12</sup>.



## 4. Cuenca Atmosférica

Un factor que influye de manera determinante en la concentración y dispersión de contaminantes en la atmósfera de una región o localidad es la forma de la superficie terrestre. Los contaminantes se ven limitados al área restringida por el relieve, teniendo mayor o menor espacio para dispersarse según el tamaño y forma de la cuenca. Por lo que los rasgos topográficos de una región definirán la magnitud y dirección de los vientos, pudiendo generar patrones de viento muy complejos <sup>13</sup>.

En este sentido, se ha señalado que parte de la complejidad de la meteorología de la zona centro de México es debida a la topografía tan accidentada de la región. Razón por la cual su análisis debe ser tratado bajo el concepto de cuenca atmosférica; la cual es definida como el espacio que delimita de manera coherente un conjunto de variables atmosféricas y de calidad del aire, usualmente definidas a través de modelos de depositación seca o húmeda de contaminantes; o bien, mediante ensambles de trayectorias de partículas y gases <sup>14 y 15</sup>.

Debido a que una cuenca atmosférica es parte de un fluido atmosférico tridimensional, no presenta límites bien definidos como los de las cuencas hidrológicas y, por tanto, los procesos físicos que generan los patrones de viento en una cuenca atmosférica pueden “desbordarse” a otra cuenca contigua, en función de las condiciones externas sinópticas y locales. Es decir, existe una dinámica que liga o comunica las cuencas atmosféricas adyacentes, como en el caso de la Corona Regional del Centro de México (CRCM). Situación que fue planteada por Bossert <sup>16</sup> en el análisis que realizó con datos de la campaña IMADA-AVER, donde concluye que se presenta un gradiente de presión entre las planicies al norte de la CRCM y el altiplano, condición que permite la entrada de masas de aire húmedo desde el Golfo de México.

<sup>12</sup> <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/climogramas-1981-2010>

<sup>13</sup> [www7.uc.cl/sw\\_educ/contam/efect/efur09.htm](http://www7.uc.cl/sw_educ/contam/efect/efur09.htm)

<sup>14</sup> Dennis, R.L. and R. Mathur, 2001. Airshed domains for modeling atmospheric deposition of oxidized and reduced nitrogen to the Neuse/Pamlico system. Hydrological Science and Technology, Special Issue, 17, No. 1-4, 107-117.

<sup>15</sup> Magaña, V.O. y E. Caetano, 2007. Identificación de Cuencas Atmosféricas en México. Dirección General de Investigación sobre la Contaminación Urbana y Regional. Informe Final. INE/A1-001/2007.

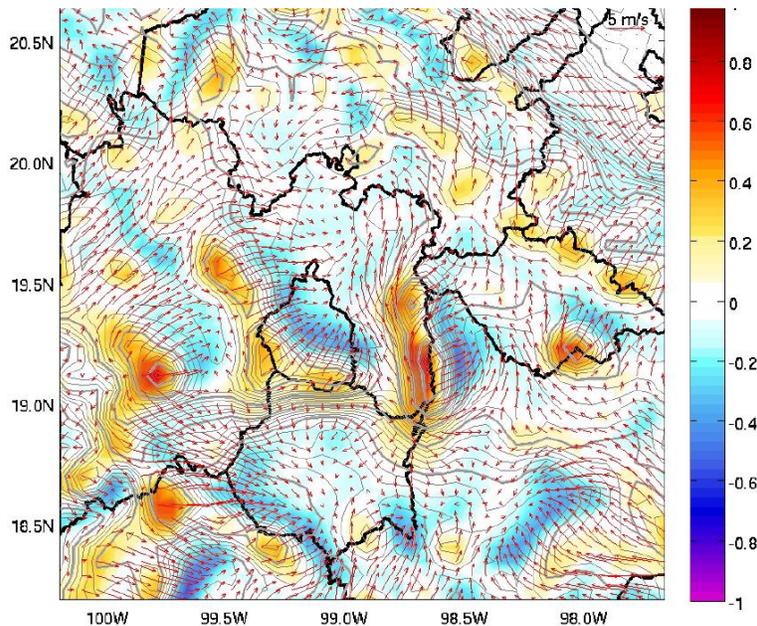
<sup>16</sup> Bossert, J.E., 1997. An investigation of flow regimes affecting the Mexico City region. J. App. Meteor. 36, 119-140.

## 5. METODOLOGÍA PARA LA DEFINICIÓN DE CUENCAS ATMOSFÉRICAS EN LA REGIÓN CRCM

La metodología propuesta por Zavala *et al.* en el Estudio de Calidad el Aire y su Impacto en la Región Centro de México (ECAIM)<sup>17</sup> considera el efecto de la orografía en la formación y mantenimiento de la estructura espacial de patrones de circulación en niveles cercanos a la superficie. Utiliza las medias mensuales para su análisis y sus resultados muestran un patrón espacial de viento convergente en el centro de los valles de la CRCM. Por lo que utiliza la divergencia horizontal del viento para reconocer y definir las cuencas, desde un punto de vista cinemático.

Para realizar lo anterior, calculó la media mensual del viento horario y su divergencia horizontal; con la ventaja de que la media mensual elimina los ciclos diarios de las series de tiempo de los campos de viento y enfatiza la señal orográfica. Por ejemplo, durante el periodo de secas en el Valle de México observó que cuando el viento sube por el lado oeste de la montaña (barlovento) en la Sierra de las Cruces, muestra divergencia ( $\nabla \cdot V > 0$ ) conforme el viento se acelera, y adquiere su máximo sobre la cima de la montaña. En contraste, se observa el efecto opuesto o de convergencia ( $\nabla \cdot V < 0$ ) cuando las parcelas de aire descienden viento abajo (sotavento), por el lado este de la montaña, hacia el centro de la Cuenca del Valle de México (Figura 8).

**Figura 8.** Viento a 10 m y Divergencia ( $s^{-1}$ , en colores),



Fuente ECAIM, 2007

Zavala concluye que el índice de la divergencia permite definir la extensión espacial de una cuenca y apreciar la variabilidad interanual e intermensual de las áreas afectadas por la convergencia de las parcelas de aire en una cuenca. De esta forma, la posición de la línea de contorno para la cual  $\nabla \cdot V = 0$ , indica los límites de una cuenca, en función de la circulación atmosférica local. Cabe resaltar que este principio para definir cuencas atmosféricas complementa lo planteado por otros métodos, como el de percepción de parcelas que se acumulan en el centro de un valle.

<sup>17</sup> INECC-SEMARNAT. Estudio de Calidad el Aire y su Impacto en la Región Centro de México, Tomo 1, Informe final. Ciudad de México, 2014.

## 6. DIVERGENCIA Y CIRCULACIÓN ATMOSFÉRICA PARA LA ÉPOCA SECA (ENERO-ABRIL)

Los campos de divergencia para los cuatro años (2010, 2011, 2012 y 2013) de simulación desarrollados con WRF en el estudio ECAIM, se muestran en la Figura 9, para los meses de enero, febrero, marzo y abril. En las gráficas de dicha figura los patrones de divergencia muestran similitud año con año y mes a mes, lo cual es evidencia de un control orográfico y térmico importante en las medias mensuales de los campos de viento. Por lo que puede mencionarse que esta propiedad del campo escalar  $\nabla \cdot V$ , permite definir con precisión cual es la extensión y posición de las cuencas atmosféricas presentes en la región.

Los promedios mensuales del campo de viento de enero a abril de 2010 a 2013, estimados en el estudio ECAIM se muestran en las gráficas de la Figura 10. En éstas es notable la aceleración de la circulación del viento sobre la cima de las montañas hacia el interior de las cuencas. Y comparando los patrones de la Figura 10 con lo mostrado en la Figura 9, se observa que la circulación en la CRCM es más variable espacialmente, que los campos de convergencia y divergencia horizontal; y que la magnitud de los vientos varía mes a mes y año con año de manera significativa. Estos resultados del proyecto ECAIM dan soporte al uso del escalar  $\nabla \cdot V$  como criterio o indicador para definir la extensión espacial de las cuencas, desde un punto de vista cinemático.

Figura 9. Divergencia horizontal del campo de viento ( $\times 10^{-4} s^{-1}$ ) estimado con WRF.

