



**UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE  
CHIAPAS**

**INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN GESTIÓN DE  
RIESGOS Y CAMBIO CLIMÁTICO**

**MAESTRÍA EN GESTIÓN DE RIESGOS Y CAMBIO  
CLIMÁTICO**

**TESIS**

Identificación de fuentes de emisión de partículas mediante trayectorias inversas en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.

**PRESENTA**

**L. C. T. ÓSCAR IVÁN BERNARDINO JIMÉNEZ**

**Para obtener el grado de:**

**Maestro en Gestión de Riesgos y Cambio Climático**

**DIRECTOR**

Dr. Emmanuel Díaz Nigenda

**ASESOR**

Dr. Williams Vázquez Morales

**ASESOR**

Dr. Marcelino García Benítez

**Tuxtla Gutiérrez, Chiapas; septiembre de 2025**



# UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS

## SECRETARÍA ACADÉMICA

### DIRECCIÓN DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

Tuxtla Gutiérrez, Chiapas a 10 de septiembre de 2025

Oficio No. SA/DIP/1033/2025

Asunto: Autorización de Impresión de Tesis

C. Oscar Iván Bernardino Jiménez

CVU: 1103702

Candidato al Grado de Maestro en Gestión de Riesgos y Cambio Climático

Instituto de Investigación en Gestión de Riesgos y Cambio Climático

UNICACH

Presente

Con fundamento en la opinión favorable emitida por escrito por la Comisión Revisora que analizó el trabajo terminal presentado por usted, denominado *Identificación de fuentes de emisión de partículas mediante trayectorias inversas en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas* y como Director de tesis es el Dr. Emmanuel Díaz Nigenda (CVU: 47792) quien avala el cumplimiento de los criterios metodológicos y de contenido; esta Dirección a mi cargo autoriza la impresión del documento en cita, para la defensa oral del mismo, en el examen que habrá de sustentar para obtener el Grado de Maestro en Gestión de Riesgos y Cambio Climático.

Es imprescindible observar las características normativas que debe guardar el documento, así como entregar en esta Dirección una copia de la *Constancia de Entrega de Documento Recepcional* que expide el Centro Universitario de Información y Documentación (CUID) de esta Casa de estudios, en sustitución al ejemplar empastado.

Atentamente  
"Por la Cultura de mi Raza"

Dra. Dulce Karol Ramírez López  
DIRECTORA



C.c.p. Dra. Sandra Urania Moreno Andrade, Directora del Instituto de Investigación en Gestión de Riesgos y Cambio Climático, UNICACH. Para su conocimiento.  
Mtra. Ana Lucía López Pimentel, Coordinadora del Posgrado, Instituto de Investigación en Gestión de Riesgos y Cambio Climático, UNICACH. Para su conocimiento  
Archivo/minutario.

EPL/DKRL/igp/gr



Ilustración: Noé Zenteno

2025, Año de la mujer indígena  
Año de Rosario Castellanos



Ciudad Universitaria, libramiento norte  
poniente 1150, col. Lajas Maciel C.P. 29035  
Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México  
[investigacionyposgrado@unicach.mx](mailto:investigacionyposgrado@unicach.mx)

## **Agradecimientos**

Expreso mi más sincero agradecimiento a quienes han contribuido de manera significativa a la realización de esta tesis y a mi formación durante el proceso de la Maestría.

En primer lugar, agradezco profundamente al Dr. Emmanuel Díaz Nigenda, director de este trabajo, por su constante guía, generosa disposición para orientarme en cada etapa desde la licenciatura, por su compromiso y experiencia que han sido fundamentales para el desarrollo y culminación de esta investigación.

A mis asesores, Dr. Williams Vázquez Morales y Dr. Marcelino García Benítez, cuyas observaciones, sugerencias y conocimientos enriquecieron sustancialmente este trabajo, así como su confianza para evaluar y afianzar la calidad de esta tesis.

A la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación por otorgarme apoyo económico a través de una beca como estudiante de posgrado y permitir desarrollar este programa educativo.

Al posgrado en Gestión de Riesgos en Cambio Climático del Instituto de Investigación en Gestión de Riesgos y Cambio Climático de esta universidad por ofrecer un entorno accesible y facilitar las herramientas para el desarrollo de mi preparación académica.

Al Dr. Valter Armando Barrera López por los comentarios recibidos respecto al modelo HYSPLIT.

A mi familia, y especialmente a mi esposa Liz Domínguez, por su apoyo incondicional.

Gracias.

## Índice de Contenido

---

|                                                                          |           |
|--------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>                                              | <b>1</b>  |
| <b>2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....</b>                                | <b>2</b>  |
| <b>3. ANTECEDENTES .....</b>                                             | <b>4</b>  |
| <b>4. JUSTIFICACIÓN .....</b>                                            | <b>7</b>  |
| <b>5. HIPÓTESIS .....</b>                                                | <b>9</b>  |
| <b>6. OBJETIVOS .....</b>                                                | <b>9</b>  |
| 6.1. Principal .....                                                     | 9         |
| 6.2. Secundarios .....                                                   | 9         |
| <b>7. MARCO TEÓRICO .....</b>                                            | <b>10</b> |
| 7.1. La atmósfera.....                                                   | 10        |
| 7.2. Contaminación del aire .....                                        | 11        |
| 7.3. Contaminantes.....                                                  | 13        |
| 7.4. Partículas.....                                                     | 14        |
| 7.5. Fuentes de emisión.....                                             | 15        |
| 7.6. Incendios .....                                                     | 17        |
| <b>8. ÁREA DE ESTUDIO .....</b>                                          | <b>19</b> |
| 8.1. Temporada de estiaje .....                                          | 20        |
| <b>9. METODOLOGÍA .....</b>                                              | <b>22</b> |
| 9.1. Modelo HYSPLIT .....                                                | 22        |
| 9.2. Instalación del modelo HYSPLIT .....                                | 24        |
| 9.3. Parámetros de simulación .....                                      | 28        |
| 9.4. Evaluación estadística.....                                         | 28        |
| 9.4.1. Índice de Concordancia.....                                       | 29        |
| 9.4.2. Desviación normal para los datos observados y pronosticados ..... | 29        |

|            |                                                       |           |
|------------|-------------------------------------------------------|-----------|
| 9.4.3.     | Raíz de la desviación cuadrática media.....           | 30        |
| 9.5.       | Evaluación cualitativa con imágenes satelitales ..... | 31        |
| <b>10.</b> | <b>RESULTADOS.....</b>                                | <b>33</b> |
| 10.1.      | Escenarios.....                                       | 33        |
| 10.2.      | Procesamiento de datos meteorológicos .....           | 34        |
| 10.3.      | Escenario 1 - 21 de abril 2016 (E1).....              | 36        |
| 10.4.      | Escenario 2 – 30 de marzo 2019 (E2) .....             | 39        |
| 10.5.      | Escenario 3 – 13 de abril 2019 (E3).....              | 42        |
| 10.6.      | Escenario 4 – 05 de mayo 2023 (E4) .....              | 47        |
| <b>11.</b> | <b>DISCUSIÓN.....</b>                                 | <b>51</b> |
| 11.1.      | Limitantes.....                                       | 58        |
| <b>12.</b> | <b>CONCLUSIONES.....</b>                              | <b>59</b> |
| 12.1.      | Recomendaciones.....                                  | 62        |
| <b>13.</b> | <b>REFERENCIAS .....</b>                              | <b>63</b> |
| <b>14.</b> | <b>ANEXOS .....</b>                                   | <b>70</b> |
| 14.1.      | Imágenes del Escenario 1.....                         | 70        |
| 14.2.      | Imágenes del Escenario 2 .....                        | 72        |
| 14.3.      | Imágenes del Escenario 3.....                         | 74        |
| 14.4.      | Imágenes del Escenario 4.....                         | 76        |

## Índice de Ilustraciones

---

|                                                                                                     |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Ilustración 1. Capas de la atmósfera_____                                                           | 12 |
| Ilustración 2. Diagrama de fuente de emisión puntual/industria_____                                 | 16 |
| Ilustración 3. Zona de estudio, zona urbana de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas _____                      | 21 |
| Ilustración 4. Esquema del funcionamiento del modelo HYSPLIT _____                                  | 24 |
| Ilustración 5. Menú interactivo del modelo HYSPLIT _____                                            | 25 |
| Ilustración 6. Selección de datos del archivo meteorológico_____                                    | 25 |
| Ilustración 7. Configuración de la simulación de trayectoria del modelo HYSPLIT                     | 26 |
| Ilustración 8. Comportamiento de las coordenadas sigma _____                                        | 27 |
| Ilustración 9. Configuración para mostrar la trayectoria resultante _____                           | 27 |
| Ilustración 10. Corrida de simulación de trayectoria con datos del tutorial básico de HYSPLIT _____ | 27 |
| Ilustración 11. Descripción de los puntos calientes para la región poniente de Chiapas _____        | 31 |
| Ilustración 12. Trayectoria simulada a las 11:00h del 21 de abril de 2016 _____                     | 37 |
| Ilustración 13. Trayectoria simulada a las 11:00h del 30 de marzo de 2019 _____                     | 40 |
| Ilustración 14. Simulación de retro-trayectorias para el 13 de abril de 2019 _____                  | 44 |
| Ilustración 15. Simulación para el 13 de abril de 2019 _____                                        | 45 |
| Ilustración 16. Trayectoria simulada a las 00:00h 05 de mayo de 2023 _____                          | 48 |
| Ilustración 17. Corrientes de viento del norte y del sur para el 13 de abril de 2019 _              | 54 |
| Ilustración 18. Sistemas meteorológicos del 05 de mayo de 2023 _____                                | 56 |

## Índice de Tablas

---

|                                                                                            |           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Tabla 1. Descripción de los parámetros de simulación de HYSPLIT.....</b>                | <b>28</b> |
| <b>Tabla 2. Descripción de los escenarios.....</b>                                         | <b>33</b> |
| <b>Tabla 3. Selección de los parámetros de simulación.....</b>                             | <b>35</b> |
| <b>Tabla 4. Datos de monitoreo VS simulados E1 .....</b>                                   | <b>38</b> |
| <b>Tabla 5. Resumen de resultados de evaluación estadística para el escenario 1 .....</b>  | <b>39</b> |
| <b>Tabla 6. Datos de monitoreo VS simulados E2 .....</b>                                   | <b>41</b> |
| <b>Tabla 7. Resumen de resultados de evaluación estadística para el escenario 2 .....</b>  | <b>42</b> |
| <b>Tabla 8. Datos de monitoreo VS simulados E3 .....</b>                                   | <b>46</b> |
| <b>Tabla 9. Resumen de resultados de evaluación estadística para el escenario 3. ....</b>  | <b>47</b> |
| <b>Tabla 10. Datos de monitoreo VS simulados E4 .....</b>                                  | <b>49</b> |
| <b>Tabla 11. Resumen de resultados de evaluación estadística para el escenario 4 .....</b> | <b>50</b> |

## 1. INTRODUCCIÓN

Distintas instituciones han diseñado estudios atmosféricos y han promovido estrategias para el control de las fuentes emisoras de contaminantes. No en todos los casos se cuenta con las herramientas y el equipo necesario para una óptima regulación y monitoreo de contaminantes, lo que ha ocasionado eventos por mala calidad del aire que han marcado a la sociedad.

De acuerdo con Arciénegas Suárez (2012), la contaminación del aire por partículas se ha medido tradicionalmente por la concentración de humo, en donde el viento toma un papel importante ya que puede transportar las partículas a través de largas distancias y éstas pueden añadirse al suelo o agua.

Por ello, los modelos de contaminación del aire tienen un rol fundamental en la ciencia, debido a su capacidad para analizar la importancia de procesos relevantes, porque utilizan métodos para cuantificar la relación entre emisiones, concentración y deposición, incluyendo las consecuencias de escenarios futuros (Arciénegas Suárez, 2012).

El presente trabajo identifica mediante trayectorias, las posibles fuentes de emisión de material particulado con diámetros aerodinámicos menores a  $10\mu\text{m}$  ( $\text{PM}_{10}$ ). Para ello se emplea un modelo atmosférico meteorológico como herramienta para determinar trayectorias inversas de estos contaminantes y así, analizar escenarios de contaminación que favorecen la mala calidad del aire en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez durante la temporada de estiaje.

## 2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER, 2021) menciona que el uso del fuego en las prácticas agrícolas ha sido ancestral; por ejemplo, el sistema de cultivo roza-tumba-quema<sup>1</sup>. Sin embargo, esta actividad tiene consecuencias como la pérdida de biodiversidad, empobrecimiento de los suelos de cultivo, así como afectaciones en la calidad del aire.

El fuego en la agricultura es responsable de un importante número de incendios forestales, que en conjunto a acciones negligentes de los pobladores (en las que se encuentran las fogatas de excursionistas, fumadores, quema de basura, limpieza de vías en carreteras y uso del fuego en otras actividades productivas dentro de áreas forestales) abonan a las principales causas de estos fenómenos (Comisión Nacional Forestal [CONAFOR], 2010). De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO, 2003), las miles de hectáreas quemadas anualmente, sobre todo por incendios forestales, emiten grandes cantidades de humo a la atmósfera, por lo que se convierten en fuentes de contaminación que afectan la calidad del aire y en consecuencia, ocasionan problemas a la salud.

En Chiapas, de acuerdo a los medios locales (Diario de Chiapas, Cuarto poder), así como la dirección de Cambio Climático y Economía Ambiental de la Secretaría de Medio Ambiente e Historia Natural del estado de Chiapas (SEMAHN), refirió que como consecuencia de los incendios forestales ocurridos en abril de 2019, los habitantes de Tuxtla Gutiérrez respiraron

---

<sup>1</sup> Este sistema es un trabajo agrario que consiste en la eliminación de la vegetación hasta la raíz de las plantas, que al derribar una sección de bosque y extraer la parte maderable (leña), se deja secar para luego quemar el resto del material vegetal. Se fundamenta en alternar el uso intensivo de un terreno con periodos largos de descanso. Esta actividad continúa siendo un importante modo de subsistencia (Gamero Gamero et al., 2020).

‘partículas de polvo, polen, hollín y humo’ (Caballero, 2019; Cantón, 2019; Domínguez, 2019). Lo anterior fue sustentado a partir del monitoreo atmosférico mediante el reporte del Índice Metropolitano de la Calidad del Aire (IMECA), el cual oscilaba entre los 75-150 unidades señalando mala calidad del aire. Durante esa temporada, se exhortó a la población a evitar actividades al aire libre y limitar la exposición fuera de casa y la oficina.

Por ello, en el presente trabajo se pretende identificar las fuentes emisoras de partículas que afectan la calidad del aire de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, ya que se ha reportado que partículas  $PM_{10}$  han tenido una presencia considerable durante la temporada de estiaje en diversos años como consecuencia de los incendios forestales que se presentan en el estado de Chiapas.

### 3. ANTECEDENTES

El transporte del humo de los incendios forestales y su efecto sobre el clima ha sido un tema de interés para la Administración Nacional del Océano y la Atmósfera de Estados Unidos (NOAA, por sus siglas en inglés) desde mediados del siglo pasado; por lo que la modelación de las emisiones generadas por los grandes incendios forestales ha sido una actividad en curso del Laboratorio de Recursos del Aire de la NOAA (ARL, por sus siglas en inglés) desde 1998 (Rolph et al., 2017). Al respecto, de acuerdo con Stein et al. (2015), en los Estados Unidos se realizan pronósticos de humo para Alaska y Hawái mediante la aplicación del modelo HYSPLIT para brindar información de la calidad del aire sobre los niveles de material particulado con diámetros menores a 2.5  $\mu\text{m}$  ( $\text{PM}_{2.5}$ ) en el aire.

Para el caso de Latinoamérica, Moya Álvarez et al. (2017), determinaron las concentraciones de partículas  $\text{PM}_{10}$  por la presencia de incendios forestales en Perú mediante el uso de modelos de simulación sinóptica (WRF-CHEM<sup>2</sup>). Definen que en la temporada de junio a agosto el incremento de concentraciones de partículas es proporcional al aumento en el número de los incendios, lo anterior debido a que encontraron mayor cantidad de material carbonáceo, típico de las emisiones por quema de biomasa. También demuestran cómo los flujos de aire propiciaron ingreso de humo proveniente de países vecinos al Perú. A su vez, Vidal-Daza y Pérez-Vidal (2018), analizaron mediante modelos numéricos (WRF y AERMOD View<sup>3</sup>) el comportamiento de la contaminación de la industria en el Valle del

---

<sup>2</sup> Weather Research and Forecasting model coupled to Chemistry (WRF-CHEM), es un modelo de predicción que fue diseñado para la investigación y la operatividad meteorológica, que acopla la química y meteorología en un único sistema.

<sup>3</sup> AERMOD: es un modelo de pluma en estado estacionario que incorpora dispersión de aire basada en la estructura de turbulencia de la capa límite planetaria y conceptos de escala

Cauca, Colombia; en el cual reconocieron que las condiciones de inestabilidad atmosférica, el viento dominante y la topografía influyen totalmente en la trayectoria de los contaminantes y reconoce limitantes en la modelación respecto a la transformación de contaminantes, el cálculo de estabilidad atmosférica y recomienda usar más de un modelo para comparar los resultados.

Por su parte, Balde y Vega-García (2018), determinaron las trayectorias de columnas de humo de incendios con el modelo HYSPLIT para Cataluña, España; para comprobar el alcance y dispersión que tiene las partículas que se emiten en los incendios (humo) y cómo los fenómenos anticiclónicos afectan a otras regiones.

Por otro lado, en el contexto mexicano, González-Valladolid (2003), utilizó un modelo meteorológico (CALMET<sup>4</sup>) y un modelo de transporte de dispersión euleriano (CALGRID<sup>5</sup>) para determinar la dispersión de partículas de diferentes fuentes en la Ciudad de México. Mediante una ecuación empírica de erosión describió la fuerza erosiva del viento modelado con el cual pudo cuantificar emisiones de partículas durante fenómenos erosivos.

Mendoza Campos (2012), a partir de información de incendios ocurridos en el Parque Nacional “La Malinche”, localizado en los estados de Tlaxcala y Puebla, México, comparó dos escenarios para evaluar las emisiones de incendios forestales y cómo contribuyen a la contaminación del aire en el centro de México mediante el uso de modelos atmosféricos para determinar la dispersión, el impacto y validación de la información. Sus resultados indican

---

<sup>4</sup> CALMET: Consiste en un módulo de campo de viento de diagnóstico y módulos de micro meteorología para tratar vientos sobre agua y sobre tierra.

<sup>5</sup> CALGRID: Describe el transporte de contaminantes mediante el uso de los parámetros de CALMET.

la importancia de tomar en cuenta a los incendios forestales en el inventario de emisiones ya que afectan considerablemente la calidad del aire en la región centro el país.

Cancino-Domínguez (2022), estudió el alcance de las partículas liberadas por fuentes biogénicas en la Reserva de la biosfera Pantanos de Centla, Tabasco, México, mediante el modelo de dispersión HYSPLIT, determinó la dirección y en qué proporción se depositan los contaminantes. Los resultados indican la exposición que sufre la población por la recurrencia de los eventos de incendios y su dispersión a los poblados circundantes.

Al contar con estos estudios, se puede entender la importancia de los modelos atmosféricos en el estudio de la dispersión de contaminantes atmosféricos. En este sentido, HYSPLIT ha sido una herramienta para atender diferentes problemáticas relacionadas a la dispersión de partículas, con lo cual se han tomado acciones para evitar que las concentraciones nocivas de éstas puedan mermar el bienestar de una comunidad.

## 4. JUSTIFICACIÓN

La atmósfera es el sistema más activo del planeta, la cual, debido a la cantidad de factores que influyen sobre ella, se encuentra en constante cambio. En este sentido, los modelos atmosféricos son la revolución para el análisis de su comportamiento.

La contaminación atmosférica es una problemática que se ha estudiado en México, mayoritariamente en el centro y las zonas metropolitanas del país; sin embargo, en el sur de México aún es un ámbito por explorar. Estudiar la calidad del aire, debe empezar por entender a los contaminantes y, sobre todo, el origen de estos, solo de esta manera se puede actuar y gestionar su emisión a la atmósfera.

De este modo, el presente proyecto modela trayectorias de masas de aire que tienen influencia sobre las partículas  $PM_{10}$  provenientes de incendios o quemas, para poder identificar si alguna fuente de emisión de interés, afecta o no la calidad del aire de Tuxtla Gutiérrez durante la temporada de estío. Lo anterior surge, debido a que medios locales mencionan que a consecuencia de los incendios forestales ocurridos en abril de 2019, los habitantes de Tuxtla Gutiérrez respiraron ‘partículas de polvo, polen hollín y humo’ (Caballero, 2019; Cantón, 2019; Domínguez, 2019; Domínguez 2020).

Aunado a esto, Díaz-Valencia en el año 2017 reportó concentraciones altas de material particulado en Tuxtla Gutiérrez, en donde señala que las principales causas de emisión de contaminantes, eran incendios circundantes a la ciudad, principalmente en la zona del Cañón del Sumidero. Además, resalta la importancia de realizar estudios de contaminación en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, como un área de oportunidad para investigación. También

demuestra que durante la temporada de estío prevalece la contaminación por partículas  $PM_{10}$  derivado de la influencia de incendios y condiciones de ambientes estables generados por sistemas anticiclónicos, lo que favorece el transporte de contaminantes hacia la ciudad.

Es por eso, que este trabajo se realiza mediante la aplicación integral de herramientas computacionales, sistemas de información geográfica, imágenes satelitales y evaluación estadística para identificar las principales fuentes de emisión de partículas en cuatro escenarios de mala calidad del aire en la ciudad.

## **5. HIPÓTESIS**

La calidad del aire de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez es afectada por los incendios que se originan en el estado de Chiapas durante temporada de estiaje.

## **6. OBJETIVOS**

### **6.1. Principal**

Determinar el origen de las partículas que afectan la calidad del aire de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez mediante trayectorias inversas.

### **6.2. Secundarios**

- Analizar los resultados de los escenarios de altas concentraciones de partículas  $PM_{10}$  mediante la observación de puntos calientes registrados por incendios forestales en Chiapas
- Simular escenarios de mala calidad del aire durante la temporada de estiaje en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez para la identificación de posibles fuentes de emisión.
- Revisar información relacionada a la calidad del aire en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez para la selección de escenarios de simulación.
- Reconocer el funcionamiento del modelo HYSPLIT para la generación de las trayectorias inversas.

## 7. MARCO TEÓRICO

La Tierra es un sistema complejo rodeado por un océano de aire que se encuentra dividido en diferentes capas de acuerdo a las características de sus componentes, cada una de las cuales tiene una función diferente; la capa inferior es donde se desarrolla todas las acciones de los seres vivos (Ayllón, 2013).

### 7.1. La atmósfera

Esta capa gaseosa es la que cubre a la Tierra, y tiene una repercusión directa en la dinámica de la vida. Esta capa es una mezcla de distintos gases, tales como nitrógeno ( $N_2$ ) que tiene una presencia de 78%; seguido del oxígeno ( $O_2$ ) con 21%; el resto se compone de vapor de agua ( $H_2O$ ), dióxido de carbono ( $CO_2$ ), metano ( $CH_4$ ), ozono ( $O_3$ ), neón (Ne), helio (He), y partículas de polvo y humo (Anglés Hernández et al., 2021).

El aire de la atmósfera es una mezcla de diversos compuestos que están en constante intercambio que varían de acuerdo al tiempo y espacio. Por ello, la definición concreta de sus características y composición es compleja. Esta tiene gran importancia en la regulación térmica de la Tierra, impidiendo cambios bruscos de temperatura, lo que provocaría inestabilidad climática al planeta. Sin la atmósfera la temperatura terrestre alcanzaría más de  $75^{\circ}C$  durante el día y más de  $130^{\circ}C$  bajo cero en la noche. De la energía solar que llega al planeta poco más del 30% es reflejado por la atmósfera o por la superficie terrestre. El resto de la energía solar es absorbida por el planeta, lo que permite calentar el aire, el agua y el suelo (SEMARNAT, 2013).

Derivado de esta composición y densidad, la atmósfera se encuentra dividida en capas. La unión Internacional de Geodesia y Geofísica (como se citó en Secretaría de Medio Ambiente

y Recursos Naturales, [SEMARNAT], 2013) adoptaron como estructura cuatro capas atmosféricas: tropósfera, estratósfera, mesósfera, termósfera (ilustración 1).