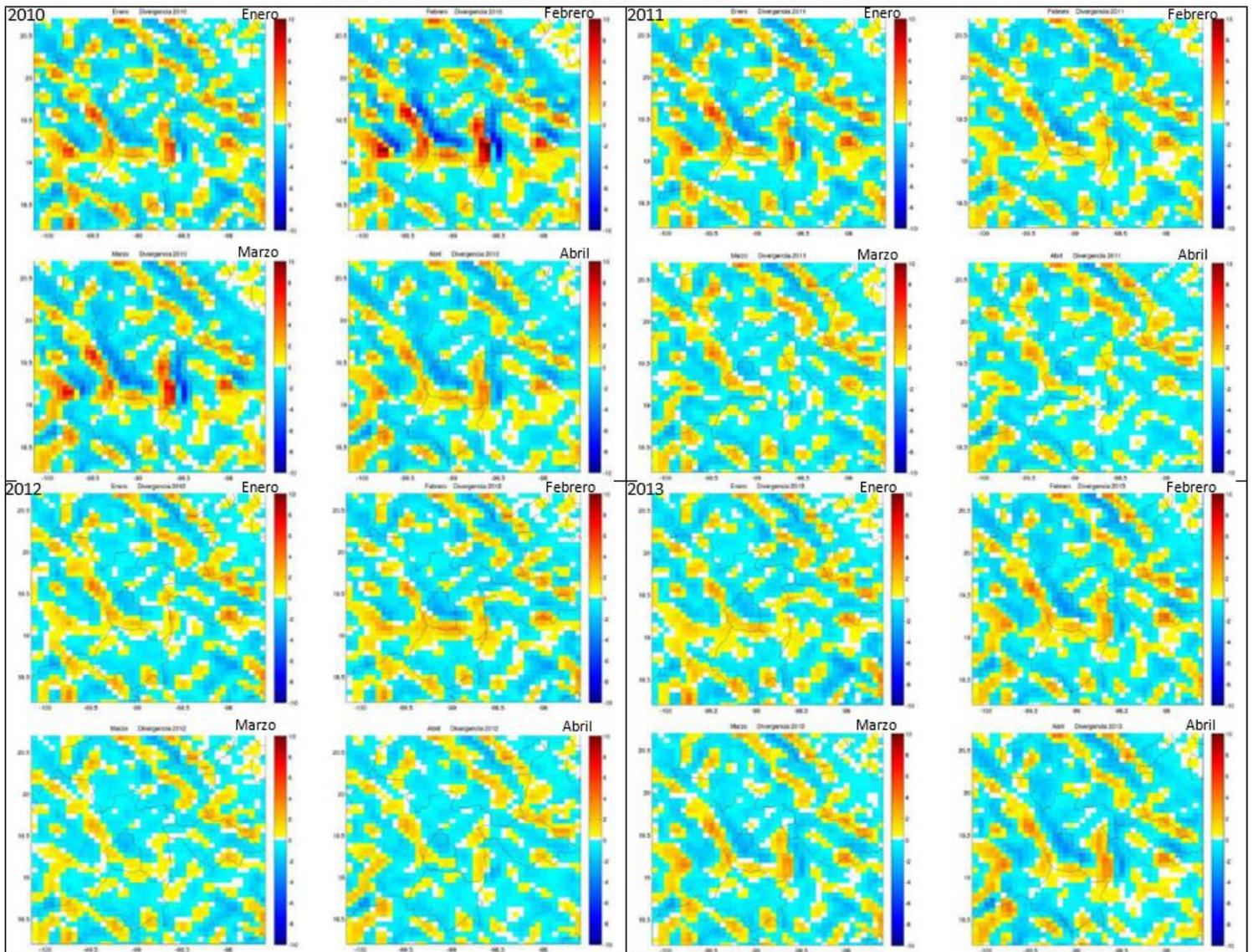
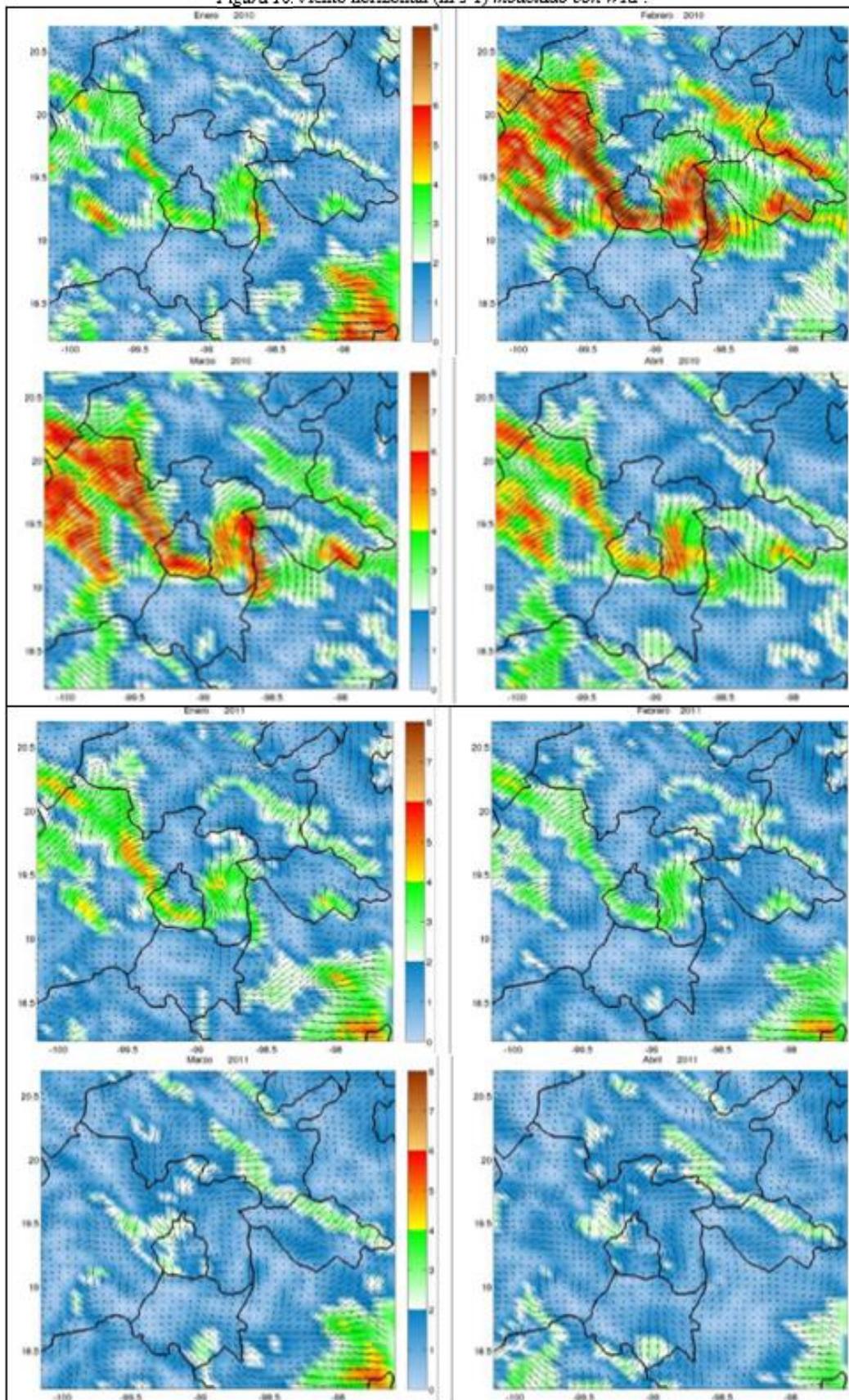
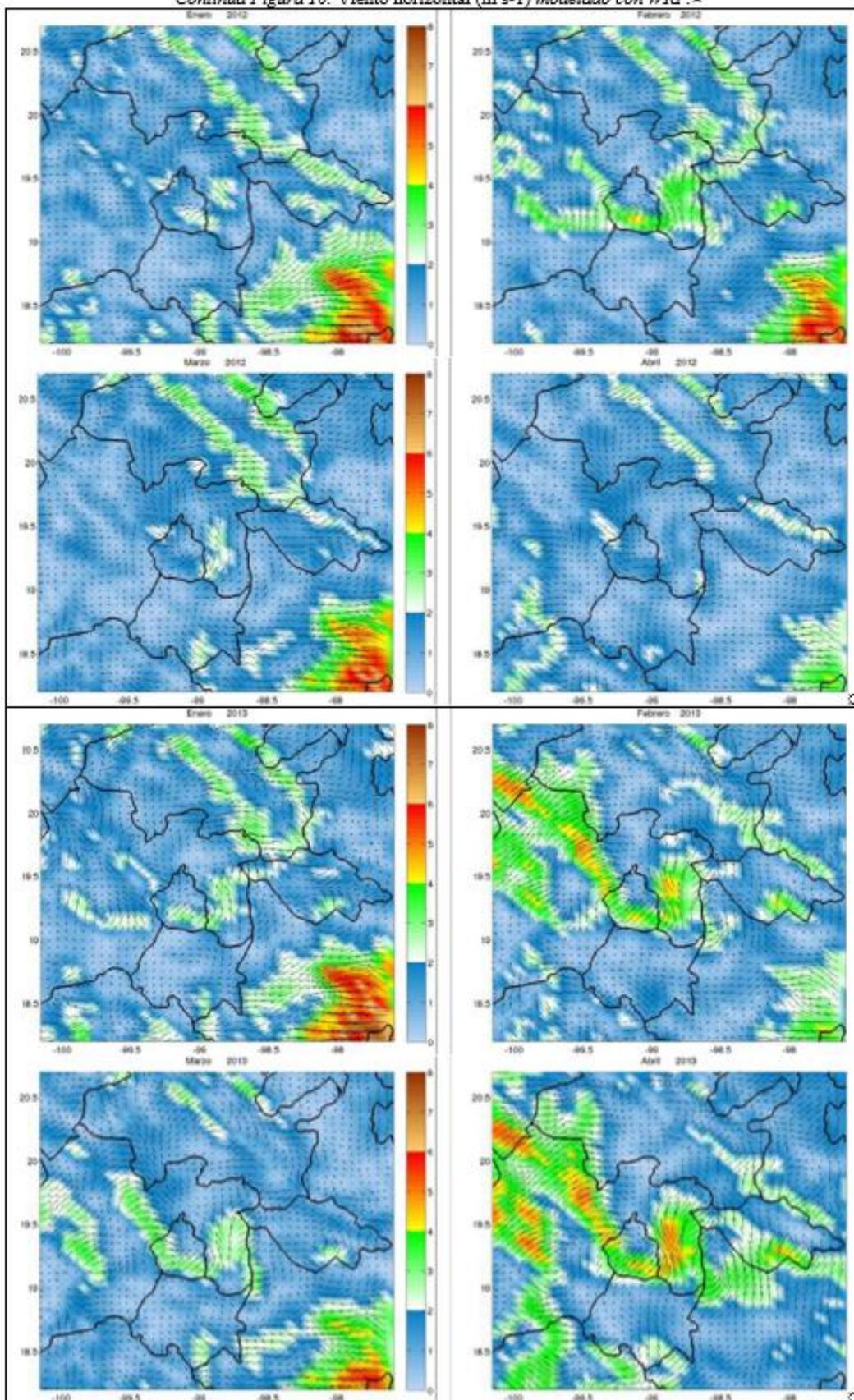


Figura-10. Viento horizontal (m s-1) modelado con WRF.



Continúa-Figura-10. Viento horizontal (m-s-1) modelado con WRF



## 7. CIRCULACIÓN ATMOSFÉRICA HORARIA EN LA CRCM

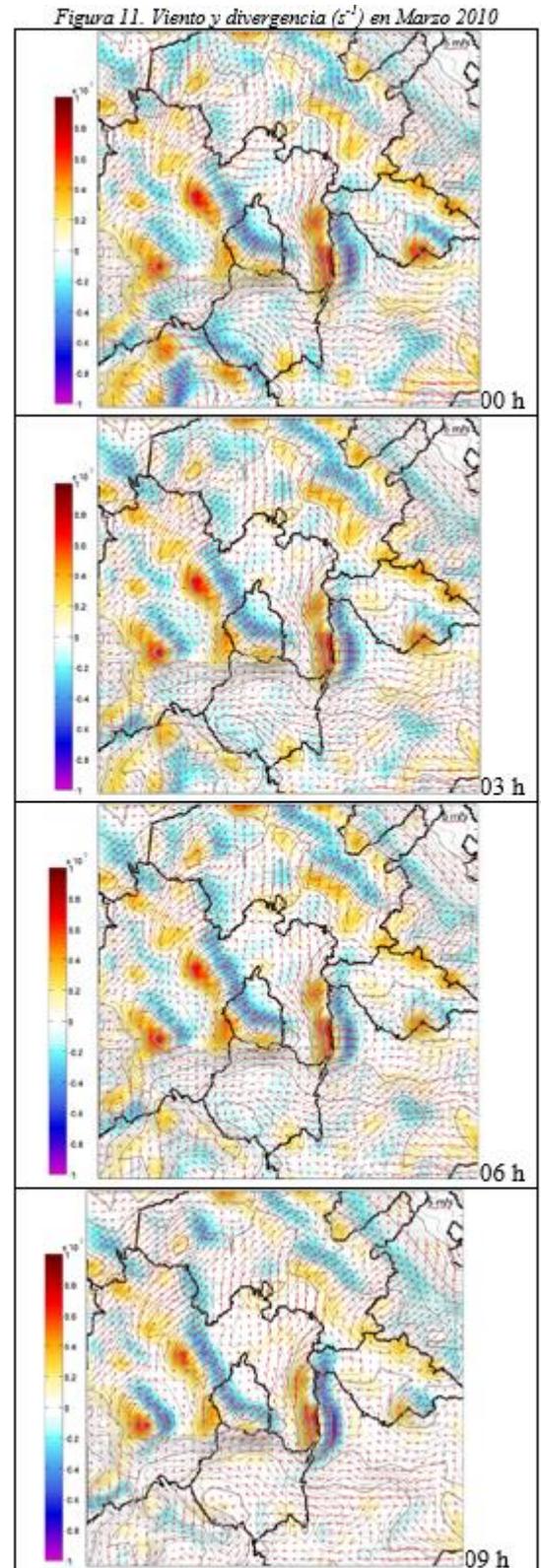
La circulación atmosférica horaria de la CRCM (Figura 11), se analizó en el estudio ECAIM con los promedios de los vientos a 10 metros de altura, y sus campos de divergencia, para marzo y septiembre de 2010. En seguida se describen los resultados de marzo.