Así, como la atmósfera filtra la radiación ultravioleta (UV) por sus distintas capas; por ejemplo en la estratósfera, la capa de ozono, situada en la estratósfera, que absorbe parte de los rayos ultravioleta del Sol (rayos UVB y UVC) protegiendo la vida en la Tierra, en la tropósfera (que es la capa que se encuentra en contacto inmediato con la Tierra), se concentra casi todo el vapor de agua de la atmósfera, así como tres cuartas partes de los gases que conforman el aire de la atmósfera, en ella se encuentran las emisiones de todos las fuentes naturales, así como aquellos que son derivados de actividades humanas. Cuando la presencia de una sustancia (gases o líquidos, principalmente) excede una concentración, puede afectar el equilibrio de un sistema y afectar significativamente el confort y bienestar (Jiménez, 2001).

En la tropósfera se desarrollan la mayor cantidad de eventos de interacción humana y contaminación, ya que por su alta densidad y composición, se llega a albergar las emisiones de las actividades humanas y su concentración trae consigo problemas para la población y los ecosistemas (Zuk et al., 2006).

## **7.2. Contaminación del aire**

De acuerdo a la Organización Panamericana de la Salud (OPS, 2016), la contaminación del aire es el principal riesgo ambiental para la salud pública en las Américas.

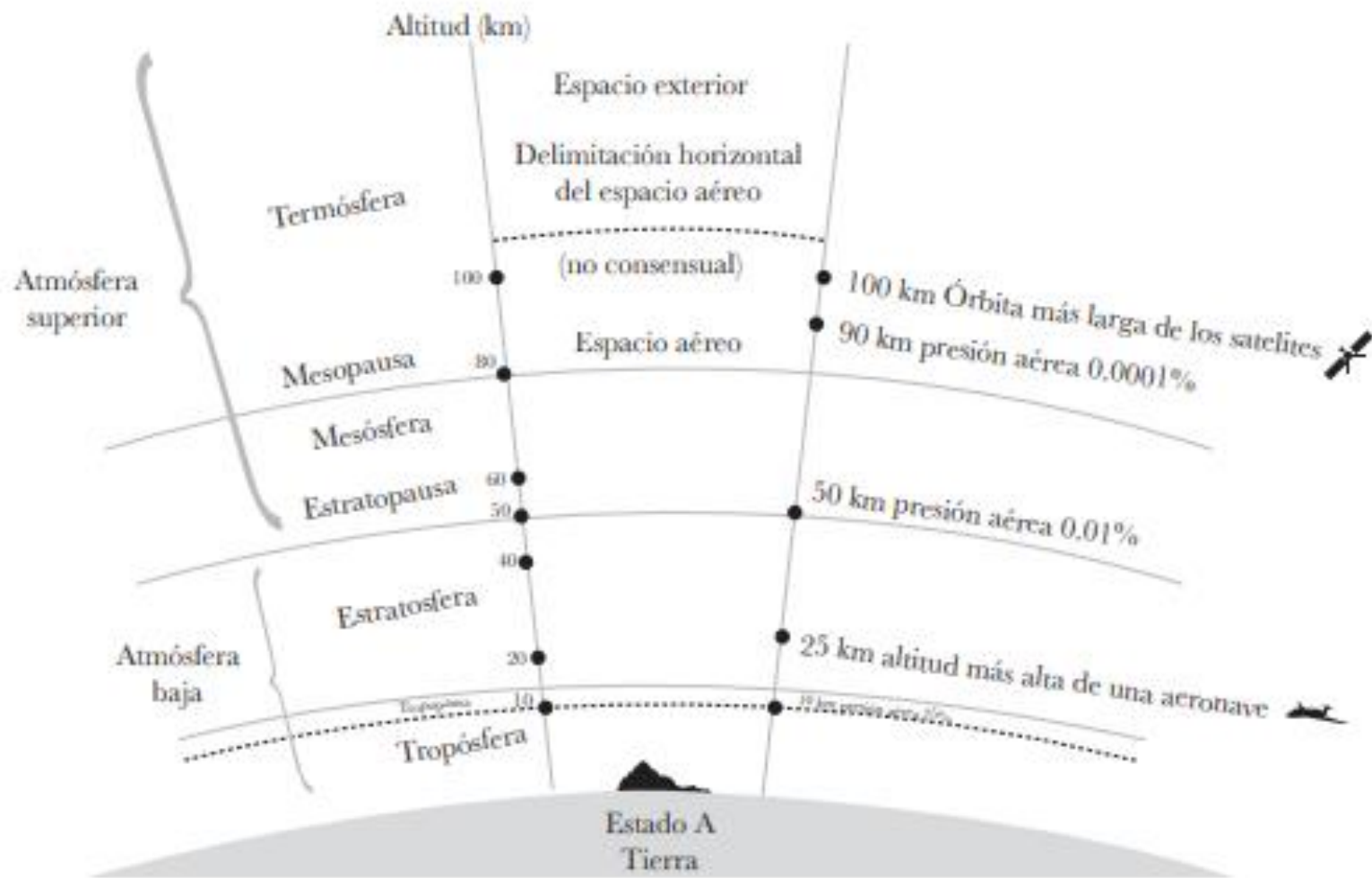


Ilustración 1. Capas de la atmósfera. Fuente: Anglés Hernández et al. (2021).

Por su parte, la SEMARNAT (2013) menciona que la contaminación atmosférica incide negativamente en la salud de la población y en la biodiversidad, por lo que su efecto puede verse reflejado en la disminución de la calidad de vida, reducción de la productividad e impactos no deseados en la economía. Estos eventos ocurren en la tropósfera, la capa en interacción con la superficie.

Con el fin de tomar acuerdos y combatir la contaminación que estaba apoderándose de la atmósfera, el deterioro continuo de la calidad del aire condujo a la celebración de varias convenciones internacionales (Romero et al., 2006). De estos acuerdos, varios gobiernos han puesto en marcha una serie de estrategias, por ello, diversos países realizan esfuerzos en materia de prevención y control de la contaminación del aire para garantizar a sus pueblos una digna calidad del aire y México, no es la excepción.

### **7.3. Contaminantes**

En México, la norma oficial mexicana NOM-172-SEMARNAT-2019 ( Diario Oficial de la Federación, 2019) define como contaminante a toda materia o energía en cualquiera de sus estados físicos y formas, que al incorporarse y actuar en la atmósfera altera o modifica su composición y condición natural. Por tanto, la contaminación por material particulado, es la alteración a la atmósfera como consecuencia de partículas en suspensión ya sea por causa natural o por acción del hombre (antropogénico).

Las directrices de la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2021) sobre la calidad del aire orientan a los gobiernos a delimitar los umbrales y límites de los contaminantes atmosféricos, de manera que se tome en cuenta los riesgos para la salud. Por lo que, en México, se han regulado las emisiones de los principales contaminantes atmosféricos, que de acuerdo a la

SEMARNAT (2019), son emitidos en grandes cantidades por diversas fuentes y son conocidos como contaminantes criterio:

- Monóxido de carbono (CO)
- Dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>)
- Óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>)
- Ozono (O<sub>3</sub>)
- Partículas PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>

Para estimar cuán buena es la calidad del aire, se requiere de información variada, iniciando con la identificación de los generadores de emisiones, la cantidad, composición de las sustancias que se expulsan a la atmósfera, así como la concentración y transporte de los contaminantes (Secretaría de Medio Ambiente de la Ciudad de México. [SEDEMA], 2024).

Cabe señalar que en el presente trabajo el análisis de la información se realiza bajo la evaluación de partículas PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>.

#### **7.4. Partículas**

De acuerdo a la Agencia Ambiental de los Estados Unidos (EPA<sup>6</sup>, por sus siglas en inglés; 2022), el Material Particulado (PM), se clasifica de acuerdo a su tamaño. PM<sub>10</sub> se entiende como una partícula de fracción gruesa, ya que tiene un diámetro de 10 µm (micrómetros) o

---

<sup>6</sup> EPA: Agencia de Protección al Ambiente de Estados Unidos (Environmental Protection Agency, por sus siglas en inglés).

inferior, mientras que  $PM_{2.5}$  comprende a partículas de fracción fina, con diámetros menores a 2.5  $\mu m$ . Estas pueden encontrarse en el polvo, hollín, humo, entre otros

De acuerdo con Canales-Rodríguez et al. (2014), las partículas contienen diferentes elementos y compuestos (p. ej.: material geológico, sulfatos de amonio, nitratos de amonio, material orgánico, carbón, cenizas, sales entre otros). Estas pueden ser removidas de manera eficiente de la atmósfera por procesos de sedimentación y tienen tiempos de vida media que van de minutos a horas.

### **7.5. Fuentes de emisión**

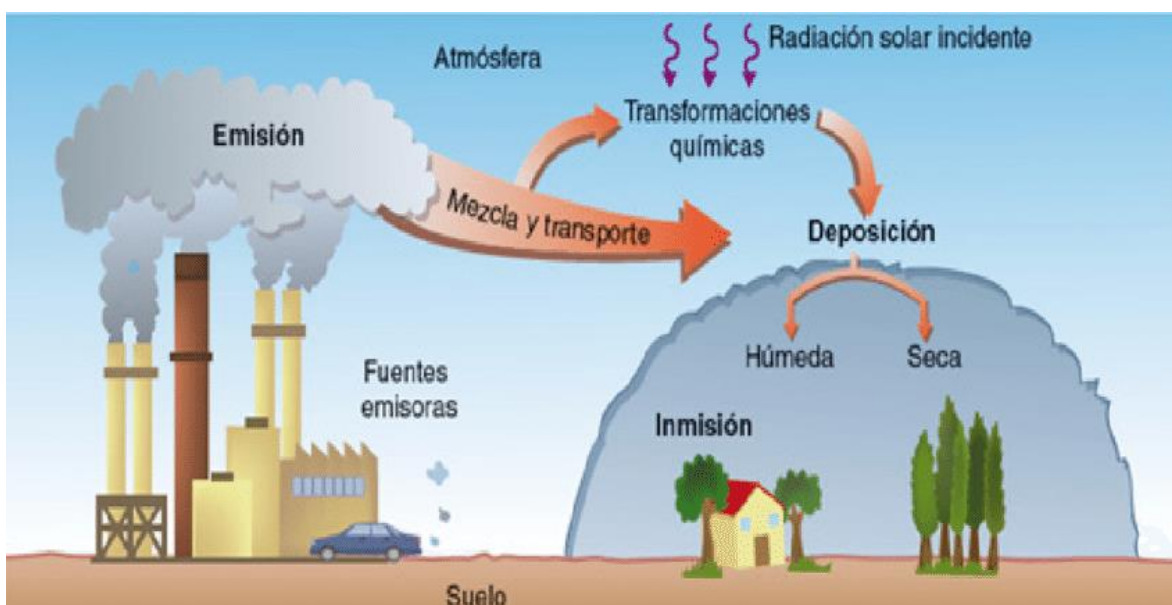
La SEMARNAT (2021) menciona que las fuentes de emisión son todas aquellas actividades, procesos y operaciones capaces de producir contaminantes del aire. En el caso de las partículas, éstas se emiten de manera natural; como en las erupciones volcánicas, polen, erosión de suelos y algunos incendios, pero otra gran parte de estas se forman en la atmósfera resultado de reacciones complejas de sustancias químicas, como el dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno provenientes de centrales, industrias y automóviles (EPA, 2022).

También la SEMARNAT (2021), describe la forma de clasificar las fuentes de emisión de un contaminante; una de las más comunes es dividir las en fuentes antrópicas y fuentes naturales.

- Fuentes naturales: cualquier fuente o proceso natural, como resultado de los fenómenos bióticos y abióticos (erupciones volcánicas, océanos, erosión del suelo, entre otras).
- Fuentes antrópicas: las cuales son generadas a partir de las actividades de los humanos, las principales son por actividades industriales.

Además pueden agruparse en:

- Fuentes puntuales: se caracterizan por emitirse desde un punto fijo, como las plantas de energía, industrias químicas, refinerías y fábricas (ilustración 2).
- Fuentes móviles: abarca todas las formas de transporte y vehículos de combustión.
- Fuentes de área: aquellas actividades que en conjunto afectan a la calidad del aire, como el uso de la madera, imprentas, tintorerías, actividades agrícolas. Estas representan un porcentaje representativo de las emisiones de contaminantes.



***Ilustración 2. Diagrama de fuente de emisión puntual/industria (Recuperado de: Carrasco Venegas, et al., 2014)***

De las fuentes antrópicas se obtienen la mayor cantidad de contaminantes atmosféricos, derivados acciones que emiten gases, como son la combustión de combustibles fósiles para energía y transporte, actividades industriales, cambios en el uso de suelo para la ganadería y agricultura e incendios. De ésta última, año con año las quemas agrícolas son un medio de preparación de los terrenos para el cultivo así como una consecuencia de descuidos y

acciones negligentes de la población. Estos producen grandes emisiones de gases como el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) responsables de al menos el 25 % de las emisiones totales de este gas en el mundo, monóxido de carbono (CO), algunos óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), entre otros; así como una parte sólida, conocida como carbono negro, que es un aerosol o material particulado que se produce en la combustión incompleta e ineficiente de combustibles fósiles, biocombustibles y biomasa. Es conocido comúnmente como hollín, un material compuesto por diminutas partículas, que tienen gran repercusión en la salud pública principalmente en medios urbanos (Barberá, 2017; El Comercio, 2018).

La exposición al material particulado no es lo único que plantea un grave riesgo para la salud; la exposición a contaminantes en el interior y alrededor de las viviendas como consecuencia del uso de combustibles en estufas abiertas o cocinas tradicionales incrementa el riesgo de infecciones agudas de las vías respiratorias inferiores.

## **7.6. Incendios**

Los incendios forman parte integral de la dinámica de los ecosistemas y son considerados como una herramienta de manejo. Un incendio forestal ocurre cuando el fuego se extiende de manera descontrolada y afecta los bosques, las selvas, o la vegetación de zonas áridas y semiáridas. De acuerdo a la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR, 2010), los incendios forestales a nivel mundial representan afectaciones de enormes cantidades de tierras y de bosques en las distintas regiones, y se estima que alrededor del 86% de la biomasa que se quema proviene de pastizales y sabanas a nivel mundial. En 2019, Chiapas reportó 451 incendios con más de 31 mil hectáreas afectadas (Flores, 2019). La Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas menciona que deben transcurrir por lo menos 15 años para

restaurar las zonas afectadas por incendios, a pesar de los esfuerzos de reforestación y actividades constantes de conservación (Lobatón, 2020).

De acuerdo a Romero Pláceres et al. (2006), las emisiones de estas partículas traen consigo repercusiones a la salud y el bienestar de las personas, además perjudica la economía, puede provocar lluvia ácida (cuando comienzan a caer las primeras lluvias de la temporada), daños a la vegetación como reducción del crecimiento de la flora y fauna, entre otros. Las emisiones de los incendios producen partículas que generalmente provocan un ambiente de poca visibilidad y malas condiciones para las actividades.

De acuerdo con Moroto (2016), para el estudio de la dispersión de los contaminantes emitidos por los incendios, es necesario el uso de modelos computacionales que permitan describir la trayectoria de los contaminantes; sin embargo, a pesar de la complejidad de los fenómenos que interactúan en ello (como turbulencia, flujos de aire, condiciones atmosféricas) permiten tener una visualización de la magnitud del problema que representa.

## 8. ÁREA DE ESTUDIO

De acuerdo al Comité Estatal de Información Estadística y Geografía del Estado de Chiapas (CEIEG, 2015), los datos más importantes que hay que considerar del municipio de Tuxtla Gutiérrez se describen a continuación.

El municipio se localiza en las coordenadas 16.75°N y 93.103°O (ilustración 3), pertenece a la región socioeconómica I Metropolitana y abarca una superficie aproximada de 335 km<sup>2</sup> a una altitud de 527 msnm<sup>7</sup>. Se encuentra inmersa en la subcuenca del río Sabinal, el cual cruza la ciudad de poniente a oriente, para desembocar en el río Grijalva.

Se compone principalmente de laderas tendidas desde las montañas más altas de la región, compuestas de rocas sedimentarias de tipo caliza (calcitas), con algunos estratos de lutita y rocas de tipo detrítico con clastos de tamaño arena. En la parte de la llanura aluvial predominante de Tuxtla Gutiérrez, se compone de materiales aluviales y limolita-areniscas. Debido a la geología, predominan litosoles y suelos con menos de 10cm de espesor, conocidos como leptosoles. También se encuentran regosoles y suelos no tan desarrollados. El clima es semicálido húmedo con regímenes de lluvia en verano que oscilan entre los 800-1200 mm anuales. La temperatura media de la mayor parte del territorio se encuentra en el rango de los 24° a 26° C. Entre los ríos más importantes destacan el arroyo Potinaspak, el río Sabinal y el río Grijalva.

La vegetación se compone por una selva baja caducifolia en mayoría, pero por la alta intervención de la urbanización, ha provocado que se conlleve a zonas de alta degradación

---

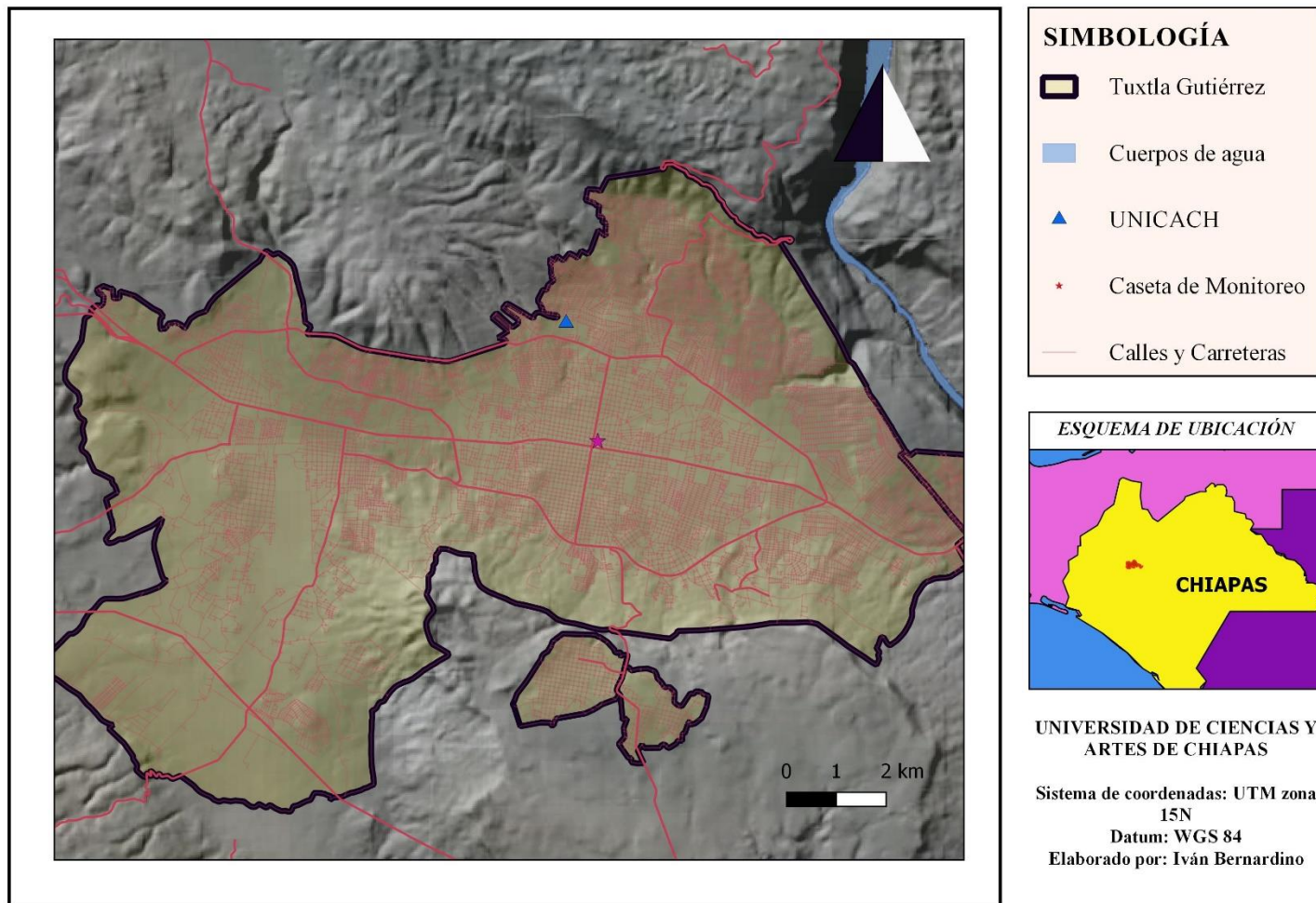
<sup>7</sup> Metros sobre el nivel del mar (Unidad de elevación, altura z)

inducida por el hombre dentro de la vegetación natural, lo que ha provocado un cambio de uso de suelo con aprovechamientos como el agrícola de temporal y pastizal inducido. Aunado a todo esto, como municipio, Tuxtla Gutiérrez colinda con Chiapa de Corzo, Suchiapa, Ocozacoautla de Espinoza, Berriozábal, San Fernando y Osumacinta, además de las áreas naturales protegidas (ANP) como el Parque Nacional “Cañón del Sumidero” al norte, así como el centro recreativo y educativo “El Zapotal” al sur, por dar algunos ejemplos.

### **8.1. Temporada de estiaje**

Se le denomina estío o estiaje, se le denomina a una temporada donde la disponibilidad de recurso hídrico agua de los cuerpos de agua y la lluvia se encuentra en un nivel más bajo al promedio anual esperado para una región o cuenca hidrológica, ocasionando el desabasto de agua para consumo de la población (Protección civil del estado de Veracruz, 2022). Esto implica que se tiene menor acceso al agua. Aunado a esto, en esta temporada se presentan altas temperaturas y aumento de condiciones de desarrollo de incendios; lo cual tal como lo mencionado por medios locales (Caballero, 2019; Cantón, 2019; Domínguez, 2019; Domínguez 2020).y la SEMAHN (2019), traen como consecuencia que la ciudad de Tuxtla Gutiérrez se llene de humo debido a los incendios

Tuxtla Gutiérrez por su importancia económica y social, representa un territorio de alta relevancia para estudiar los impactos de los fenómenos naturales, ambientales y el riesgo que se pueda generar; de ahí la relevancia de efectuar estudios en diferentes campos, los cuales también comprenden actualizar y mejorar los ya propuestos.



*Ilustración 3. Zona de estudio, zona urbana de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. Fuente: elaboración propia (Datos Carta de Urbana, INEGI [2017]).*

## 9. METODOLOGÍA

En este apartado se describe el procedimiento y los pasos seguidos para la implementación y ejecución del modelo atmosférico HYSPLIT para la identificación de las fuentes de emisión de material particulado para la ciudad de Tuxtla Gutiérrez. Además, se explica detalladamente la instalación del software, la configuración de los parámetros de simulación, así como el tratamiento de los datos meteorológicos necesarios para recrear las trayectorias del aire que podrían haber influido en la dispersión de contaminantes en la región. De igual manera, se señala cómo se seleccionan los escenarios de simulación basados en eventos de altas concentraciones de partículas, y se describen las herramientas estadísticas para evaluar la fiabilidad de los datos del modelo. Por último, se muestra la forma en la que se realiza la comparación de los resultados con imágenes satelitales de puntos calientes y el análisis visual de las trayectorias simuladas.

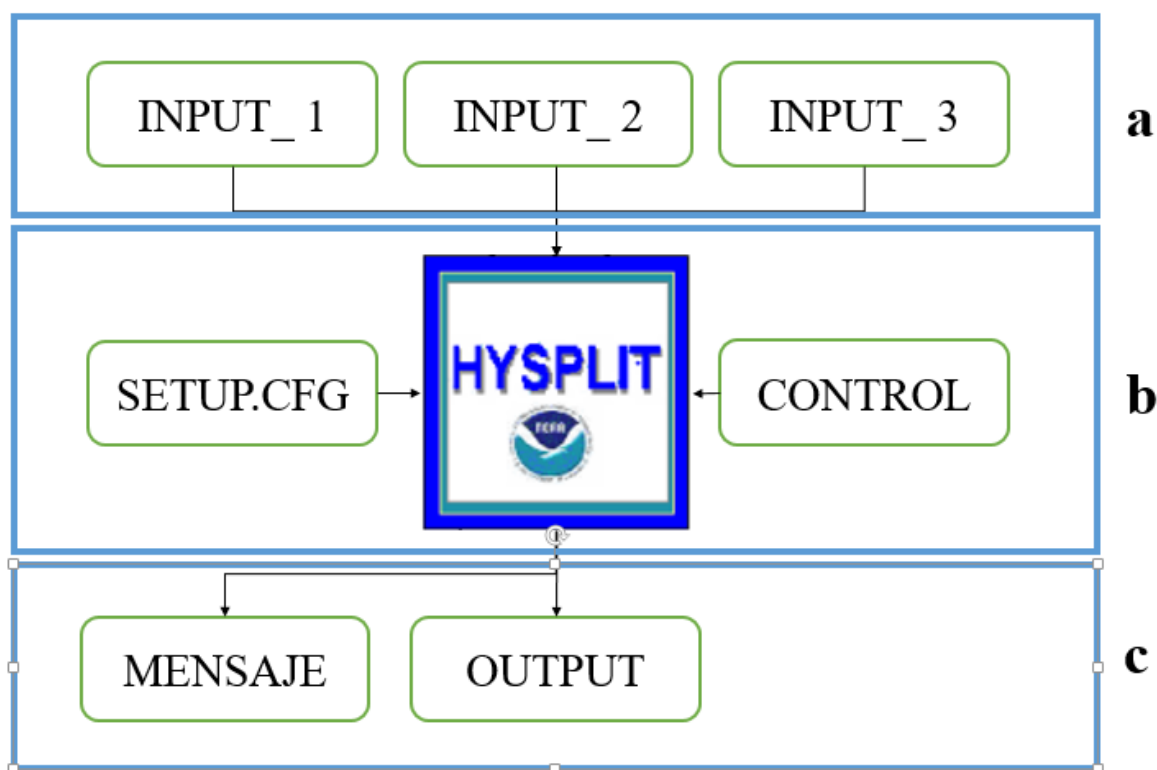
### 9.1. Modelo HYSPLIT

Para precisar la contribución de las diversas fuentes de emisión para favorecer el monitoreo y la evaluación de la contaminación atmosférica el modelo de Trayectoria Integrada Lagrangiana Híbrida de Partícula Única (HYSPLIT por sus siglas en inglés), es una herramienta que implementa un modelo de cálculo de trayectorias, concentraciones y dispersión de partículas atmosféricas, el cual ha sido ampliamente utilizado en la meteorología. Este instrumento permite modelar las trayectorias de las masas de aire que tienen influencia sobre la carga contaminante del aire y así poder establecer si alguna fuente de emisión de interés afecta o no la calidad del aire de una región determinada, por ejemplo: incendios forestales (Prieto, 2017). HYSPLIT fue desarrollado por el Laboratorio de Recursos del Aire de Estados Unidos (ARL-NOAA, por sus siglas en inglés). Utiliza el

método de cálculo híbrido entre el enfoque lagrangiano y euleriano (ARL-NOAA, 2022); el primero usa un marco de referencia móvil para los cálculos de advección y difusión a medida que las trayectorias se mueven desde su ubicación inicial, el segundo usa una cuadrícula tridimensional fija como un marco de referencia para calcular las concentraciones de contaminantes en el aire. Este modelo ha estado en constante evolución por más de 30 años, con el cual se puede estimar trayectorias, contabilizar el transporte, dispersión y deposición de múltiples contaminantes, para una escala local y global.

El uso de HYSPLIT se ha extendido por las diversas necesidades que van desde operatividad de aeronaves, erupciones volcánicas, evaluaciones de calidad del aire, emisiones de agentes antropogénicos, entre otras. En este sentido, el modelo se ha empleado para conocer la procedencia de humo de incendios forestales (Rolph et al., 2017), transporte de polvo (Escudero et al., 2006; Gaiero et al., 2013), contaminantes de diversas fuentes estacionarias y móviles (Chen et al., 2013), cenizas volcánicas (Stunder et al., 2007), y otros más. Una de las ventajas sobre otros modelos es que, el modelo HYSPLIT se puede usar de forma gratuita; y se descarga desde su página oficial para sistema Windows o Mac. También puede ejecutarse de forma interactiva a través de la website READY (Real-time Environmental Applications and Display sYstem).

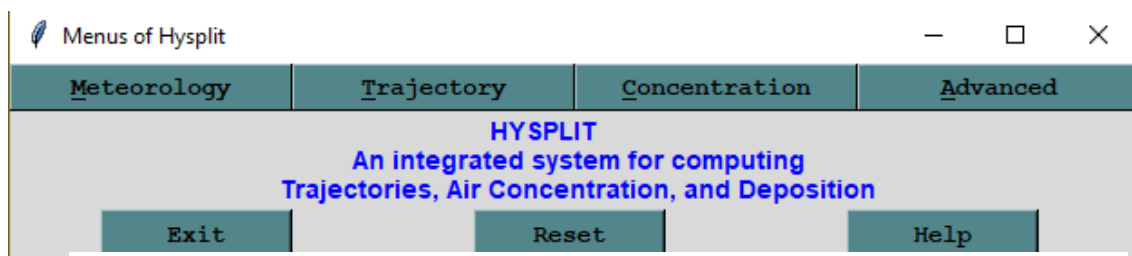
El modelo se compone de tres partes (ilustración 4). La primera (4a) se trata del sistema que alimenta de información meteorológica al modelo (Input). La segunda (4b) parte se encarga de procesar y adecuar la información que el usuario solicita; es la sección en la que se interactúa con el modelo de forma más eficiente. La tercera (4c) es el resultado del procesamiento de la información y puede verse de manera gráfica, imagen o tabla de contenido (Output).



**Ilustración 4. Esquema del funcionamiento del modelo HYSPLIT. Adaptado del manual de HYSPLIT. Fuente: <https://www.arl.noaa.gov/hysplit/hysplit-workshop/>**

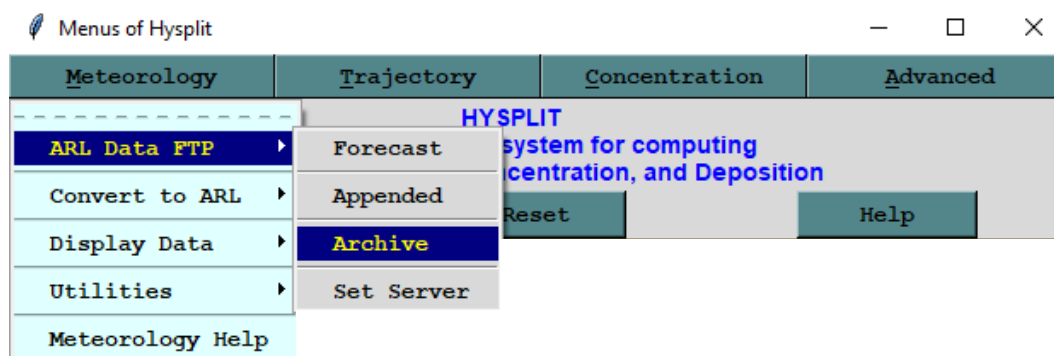
## 9.2. Instalación del modelo HYSPLIT

El software HYSPLIT se puede descargar de acuerdo a las características de la computadora del usuario, para este trabajo se usa la versión no registrada para sistema Windows e instalada en ordenador portátil de 64 bits. Para su correcta ejecución, se necesita configurar las extensiones de los programas que soportan el software para que la unidad gráfica pueda leer los archivos y seguir las indicaciones que el usuario aplica. En la ilustración 5, se observa la pantalla de inicio y el menú principal del modelo, en el cual se muestran las opciones para configurar las simulaciones, y seleccionar el tipo de función requerida para simulación.



**Ilustración 5. Menú interactivo del modelo HYSPLIT.**

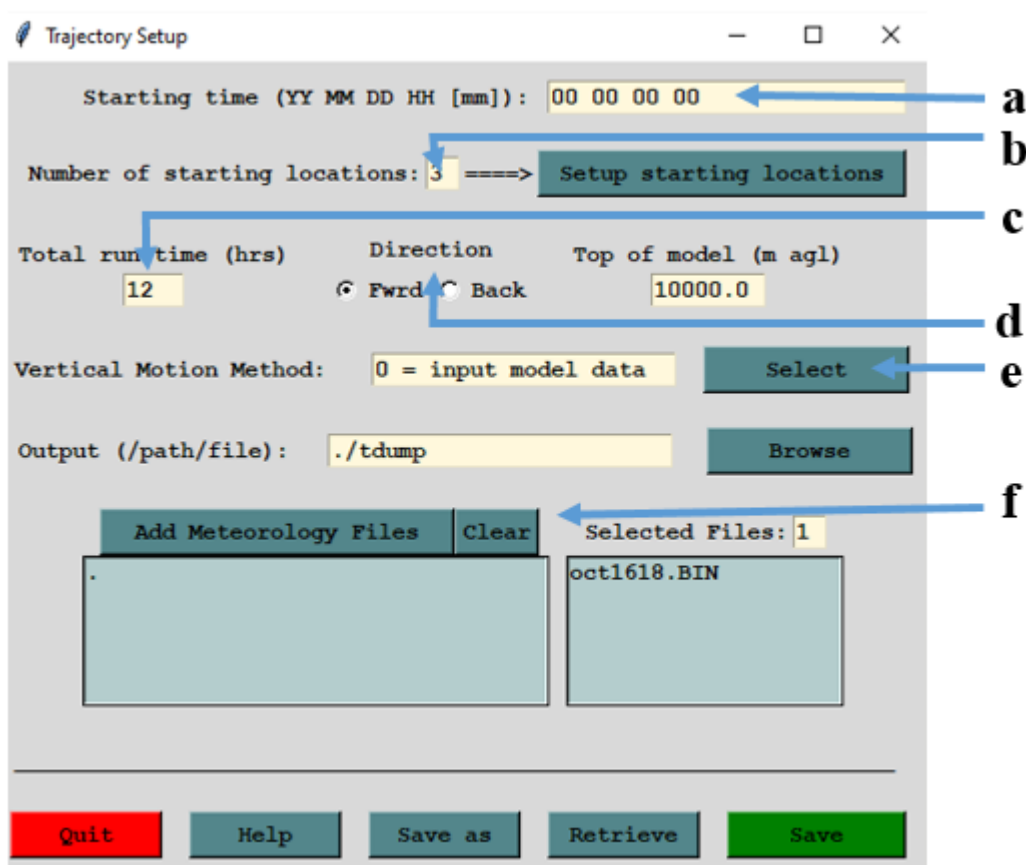
Para obtener la información de entrada, la cual son bases de datos de datos meteorológicos, el modelo permite acceder al archivo histórico de bases de datos de distintos sistemas numéricos de predicción del tiempo atmosférico (ilustración 6). Se puede seleccionar información variada desde el Sistema de Pronóstico Global (GFS, por sus siglas en inglés), Sistema Global de Asimilación de Datos (GDAS, por siglas en inglés), entre otros. Estas bases de datos de información meteorológica sobre las condiciones del tiempo proporcionan variables como el viento (dirección y velocidad), temperatura, humedad, altura en unidades de presión a nivel de superficie, entre otros parámetros.



**Ilustración 6. Selección de datos del archivo meteorológico.**

Después de definir el archivo meteorológico, se configura el procedimiento de simulación (ilustración 7), el cual se encuentra seleccionando: Trayectoria → Set Up → Run model → Display, y ahí se determina la fecha y hora de inicio del análisis de datos (7a), el número de

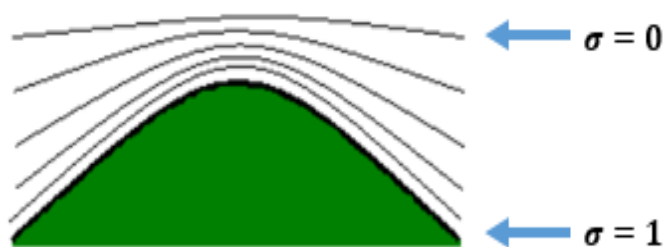
puntos de inicio de trayectorias que puede calcular el modelo (7b), el total de horas de simulación (7c), la dirección del análisis de tal manera que se ejecute a manera de pronóstico o inversa (retro-trayectoria) (7d), el método de movimiento vertical (7e). Al final, se ingresa los archivos de meteorología de los cuales dependerá el resultado de la trayectoria (7f).



**Ilustración 7. Configuración de la simulación de trayectoria del modelo HYSPLIT.**

Por otro lado, se debe de tomar en cuenta la manera que se interpola información meteorológica con el terreno. Para ello se utilizan las coordenadas sigma ( $\sigma$ ) las cuales relacionan los diferentes niveles de presión de manera tal que el modelo pueda identificar el componente orográfico (ilustración 8). Sus valores van desde 1 en el suelo y llegan a 0 en límite de la capa. Por ello también debe señalarse que esta clase de interpolación suaviza las

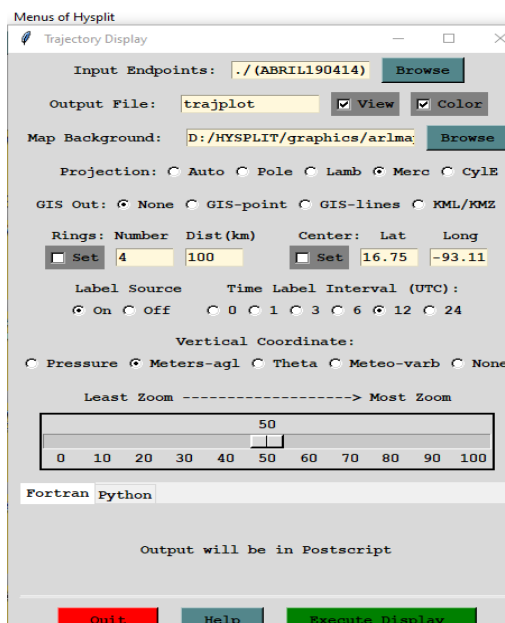
pendientes y generalmente no representa con exactitud la verdadera elevación de la superficie (Solman, 2010).



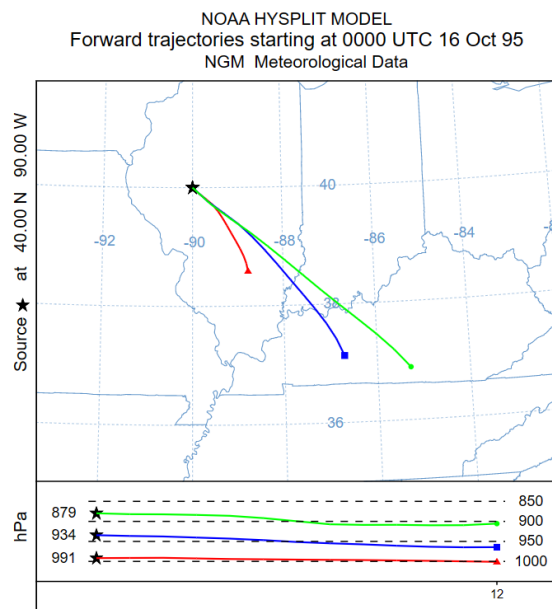
**Ilustración 8. Comportamiento de las coordenadas sigma.**  
Recuperado de Draxler (2004).

En la ilustración 9, se muestra la configuración para observar en forma de imagen el resultado de los cálculos realizados por el modelo. Su interfaz gráfica para resultados

es una de las ventajas de usar HYSPLIT, los cuales también pueden ser exportados en diferentes formatos como imagen (.jpg), shapefile, script y texto. El modelo HYSPLIT permite visualizar los datos resultantes con una interfaz gráfica que se instala al mismo tiempo que el modelo, en la cual se observan las proyecciones resultantes como en la ilustración 10, en la cual se ejecutó una trayectoria de acuerdo a los datos del tutorial básico, en el momento de la capacitación del mismo.



**Ilustración 9. Configuración para mostrar la trayectoria resultante, en la cual se puede obtener la información en formato de texto, script y en shapefile.**



**Ilustración 10. Corrida de simulación de trayectoria con datos del tutorial básico de HYSPLIT.**

### 9.3. Parámetros de simulación

Dentro del modelo existen varios parámetros para simular, los cuales se describen en la tabla 1:

**Tabla 1. Descripción de los parámetros de simulación de HYSPLIT.**

| <b>Parámetro</b>                     | <b>Valor</b>           | <b>Parámetro</b>              | <b>Valor</b>                |
|--------------------------------------|------------------------|-------------------------------|-----------------------------|
| <b>Tipo de trayectoria</b>           | Pronóstico<br>Inversa  | <b>Tiempo de simulación</b>   | A partir de 3h              |
| <b>Método de movimiento vertical</b> | - Default              | <b>Tiempo de incremento</b>   | A partir de 3h              |
|                                      | - Isobárico            | <b>Coordenadas Verticales</b> | Sigma ( $\sigma$ )          |
|                                      | - Isentrópico          |                               |                             |
|                                      | - Densidad constante   |                               |                             |
|                                      | - Isosigma             | <b>Meteorología</b>           | Base de datos meteorológica |
|                                      | - Divergencia          |                               |                             |
|                                      | - MSL a AGL            | <b>Altura de predicción</b>   | A partir de 10m AGL         |
|                                      | - Promedio de datos    |                               |                             |
|                                      | - Magnitud amortiguada |                               |                             |

Estos parámetros son opciones que nos permiten determinar condiciones dentro de la simulación, y el resultado depende de esta configuración y el paquete meteorológico que se utilice, así como el nivel de simulación de las corrientes de viento. El método de movimiento vertical se encuentra en unidades de presión ( $\sigma$ ) y sirve para calcular las trayectorias de tal modo el modelo considere cambios en los valores de la superficie, temperatura, viento, entre otros.

### 9.4. Evaluación estadística

Con la finalidad de evaluar las simulaciones realizadas con el modelo HYSPLIT, se analiza la temperaturas de los datos simulados y los datos de monitoreo meteorológico del

área de Cambio Climático y contaminación Atmosférica del Instituto de Investigación en Gestión de Riesgos y Cambio Climático (IIGERCC) de la UNICACH, y de esta forma corroborar si los datos computarizados son equivalentes al tiempo atmosférico medido por la estación de monitoreo. Para ello se utilizan tres evaluaciones estadísticas descritas a continuación:

#### 9.4.1. Índice de Concordancia

El índice de concordancia ( $I_c$ ) indica qué tanta coincidencia existe entre los resultados del modelo y las observaciones reportadas por las estaciones de monitoreo. De acuerdo a Willmott (1981), se define matemáticamente como:

$$I_c = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde:

- $P_i$  = Datos estimados por el modelo
- $O_i$  = Datos observados
- $\bar{O}$  = Promedio de los datos observados
- $n$  = Número de datos

Este índice varía entre 0 y 1. Un valor de = 1 indica concordancia perfecta entre los valores observados y los generados por el modelo. Los valores cercanos a 0 indican que existe diferencia entre los datos comparados.

#### 9.4.2. Desviación normal para los datos observados y pronosticados

Las desviaciones normales de las observaciones ( $\sigma_o$ ) y de los pronósticos ( $\sigma_p$ ), indican qué tan alejados se encuentran los datos del promedio (Pértegas y Pita, 2001). Estos parámetros se calculan de la siguiente manera:

$$\sigma_o = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (\text{Ecuación 2})$$

$$\sigma_p = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2} \quad (\text{Ecuación 3})$$

Donde:

$P_i$  = Datos estimados por el modelo  
 $\bar{P}$  = Promedio de los datos estimados  
 $O_i$  = Datos observados  
 $\bar{O}$  = Promedio de los datos observados  
 $n$  = Número de datos

Para el uso de este estadístico, el nivel de predicción del modelo se considera alto si  $\sigma_o \approx \sigma_p$ .

#### 9.4.3. Raíz de la desviación cuadrática media

La Raíz del Error Cuadrático Medio o Raíz de la desviación Cuadrática Media (***RMSD***) es una medida de desempeño cuantitativa utilizada comúnmente para evaluar métodos de pronóstico (S.N., 2015). Mide la variación de los valores calculados entre el valor real y el valor pronosticado. En este contexto el ***RMSD*** consiste en la raíz cuadrada de la sumatoria de los errores cuadráticos. La fórmula de cálculo del ***RMSD*** se muestra a continuación:

$$RMSD = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2} \quad (\text{Ecuación 4})$$

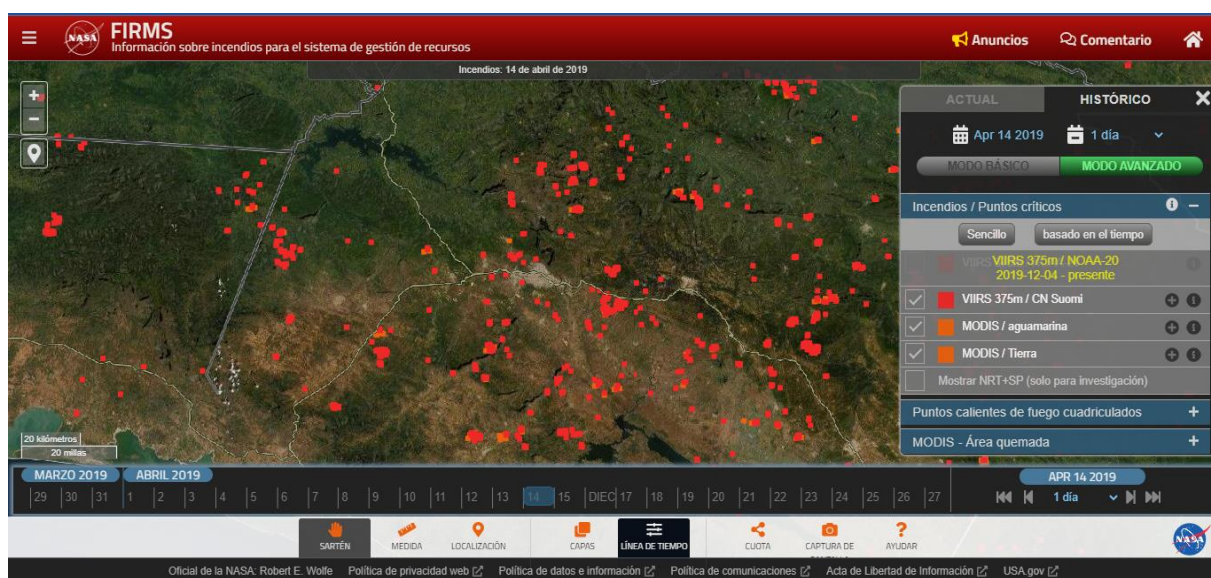
Donde:

$P_i$  = Datos estimados por el modelo  
 $O_i$  = Datos observados  
 $n$  = Número de datos

Para el uso de este estadístico, el nivel de predicción del modelo se considera alto si el ***RMSD*** es menor o igual a la desviación normal de los datos observados (***RMSD***  $\leq$   $\sigma_o$ ).

## 9.5. Evaluación cualitativa con imágenes satelitales

También, los resultados se validan mediante imágenes satelitales que corresponden a puntos de calor o puntos calientes. Estos se usan para los escenarios 3 y 4, obteniendo información del Mapa de Incendios – NASA (ilustración 11), el cual se encuentra disponible en <https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/>, esto debido a la disponibilidad de información de imágenes satelitales de la fecha de interés. El mapa de incendios es un suministro de datos interactivo, en el cual se monitorea en tiempo real los incendios a través de la gestión de recursos de observación satelital. Este sistema está conformado por un espectro-radiómetro de imágenes de resolución moderada (MODIS, por sus siglas en inglés), a bordo de los satélites AQUA y TERRA; en conjunto con el radiómetro de imágenes infrarrojas visibles (VIIRS, por sus siglas en inglés) a bordo de S-NPP y NOAA 20.



***Ilustración 11. Descripción de los puntos calientes para la región poniente de Chiapas, de acuerdo al FIRMS-NASA.***

Además, cuenta con archivo histórico interactivo que permite consultar alguna fecha deseada, y por medio de imágenes de satélite se puede observar el desarrollo y permanencia de los

eventos. Cabe señalar que es un sistema accesible y público. Para esto, los puntos calientes se han corroborado mediante un análisis de mediano plazo, observando qué puntos de calor persisten de -72h a la hora de inicio de la corrida de simulación.