00 h. Las áreas de convergencia y divergencia más marcadas se observan sobre o alrededor de las partes más altas de las zonas montañosas; hacia la parte sudoriental de la CRCM, al sur de los 19° de latitud, predominan vientos del este. Se observaron vientos del SO en Centro y sur de CDMX provenientes del Oriente de la Sierra de Chichinautzin (SC); y vientos débiles en su parte norte. También se apreció una fuerte convergencia en las laderas orientales de las Sierras de las Cruces y SC. Con viento intenso por la ladera de la Sierra Nevada (SN), desde el paso de la SC y la SN, hacia Hidalgo. En la región nororiental de la CRCM se observaron vientos del suroeste que formaron una zona de convergencia a lo largo de las curvas de nivel, con un descenso pronunciado del terreno, hacia donde los vientos fueron muy débiles y con componente del este. Finalmente, se observó un flujo hacia el norte a través del paso entre la SN y La Malinche, el cual genera una zona de convergencia con vientos del oeste, que se observan sobre la ladera oriental de la SN.

03 h. Los patrones de viento y divergencia promedio para las 03:00 h son similares a los de las 00 h, aunque con vientos menos intensos. El extremo nororiental de la CRCM mostró un cambio en la dirección de los vientos, con vientos ligeros predominantes del noroeste. Los vientos más intensos se apreciaron en las zonas de divergencia, con vientos hacia el este y noreste en las partes más altas. También se estimó que los vientos en la parte noroccidental del Edo. de México y su colindancia con Hidalgo, fueron relativamente intensos.

06 h. A esta hora se presentan características del campo de viento similares al de las 03 h, en magnitud y en dirección.

09 h. Se observó un cambio en la dirección del viento en el extremo nororiental de la CRCM, teniendo ahora viento del norte y noreste, que generan una convergencia a lo largo del descenso del terreno hacia el nororiente. Los



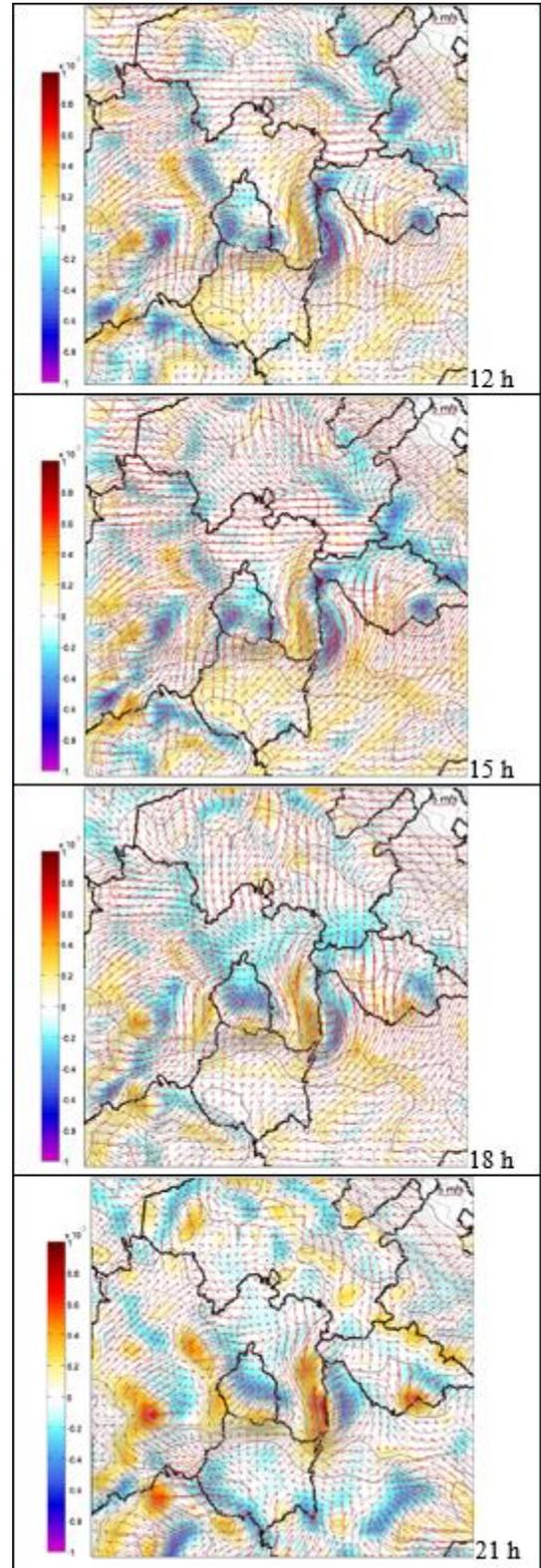
Continúa Figura 11.

vientos en la parte norte de Morelos provienen del sur y suroeste; y los vientos en la parte oriental de las sierras de las Cruces y SC, son menos intensos que en las horas previas. Se observa una ligera intensificación de los vientos del sur, en la región noroccidental del Estado de México y suroccidental de Hidalgo. Prevalece el flujo hacia el norte a lo largo de la ladera occidental de la SN y hacia el este a lo largo de su ladera oriental. Se observó una zona de convergencia en la ladera oriental de esta sierra.

*12 h.* Se apreció cambio en vientos del centro-sur y sureste de la CRCM, estimándose vientos del sur y del oeste en gran parte de la zona. En Hidalgo predominó viento del oeste, con excepción de su parte nororiental, donde se observó un flujo del norte y noroeste, que converge en esa zona. En las laderas occidentales de la SN el flujo se dirige hacia el este. En el extremo nororiental de la CRCM se intensificó el viento del noreste y los flujos hacia el norte y noreste del Nevado de Toluca. Estos vientos recurvan al este, cruzando la SC, lo que genera vientos intensos del sur y suroeste en el sur de la CDMX.

*15 h.* Con vientos del oeste más intensos que a las 12 h, en parte de la región noroccidental y la franja entre  $19.5^{\circ}\text{N}$  y  $20.0^{\circ}\text{N}$ ; con componente del norte en el centro-norte, y componente del noreste, en el extremo nororiental de la CRCM. Se presentaron vientos intensos del sur y suroeste en gran parte de la franja entre  $18.5^{\circ}\text{N}$  y  $19.5^{\circ}\text{N}$ .

*18 h.* Los patrones de viento son similares a los de las 15 h, pero menos intensos. En la parte central de la franja entre  $19.5^{\circ}\text{N}$  y  $20.5^{\circ}\text{N}$ , los vientos tienen componente del norte. En el nororiente de la CRCM se estimó viento del este. Estos patrones generaron una zona de confluencia y convergencia alrededor de los  $19.75^{\circ}\text{N}$  y hacia el este de los  $99.25^{\circ}\text{W}$ . Aún predominan vientos del sur-suroeste en la parte sur de la CDMX, Morelos y Puebla; aunque en general al sur de  $18.5^{\circ}\text{N}$  predomina viento del oeste. En los pasos montañosos, a ambos lados de la SC y entre la SN y La Malinche, prevalece viento hacia el norte.



27 h. En la franja entre los 18.5°N y 19.0°N se observa un patrón complejo de vientos con componente norte. Disminuye el flujo hacia el norte entre la SC y el Nevado de Toluca; y el flujo a través de la SC y la SN prevalece y tiene mayor penetración hacia el norte. En el extremo nororiental de la CRCM prevalecen vientos menos intensos del este. Y al sur de 18.5°N se observaron vientos del sur entre los 99.5°W y 98.25°W; en tanto que al este de los 98.25°W, se presentaron vientos del este, lo cual generó algunas zonas de convergencia a lo largo de los 18.5°N.

A continuación, se describe para septiembre la circulación atmosférica de la CRCM (Figura 12) desarrollada en el estudio ECAIM.

00 h. En gran parte de la CRCM predominaron vientos con componente del este; a ambos lados de la SC se observaron zonas de convergencia de los vientos y el flujo a través del paso entre la SN y La Malinche mostró una dirección hacia el sur.

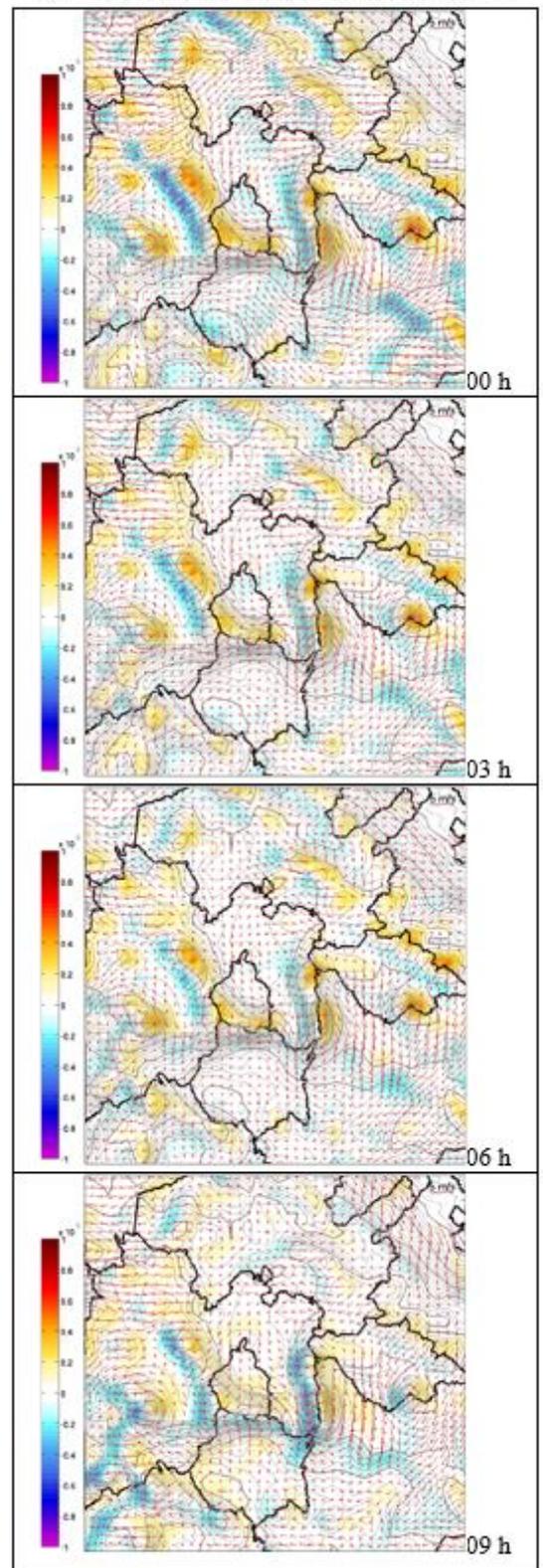
Los vientos en el extremo nororiental de la CRCM fueron débiles y con dirección variable, mientras que los vientos al noroeste y al sureste fueron intensos y con componente del este. Las zonas más altas mostraron vientos divergentes; y las zonas de convergencia se localizaron en las laderas occidentales de las zonas montañosas.

03 h. Patrones de viento parecidos a las 0 h, pero con vientos menos intensos y zonas de convergencia y divergencia más débil. Vientos del oeste más intensos en el extremo nororiental.

06 h. Los patrones de viento fueron similares a los de las horas anteriores, pero con vientos aún menos intensos.