Con estas imágenes se pretende definir si los puntos de calor son significativos y podrían corresponder a un evento de incendio o quema, a partir de evaluar si los puntos calientes se prolongan por varios días y la imagen en tiempo real se correlaciona con una columna de humo.

Las retro-trayectorias obtenidas con HYSPLIT se descargan en formato *shapefile* y se sobreponen en imágenes de modelos de elevación digital e imágenes satelitales para relacionarlos a los puntos calientes de tal forma que se pueda asociar el humo a las corrientes de las masas de aire para complementar el análisis de carácter visual.

## 10.RESULTADOS

Con base a la metodología expuesta previamente, y considerando la información de la calidad del aire que presentó la ciudad de Tuxtla Gutiérrez en diferentes años, durante la temporada de estiaje, se han seleccionado escenarios los cuales se describen a continuación.

### 10.1. Escenarios

Los escenarios seleccionados se diseñan a partir de los reportes consultados de altas concentraciones de partículas sobre la ciudad de Tuxtla Gutiérrez en tesis, periódicos, documentos académicos y fuentes oficiales de la SEMAHN. En este sentido, en la tabla 2 se presentan los escenarios seleccionados:

**Tabla 2. Descripción de los escenarios**

| <i>Escenario</i> | <i>Fecha</i> | <i>Motivo de su selección</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | <i>Período de simulación</i>                                                |
|------------------|--------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|
| <b>1</b>         | 21/04/2016   | Reporte de altas concentraciones en monitoreo realizado por Díaz-Valencia (2017).<br>Se registró una concentración de $385\mu\text{g}/\text{m}^3$ de partículas $\text{PM}_{10}$ , en el centro de la ciudad.                                                                                                                     | Inicio: 8:00h del 21 de abril<br>Fin: 8:00h del 22 de abril de 2016         |
| <b>2</b>         | 30/03/2019   | Reporte de altas concentraciones de contaminantes en la ciudad, de acuerdo al registro de monitoreo en el centro de la ciudad, donde se reportó una concentración de $124\mu\text{g}/\text{m}^3$<br>Datos de monitoreo de la calidad del aire del área de Cambio Climático y Contaminación Atmosférica del IIGERCC de la UNICACH. | Inicio: 8:00h del 30 de marzo<br>Fin: 8:00h del 31 de marzo de 2019         |
| <b>3</b>         | 13/04/2019   | Reporte de altas concentraciones de contaminantes en la ciudad (Periódicos locales Cuarto Poder <sup>8</sup> , Chiapas paralelo <sup>9</sup> , Alerta Chiapas <sup>10</sup> )                                                                                                                                                     | Inicio: 8:00h del 13 de abril de 2019<br>Fin: 8:00h del 14 de abril de 2019 |

<sup>8</sup> <https://www.cuartopoder.mx/chiapas/advierten-contingencias-por-mala-calidad-del-aire/283260/>

<sup>9</sup> <https://chiapas-digital.com/hollin-y-humo-lo-que-respiran-habitantes-de-tuxtla-gutierrez-semahn/>

<sup>10</sup> <https://alertachiapas.com/2019/04/25/mala-y-no-saludable-la-calidad-del-aire-en-tuxtla/>

**Continuación de la tabla 2.**

|          |            |                                                                                                                                                                                                      |                                                                       |
|----------|------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
|          |            | Datos de monitoreo de la calidad del aire del área de Cambio Climático y Contaminación Atmosférica del Instituto de Investigación en Gestión de riesgos y Cambio Climático de la UNICACH.            |                                                                       |
| <b>4</b> | 05/05/2023 | Registro de altas concentraciones por parte del Sistema de Monitoreo de Calidad del Aire (SMCA) en el centro de la ciudad por parte de la SEMAHN. Reportó 99.6µg/m <sup>3</sup> de PM <sub>2.5</sub> | Inicio: 00h del 05 de mayo de 2023<br>Fin: 23h del 05 de mayo de 2023 |

## **10.2. Procesamiento de datos meteorológicos**

Para poder identificar el posible origen de los contaminantes que afectaron la calidad del aire de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, se utilizó el modelo HYSPLIT, para simular los escenarios antes mencionados mediante trayectorias inversas (que parten del punto de deposición y trazan una trayectoria en función de la meteorología), lo anterior para recrear el recorrido de las masas de aire que pudieron influenciar y transportar contaminantes a la ciudad. Estas masas de aire arrastrarían el material contaminante de las columnas de humo hacia la ciudad, asociadas a las posibles fuentes de emisión generadas por los incendios y quemas de la temporada.

Para ello, el modelo HYSPLIT, se configuró de acuerdo a lo descrito anteriormente en la metodología (apartado 9.3). Es importante definir la base de datos meteorológica, ya que esta determina los datos que el modelo procesa y afecta directamente a la definición de la trayectoria, y después de analizar diferentes servidores y la información que proporciona los archivos del modelo. Los datos GDAS son los utilizados para este trabajo y tienen una resolución de 0.5° la cual corresponde a una resolución intermedia de acuerdo a las opciones de datos globales, y se empleó el método de configuración vertical por *Default* recomendado por el tutorial del modelo para trayectorias inversas, ya que considera la velocidad vertical

del archivo de datos meteorológicos de procedencia y permiten el retorno adecuado de la partícula (ARL, 2022). En la tabla 3 se muestran los parámetros utilizados.

**Tabla 3. Selección de los parámetros de simulación**

| Parámetro                     |  | Valor              |  | Parámetro                                                     |  | Valor                                                                                    |  |
|-------------------------------|--|--------------------|--|---------------------------------------------------------------|--|------------------------------------------------------------------------------------------|--|
| Tipo de trayectoria           |  | Normal             |  | Inicio de simulación en horario UTC y hora local escenario 4. |  | Escenario 1: 13:00h<br>Escenario 2: 14:00h<br>Escenario 3: 13:00h<br>Escenario 4: 00:00h |  |
| Método de movimiento vertical |  | Default            |  | Tiempo de simulación                                          |  | 24h                                                                                      |  |
| Dirección de trayectoria      |  | Backward (inversa) |  | Tiempo de incremento                                          |  | 3h                                                                                       |  |
| Coordenadas Verticales        |  | Sigma              |  |                                                               |  |                                                                                          |  |
| Meteorología                  |  | GDAS 0.5°          |  | Coordenadas de inicio                                         |  |                                                                                          |  |
| Altura de predicción          |  | 10m AGL            |  | 16.75°N                                                       |  | 93.103°O                                                                                 |  |

Esta parametrización, permitió conocer las trayectorias inversas de los vientos que incidieron en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez durante los eventos de interés, lo cual, en conjunto el análisis de imágenes satelitales (apartado 9.5), permitió el posible origen de las partículas que afectaron la calidad del aire en cada uno de ellos.

Los resultados obtenidos por el modelo utilizan información meteorológica en horario UTC, por lo que las imágenes resultantes de los escenarios se describen en ese horario, y la descripción de los escenarios se realiza en hora local para la comprensión del escenario.

Una vez seleccionados los escenarios de interés, se realizó la simulación de cada uno de ellos considerando los parámetros que se mencionaron en el apartado metodológico. A continuación se muestran los resultados obtenidos.

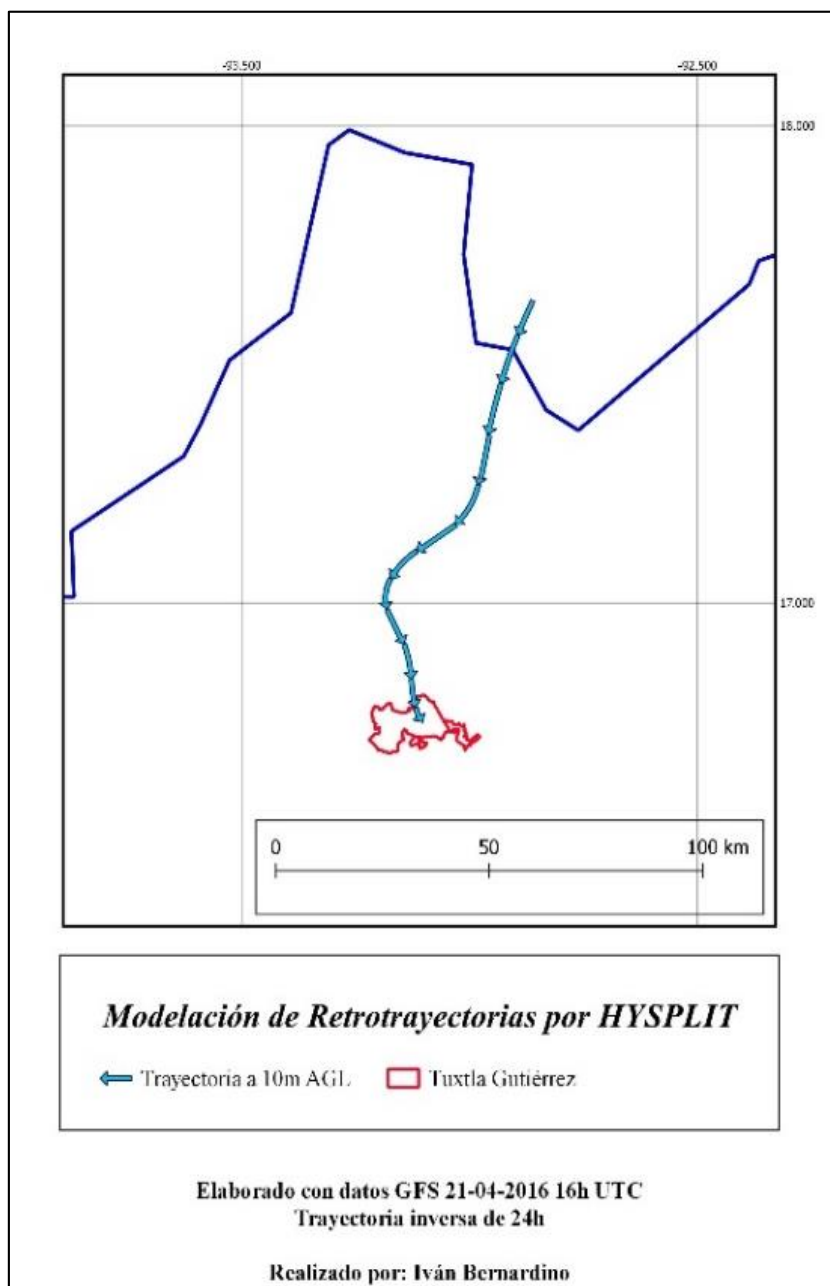
### **10.3. Escenario 1 - 21 de abril 2016 (E1)**

Este escenario está construido a partir de información publicada por Díaz-Valencia (2017), quien estudió las concentraciones de partículas y dispuso una descripción de los días con mayor concentración de  $PM_{10}$  y carbono negro durante el periodo de noviembre 2015 – mayo 2016. Menciona que el 21 de abril de 2016 se registró una concentración de  $385 \mu/m^3$  de partículas  $PM_{10}$ . Reconoció incendios al suroeste de la ciudad y al norte sobre el Parque Nacional Cañón del Sumidero.

A partir de ello, se desarrolló el escenario del recorrido de trayectorias de las parcelas de aire que ingresan a Tuxtla Gutiérrez en un periodo de 24h, comenzando a las 08:00h del 21 de abril a 08:00h del 22 de abril de 2016, que corresponde al periodo de monitoreo. En la ilustración 12 se muestra la trayectoria inversa generada para las 11:00h del 21 de abril, el resto de las trayectorias generadas para este escenario se pueden consultar en el apartado 14.1 (derivado del cambio de horario de verano se considera UTC-5h).

La trayectoria de las 11:00 h del día 21 de abril (16:00 UTC) indica que la parcela de aire que incidió sobre el punto de monitoreo localizado en el centro de la ciudad ingresó por la zona norte de esta, proveniente principalmente del este del estado. El mismo comportamiento se observa para las trayectorias de las masas de aire que incidieron a las 14:00 (19:00 UTC), 17:00h (22:00 UTC) y 20:00 (01:00 UTC). En cambio, se observa que las parcelas de aire a partir de las 23:00h (04:00 UTC), se observa que las parcelas de aire tienden a entrar al nor-

oeste del estado, cerca de los 17.5 °N interactúan con el complejo montañoso del norte del estado, por los municipios de Chapultenango e Ixhuatán, ocasionando que el aire se desplace al centro del estado. En consecuencia, las siguientes parcelas, también pasan por la zona norte de la ciudad, pero ahora provienen del este del estado cercano a la sierra norte de Chiapas, como es la trayectoria de las 05:00h (10:00 UTC) y 08:00h (13:00 UTC).



**Ilustración 12. Trayectoria simulada a las 11:00h (16:00 UTC) del 21 de abril de 2016.**

De acuerdo con Díaz-Valencia (2017), se presentaron incendios en el Parque Nacional Cañón del Sumidero durante ese día, por lo que, de acuerdo a la circulación del viento simulado por HYSPLIT, se puede relacionar que estos eventos fueron los que afectaron la calidad del aire de la ciudad.

En la tabla 4, se muestran los datos de temperatura (en grados Celcius [C°]) obtenidos por el modelo HYSPLIT, así como aquellos reportados por la estación meteorológica instalada en el poniente de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez. A partir de ellos, se realizó la evaluación estadística del desempeño del modelo.

**Tabla 4. Datos de monitoreo VS simulados E1**

| <i>Fecha</i>      | <i>Hora local</i> | <i>Temperatura</i> |                 |
|-------------------|-------------------|--------------------|-----------------|
|                   |                   | <i>Monitoreo</i>   | <i>Simulado</i> |
| <i>21/04/2016</i> | 08:00:00 a. m.    | 23.48              | 19.3            |
| <i>21/04/2016</i> | 11:00:00 a. m.    | 28.93              | 21.7            |
| <i>21/04/2016</i> | 02:00:00 p. m.    | 31.77              | 26.6            |
| <i>21/04/2016</i> | 05:00:00 p. m.    | 28.43              | 27.3            |
| <i>21/04/2016</i> | 08:00:00 p. m.    | 26.15              | 24.0            |
| <i>21/04/2016</i> | 11:00:00 p. m.    | 24.77              | 21.0            |
| <i>22/04/2016</i> | 02:00:00 a. m.    | 23.68              | 19.9            |
| <i>22/04/2016</i> | 05:00:00 a. m.    | 23.67              | 18.9            |
| <i>22/04/2016</i> | 08:00:00 a. m.    | 25.00              | 22.9            |

En la tabla 5, se muestra el resumen de la evaluación estadística del desempeño del modelo. El  $I_C$  (ecuación 1) tiene como resultado 0.63, lo que corresponde a una concordancia media de los datos. Por otro lado la desviación normal (ecuación 2 y 3) de los datos observados ( $\sigma_o$ ) y los simulados ( $\sigma_p$ ) fueron similares (1.67 y 1.81 respectivamente), mientras que el **RMSE**

(ecuación 4) tuvo un valor de 2.47, el cual, presenta una diferencia de poco más del 50% respecto a  $\sigma_o$ . Estos resultados indican que el modelo tuvo un desempeño regular para este escenario.

**Tabla 5. Resumen de resultados de evaluación estadística para el escenario 1**

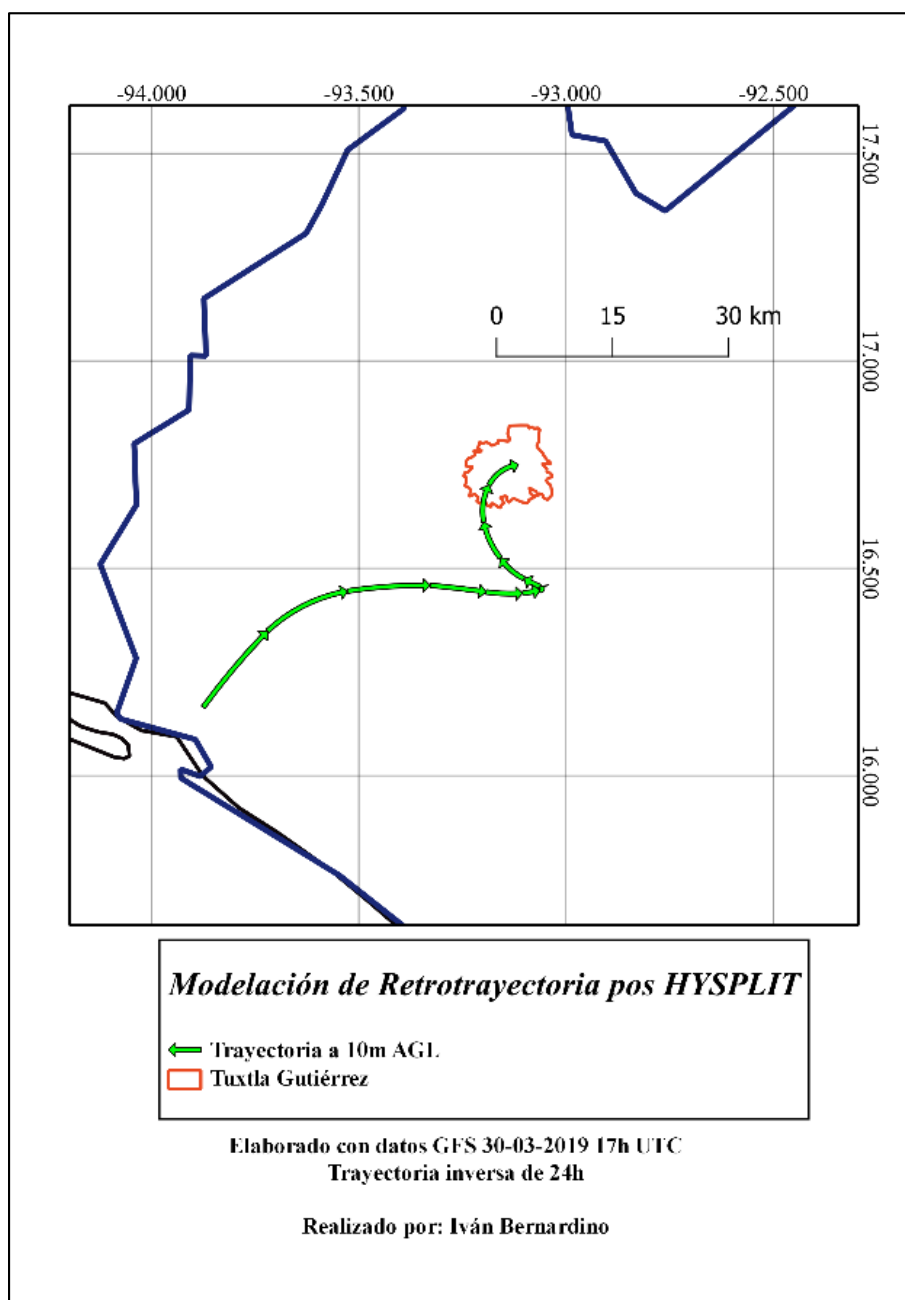
| <i>Índice</i>                | <i>Resultado</i> |
|------------------------------|------------------|
| <i>Ic</i>                    | 0.63             |
| <i><math>\sigma_o</math></i> | 1.67             |
| <i><math>\sigma_p</math></i> | 1.81             |
| <i>RMSD</i>                  | 2.47             |

#### **10.4. Escenario 2 – 30 de marzo 2019 (E2)**

Se tienen registros de monitoreo atmosférico que corresponden a datos no publicados del área de Cambio Climático y Contaminación Atmosférica del IIGERCC de la UNICACH, el cual reporta el muestreo de partículas  $PM_{10}$  en el centro de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez (16°45'19.42"N, 93° 6'56.46"O) durante los meses de marzo, abril y mayo de 2019. Este registro se realizó con la finalidad de explorar la calidad del aire durante la temporada de estiaje en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, para lo cual se empleó el mismo equipo utilizado por Díaz-Valencia (2017).

Durante este periodo de muestreo, se recolectó información que corresponde a concentraciones altas de  $PM_{10}$  y se definen los escenarios 2 y 3. El primer escenario a analizar no fue reportado como mala calidad del aire por la SEMAHN, sin embargo derivado de los datos de monitoreo recolectados, se registró una concentración de  $124\mu/m^3$ , lo que resulta un escenario de riesgo. Es así que, el periodo del E2 se define del 30 de marzo a las 8:00h (14:00 UTC) a las 8:00h (14:00 UTC) del 31 de marzo de 2019, que corresponde al tiempo de

recolección de la muestra. En la ilustración 13 se muestra la trayectoria inversa generada para las 11:00 (17:00 UTC) que corresponde al 30 de marzo de 2019, el resto de las trayectorias generadas para este escenario se pueden consultar en el apartado 14.2 (estas se presentan en hora UTC -6h).



**Ilustración 13. Trayectoria simulada a las 11:00h (17:00 UTC) del 30 de marzo de 2019.**

La trayectoria con horario de las 11:00h (17:00 UTC), se observa que proviene del sur-oeste, y al llegar a los municipios de Chiapa de Corzo y Suchiapa presenta una modificación de trayectoria hacia el norte e ingresa a la ciudad. La simulación de las 14:00h (20:00 UTC) proviene también del sur-oeste la cual presenta un cambio de trayectoria hacia el norte, cerca de los municipios de Villaflores y Villacorzo e ingresa por el poniente de la zona de estudio. La simulación de las 17:00h (23:00 UTC) es similar a la primera de esta ronda, al igual que la trayectoria de las 20:00 (02:00 UTC). Finalmente en las trayectorias que transcurren durante la madrugada, estas circulaciones provienen del sur-oeste e ingresan por el poniente y por el sur de la ciudad. A continuación, en la tabla 6 se describen las horas y los datos de temperatura de las trayectorias simuladas y de monitoreo.

**Tabla 6. Datos de monitoreo VS simulados E2**

| <i>Fecha</i>      | <i>Hora local</i> | <i>Temperatura</i> |                 |
|-------------------|-------------------|--------------------|-----------------|
|                   |                   | <i>Monitoreo</i>   | <i>Simulado</i> |
| <i>30/03/2019</i> | 08:00:00 a. m.    | 23.13              | 16.8            |
| <i>30/03/2019</i> | 11:00:00 a. m.    | 31.20              | 21.7            |
| <i>30/03/2019</i> | 02:00:00 p. m.    | 36.30              | 26.6            |
| <i>30/03/2019</i> | 05:00:00 p. m.    | 34.70              | 27.3            |
| <i>30/03/2019</i> | 08:00:00 p. m.    | 24.13              | 24.0            |
| <i>30/03/2019</i> | 11:00:00 p. m.    | 21.10              | 21.0            |
| <i>31/03/2019</i> | 02:00:00 a. m.    | 20.83              | 19.9            |
| <i>31/03/2019</i> | 05:00:00 a. m.    | 21.15              | 18.9            |
| <i>31/03/2019</i> | 08:00:00 a. m.    | 24.10              | 18.5            |

Se aplicó la evaluación estadística y en la tabla 7 se describen los resultados de los índices. El  $I_C$  (ecuación 1) para el E2, nos indica que se tiene un 67% de relación entre los datos simulados y de monitoreo. La desviación normal (ecuación 2 y 3) al cumplir con la relación

de  $\sigma_o \approx \sigma_p$ , se considera bueno al ser diferentes las desviaciones de los datos. En cambio para el estadístico **RMSD** (ecuación 4), el nivel de predicción del modelo se considera bajo, ya que el valor del índice es mayor a la desviación normal de los datos observados.