09 h. Intensificación de zonas de convergencia a ambos lados de la SC, con flujo hacia el sur. Las zonas de convergencia al oeste del Nevado de Toluca, y de las regiones montañosas que están hacia el sur de este volcán, se muestran más intensas. Prevalece el flujo intenso hacia el sur entre la SN y La Malinche. En la CDMX se observaron vientos del norte, que se van intensificando y divergiendo conforme se dirigían del norte hacia el sur.

Figura 12. Viento y divergencia ( $s^{-1}$ ) en Septiembre 2010.



Los vientos de Morelos presentaron una componente del sur, lo que genera una convergencia en los límites con la CDMX. En el extremo nororiental de la CRCM se observó un cambio en la dirección de los vientos, ahora con componente del norte.

12 h. Continúa la tendencia de intensificación en las zonas de convergencia con cierta expansión hacia el este; mientras que las zonas de divergencia al oriente de las montañas del eje neovolcánico se ven disminuidas.

En la CDMX y al norte de los  $19.5^{\circ}\text{N}$ , el viento dominante es del noreste. Se observó un cambio en la magnitud y dirección del flujo entre la SN y La Malinche, siendo menos intenso que tres horas antes, y ahora con dirección del noreste.

15 h. Continúan los vientos intensos del noreste en toda la región al norte de  $19.5^{\circ}\text{N}$ ; se aprecia una ligera disminución en la intensidad de las zonas de convergencia, y continúan debilitándose las zonas de divergencia.

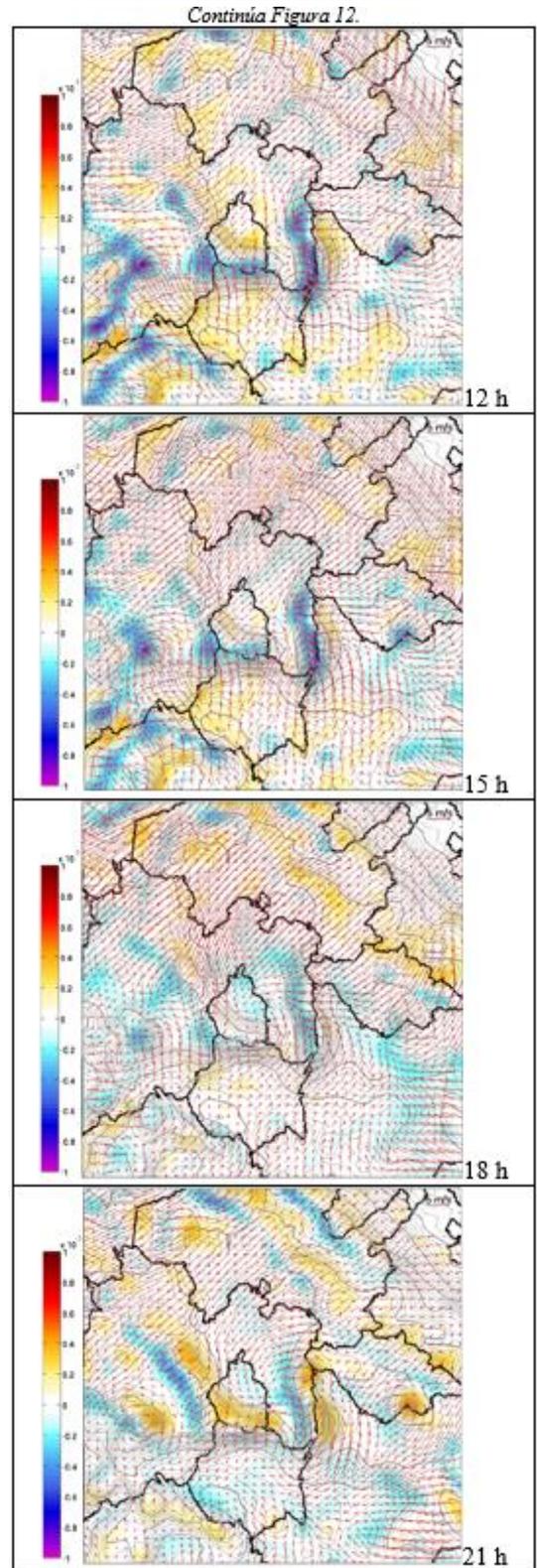
Al sur de los  $19.0^{\circ}\text{N}$  se observa un incremento en la magnitud de los vientos, que en su mayoría provienen del sur, y algunos penetran más al norte de esta latitud.

18 h. En la región al sur de los  $19.5^{\circ}\text{N}$  se presentaron vientos menos intensos que a las 15 h, y con los patrones de circulación más complejos. Al norte de dicha latitud siguieron prevaleciendo vientos relativamente intensos del noreste.

Las zonas de convergencia y divergencia asociadas a las regiones montañosas del eje neovolcánico se vieron debilitadas. Sin embargo, las zonas de divergencia al norte y nororiental de la CRCM se mostraron más intensas.

Por su parte, en los pasos montañosos a ambos lados de la SC, se observaron flujos hacia el norte, que giraron hacia el oeste conforme penetran hacia el norte. En particular, el flujo del lado oriental generó una zona de convergencia en la región nororiental de la CDMX.

21 h. Con patrón de vientos similares a los de las 0 h. Aunque se observaron cambios en la intensidad de las zonas de convergencia y divergencia, principalmente al sur de los  $19.5^{\circ}\text{N}$ .



Adicional a este análisis de circulación, en el estudio ECAIM se realizó la modelación del “Desplazamiento de parcelas de aire en superficie mediante simulaciones con partículas”, concluyendo lo siguiente:

**Transporte de partículas con origen en Toluca:** En enero, febrero, marzo y abril exporta parte de sus partículas hacia Zumpango y la CDMX; de mayo a agosto no parece exportar a otras cuencas; de septiembre a diciembre exporta una parte hacia el oeste del Ajusco, cerca de la frontera con Morelos y la CDMX

**Transporte de partículas desde Cuernavaca:** De enero a abril parte de sus emisiones llegan a la CDMX; de mayo a octubre exporta hacia el oeste del Ajusco; en noviembre parte vuelve a llegar a la CDMX; en diciembre las emisiones se desplazan hacia el suroeste de Morelos y poco hacia el oeste del Ajusco.

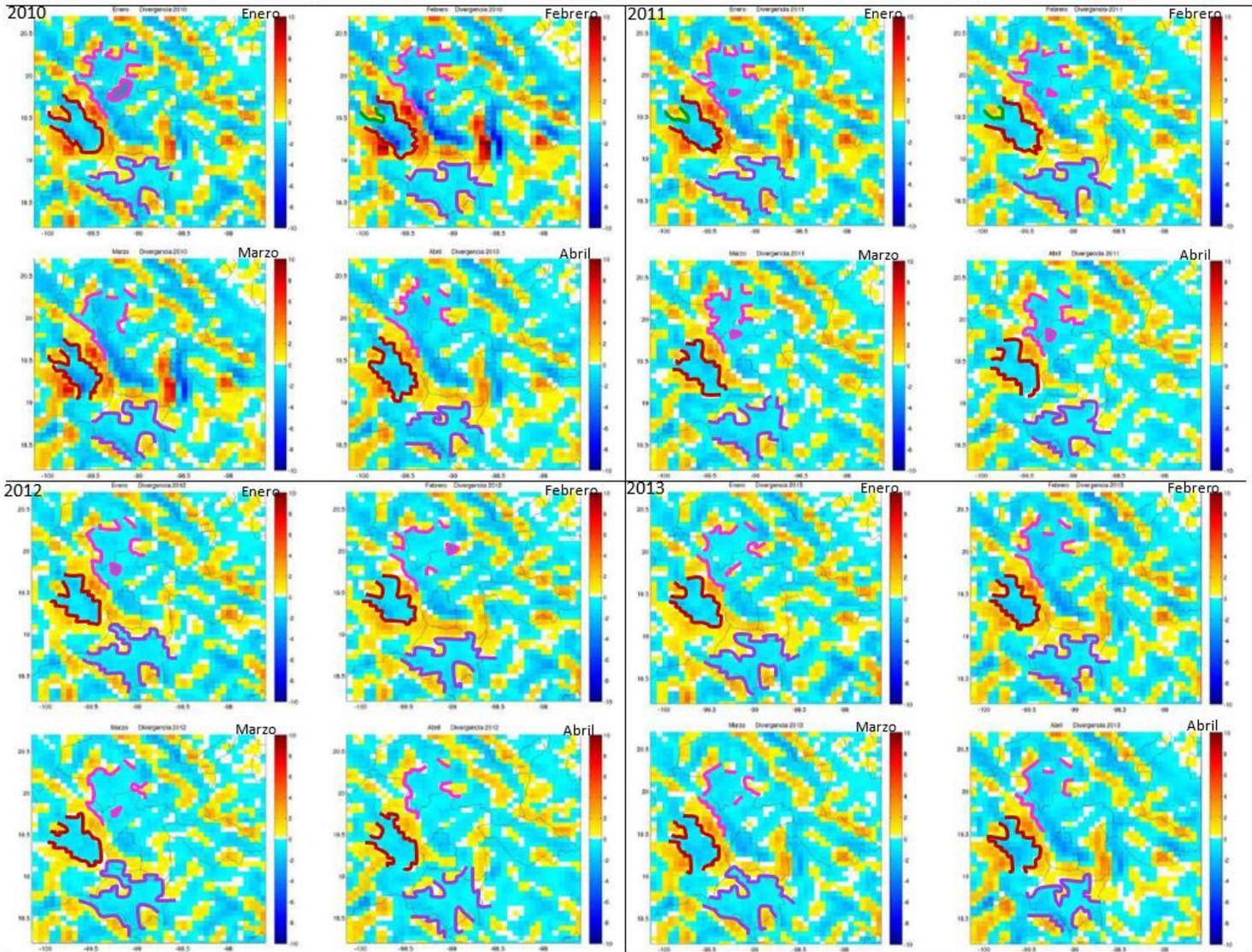
**Transporte de partículas vertidas en Pachuca:** De enero a marzo las emisiones se dispersan rápidamente; como igualmente lo hacen de junio a diciembre, pero el sureste, a lo largo de Texcoco-Amecameca-Ozumba.

## 8. DEFINICIÓN DE LAS CUENCAS ATMOSFÉRICAS DE TULA, VALLE DE TOLUCA Y YECAPIXTLA-HUEXCA-CUAUTLA.

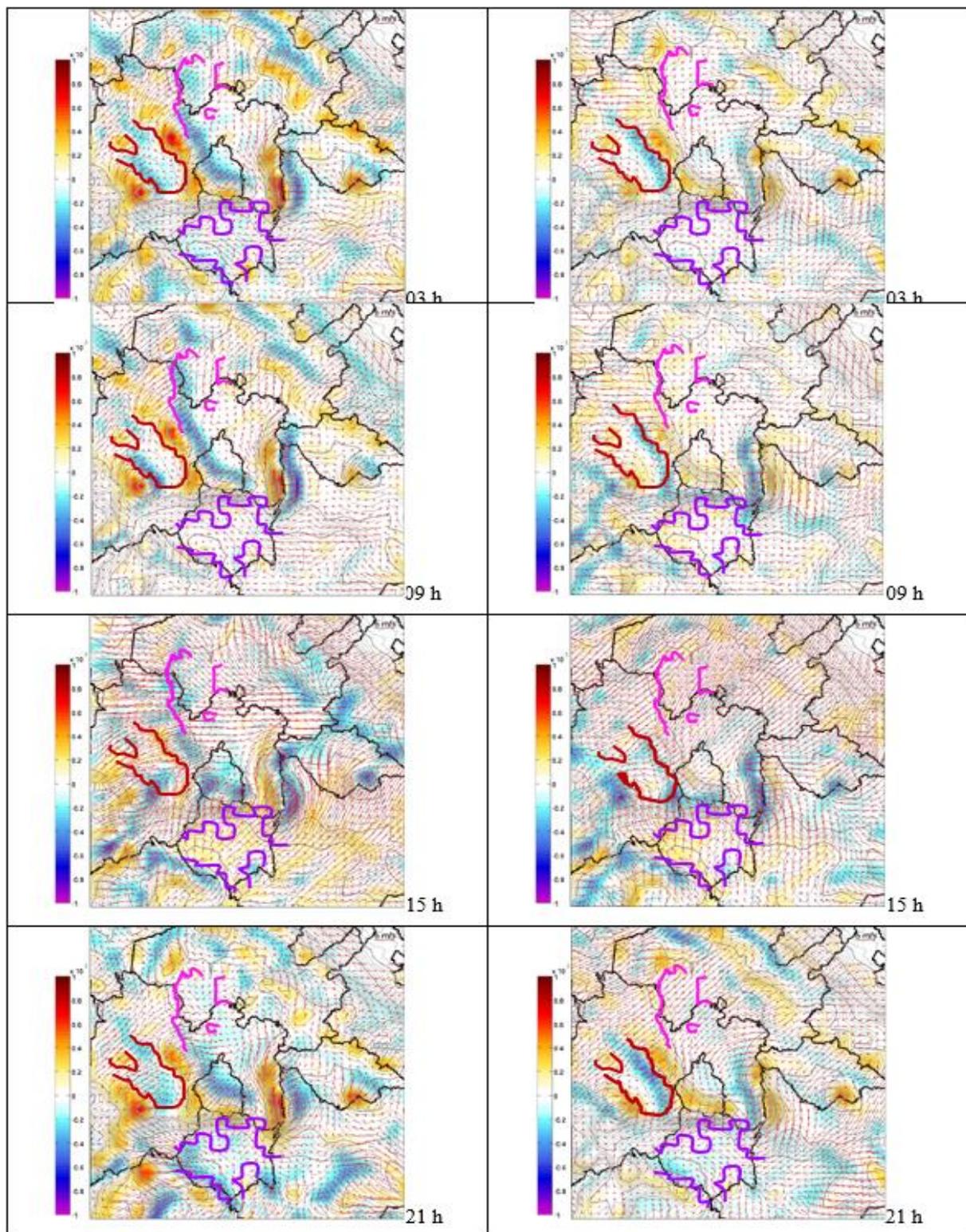
Con la finalidad de definir la extensión de la cuenca atmosférica donde están establecidas las localidades Tula, Toluca y Yecapixtla-Huexca-Cuautla, se utilizaron los resultados de divergencia-convergencia (Figuras 9 y 10) del estudio ECAIM, delimitando con ello las regiones de dispersión atmosférica en las zonas mencionadas.

Los límites fueron establecidos en cada cuenca utilizando las zonas donde  $\nabla \cdot V = 0$ , como sugiere Zavala en su análisis de divergencia arriba descrito. Estos bordes se aprecian en las Figuras 9, 11 y 12 como franjas en color blanco, que definen la zona de transición de la divergencia hacia la convergencia. El proceso de delimitación de las cuencas se presenta en las Figuras 13 y 14, para cada región de interés.

Figura 13. Delimitación de cuencas atmosféricas utilizando bordes de transición Divergencia-Convergencia en Tula (rosa), Toluca (vino) y Yecapixtla-Huexca-Cuautla (morado).



**Figura 14.** Delimitación de cuencas con base en viento y divergencia horarias en marzo (izquierda) y septiembre (derecha) del 2010.



## 9.RESULTADOS

### Definición de las Cuencas Atmosféricas

Con base en el análisis de los resultados mostrados en las Figuras 13 y 14, la delimitación final de las cuencas de Tula, Toluca y Yecapixtla-Huexca-Cuautla se muestran en la Figura 15, donde se aprecia que las cuencas atmosféricas quedan parcialmente limitadas por las sierras de sus cuencas hidrológicas<sup>18</sup>.

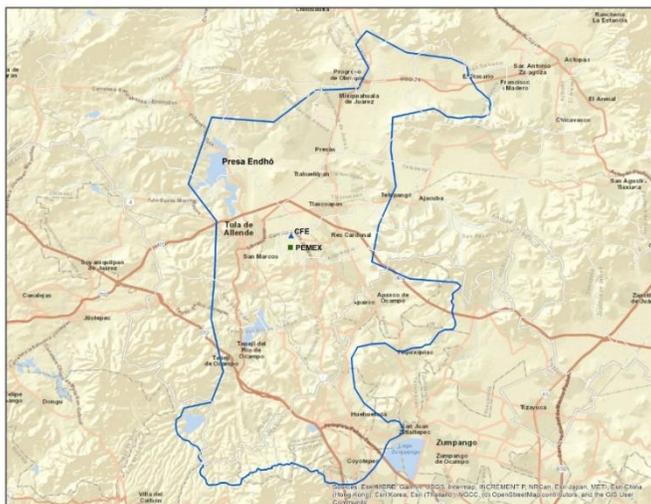
Cabe mencionar que, para facilitar el procesamiento, se muestran las cuencas cerradas, pero como se aprecia en las Figuras 12 y 13, parte de sus fronteras pueden estar comunicadas con otras cuencas. A partir de la delimitación de las cuencas atmosféricas, como se describió en la sección anterior, cada cuenca incluyó total o parcialmente los siguientes municipios.

**Cuenca de Tula:** Atitalaquia, Atotonilco de Tula, Francisco I. Madero, Mixquiahuala de Juárez, Progreso de Obregón, Tepeji del Río de Ocampo, Tepetitlán, Tetepango, Tezontepec de Aldama, Tlahuelilpan, Tlaxcoapan y Tula de Allende del Estado de Hidalgo; y Coyotepec, Huehuetoca, Zumpango y Tepetzotlán del Estado de México.

**Cuenca del Valle de Toluca:** Cuenca del Valle de Toluca: Almoloya de Juárez, Almoloya del Río, Atizapán, Atlacomulco, Calimaya, Capulhuac, Chapultepec, Ixtlahuaca, Jiquipilco, Jocotitlán, Lerma, Metepec, Mexicaltzingo, Otzolotepec, Rayón, San Antonio la Isla, San Felipe del Progreso, San Mateo Atenco, Temoaya, Texcalyacac, Toluca, Villa Victoria, Xonacatlán, Zinacantepec y San José del Rincón, todos del Estado de México.

**Cuenca de Yecapixtla-Huexca-Cuautla:** Ozumba y Tepetlixpa del Estado de México; Amacuzac, Atlatlahucan, Ayala, Coatlán del Río, Cuautla, Jantetelco, Jojutla, Jonacatepec, Mazatepec y Miacatlán; y Ocuituco, Tepalcingo, Tetecala, Tlaltizapán, Tlaquiltenango, Xochitepec, Yautepec, Yecapixtla, Zacatepec, Zacualpan y Temoac del Estado de Morelos.

**Figura 15.** Cuencas atmosféricas de Tula (arriba), Valle de Toluca (en medio) y Yecapixtla-Huexca-Cuautla (abajo) delimitadas a partir de campos de divergencia y convergencia del viento en la Corona Regional del Centro de México.



<sup>18</sup> <https://www.gob.mx/imta/articulos/que-es-una-cuenca-211369>

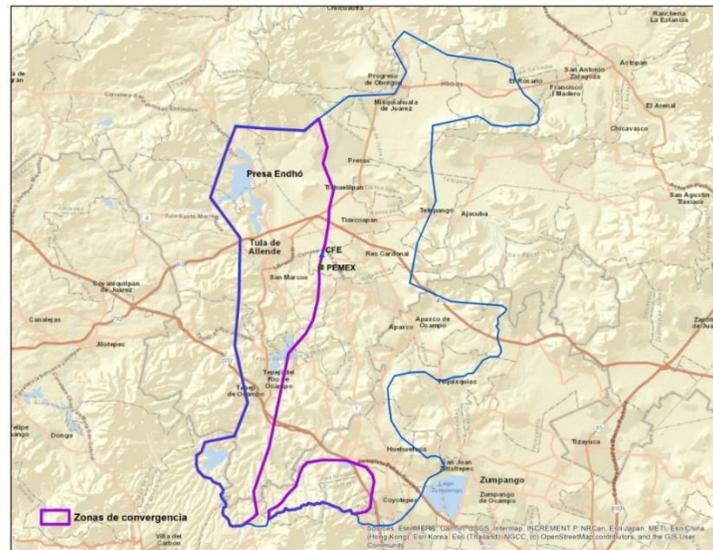


## Zonas de convergencia

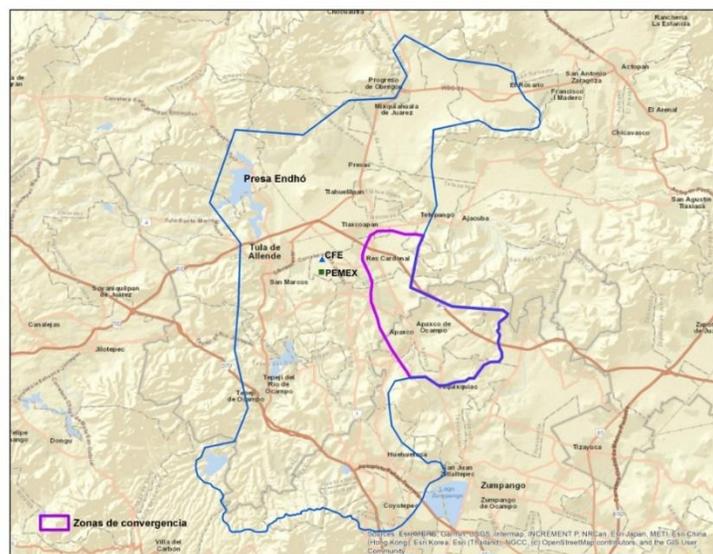
Una vez definidas las fronteras de las cuencas para Tula, Toluca y Yecapixtla-Huexca-Cuautla, se realizó el análisis de las zonas de convergencia de los gráficos en las Figuras 11 y 12, esto se efectuó delimitando dichas zonas en cada gráfico; con lo cual se generaron polígonos de estas. La superposición de tales polígonos permitió definir zonas de convergencia para marzo y para septiembre, mismas que son propuestas para establecer los sitios de medición.

A continuación, se presentan en la Figura 16, las zonas de convergencia definidas para cada mes y cuenca atmosférica:

**Figura 16.** Zonas de convergencia (líneas rosas) para las regiones de Tula, Valle de Toluca y Yecapixtla-Huexca-Cuautla, en marzo y septiembre.