**Tabla 7. Resumen de resultados de evaluación estadística para el escenario 2**

| <b>Índice</b> | <b>Resultado</b> |
|---------------|------------------|
| <b>Ic</b>     | 0.67             |
| $\sigma_o$    | 3.52             |
| $\sigma_p$    | 2.11             |
| <b>RMSD</b>   | 3.63             |

#### **10.5. Escenario 3 – 13 de abril 2019 (E3)**

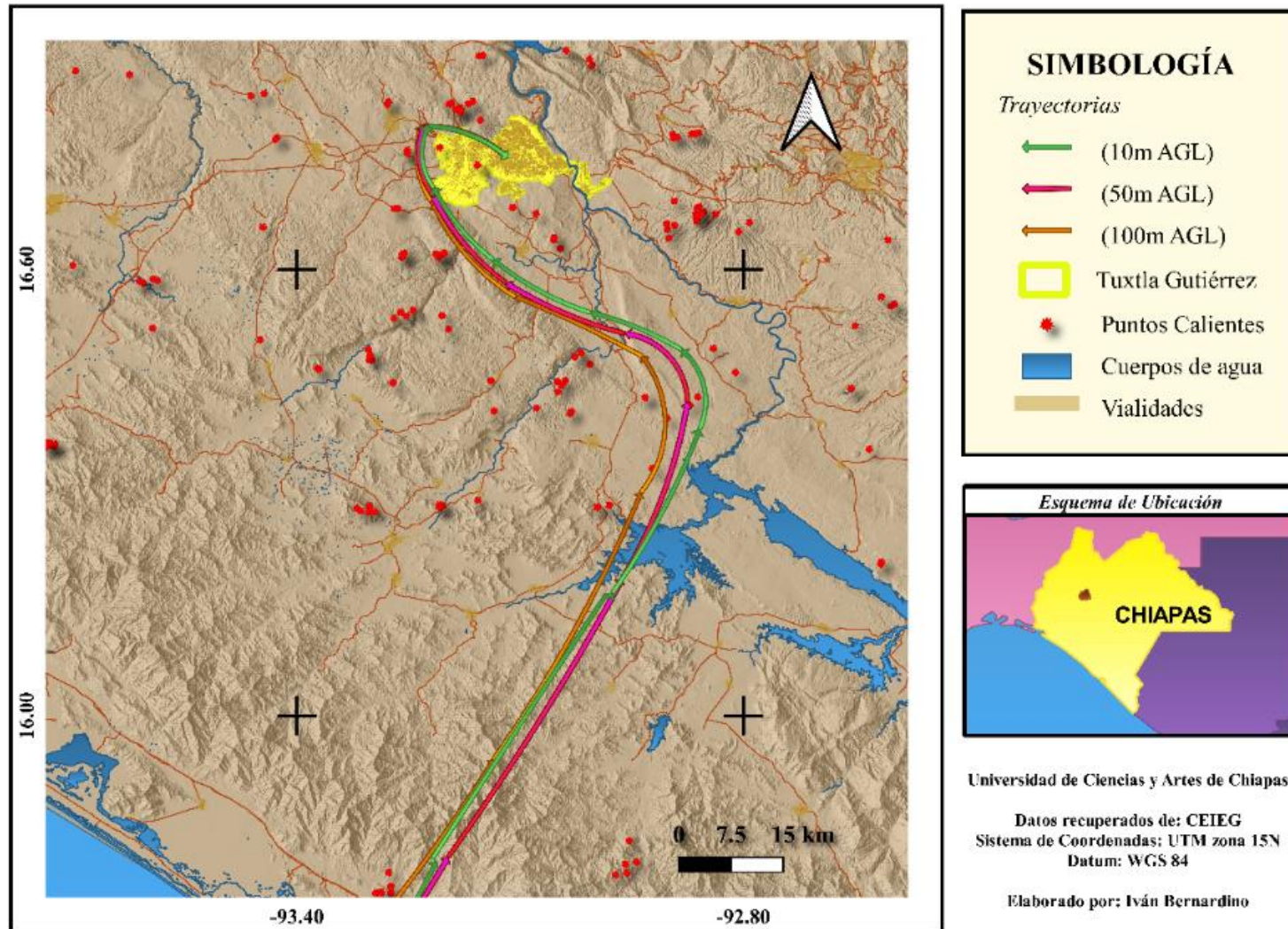
La simulación para el escenario 3 (E3), empezó a las 08:00h (13:00 UTC) del 13 de abril a las 08:00h (13:00 UTC) del 14 de abril de 2019 (derivado del cambio de horario de verano se considera UTC-5h). De acuerdo a los periódicos locales y la SEMAHN (2019), fue un día que presentó una bruma/humo y poca visibilidad.

En el apartado 14.3 se observan las ilustraciones de las trayectorias de este periodo. En la trayectoria de las 11:00h (16:00 UTC) se observa como ingresa al sur del estado teniendo un cambio de dirección al oeste por el municipio de Chiapa de Corzo. La simulación de las 13:00h (19:00 UTC) locales proviene del sur únicamente. Las simulaciones siguientes hasta la 23:00h del 13 de abril (04:00 UTC), provienen del sur-oeste, y presentan un cambio de dirección antes de ingresar al estado. Mientras que aquellas trayectorias generadas a partir de las 02:00 del 14 de abril (07:00 UTC) presentan ese cambio de dirección cerca de la zona de estudio, sobre Chiapa de Corzo e ingresan a la ciudad por el sur.

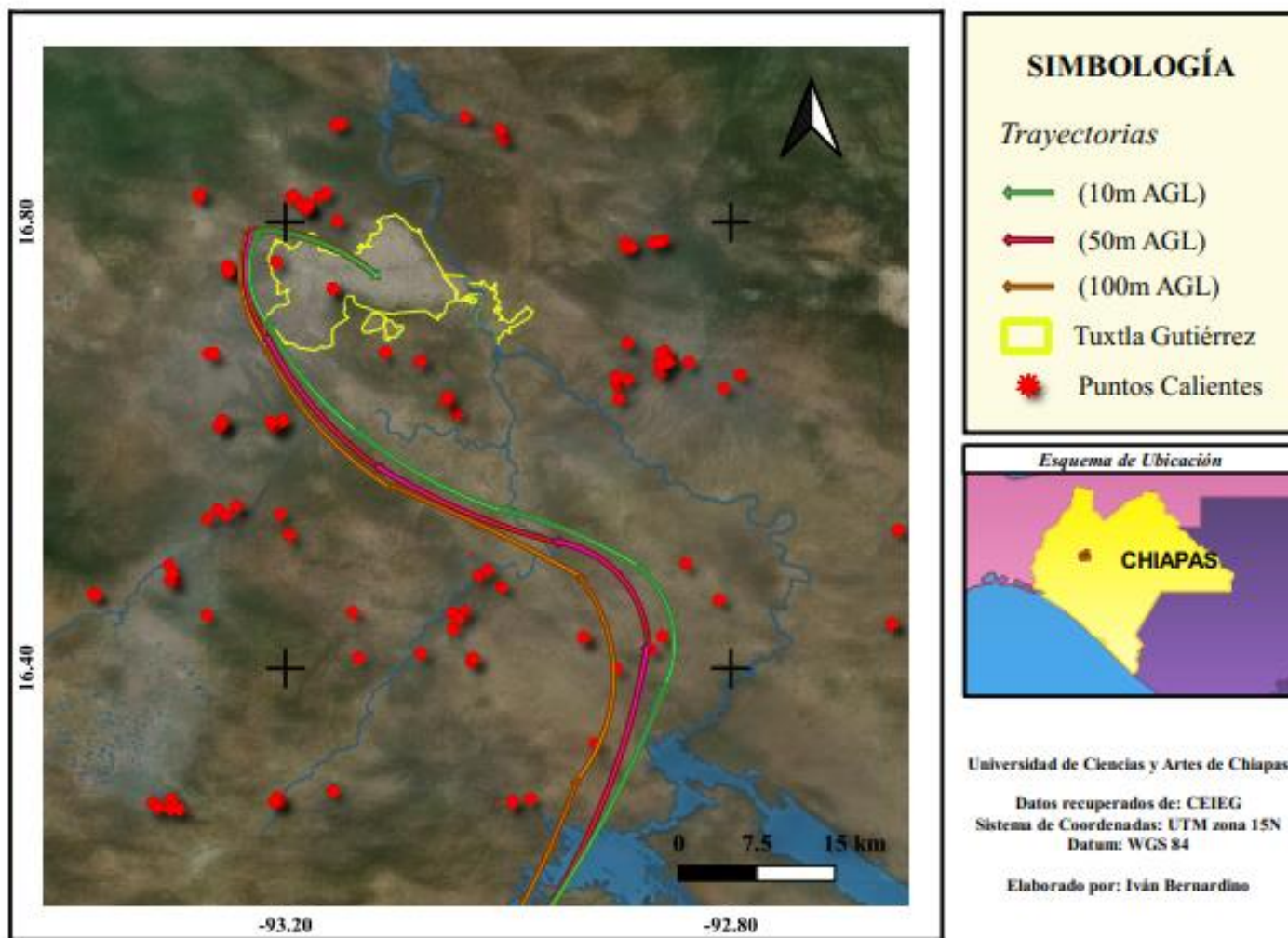
En la ilustración 14, se puede observar cómo se comporta la masa de aire en promedio de 24h y los lugares que recorre por el estado de Chiapas. Esta masa de aire ingresa al sur del estado, por el municipio de Pijijiapan, cruza la Sierra Madre de Chiapas, que se localiza por toda la costa de la región. Posterior a ello, la trayectoria muestra que el aire entra a zona de valle y planicie de la región frailesca, en donde se encuentra el embalse de la presa “La Angostura” (Central Hidroeléctrica Belisario Domínguez) donde se desvía hacia al noroeste, enseguida, al pasar al sur de la zona metropolitana de Tuxtla Gutiérrez, se observa de nueva cuenta un cambio de dirección abrupto, regresando la trayectoria en sentido este para terminar el recorrido en el punto de monitoreo ( $16^{\circ}46'10.20''N$   $93^{\circ}10'21.39''O$ ).

En la ilustración 15 se observan los puntos calientes para el periodo de estudio, los cuales son significativos, ya que de acuerdo al mapa interactivo de NASA-FIRMS (apartado 9.5), se mantienen por dos o más días. Además, se integra una imagen satelital, en la cual se observa la nubosidad del día, que permite observar si las columnas de humo son visibles y se encuentran en el radio de los puntos calientes, lo que indicaría la presencia de un incendio.

De acuerdo a lo que se observa en las ilustraciones 14 y 15, se puede decir que los altos índices de contaminación que se presentaron en la ciudad el día 13 de abril del 2019 fueron ocasionados principalmente por el transporte de humo generado por los incendios al suroeste del municipio, en los límites de Ocozocoautla y Suchiapa. Aunado a ello, no se descarta que los incendios de alrededor no incidan en la problemática, más bien que el humo proviene de más de una fuente emisora y no cercana a la zona de estudio.



*Ilustración 14. Simulación de retro-trayectorias para el 13 de abril de 2019, en conjunto los puntos calientes activos para la fecha.*



*Ilustración 15. Simulación para el 13 de abril de 2019, con una trayectoria de 21h, comenzando a las 18h UTC. Fuente: Elaboración propia con datos del CEIEG y FIRMS/NASA.*

Para la evaluación del desempeño del modelo, se utilizaron datos de la estación meteorológica instalada en el centro de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez (16°45'19.42"N, 93° 6'56.46"O). En la tabla 8 se muestran los datos de temperatura obtenidos por el modelo HYSPLIT, así como los reportados por la estación del IIGERCC. En la tabla 8 se describen la evaluación estadística

**Tabla 8. Datos de monitoreo VS simulados E3**

| <i>Fecha</i>      | <i>Hora</i> | <i>Temperatura</i> |                 |
|-------------------|-------------|--------------------|-----------------|
|                   |             | <i>Monitoreo</i>   | <i>Simulado</i> |
| <b>13/04/2019</b> | 08:00 a. m. | 19.58              | 16.4            |
| <b>13/04/2019</b> | 11:00 a. m. | 28.90              | 22.0            |
| <b>13/04/2019</b> | 02:00 p. m. | 33.18              | 26.2            |
| <b>13/04/2019</b> | 05:00 p. m. | 34.95              | 28.1            |
| <b>13/04/2019</b> | 08:00 p. m. | 30.28              | 25.6            |
| <b>13/04/2019</b> | 11:00 p. m. | 25.47              | 20.5            |
| <b>14/04/2019</b> | 02:00 a. m. | 21.63              | 18.1            |
| <b>14/04/2019</b> | 05:00 a. m. | 19.60              | 16.9            |
| <b>14/04/2019</b> | 08:00 a. m. | 19.35              | 16.0            |

Se emplea el índice de correlación para analizar cuán cercanos son los datos de monitoreo con los de simulación, así como la desviación normal y raíz cuadrática media de los datos simulados y monitoreados. El  $I_c$  (ecuación 1) para el E2, nos indica que se tiene un 81% de relación entre los datos simulados y de monitoreo, lo que significa una concordancia buena. La desviación normal (ecuación 2 y 3) al cumplir con la relación de  $\sigma_o \approx \sigma_p$ , se considera aceptable al no variarsimilares las desviaciones de los datos. El estadístico ***RMSD*** (ecuación 4), se considera bueno el nivel de predicción debido a que el índice es menor a la desviación normal de los datos observados (***RMSD***  $\leq \sigma_o$ ). Los resultados se señalan en la tabla 9.

**Tabla 9. Resumen de resultados de evaluación estadística para el escenario 3.**

| <i>Índice</i> | <i>Resultado</i> |
|---------------|------------------|
| <i>Ic</i>     | 0.81             |
| $\sigma_o$    | 3.56             |
| $\sigma_p$    | 2.67             |
| <i>RMSD</i>   | 3.11             |

#### **10.6. Escenario 4 – 05 de mayo 2023 (E4)**

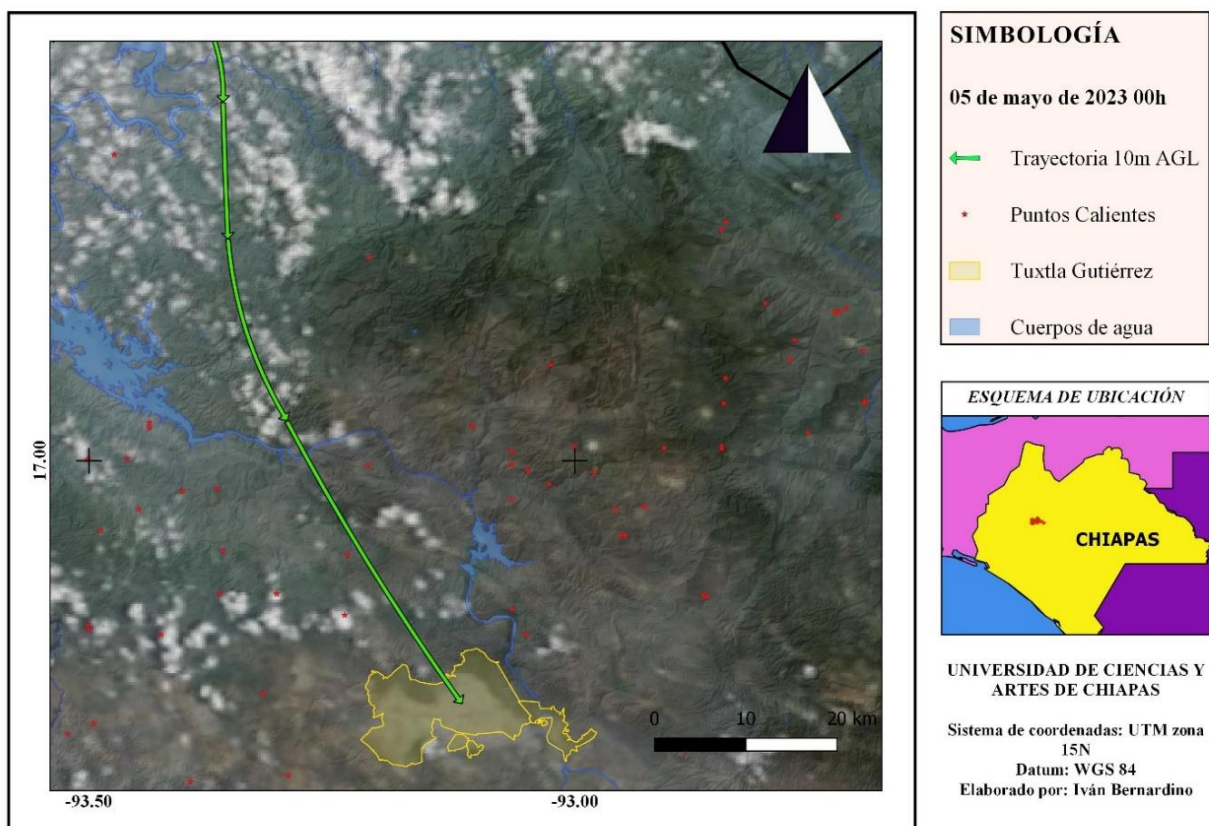
La SEMAHN reportó, por medio del Sistema de Monitoreo de Calidad del Aire (SMCA<sup>11</sup>), una mala calidad del aire (concentración de 99.6µg/m<sup>3</sup> de PM<sub>2.5</sub>) y disminución de la visibilidad por la presencia de humo el día 05 de mayo de 2023 en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, debido a ello, para la simulación de este escenario la serie de tiempo comienza a las 00:00h hasta las 23:00h de este día (hora local).

Para determinar de dónde provenía el aire que ingresó a la ciudad durante este día, se realizaron retro-trayectorias con una frecuencia de 1h, en las cuales se pudo observar cómo ingresan las parcelas de aire. Se complementa con información de puntos calientes (FIRMS/NASA), una imagen satelital (WorldView/NASA) y un modelo digital de elevación.

Se observa en la simulación de las 00:00h del 05 de mayo (ilustración 16) que la masa de aire que ingresa a la zona de estudio proviene del norte del estado, pasando por los municipios de San Fernando y Berriozábal. En las siguientes trayectorias se puede observar que el recorrido mantiene la misma dirección. También se observa que la trayectoria tiene un desplazamiento hacia el oeste, el cual cada vez se prolonga y el ingreso de la masa de aire es

<sup>11</sup> SMCA de la SEMAHN: [https://www.semahn.chiapas.gob.mx/portal/index.php/calidad\\_aire](https://www.semahn.chiapas.gob.mx/portal/index.php/calidad_aire)

del oeste. A las 02:00h del 05 de mayo se desplaza sobre el embalse de la presa ‘Malpaso’ (Central Hidroeléctrica Nezahualcóyotl), ingresando al oeste de la ciudad. A las 11:00h, el recorrido de la masa de aire sigue un desplazamiento noroeste cercano a los municipios de Ostuacán y Ocozocoautla de Espinosa. Siendo las 16:00h la trayectoria ingresa por la frontera entre Veracruz, Oaxaca y Chiapas para pasar por el embalse de la presa Malpaso y pasa en la colindancia con el municipio de San Fernando e ingresar a la ciudad y reportarse en la zona de estudio. A las 19:00h la masa de aire pasa por la presa ‘Malpaso’ e ingresa al noroeste de la ciudad. Para las 21:00h la masa pasa por el norte del estado y recorre San Fernando antes de ingresar a la ciudad. Las últimas trayectorias se comportan como ésta última.



*Ilustración 16. Trayectoria simulada a las 00:00h 05 de mayo de 2023.*

Cabe señalar que al analizar las trayectorias en conjunto con la imagen satelital, la trayectoria pasa por los puntos calientes que se identifican y que se localizan al oeste y noreste de la ciudad, por lo que se podría relacionar la influencia de estos sobre las trayectorias que entran sobre el poniente de la ciudad desde las 11:00h – 18:00h) favoreciendo el transporte de partículas. Las imágenes de las trayectorias inversas podemos encontrarlas en el apartado 14.4, definidas en hora local.

A continuación, en la tabla 10 se describen las horas y los datos de temperatura de las trayectorias simuladas y de monitoreo. Los datos meteorológicos fueron obtenidos de la estación que se encontraba en las instalaciones del IIGERCC-UNICACH, al norte poniente de la ciudad (16°46'41.05"N, 93° 7'18.58"O).

**Tabla 10. Datos de monitoreo VS simulados E4**

| <i>Fecha</i> | <i>Hora</i>    | <i>Temperatura</i> |                 |
|--------------|----------------|--------------------|-----------------|
|              |                | <i>Monitoreo</i>   | <i>Simulado</i> |
| 05/05/2023   | 00:00:00 a. m. | 27.9               | 24.2            |
| 05/05/2023   | 03:00:00 a. m. | 26.6               | 22.9            |
| 05/05/2023   | 06:00:00 a. m. | 26.5               | 22.7            |
| 05/05/2023   | 09:00:00 a. m. | 31.9               | 27.5            |
| 05/05/2023   | 12:00:00 p. m. | 38                 | 33.4            |
| 05/05/2023   | 15:00:00 p. m. | 35.2               | 35.4            |
| 05/05/2023   | 18:00:00 p. m. | 31.1               | 29.7            |
| 05/05/2023   | 21:00:00 p. m. | 29.9               | 26.4            |

Se aplicó la evaluación estadística y en la tabla 11 se describen los resultados de los índices. El  $I_C$  (ecuación 1) para el E4, nos indica que se tiene un 85% de relación entre los datos simulados y de monitoreo, lo que significa una buena relación. La desviación normal

(ecuación 2 y 3) al cumplir con la relación de  $\sigma_o \approx \sigma_p$ , se considera bueno al ser similares las desviaciones de los datos. El estadístico **RMSD** (ecuación 4), el nivel de predicción del modelo se considera bueno ya que el valor del índice es menor a la desviación normal de los datos observados.

**Tabla 11. Resumen de resultados de evaluación estadística para el escenario 4**

| <b>Índice</b>                | <b>Resultado</b> |
|------------------------------|------------------|
| <b><math>I_c</math></b>      | 0.85             |
| <b><math>\sigma_o</math></b> | 2.22             |
| <b><math>\sigma_p</math></b> | 2.56             |
| <b>RMSD</b>                  | 2.01             |

## 11.DISCUSIÓN

Existen modelos de calidad del aire que permiten evaluar el impacto de ciertos fenómenos en un tiempo y espacio determinado. Estos modelos dependen de resolución, parámetros de física y química, así como de datos de entrada que alimentan el software. El modelo HYSPLIT, así como otros modelos de trayectoria, se han utilizado como herramienta para observar la deposición y dispersión de contaminantes (Laing y Evans, 2016). Este modelo atmosférico permite realizar predicciones y analizar datos pasados de condiciones atmosféricas.

La aplicación del modelo HYSPLIT ha permitido identificar la evolución espacial de masas de aire, que al pasar por zonas identificadas con puntos calientes relacionados a eventos de incendios forestales o quemas, permite asociarlas a la emisión de contaminantes como hollín o carbono negro, que corresponden a material particulado  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ .

Esto responde al planteamiento de identificar las fuentes de emisión de las partículas, cuyos contaminantes tienen mayor incidencia durante la temporada de estío en Tuxtla Gutiérrez, que es un aspecto poco monitoreado y por consiguiente no se tienen suficientes datos.

Las imágenes obtenidas, permiten definir si el comportamiento de las trayectorias generadas por el modelo presenta relación con las imágenes de satélite (E3 y E4). Con base en ellas, se pueden identificar fuentes de emisión de contaminantes que afectaron la calidad del aire de la ciudad durante los escenarios estudiados. Lo anterior fue posible al asociar las trayectorias a puntos calientes, que, al trasponerse a imágenes satelitales, permitió observar si las trayectorias trazadas por el modelo coinciden con las columnas de humo.

De acuerdo con los resultados del  $I_c$  (ecuación 1), el modelo presentó un desempeño aceptable para los escenarios 1 y 2 ( $<0.8$ ); en cambio para los escenarios 3 y 4 su desempeño fue bueno ( $>0.8$ ). Respecto a la desviación normal (ecuación 3 y 4), se pudo observar tuvo un buen desempeño en todos los escenarios, ya que las desviaciones son semejantes entre sí. En cambio para el estadístico **RMSD** (ecuación 4) solo en los escenarios 3 y 4 tienen un buen desempeño. Por tanto los escenarios 3 y 4 son los que cumplen con el mejor desempeño estadístico, lo que significa que el modelo tuvo mejor desempeño en la simulación y representan un escenario más cercano a la realidad.

Respecto al escenario 1, un caso publicado por Díaz-Valencia en 2017, quien reportó para el día 21 de abril de 2016 concentraciones muy altas de  $PM_{10}$ , por lo cual era de interés conocer de dónde provenían los contaminantes que afectaron la calidad del aire. Describe así mismo que durante el día de estudio las ráfagas de viento eran principalmente del oeste y sur-oeste, lo que en parte coincide con las trayectorias desarrolladas para el escenario donde en determinadas horas del día, el viento ingresa al oeste de la ciudad. Las concentraciones de humo podrían asociarse a incendios al suroeste de la ciudad y sobre el Cañón del Sumidero. Se puede pensar que los incendios y/o quemas locales influyen en este caso, ya que la concentración era muy elevada. De acuerdo a las trayectorias realizadas con HYSPLIT, los vientos ingresaron por el lado norte de la zona de estudio, los cuales favorecieron el ingreso de humo por los incendios que se presentaron en el Parque Nacional Cañón del Sumidero.

También señalar que los escenarios 2 y 3, se observa que las masas de aire no ingresan necesariamente del norte del estado, como suele definirse por los vientos dominantes y la meteorología para Tuxtla Gutiérrez. Las simulaciones mostraron que los vientos del sur son dominantes en algunos días durante la temporada de estiaje. Este fenómeno se relaciona al

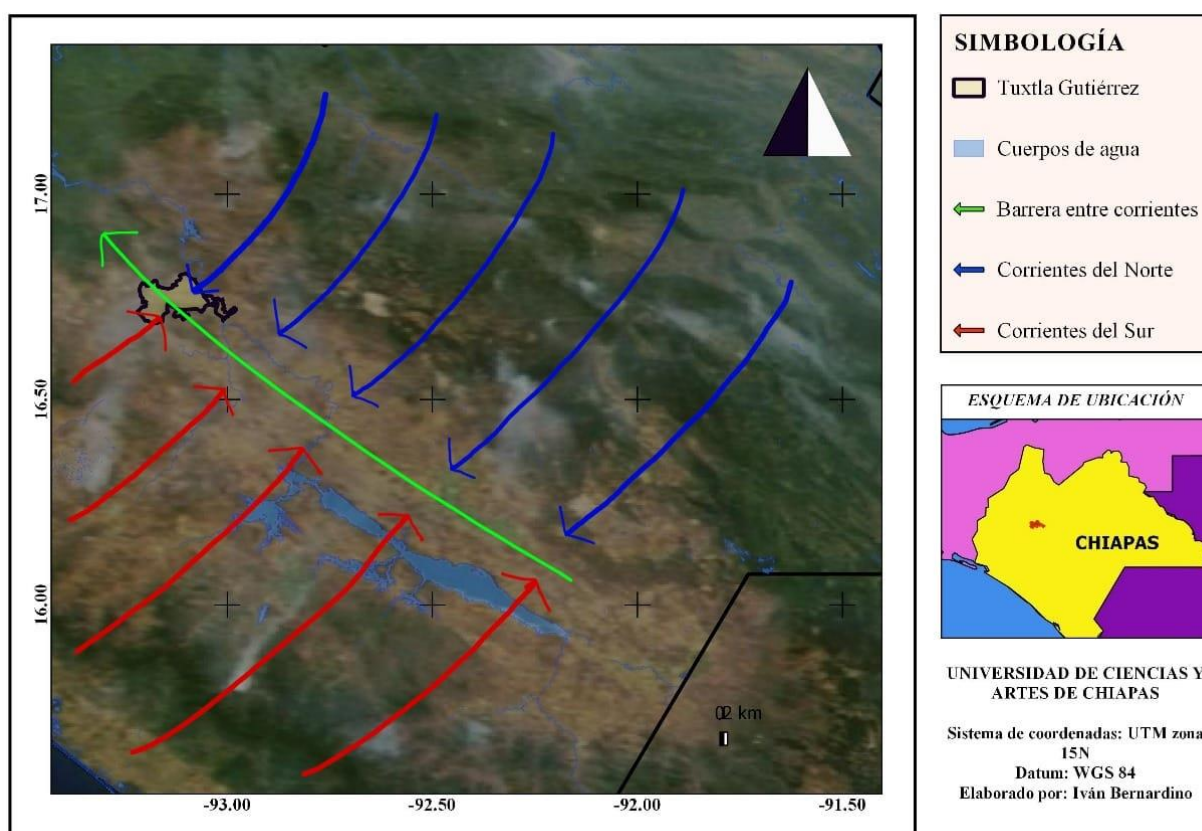
fenómeno de *surada*, que se refiere a un viento proveniente del sur y sureste que es favorecida por sistemas anticiclónicos intensos y secos en superficie, por lo que no traen lluvia, y propician un ambiente cálido y estable. Este fenómeno se puede presentar en cualquier época del año (CENAPRED, 2019).

Con base a lo anterior, el E3 presentó una influencia de vientos que provienen de la Sierra Madre, atraviesan la región Frailesca e ingresan en un valle intermontano de la Depresión Central, justo al sur del municipio de Suchiapa. Este escenario de trayectorias inversas nos permite asociar corrientes de vientos provenientes del Pacífico, lo que conlleva al transporte de aire y en posible caso, contaminantes asociados al humo provocado por incendios, por lo que los contaminantes que persisten en la región de Tuxtla Gutiérrez durante la temporada de estiaje no solo provienen de sus alrededores, sino de regiones al sur de la zona de estudio, cuyas emisiones llegan a modificar la calidad el aire de la ciudad.

Cuando la corriente del E3 cruza por el municipio de Suchiapa, tiene un cambio de dirección de este a oeste. Este cambio pudiera ser provocado por una barrera atmosférica (ilustración 17), ya que no permite que las masas de aire continúen su trayecto y giren de manera abrupta. Este caso estaría demostrando de manera general cómo corrientes del Golfo de México chocan con las corrientes que vienen del sur (del océano Pacífico), desviando el curso de las corrientes desplazándolas hacia el oeste. Por ello se sugiere que este fenómeno ocurrió por encima de la región Centro y Altos de Chiapas, lo cual generó este cambio de trayectoria. De acuerdo a CENAPRED (2019), en el estado dominan vientos que provienen del norte (líneas azules), pero existen eventos como las *suradas* asociados a sistemas anticiclónicos ocasionando rachas de viento provenientes del pacífico (líneas rojas). De acuerdo a

Protección Civil del estado de Chiapas (2024), menciona que estos fenómenos de suradas pueden ocasionar condiciones atmosféricas idóneas para el desarrollo de incendios forestales.

Se debe señalar que los campos de salida del modelo HYPLIT son una interpolación entre el terreno (altitud del terreno, suelo) y el sistema de coordenadas, por tanto, la resolución es proporcional al sistema de coordenadas nativo, la cual tiene un valor máximo de 10km por pixel.



*Ilustración 17. Corrientes de viento del norte y del sur para el 13 de abril de 2019.*

Durante las simulaciones de trayectoria, se tuvo una coincidencia mínima con las geoformas del terreno, ya que el proceso de interpolación del modelo se considera “suave”, es decir, la fricción que es provocada por el terreno será menor y no alcanza a definir todos los detalles

y formas del relieve local. El modelo no es muy preciso cuando el terreno es muy complejo y cuando el flujo de viento es impulsado por condiciones sinópticas a gran escala (vientos fuertes, anticiclones, entre otros).

En el escenario 4, se describió un caso con un monitoreo vigente, el cual comprende parte de las estrategias para mitigar el riesgo por mala calidad del aire, a partir del Sistema de Monitoreo de Calidad del Aire a cargo de la Secretaría de Medio Ambiente e Historia Natural del Estado. El 05 de mayo de 2023 se presentó un caso de altas concentraciones de  $PM_{2.5}$ , las cuales son más dañinas para la salud, pero para los casos de estudios anteriores a 2020 no se contaba con un monitoreo activo en Chiapas.

Las imágenes que han descrito el escenario, muestran cómo las trayectorias tienen una dirección que corresponde a la forma de las nubes de las imágenes satelitales, ya que para esta fecha se tiene la presencia de un canal de baja presión lo que explicaría la nubosidad influenciada por un sistema anticiclónico que estaba estacionado en el país (ilustración 18).

Las masas de aire ingresaron al norte de la ciudad y al oeste principalmente. De acuerdo a los puntos caliente localizados y las trayectorias simuladas, se puede inferir que los incendios que se encontraban al oeste de la zona de estudio (apartado 14.4) son los que pudieron emitir contaminantes que afectaron la calidad del aire de la ciudad, esto de acuerdo a puntos calientes localizados y las trayectorias simuladas.

Entre los escenarios 3 y 4, se pudo observar que las masas de aire que ingresan a la ciudad pueden determinar la calidad del aire en la ciudad, ya que llegan a transportar humo de los incendios o quemas que se encuentran a su paso por otras regiones del estado. Esto también

puede ser influenciado por que se encuentra sobre la zona de estudio un sistema anticiclón lo que mantiene en suspensión partículas por mayor tiempo.

De los meses entre septiembre a marzo, se recibe mayor radiación ocasionando que las partículas se concentren con mayor facilidad en algunas zonas (Secretaría de Medio Ambiente, 2023); a pesar de que el viento es el vehículo del humo, este dispersa las masas de aire y logra depositar las partículas más allá de las regiones donde se originan los incendios o quemas.



*Ilustración 18. Sistemas meteorológicos del 05 de mayo de 2023 (SMN, 2023).*

El humo tiene un potencial para afectar la calidad del aire generando efectos en la salud de la población (enfermedades respiratorias, y problemas en órganos internos), además de la reducción de visibilidad (bruma). La mala calidad del aire es el principal riesgo ambiental al que se exponen los habitantes de la región bajo condiciones de contingencia ambiental (Gibbens y McKeever, 2023).

Así mismo, se reconoce que las quemas e incendios son mayores en temporada de estiaje, puesto que se presentan las condiciones que favorecen su presencia (como condiciones de mayor radiación, menor presencia de lluvias, y presencia de fenómenos anticiclónicos). Cabe señalar que los escenarios analizados comprenden la temporada de estiaje de diferentes años, en los cuales cada uno señala que persiste una mala calidad del aire por altas concentraciones de partículas  $PM_{10}$  (E1, E2, E3) o  $PM_{2.5}$  (E4).

En los escenarios E3 y E4 se aprecia cómo las trayectorias pasan sobre las columnas de humo o sobre puntos calientes identificados como incendios, por lo que se infiere que tuvieron influencia en el transporte de humo (apartados 14.3 y 14.4). De esta forma se puede sugerir que el viento arrastra contaminantes al pasar sobre las columnas de humo y las transporta a la ciudad de Tuxtla Gutiérrez generando un escenario de bruma (E3).

Con la información analizada por Díaz-Valencia (2017) y con las trayectorias obtenidas en el E1, podemos entender cómo el humo generado en el Parque Cañón del Sumidero es arrastrado a la ciudad derivado de la trayectoria sugerida por el modelo HYSPLIT y lo que propició que se reportara mala calidad el aire.

Además en los escenarios 2 y 3, se observó en las simulaciones que los vientos ingresan por el sur y oriente de la ciudad, y no por el noreste que son los vientos dominantes para el sureste

de México en la temporada, este cambio en la dirección del viento es derivado del evento de surada presente por el temporal de estío (SMN, 2019).

También se observa que los eventos sinópticos como los anticiclones o frentes fríos, condicionan el movimiento de las masas de aire, y juega un papel importante para dispersar el humo de quemas e incendios que se presentaron en el E4.

Los modelos de trayectoria son una herramienta útil para analizar el alcance que puede tener la dispersión de contaminantes; tal como menciona Balde y Vega-García (2019), HYSPLIT es utilizado ampliamente para comprobar el alcance de las partículas originadas por incendios y cómo los fenómenos anticiclónicos ponderan las concentraciones de contaminantes. También, Cancino-Domínguez (2022) utiliza HYSPLIT para definir la dirección que toman contaminantes y cómo la población es expuesta al humo de incendios no circundantes.

Lo anterior coincide con los resultados de los escenarios del presente estudio, los cuales muestran cómo las partículas llegan a viajar de diferentes lugares del estado de Chiapas, que en conjunto con condiciones atmosféricas recurrentes (eventos anticiclónicos, suradas) favorecen condiciones de altas concentraciones de material particulado en Tuxtla Gutiérrez, ocasionando que la población se exponga a escenarios de mala calidad del aire.

### **11.1. Limitantes**

Aunque el modelo HYSPLIT se ha mejorado desde sus inicios en la década de 1980, existen varias limitantes, en las que se destaca la poca capacidad del modelo para tener en cuenta las reacciones químicas secundarias y la dependencia de la resolución de los datos meteorológicos de entrada, que pueden tener una resolución temporal y espacial aproximada. Por lo que se debe evaluar los resultados cuidadosamente en áreas con terreno complejo.

## 12.CONCLUSIONES

Se identifican las fuentes de emisión de contaminantes a partir de los escenarios de trayectorias inversas modeladas por HYSPLIT y de las zonas donde se registraron incendios. Esto implica reconocer un factor de riesgo de la calidad del aire de la ciudad.

Se ha demostrado cómo el modelo HYSPLIT funciona como herramienta complementaria para definir escenarios de trayectoria, y que se ha complementado la información con uso de sistemas de información geográfica e imágenes de satélite.

De acuerdo a los escenarios elaborados por el modelo HYSPLIT:

- El humo proviene de otras regiones no cercanas a la zona de estudio y que, por las condiciones meteorológicas, como son los vientos dominantes durante la temporada de estiaje, favorecen su transporte hacia la ciudad.
- Los factores de temperatura y viento son primordiales para describir la dinámica atmosférica de un lugar y además, juegan un papel importante en la dispersión de los contaminantes, por lo que deben ser monitoreados y almacenados en bases de datos para estudios de la dinámica atmosférica así como de la calidad el aire.
- Las fuentes de emisión descritas a partir de las trayectorias simuladas por HYSPLIT, coinciden con las imágenes satelitales, y la capa de puntos calientes refuerzan el origen de los contaminantes (escenarios 3 y 4).

Como software de análisis atmosférico, se encontró a HYSPLIT:

- De fácil acceso y habilidades múltiples para investigaciones de dispersión de contaminantes.
- Su manejo requiere de un equipo de cómputo de por lo menos 32 bits. Además de que su diseño operativo no requiere de conocer otros lenguajes de computación.
- Tiene la facilidad de exportar información a sistemas de información geográfica.
- Así también, se reconoce que tiene limitantes en cuanto a la resolución de procesamiento de información, así como deficiencias en los parámetros de elevación y terrenos, lo que dificulta tener mayor certeza en los movimientos horizontales del aire para escalas locales.
- El modelo funciona mejor para realizar simulaciones de fenómenos a mesoescala.

Como herramienta para análisis de escenarios, HYSPLIT:

- Permitió trazar trayectorias y reconocer las fuentes localizadas como puntos calientes, los cuales coinciden con la información de las imágenes satelitales (E3 y E4).
- Se evaluaron los diferentes escenarios, a diferentes horas y con distintos parámetros hasta definir la mejor serie de simulaciones y de esta forma desarrollar escenarios de trayectorias inversas.

De acuerdo a la evaluación estadística:

- Todos los escenarios contaron con más del 60% de concordancia, siendo mayor para el E3 y E4, y respecto a la comparación de la desviación normal de los datos todos los escenarios se consideraron aceptables. En cambio, la raíz cuadrática media no tuvo un desempeño positivo en los escenarios 1 y 2. De manera general el modelo

tuvo un buen desempeño, derivado a promediar el 60% de confiabilidad de acuerdo al Índice de Concordancia, teniendo en cuenta los limitantes del modelo. Si pudiera tomarse en cuenta mayor precisión en los parámetros de simulación, los estadísticos mostrarían un mejor desempeño en la evaluación.

- La falta de datos de monitoreo no permite tener una validación estadística más completa, ya que se requieren de datos de más estaciones, inclusive de sondeo vertical para validar los datos simulados en altura.

Por tanto, la creación de estos escenarios es una oportunidad para demostrar que la calidad del aire en Tuxtla Gutiérrez, se ve afectada durante la temporada de estiaje no solo por los incendios o quemas locales, sino que la dinámica atmosférica de mayor escala puede favorecer el trayecto de contaminantes de otras regiones del estado.

Como se describió en los diferentes escenarios (E3 y E4), donde el humo fue evidente en la temporada, y en ambos casos las trayectorias mostraron que las masas de aire pudieron transportar contaminantes de columnas de humo provenientes de quemas de regiones alejadas de Tuxtla Gutiérrez, localizados principalmente en el E3 al sur-oeste de la zona de estudio y al oeste para el E4.

Por último, se puede decir que los incendios son un factor de riesgo para la población, que de acuerdo a esta investigación, sus efectos se propagan a sitios alejados de las fuentes, por causa de la dinámica atmosférica (los vientos) y que se debe tener más atención en ellos durante la temporada de estiaje.

### **12.1. Recomendaciones**

Se recomienda evaluar los escenarios futuros de bruma e identificar el origen mediante trayectorias para realizar un catálogo de eventos y mejorar la toma de decisiones y alertas de contingencia ambiental cuando se lleguen a presentar estos eventos.

Se recomienda utilizar más herramientas de modelación para mejorar la atención a los fenómenos que pongan en riesgo la salud de la población.

### 13.REFERENCIAS

Air Resources Laboratory. (2022). HYSPLIT – Laboratorio de Recursos del Aire.

<https://www.arl.noaa.gov/hysplit/>

Anglés Hernández, M., Rovalo Otero, M. y Tejado Gallegos, N. (2021) Manual de derecho ambiental mexicano. Instituto de investigaciones Jurídicas. Universidad Autónoma de México. Doctrina Jurídica, Núm. 915. México.

Arciénegas Suárez, C. A. (2012). Diagnóstico y control de material particulado: partículas suspendidas totales y fracción respirable PM10. Luna Azul, 34(2012), 195–213.  
<http://www.scielo.org.co/pdf/luaz/n34/n34a12.pdf>

Ayllón, Teresa. (2013). Elementos de la meteorología y la climatología. Trillas, 3ra ed. México, D. F.

Balde, B y Vega-García, C. (2019). Estimación de emisión de GEI y sus trayectorias en grandes incendios forestales en Cataluña, España. INECOL: Maderas y Bosques, 25(2).  
<https://doi.org/10.21829/myb.2019.2521764>

Barberá Riera, M. (2017). Exposición al humo de incendios forestales y mortalidad en Valencia, Universitat Jaume I. <https://doi.org/10.6035/14032.2017.24116>

Caballero, G. (2019, April 25). “Mala” y “no saludable”, la calidad del aire en Tuxtla. Alerta Chiapas. <https://alertachiapas.com/2019/04/25/mala-y-no-saludable-la-calidad-del-aire-en-tuxtla/>

Canales-Rodríguez, M., Quintero-Núñez, M., Castro-Romero, T. y García-Cuento, R. (2014). Las partículas respirables PM10 y su composición química en la zona urbana y rural de Mexicali, Baja California en México. Información Tecnológica, vol. 25, 6. doi: 10.4067/S0718-07642014000600003

Cancino-Domínguez, Z. (2022). Modelación de la trayectoria y dispersión de emisiones producidas por incendios forestales de los Pantanos de Centla, Tabasco periodo 2016-2019. Tesis de Pregrado. Universidad Autónoma de Puebla, Puebla.

- Cantón, F. (2019). Hollin y humo, lo que respiran habitantes de Tuxtla Gutiérrez: Semahn. Chiapas Paralelo. <https://chiapas-digital.com/hollin-y-humo-lo-que-respiran-habitantes-de-tuxtla-gutierrez-semahn/>
- Carrasco Venegas, L., Castañeda Pérez, L. y Concepción Gamarra, L. (2014). Simulación de las interacciones químicas y fotoquímicas de contaminantes troposféricos. Cátedra Villareal, v.2, 2, 41-53. ISSN: 2310-4767
- Comité Estatal de Información Estadística y Geográfica de Chiapas (CEIEG). (2015). Región I Metropolitana. Recuperado de: [http://www.ceieg.chiapas.gob.mx/productos/files/MAPESTEMREG/REGION\\_I\\_METROPOLITANA\\_post.pdf](http://www.ceieg.chiapas.gob.mx/productos/files/MAPESTEMREG/REGION_I_METROPOLITANA_post.pdf)
- Centro Nacional de Prevención de Desastres. (2019). Vientos del sur, Surada. Recuperado de: Vientos del sur, Surada | Centro Nacional de Prevención de Desastres | Gobierno | gob.mx ([www.gob.mx](http://www.gob.mx))
- Chen, B., Stein, A. F., Maldonado, P. G., Sanchez de la Campa, A. M., Gonzalez-Castanedo, Y., Castell, N., y de la Rosa, J. D. (2013). Size distribution and concentrations of heavy metals in atmospheric aerosols originating from industrial emissions as predicted by the HYSPLIT model. *Atmospheric Environment*, 71, 234–244. <https://doi.org/10.1016/J.ATMOENV.2013.02.013>
- Comisión Nacional Forestal. (2010). Incendios forestales. Guía práctica para comunicadores. Comisión Nacional Forestal, 3ed, 221.
- Díaz-Valencia, S. (2017). Estudio de comportamiento de las concentraciones de partículas PM10 en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez durante la temporada de estiaje. Tesis de pregrado. Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.
- Domínguez, A. (2019). Advierten contingencias por mala calidad del aire. Cuarto Poder. <https://www.cuartopoder.mx/chiapas/advierten-contingencias-por-mala-calidad-del-aire/283260/>
- Domínguez, A. (2020). Calidad del aire ya es monitoreada a diario en la Zona Metropolitana de Chiapas | Chiapasparalelo. Chiapas Paralelo.

<https://www.chiapasparalelo.com/noticias/chiapas/2020/02/calidad-del-aire-ya-es-monitoreada-a-diario-en-la-zona-metropolitana-de-chiapas/>

Draxler, R. (2004). Seminario de capacitación para el uso del modelo HYSPLIT en PC.