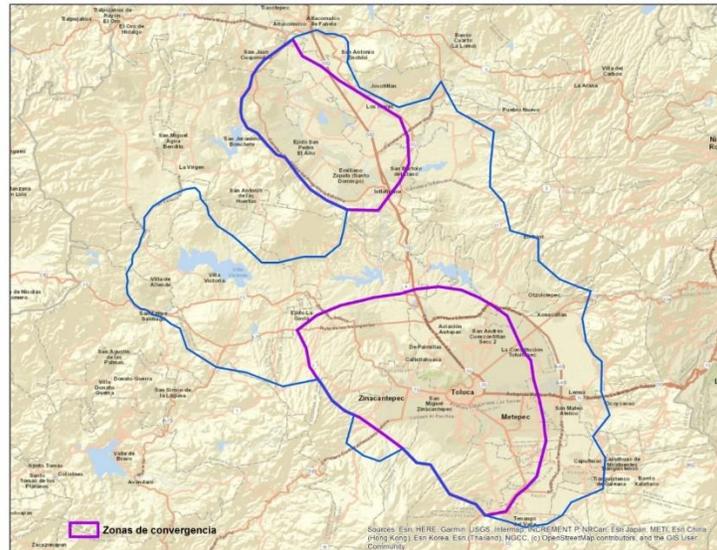


Tula-marzo

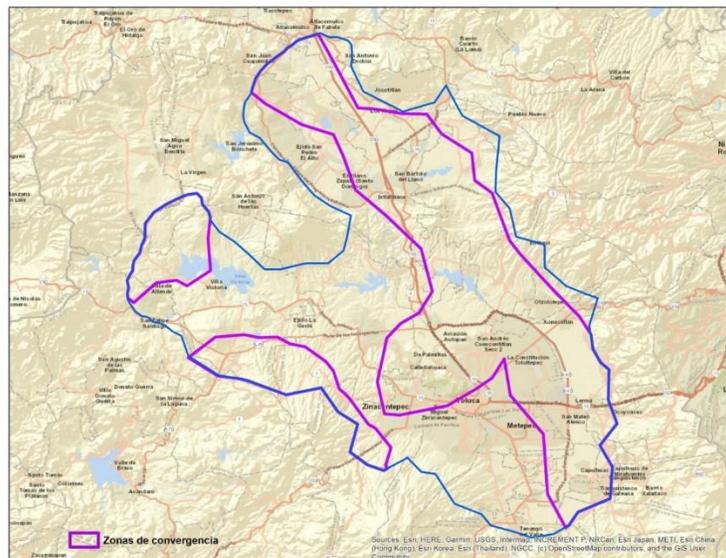


Tula  
septiembre

**Continúa figura 16.** Zonas de convergencia para las regiones de Tula, Valle de Toluca y Yecapixtla-Huexca-Cuautla, en marzo y septiembre.

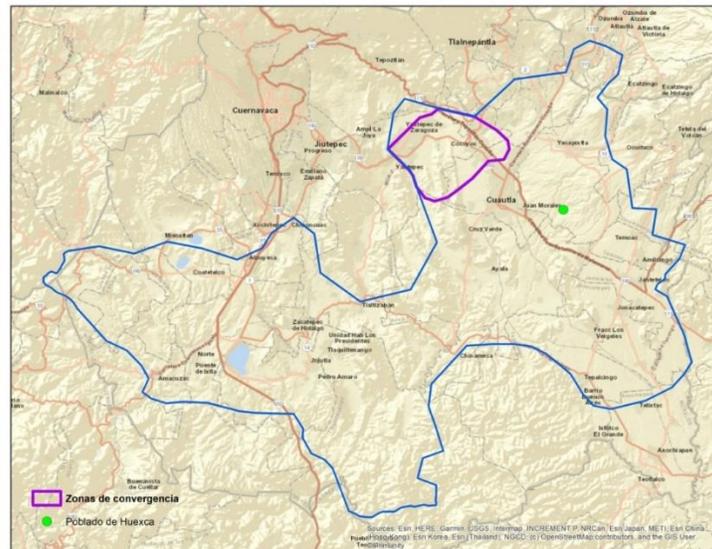


Valle de Toluca  
marzo

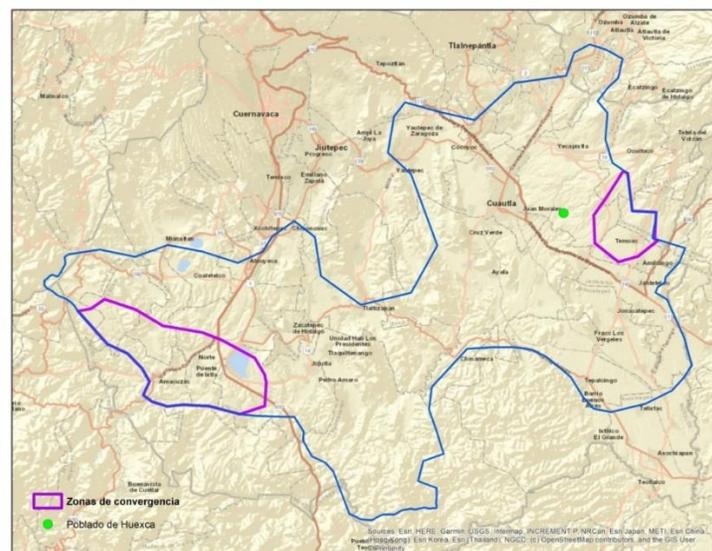


Valle de Toluca  
septiembre

**Continúa figura 16.** Zonas de convergencia para las regiones de Tula, Valle de Toluca y Yecapixtla-Huexca-Cuautla, en marzo y septiembre.



Yecapixtla – Huexca - Cuautla marzo



Yecapixtla – Huexca - Cuautla septiembre

En el Anexo se incluyen Figuras de las zonas propuestas para establecer sitios de mediciones, delimitadas considerando además de los criterios ya mencionados, las características fisiográficas recomendadas para establecer sitios de monitoreo ambiental.

Condiciones climatológicas mensuales por cuenca.

Las condiciones climáticas se caracterizaron con la información del portal <https://es.weatherspark.com/>, donde éstas son descritas e ilustradas para localidades ubicadas dentro de las cuencas arriba definidas.

La **cuenca de Tula** es de interés por las actividades de fuentes emisoras como la Termoeléctrica Francisco Pérez, la refinería Miguel Hidalgo, industrias cementeras y la Presa Endhó. Por lo que definir la región que comparten este tipo de fuentes es fundamental para realizar mediciones

perimetrales y/o en fuente. Esta región común se presentó en la Figura 15, y en seguida se describe la climatología de esta.

Esta cuenca presenta precipitación entre 120 y 4 mm, principalmente de mayo a octubre. Con cielos nublados (del 58 al 86 %) de junio a octubre y cielos más (>50%) despejados en noviembre y diciembre. El periodo de mayor temperatura es de abril a mayo, con temperaturas promedio máximas de 27 °C y 26°C respectivamente, y una temperatura promedio mínima de 6 °C en enero. La precipitación puede extenderse de abril a noviembre, pero la mayor lámina se espera en junio-julio, con 120 mm. El viento presenta su mayor intensidad de marzo a octubre, con velocidades de aproximadamente 3 m/s; y predomina del sur en diciembre y enero, del oeste en febrero y marzo, del norte en mayo y del este durante el periodo junio a parte de diciembre. En este sentido, en noviembre se espera viento del este con velocidades de 2.7 m/s (Figura 17).

En cuanto a la **cuenca del Valle de Toluca**, el interés del muestreo de variables meteorológicas y calidad del aire está encaminado a observar las condiciones de contaminación atmosférica en la zona y el transporte de contaminantes desde otras áreas metropolitanas, por lo que es de utilidad disponer de las zonas de convergencia en la cuenca, hacia donde se transportarían los contaminantes.

La cuenca del Valle de Toluca presenta lluvias de mayo a octubre, con su máxima precipitación (136 mm) en junio-julio, pero un incremento importante a finales de agosto. El periodo más cálido es de parte de marzo, a principios de junio; con la máxima temperatura promedio (23 °C) a inicios de mayo, mientras que de julio a enero se presenta una temperatura promedio máxima de 18 a 19 °C, y es en enero cuando la temperatura mínima promedio disminuye hasta 6 °C; y en diciembre se observan temperaturas muy cercanas a este valor. La velocidad promedio del viento se eleva de finales de febrero a abril, con un máximo promedio de 2.3 m/s hacia el final de marzo; los meses restantes este parámetro disminuye por debajo de los 2 m/s. Se espera viento del oeste de diciembre a mayo, viento con componente del este de junio a octubre, y viento del norte en noviembre. En este último mes se espera una intensidad promedio del viento de 1.8 m/s, con la dirección del este al inicio, del norte en la mayor parte del mes y del oeste hacia el final de este. La Figura 18 ilustra la información aquí citada, y se muestra en la misma a manera de ejemplo, que el ocho de noviembre la mayor velocidad del viento se espera entre las 14 y 15 h, con dirección del sur en mayor proporción. Cabe mencionar, que una vez en la página de weatherspark, se puede ir desplegando para el sitio en análisis, desde el ciclo anual hasta algún día de interés.

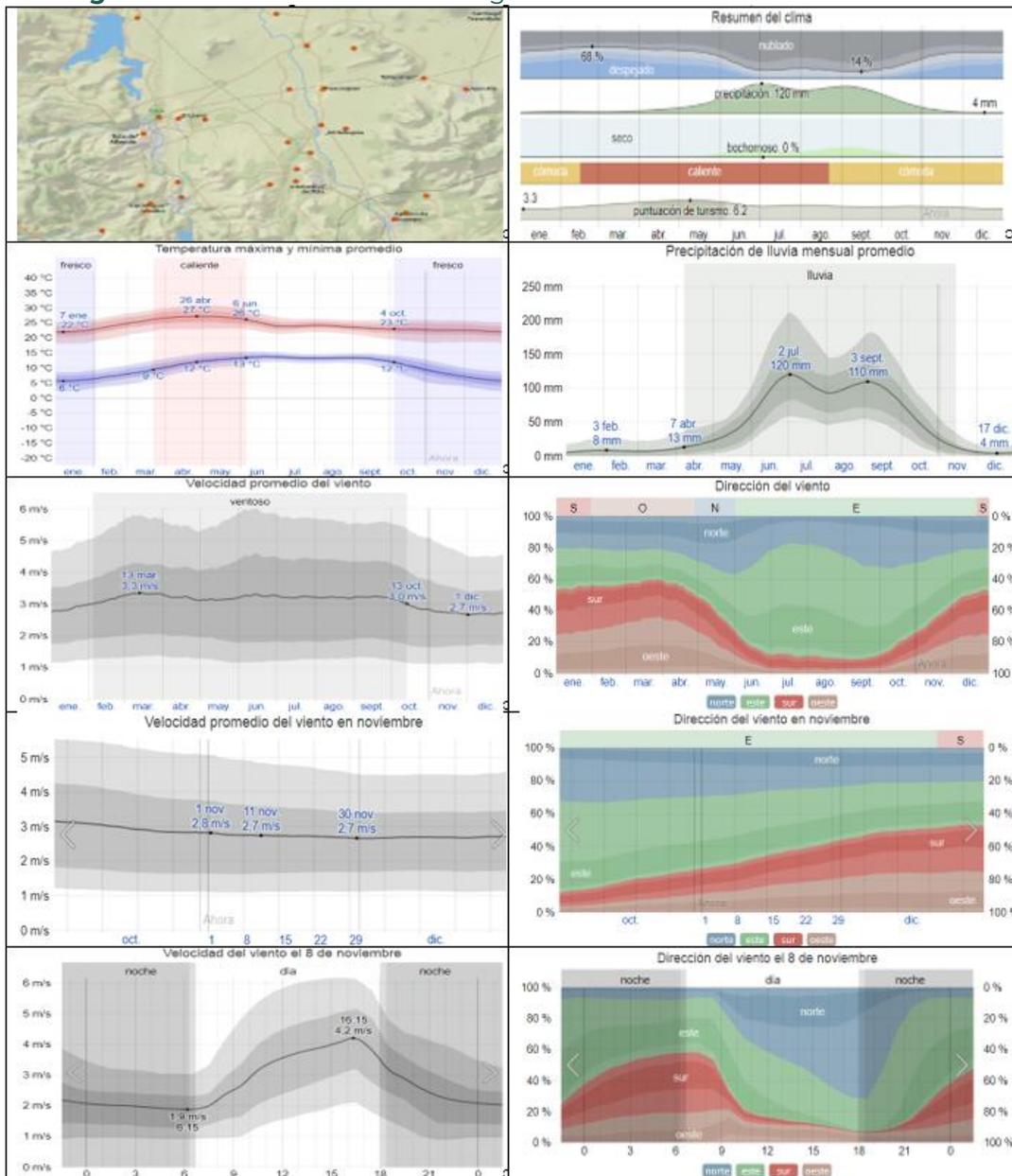
En el caso de la **cuenca Yecapixtla-Huexca-Cuautla**, la zona de mayor interés es la localidad Huexca, ya que es donde se localizará la termoeléctrica de Huexca. En esta cuenca el objetivo es realizar el muestreo de calidad del aire previo a la entrada en operación de la termoeléctrica mencionada. Por tal razón, a continuación, se presentan las condiciones climatológicas anuales del punto Mixtlalzingo, ubicado 3.2 km al Este de Huexca.

Como se observa en la Figura 19, la temperatura en esta región varía entre 32 y 11 °C, el periodo de lluvias es de mayo a octubre, con precipitaciones máximas esperadas de 154 mm, bajas condiciones de humedad en el periodo diciembre a abril, velocidades de viento promedio entre 2 y 2.7 m/s, viento prevaleciente del sur entre febrero y junio y viento prevaleciente del este en los meses restantes. En la misma Figura 19 se ejemplifica con el viento el despliegue de esta variable en resolución de días para el mes de noviembre; y a su vez, también se muestra el despliegue horario

de esta variable para el día 8 del mismo mes. Con lo cual es posible tener una visualización detallada del clima en los sitios graficados.

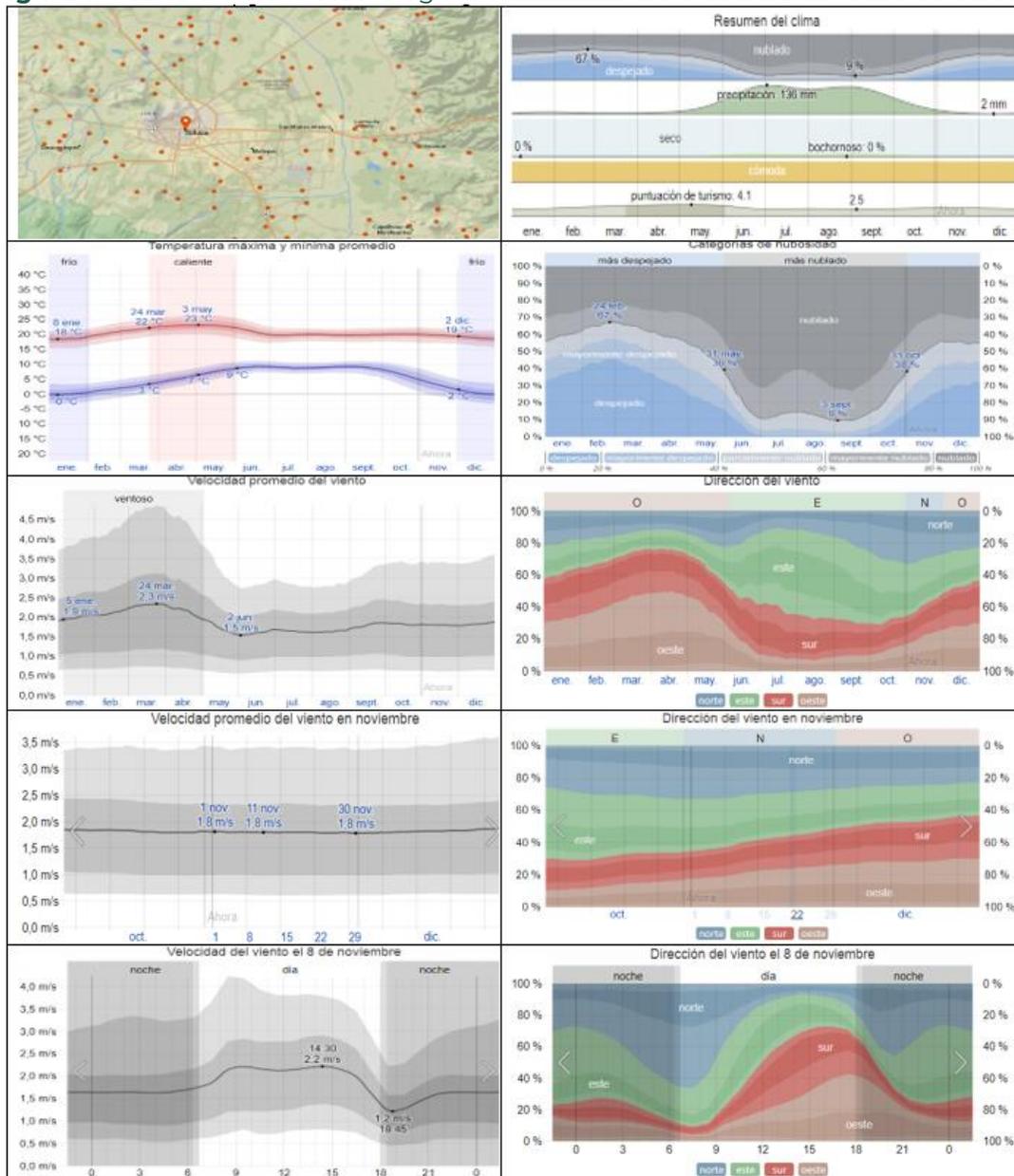
Cabe mencionar que al pie de cada figura de condiciones climatológicas y pronóstico meteorológico se incluyen las direcciones URL para que se pueda acceder hasta un nivel de información de mes, día y hora, según se requiera.

**Figura 17.** Condiciones meteorológicas mensuales en la cuenca de Tula



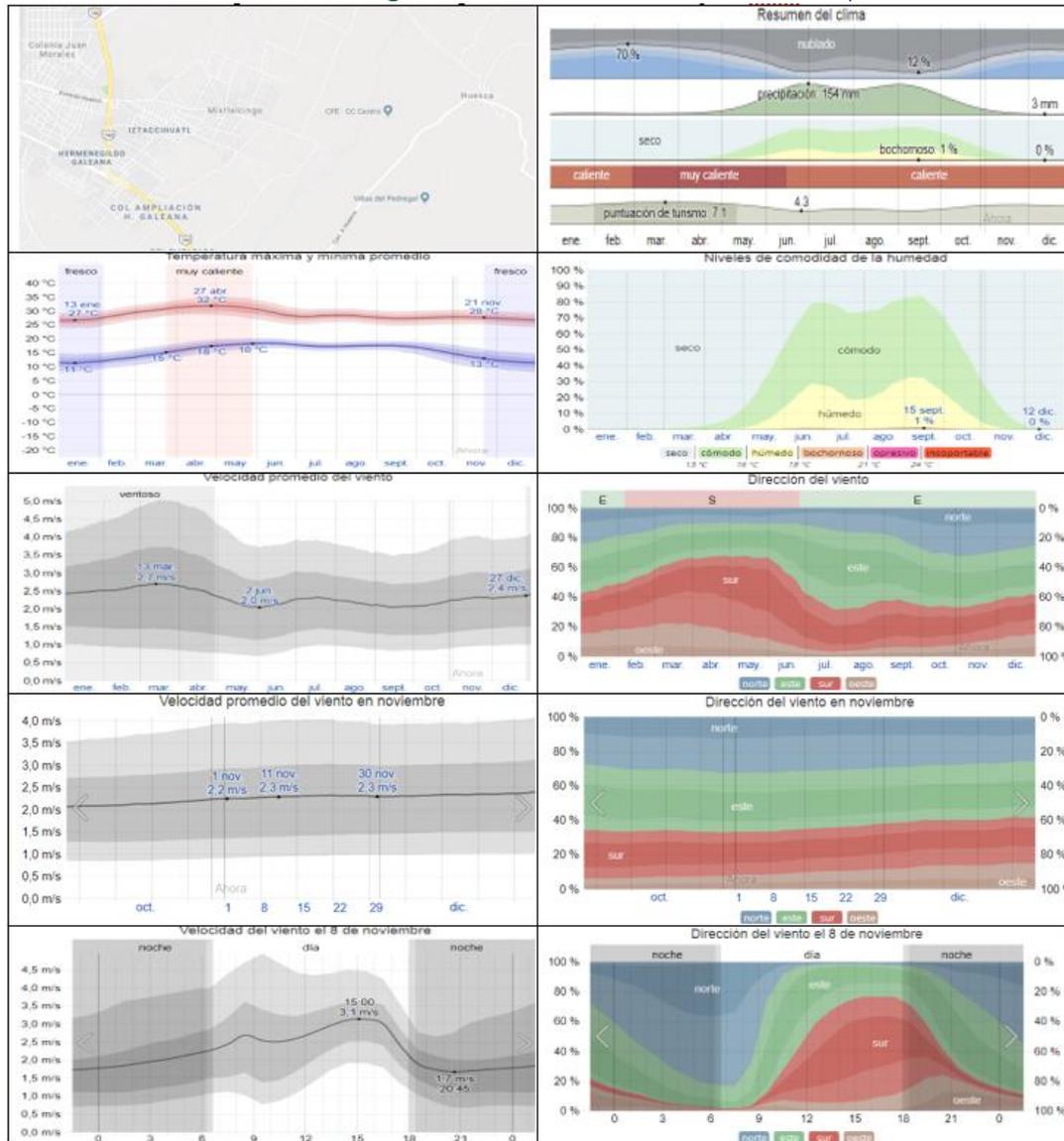
Fuente: <https://es.weatherspark.com/y/6038/Clima-promedio-en-Tula-de-Allende-M%C3%A9xico-durante-todo-el-a%C3%B1o>

**Figura 18.** Condiciones meteorológicas mensuales en la cuenca del Valle de Toluca



Fuente: <https://es.weatherspark.com/y/5577/Clima-promedio-en-Toluca-de-Lerdo-M%C3%A9xico-durante-todo-el-a%C3%B1o>

Figura 19. Condiciones meteorológicas mensuales en la cuenca Yecapixtla-Huexca-Cuatla



Fuente: <https://es.weatherspark.com/y/6568/Clima-promedio-en-Mixtlalcingo-M%C3%A9xico-durante-todo-el-a%C3%B1o>

## Pronóstico meteorológico por sitio de interés

Finalmente, con objeto de proporcionar al personal que realizará el muestreo de calidad el aire, una opción para desplegar las condiciones de viento que se presentarán en las zonas o sitios donde realizarán las mediciones, a continuación, se presentan ejemplos de la descripción de viento y otras variables meteorológicas.