National Oceanic and Atmospheric Administration. Recuperado de:

<https://www.arl.noaa.gov/documents/workshop/hysplit1/spanish/startme.pdf>

El Comercio. (2018). ¿Qué es el carbono negro y cómo afecta a los glaciares?. Recuperado de: <https://elcomercio.pe/peru/ancash/carbono-negro-afecta-glaciares-noticia-511295-noticia/>

Environmental Protection Agency. (2022). Conceptos básicos sobre el material particulado (PM, por sus siglas en inglés). <https://espanol.epa.gov/espanol/conceptos-basicos-sobre-el-material-particulado-pm-por-sus-siglas-en-ingles>

Escudero, M., Stein, A., Draxler, R. R., Querol, X., Alastuey, A., Castillo, S., y Avila, A. (2006). Determination of the contribution of northern Africa dust source areas to PM10 concentrations over the central Iberian Peninsula using the Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory model (HYSPLIT) model. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 111(D6). <https://doi.org/10.1029/2005JD006395>

Flores, L. (2019). De 300% el incremento de incendios forestales en Chiapas. *El Heraldo de Chiapas*. Recuperado de: <https://www.elheraldodechiapas.com.mx/local/de-300-el-incremento-de-incendios-forestales-en-chiapas-4181500.html>

Gaiero, D. M., Simonella, L., Gassó, S., Gili, S., Stein, A. F., Sosa, P., Becchio, R., Arce, J., y Marelli, H. (2013). Ground/satellite observations and atmospheric modeling of dust storms originating in the high Puna-Altiplano deserts (South America): Implications for the interpretation of paleo-climatic archives. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(9), 3817–3831. <https://doi.org/10.1002/JGRD.50036>

Gamero Gamero, A. M., Delgadillo, J., Cortes Flores, J. I., Velasco Velasco, J., y Velasco Cruz, C. (2020). Propiedades del suelo afectadas por el tiempo de descanso en un sistema de roza-tumba-quema. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 7(1). <https://doi.org/10.19136/ERA.A7N1.2098>

- Gibbens, S. y McKeever, A. (2023). Cómo nos afecta el humo de los incendios forestales y qué podemos hacer. Recuperado de: <https://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/incendios-forestales-como-nos-afecta-el-humo>
- González Valladolid, E. (2003). Modelación de transporte y dispersión de partículas PM2.5 y PM10 utilizando un modelo euleriano a nivel mesoescala en la región de la zona metropolitana de la ciudad de México [Universidad Autónoma Metropolitana]. <http://zaloamati.azc.uam.mx/handle/11191/1186>
- INEGI. (2017). Carta Urbana de Tuxtla Gutiérrez. Recuperado de: <https://www.inegi.org.mx/app/mapas/>
- Jiménez Cisneros, B. E. (2001). La contaminación ambiental en México: causas, efectos y tecnología apropiada. Colegio de Ingenieros Ambientales de México. <https://books.google.com.mx/books?hl=en&lr=&id=8MVxlyJGokIC&oi=fnd&pg=PA29&dq=Contaminación+del+aire+en+México&ots=IVyHUNLxxy&sig=KANjytUDzw6qno2fgEajmLhl7AA#v=onepage&q=Contaminación del aire en México&f=false>
- Laing, A. y Evans J. (2016). Introducción a la meteorología tropical. The COMET Program. Recuperado de: [https://www.meted.ucar.edu/tropical/textbook\\_2nd\\_edition\\_es/navmenu.php?tab=10&page=3.1.7](https://www.meted.ucar.edu/tropical/textbook_2nd_edition_es/navmenu.php?tab=10&page=3.1.7)
- Lobón, C. (2020). Disminuye incendios forestales en Chiapas. Recuperado de: <https://www.meganoticias.mx/guaymas/noticia/disminuyen-incendios-forestales-en-comparacion-con-2019-en-chiapas/180654>
- Mendoza Campos, A. (2012). Estudio de la calidad del aire en el Centro de México de las emisiones generadas por incendios en el Parque Nacional La Malinche. (Tesis de Maestría). Universidad Nacional Autónoma de México, México. Recuperado de <https://repositorio.unam.mx/contenidos/64955>
- Moroto, J. (2016). Modelos de simulación computacional de incendios. CEPREVEN. Recuperado de: <https://www.cepreven.com/modelos-de-simulacion-computacional-de-incendios-msci-612>

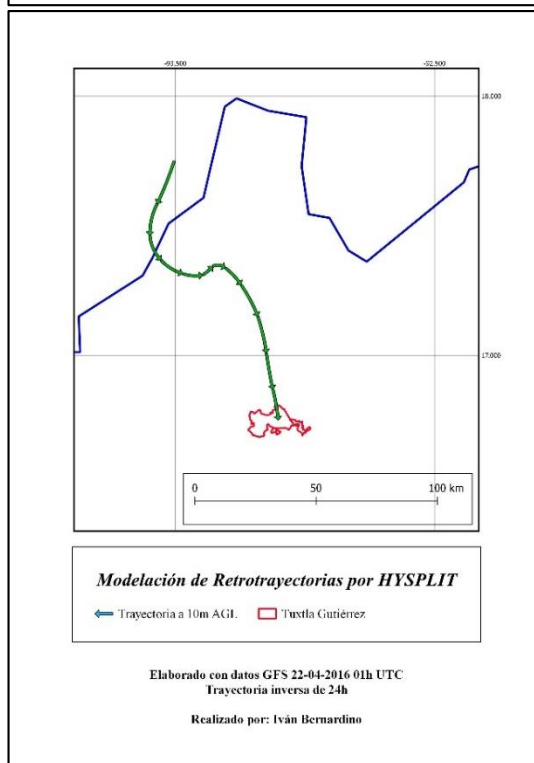
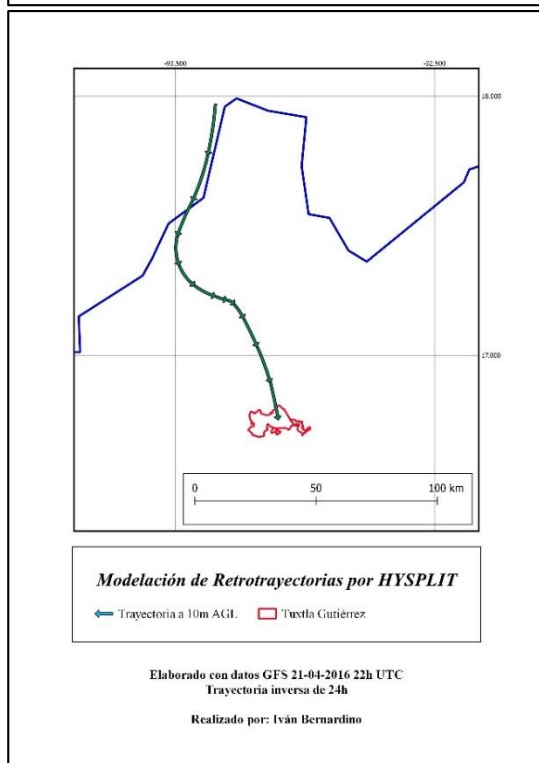
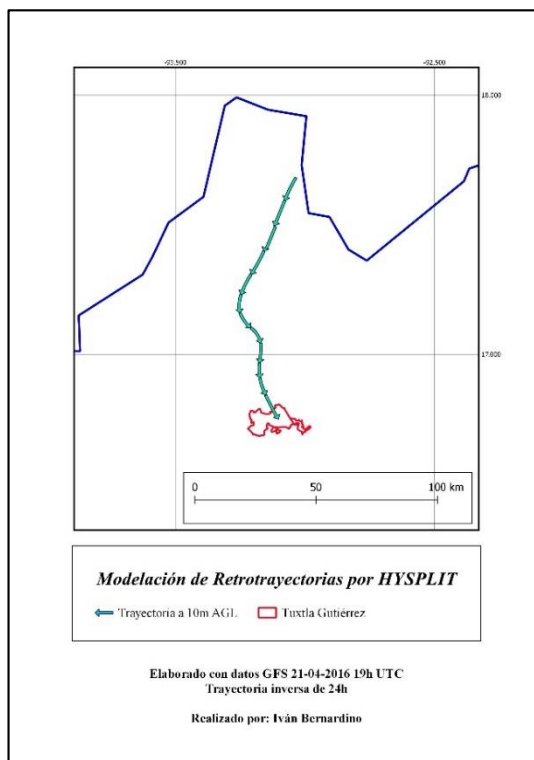
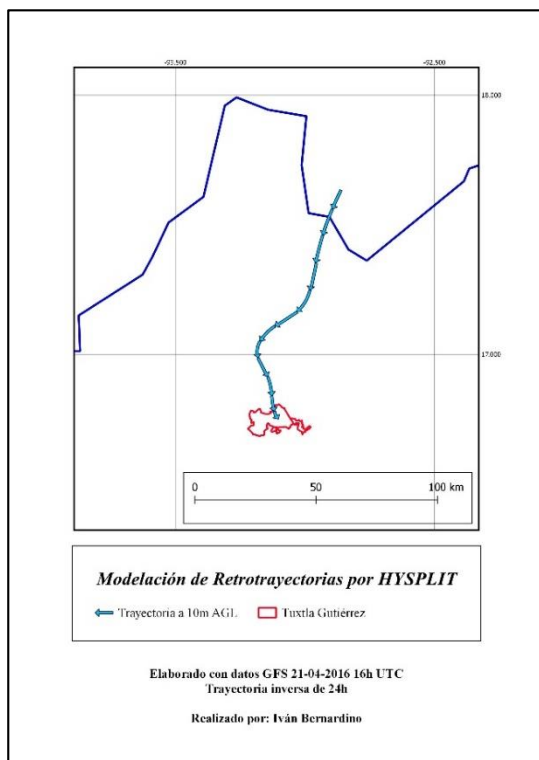
- Moya Álvarez, A. S., Arredondo, R. E., y Yuli Posadas, R. Á. (2017). Determination of the presence of particles (PM10) in Peru produced by biomass burning using numerical models. *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental*, 33(1), 99–108.  
<https://doi.org/10.20937/RICA.2017.33.01.09>
- Norma Oficial Mexicana NOM-172-SEMARNAT-2019, Lineamientos para la obtención y comunicación del Índice de Calidad del Aire y Riesgos a la Salud., (2019) (testimony of Diario Oficial de la Federación).  
[https://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5579387&fecha=20/11/2019](https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5579387&fecha=20/11/2019)
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. (2003). Los incendios devastan cada vez más los bosques de todo el mundo. FAO.  
<https://www.fao.org/spanish/newsroom/news/2003/21962-es.html>
- Organización Mundial de la Salud. (2021, September 22). Calidad del aire ambiente (exterior) y salud. [https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)
- Organización Panamericana de la Salud. (2016). Calidad del aire .  
<https://www.paho.org/es/temas/calidad-aire>
- Pértegas, S. y Pita, S (2001). La distribución normal. *Unidad de Epidemiología Clínica y Bioestadística. Complejo Hospitalario Universitario de A Coruña*, 8: 268-274. España.
- Prieto, Y. (2017). Incidencia de los incendios forestales sobre la calidad de aire en la ciudad de Bogotá. Tesis de pregrado. Universidad de los Andes.
- Protección Civil del Estado de Chiapas. (2024). Recuperado de:  
<https://www.proteccioncivil.chiapas.gob.mx/comunicado-007-23-01-24>
- Protección Civil del Estado de Veracruz, (2022). Recuperado de:  
[http://www.proteccioncivil.gob.mx/work/models/ProteccionCivil/swbcalendario\\_ElementoSeccion/722/RECOM...\\_TEMP.\\_DE\\_ESTIAJE.PDF](http://www.proteccioncivil.gob.mx/work/models/ProteccionCivil/swbcalendario_ElementoSeccion/722/RECOM..._TEMP._DE_ESTIAJE.PDF)
- Rolph, G., Stein, A. y Stunder, B., (2017). Aplicaciones ambientales en tiempo real y sistema de visualización: LISTO. *Software y modelado ambiental*, 95, 210-228,  
<https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.06.025> .

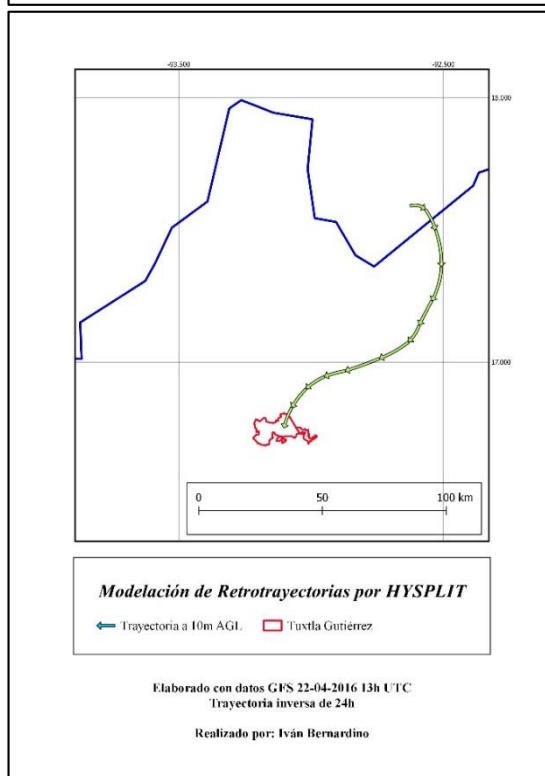
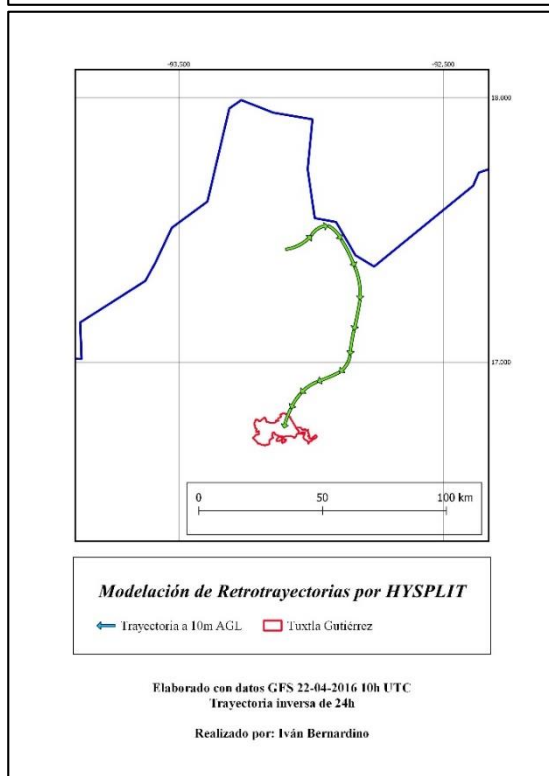
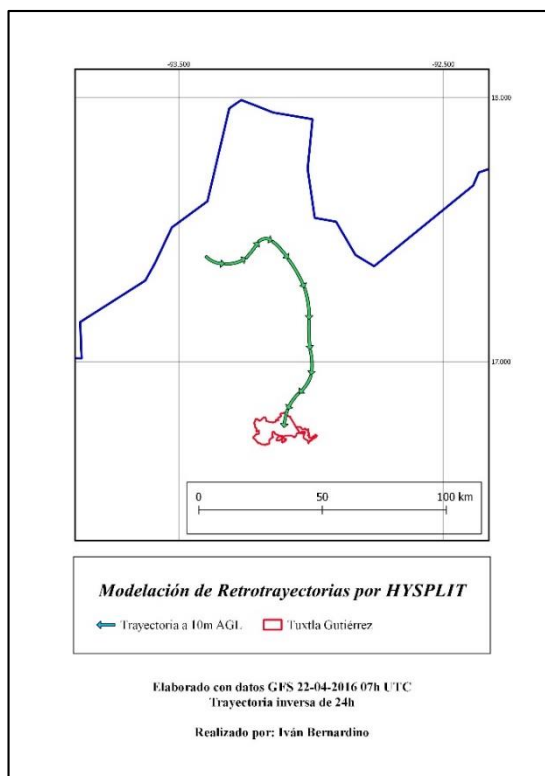
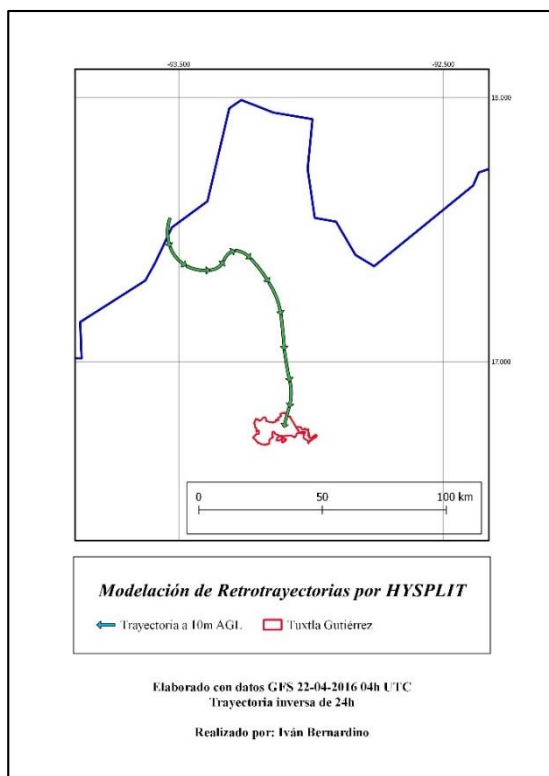
- Romero Placeres, M., Diego Olite, F., y Álvarez Toste, M. (2006). La contaminación del aire: su repercusión como problema de salud. *Revista Cubana de Higiene y Epidemiología*, 44(2) [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=s1561-30032006000200008](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=s1561-30032006000200008)
- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. (2021, April 27). El fuego ya no es una alternativa . <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/el-fuego-ya-no-es-una-alternativa>
- Secretaría de Medio Ambiente de la ciudad de México. (2023). Índice de Radiación Solar. Recuperado de : <http://www.aire.cdmx.gob.mx/default.php?opc=%27ZaBhnmI=&dc=%27aA==>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2013). Informe de la Situación del Medio Ambiente en México. Compendio de Estadísticas Ambientales. Indicadores Clave y de Desempeño Ambiental. In Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. <http://www.semarnat.gob.mx>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2019). Inventario Nacional de Emisiones de Contaminantes Criterio INEM. Recuperado de: <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/inventario-nacional-de-emisiones-de-contaminantes-criterio-inem>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2021). Tipos de fuentes de emisión de contaminantes atmosféricos. Consultla Temática. [http://dgeiawf.semarnat.gob.mx:8080/ibi\\_apps/WFServlet?IBIF\\_ex=D3\\_R\\_AIRE01\\_02&IBIC\\_user=dgeia\\_mce&IBIC\\_pass=dgeia\\_mce](http://dgeiawf.semarnat.gob.mx:8080/ibi_apps/WFServlet?IBIF_ex=D3_R_AIRE01_02&IBIC_user=dgeia_mce&IBIC_pass=dgeia_mce)
- Secretaría de Medio Ambiente de la Ciudad de México. (2024). Recuperado de: <http://www.aire.cdmx.gob.mx/default.php?opc=%27ZaBhnmI=%27>.
- Servicio Meteorológico Nacional. (2023). Sistemas meteorológicos actuales del 05 de mayo de 2023. Recuperado de: [https://smn.conagua.gob.mx/tools/DATA/Formularios/Reporte%20Meteorol%C3%B3gico%20para%20la%20Agricultura/Reporte%20Meteorol%C3%B3gico%20para%20la%20Agricultura\\_2113.pdf](https://smn.conagua.gob.mx/tools/DATA/Formularios/Reporte%20Meteorol%C3%B3gico%20para%20la%20Agricultura/Reporte%20Meteorol%C3%B3gico%20para%20la%20Agricultura_2113.pdf)

- Solman, S. (2010). La estructura de los modelos de pronóstico numérico. Laboratorio de previsión del tiempo. Universidad de Buenos Aires.
- S.N., (2015). Gestión de operaciones, Cálculo de la Raíz del Error Cuadrático Medio o RMSE (Root Mean Squared Error). Recuperado de:  
<https://www.gestiondeoperaciones.net/proyeccion-de-demanda/calculo-dela-raiz-del-error-cuadratico-medio-o-rmse-root-mean-squared-error>
- Stein, AF, Draxler, RR, Rolph, GD, Stunder, BJB, Cohen, MD y Ngan, F., (2015). Sistema de modelado de dispersión y transporte atmosférico HYSPLIT de la NOAA. Bulletin of the American Meteorological Society, 96 , 2059-2077,  
<http://dx.doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00110.1>
- Stunder, B. J. B., Heffter, J. L., y Draxler, R. R. (2007). Airborne Volcanic Ash Forecast Area Reliability. Weather and Forecasting, 22(5), 1132–1139.  
<https://doi.org/10.1175/WAF1042.1>
- Vidal-Daza, O. A., y Pérez-Vidal, A. (2018). Estimación de la Dispersión de Contaminantes Atmosféricos Emitidos por una Industria Papelera Mediante el Modelo AERMOD. Ingeniería, 23(1), 31–47. <https://doi.org/10.14483/23448393.12262>
- Willmott, C. J. (1981). On the Validation of models. Physical Geography, 2, 184 - 194.
- Zuk, M., Garibay Bravo, V., Iniestra Gómez. Rodolfo, López Villegas, M. T., Rojas-Bracho, L., y Laguna Monroy, I. (2006). Introducción a la evaluación de los impactos de las termoeléctricas de México (S. Escobar Maravillas (ed.); 1st ed.). Editorial del Deporte Mexicano.  
[https://books.google.com.mx/books?id=fuaSuMsIGGIC&pg=PA4&lpg=PA4&dq=ISBN:+968-817-804-7.&source=bl&ots=A1K9rCI\\_I6&sig=ACfU3U3e6NKh3NDdZxB1Ud2iAR1CiHDv9A&hl=en&sa=X&ved=2ahUKEwiskufgprz2AhUIKEQIHerLBpgQ6AF6BAGJEAM#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.mx/books?id=fuaSuMsIGGIC&pg=PA4&lpg=PA4&dq=ISBN:+968-817-804-7.&source=bl&ots=A1K9rCI_I6&sig=ACfU3U3e6NKh3NDdZxB1Ud2iAR1CiHDv9A&hl=en&sa=X&ved=2ahUKEwiskufgprz2AhUIKEQIHerLBpgQ6AF6BAGJEAM#v=onepage&q&f=false)

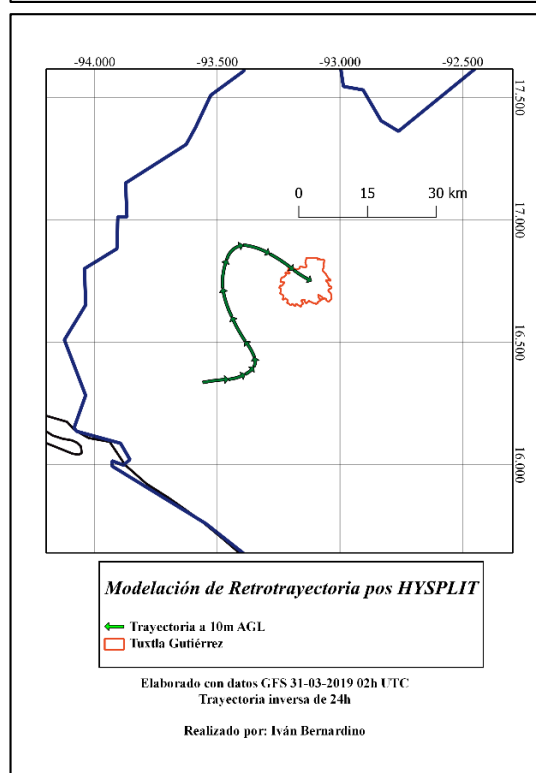
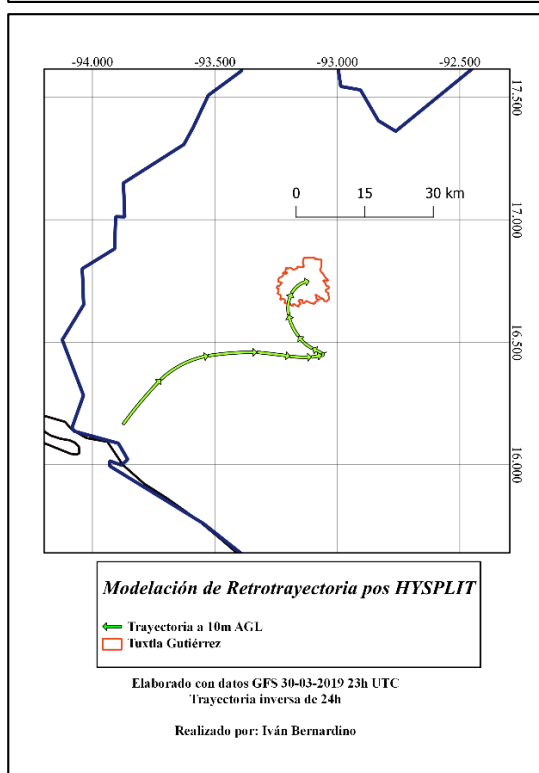
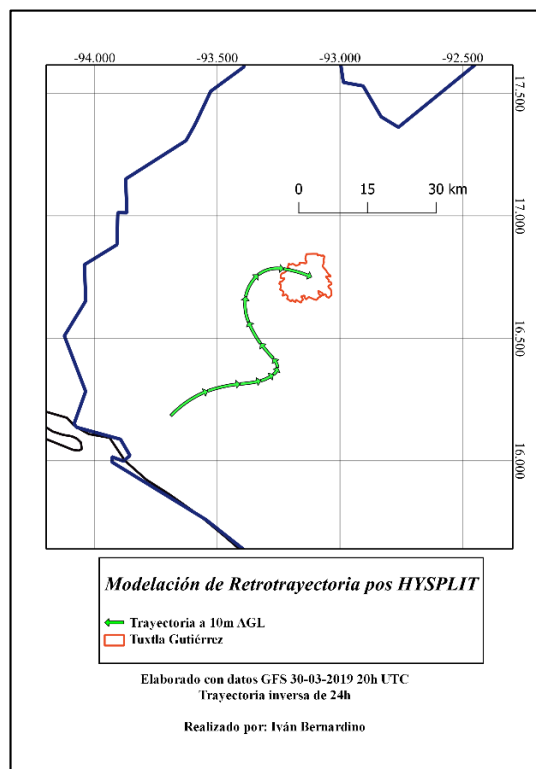
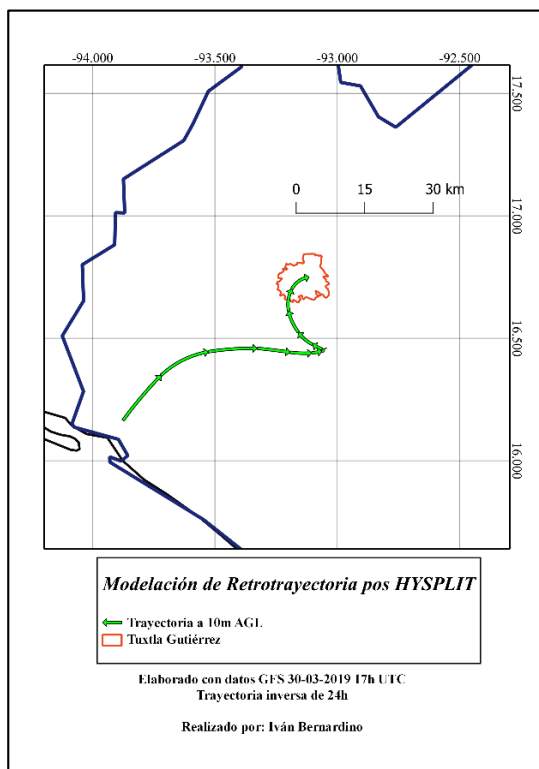
## 14. ANEXOS