Como observa en las Figuras 20, 21 y 22, se puede graficar y descargar las rosas de viento, la temperatura y precipitación desde el portal <https://www.meteoblue.com>; esto para un periodo de hasta dos semanas previas a la fecha presente. También se puede desplegar el pronóstico horario de las variables meteorológicas para el día previo y actual. Este tipo de despliegues se ejemplifican en las figuras mencionadas, para los puntos de interés Tula de Allende, Toluca y Huexca, en las cuencas de Tula, Valle de Toluca y Yecapixtla-Huexca-Cuautla, respectivamente; y también se citan las direcciones URL para su acceso por parte del personal técnico.

Figura 20. Pronóstico meteorológico para Tula de Allende, cuenca Tula.



Fuente: [https://www.meteoblue.com/es/products/historyplus/windrose/tula-de-allende\\_m%c3%a9xico\\_3515064](https://www.meteoblue.com/es/products/historyplus/windrose/tula-de-allende_m%c3%a9xico_3515064)



Fuente: [https://www.meteoblue.com/es/products/historyplus/download/tula-de-allende\\_m%c3%a9xico\\_3515064](https://www.meteoblue.com/es/products/historyplus/download/tula-de-allende_m%c3%a9xico_3515064)

Figura 21. Pronóstico meteorológico para Toluca, cuenca Valle de Toluca.

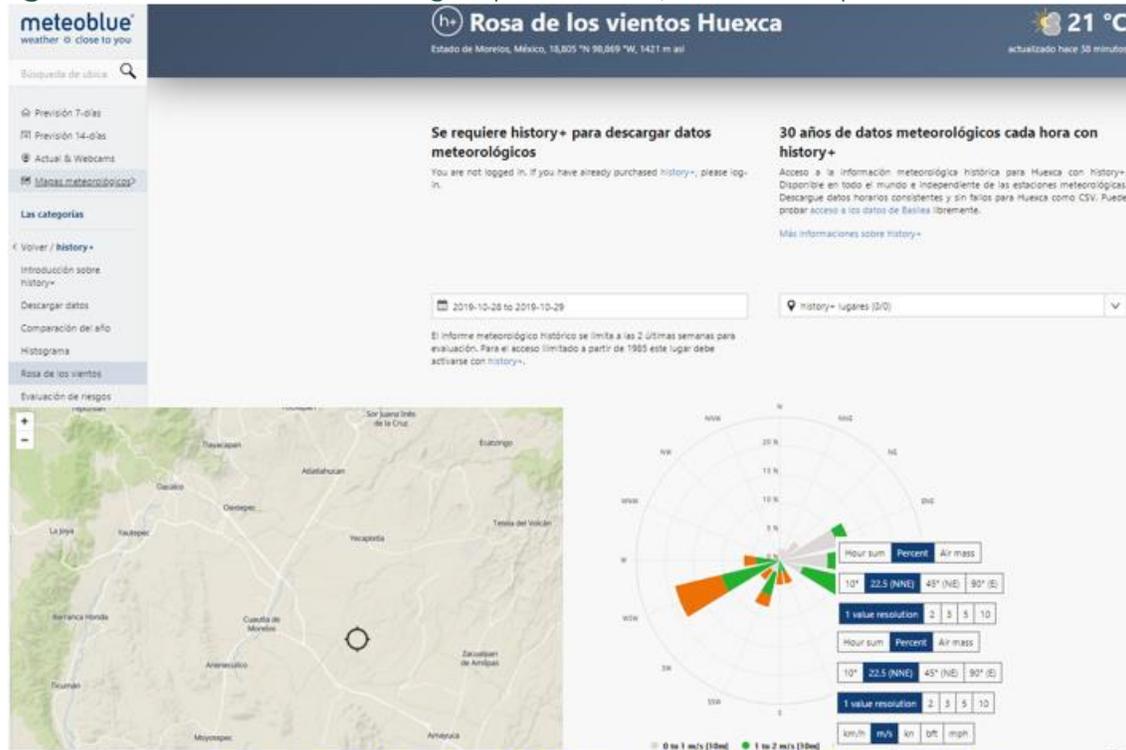


Fuente: <https://www.meteoblue.com/es/products/historyplus/windrose/toluca-de-lerdo> m%3a9xico 3515302



Fuente: <https://www.meteoblue.com/es/products/historyplus/download/toluca-de-lerdo> m%3a9xico 3515302

Figura 22. Pronóstico meteorológico para Huexca, cuenca Yecapixtla-Huexca-Cuautla.



Se espera que los resultados aquí presentados apoyen la selección de la localización geográfica y temporal para que el personal del INECC ubique convenientemente los puntos de mediciones de calidad del aire en sitios con presencia importante de contaminantes atmosféricos y localidades con convergencia del viento hacia los que serían transportados los mismos.

El objetivo de la descripción climática y meteorológica desarrollada en este documento fue dar la información básica para que el personal técnico prepare sus equipos y diseñe sus muestreos, minimizando los riesgos asociados con las condiciones ambientales que podrían deteriorar el instrumental de laboratorio y campo que se emplearán en las mediciones.

## 10. CONCLUSIONES

La revisión y análisis de los resultados de divergencia desarrollados para el estudio ECAIM permitieron definir las cuencas atmosféricas de las regiones Tula, Valle de Toluca y Yecapixtla-Huexca-Cuautla, utilizando para ello los campos de divergencia y convergencia.

Las cuencas atmosféricas fueron incluyen los siguientes municipios:

**Cuenca de Tula:** Atitalaquia, Atotonilco de Tula, Francisco I. Madero, Mixquiahuala de Juárez, Progreso de Obregón, Tepeji del Río de Ocampo, Tepetitlán, Tetepango, Tezontepec de Aldama, Tlahuelilpan, Tlaxcoapan y Tula de Allende del Estado de Hidalgo; y Coyotepec, Huehuetoca, Zumpango y Tepetzotlán del Estado de México.

**Cuenca del Valle de Toluca:** Cuenca del Valle de Toluca: Almoloya de Juárez, Almoloya del Río, Atizapán, Atlacomulco, Calimaya, Capulhuac, Chapultepec, Ixtlahuaca, Jiquipilco, Jocotitlán, Lerma, Metepec, Mexicaltzingo, Otzolotepec, Rayón, San Antonio la Isla, San Felipe del Progreso, San Mateo Atenco, Temoaya, Texcalyacac, Toluca, Villa Victoria, Xonacatlán, Zinacantepec y San José del Rincón, todos del Estado de México.

**Cuenca de Yecapixtla-Huexca-Cuautla:** Ozumba y Tepetlixpa del Estado de México; Amacuzac, Atlatlahucan, Ayala, Coatlán del Río, Cuautla, Jantetelco, Jojutla, Jonacatepec, Mazatepec y Miacatlán; y Ocuituco, Tepalcingo, Tetecala, Tlaltizapán, Tlaquiltenango, Xochitepec, Yautepec, Yecapixtla, Zacatepec, Zacualpan y Temoac del Estado de Morelos.

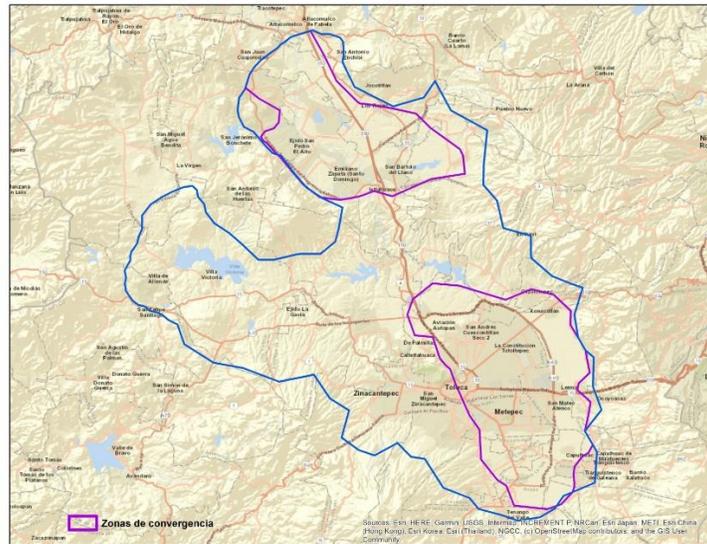
También se definieron zonas de convergencia dentro de las cuencas atmosféricas, como áreas propuestas para establecer los sitios de medición de calidad del aire, considerando que es en estas zonas, hacia donde son transportados los contaminantes atmosféricos.

Se describió la caracterización de la climatología en las cuencas atmosféricas definidas y se planteó y citó el uso de páginas URL para consultar el pronóstico meteorológico antes y durante las campañas de medición.

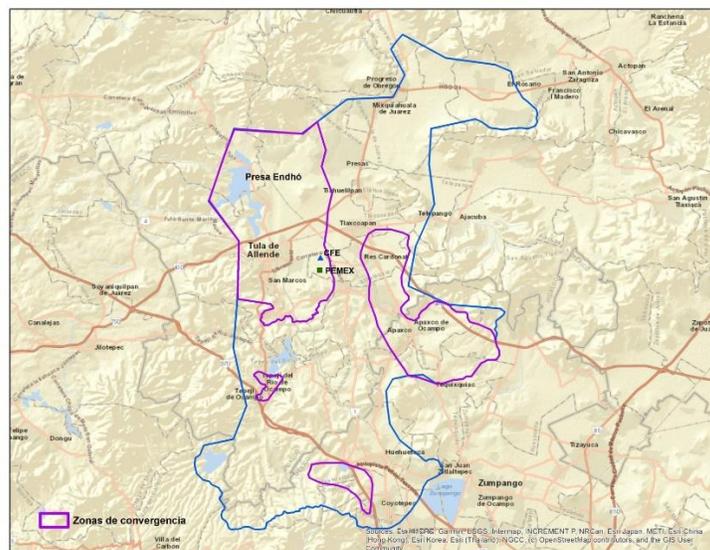
## 11. Anexo

Zonas delimitadas con base en cuencas atmosféricas, convergencia del viento y características fisiográficas (línea rosa).

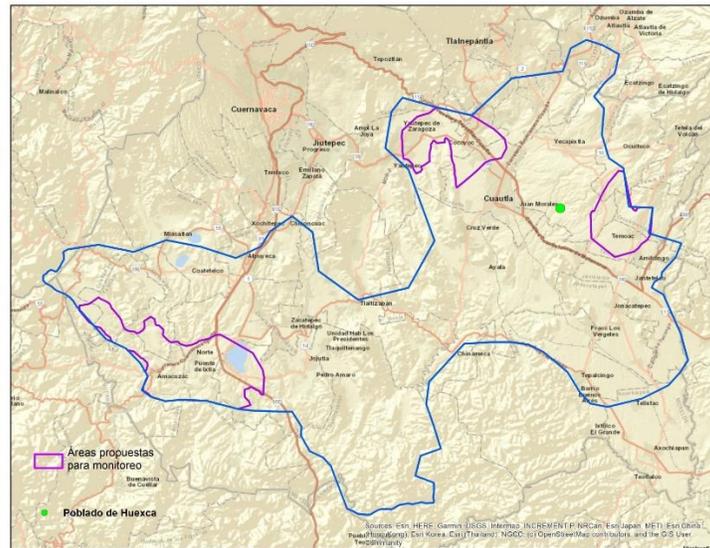
Cuenca atmosférica de Toluca



Cuenca atmosférica de Tula



Cuenca atmosférica de Yecapixtla-Huexca-Cuautla





# MEDIO AMBIENTE

SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES



# INECC

INSTITUTO NACIONAL  
DE ECOLOGÍA Y  
CAMBIO CLIMÁTICO