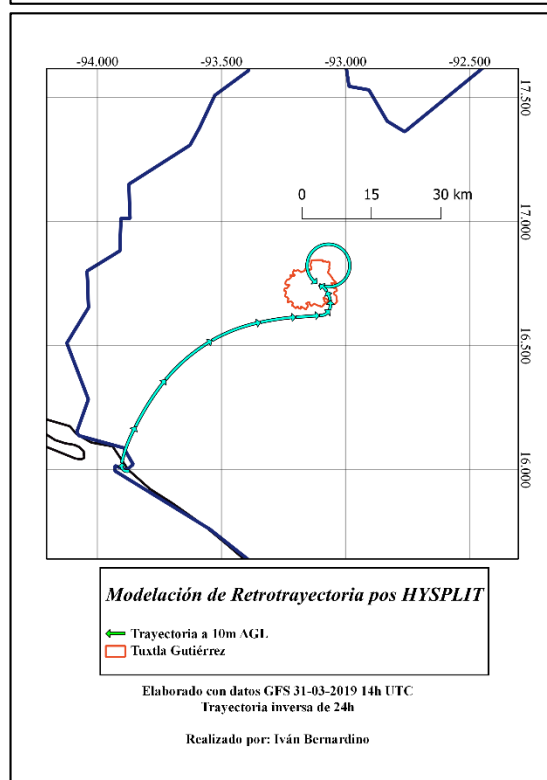
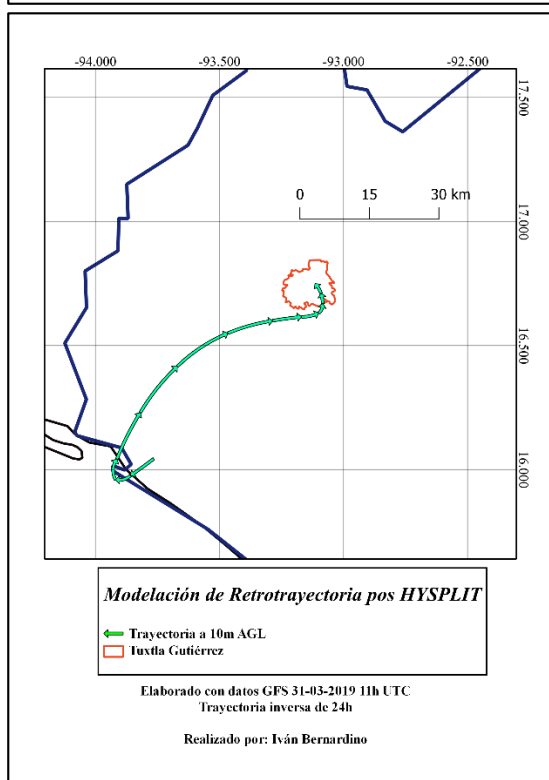
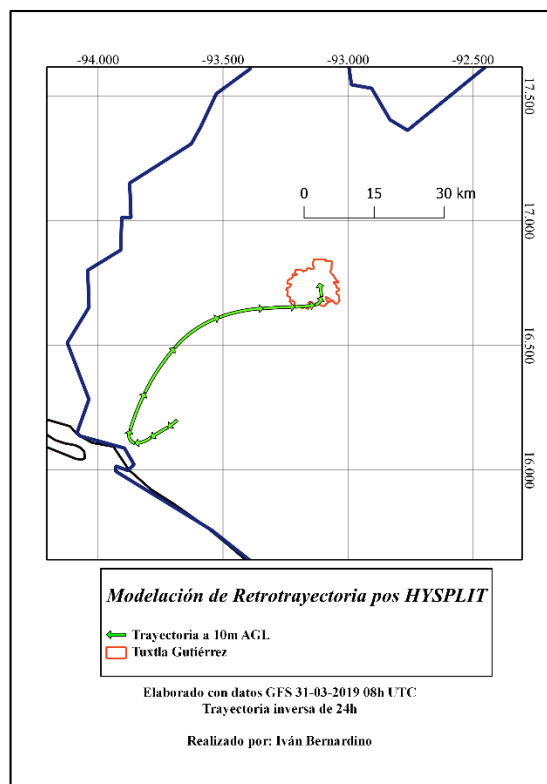
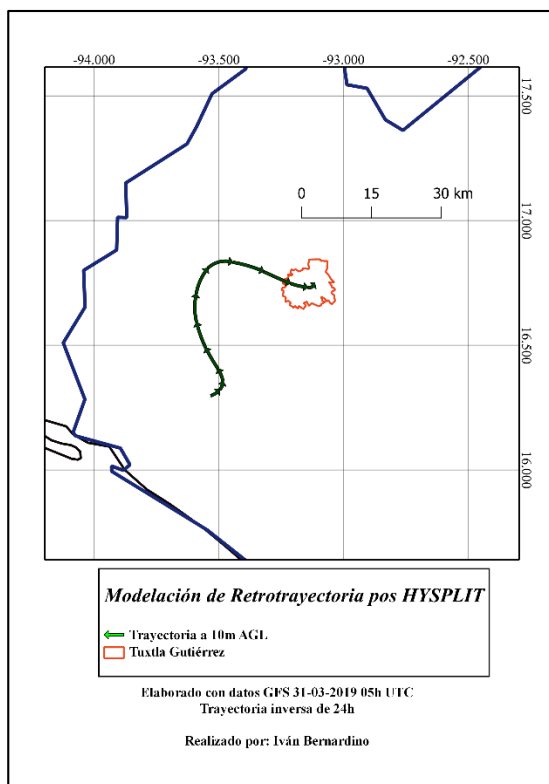
### 14.1. Imágenes del Escenario 1



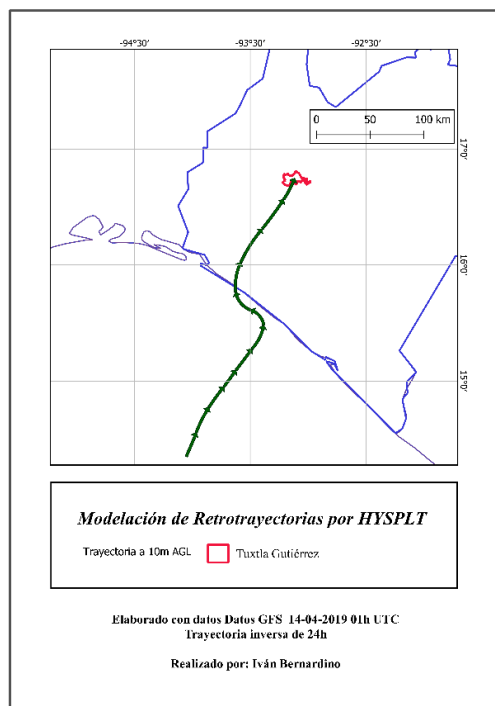
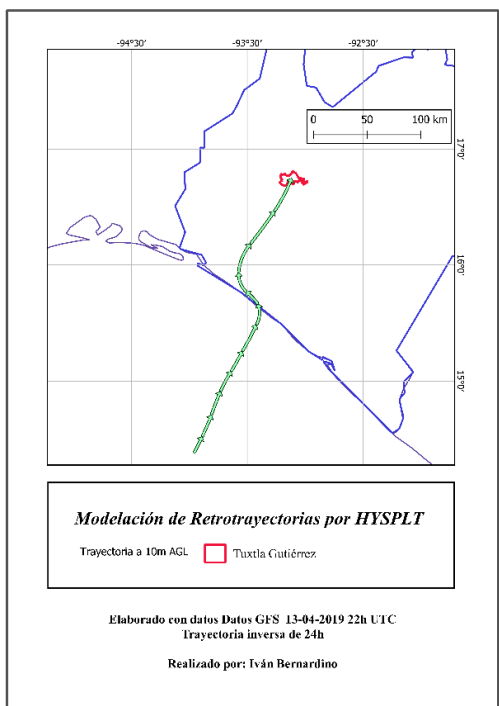
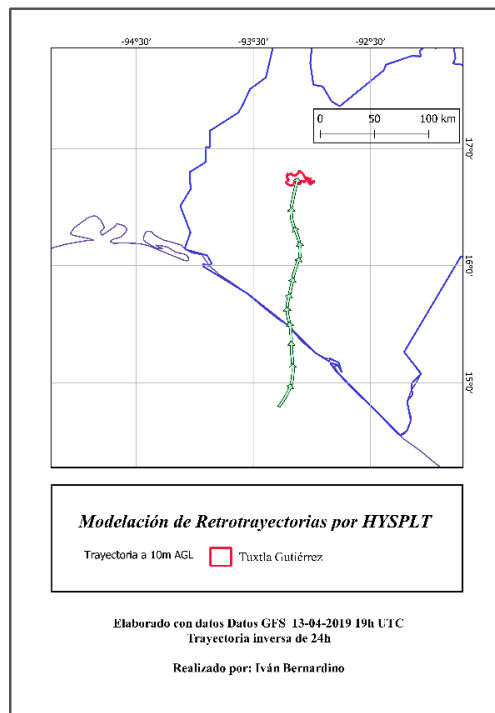
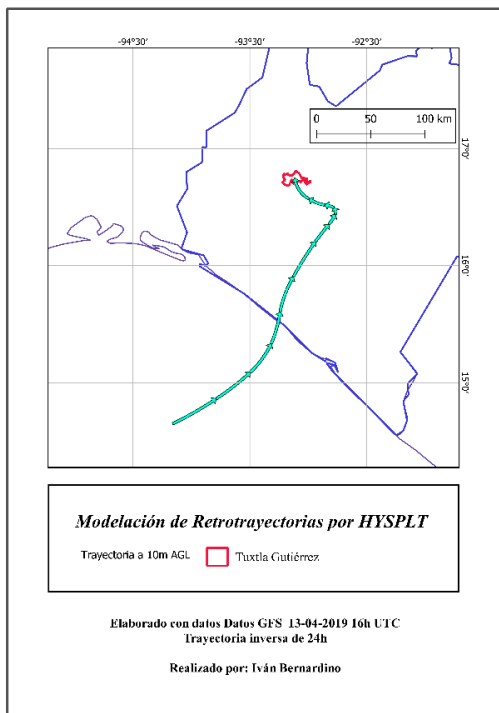


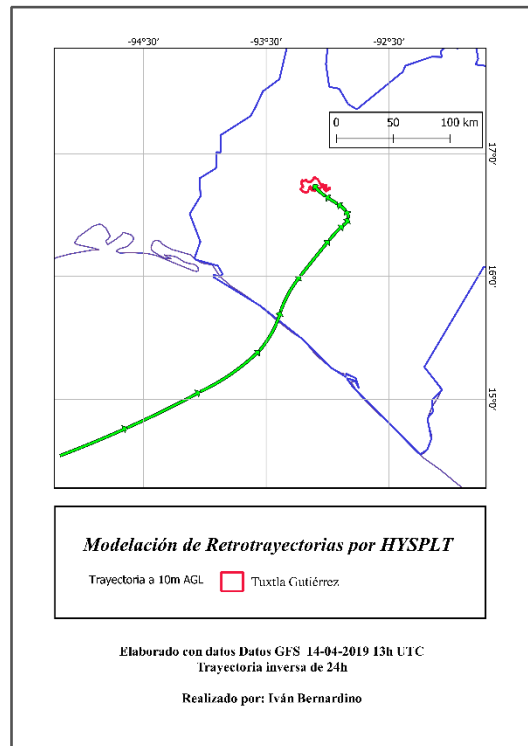
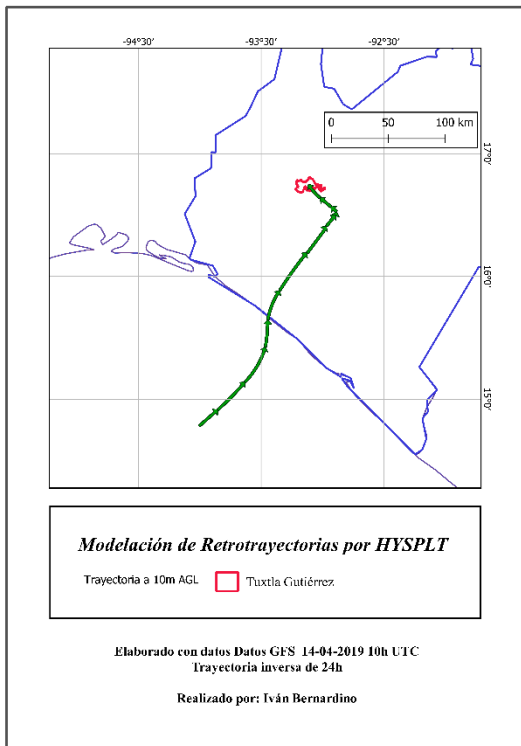
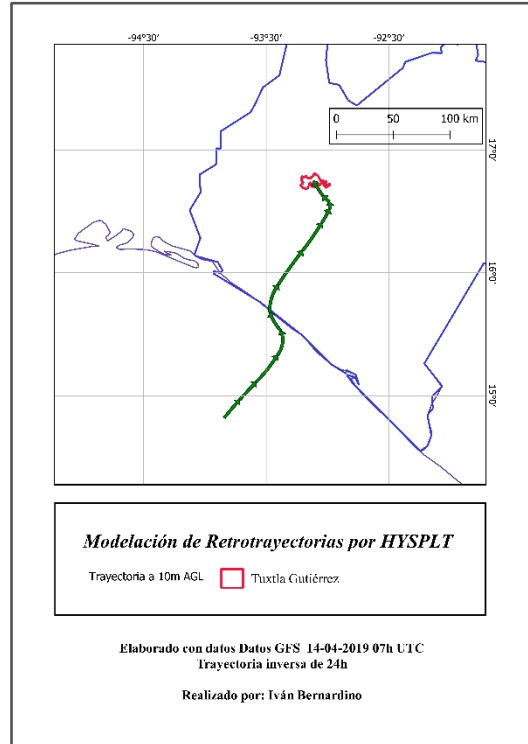
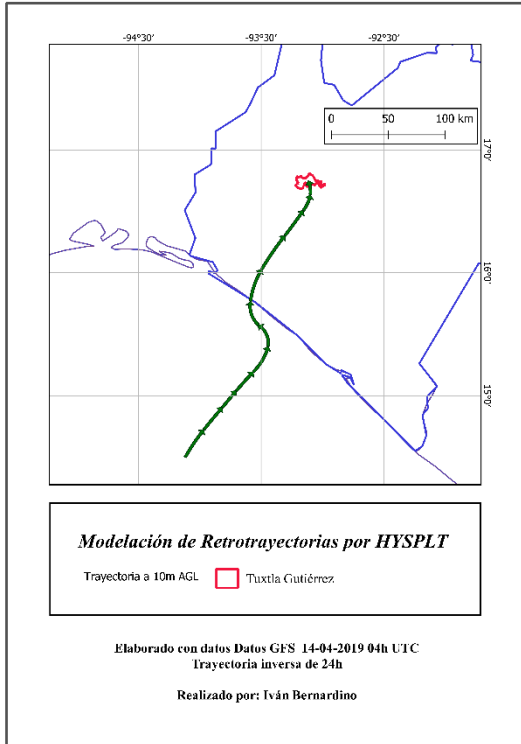
## 14.2. Imágenes del Escenario 2



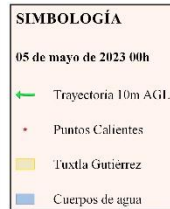
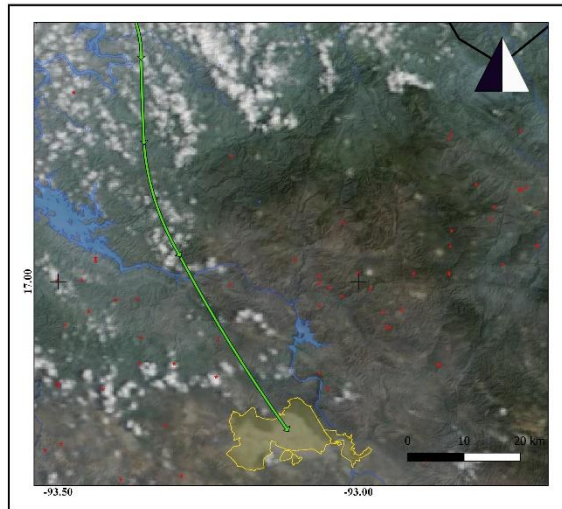


### 14.3. Imágenes del Escenario 3

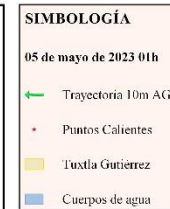
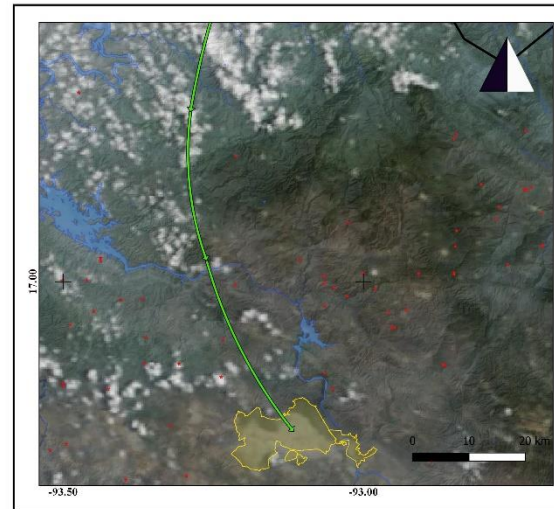




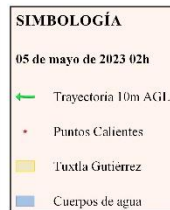
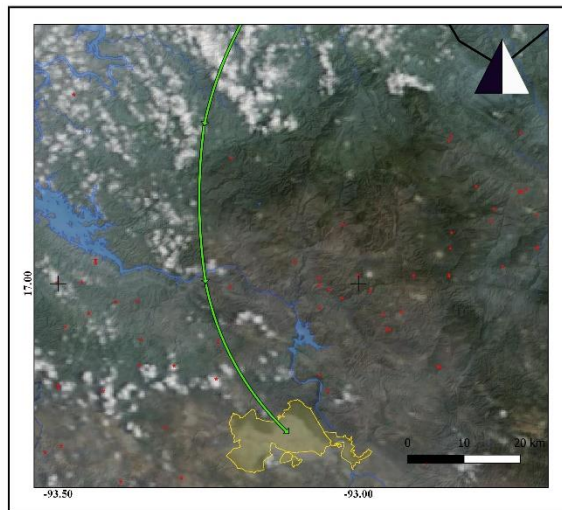
## 14.4. Imágenes del Escenario 4



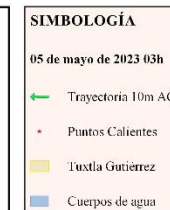
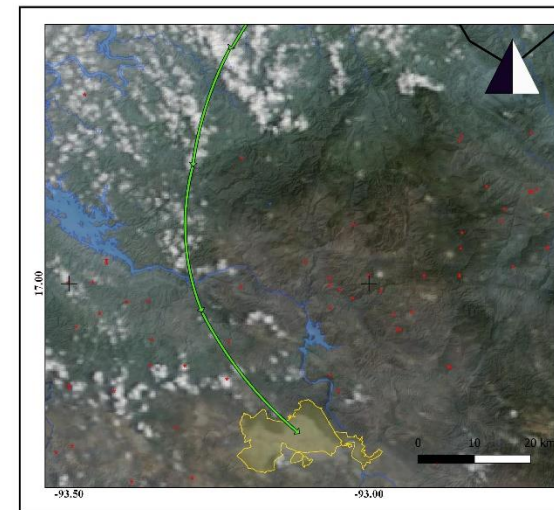
UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS  
Sistema de coordenadas: UTM zona 15N  
Datum: WGS 84  
Elaborado por: Iván Bernardino



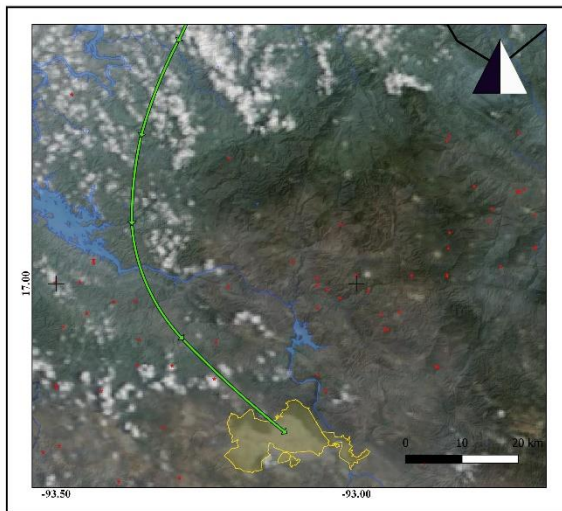
UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS  
Sistema de coordenadas: UTM zona 15N  
Datum: WGS 84  
Elaborado por: Iván Bernardino



UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS  
Sistema de coordenadas: UTM zona 15N  
Datum: WGS 84  
Elaborado por: Iván Bernardino



UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS  
Sistema de coordenadas: UTM zona 15N  
Datum: WGS 84  
Elaborado por: Iván Bernardino



**SIMBOLOGÍA**

05 de mayo de 2023 04h

- Trayectoria 10m AGL.
- Puntos Calientes
- Tuxtla Gutiérrez
- Cuerpos de agua

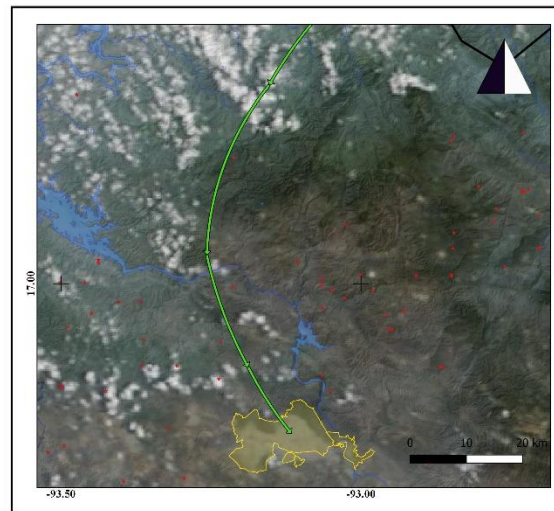


UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS

Sistema de coordenadas: UTM zona 15N

Datum: WGS 84

Elaborado por: Iván Bernardino



**SIMBOLOGÍA**

05 de mayo de 2023 05h

- Trayectoria 10m AGL.
- Puntos Calientes
- Tuxtla Gutiérrez
- Cuerpos de agua

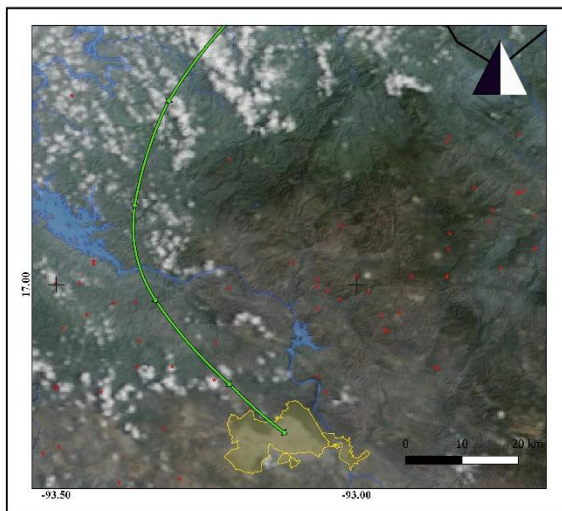


UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS

Sistema de coordenadas: UTM zona 15N

Datum: WGS 84

Elaborado por: Iván Bernardino



**SIMBOLOGÍA**

05 de mayo de 2023 06h

- Trayectoria 10m AGL.
- Puntos Calientes
- Tuxtla Gutiérrez
- Cuerpos de agua

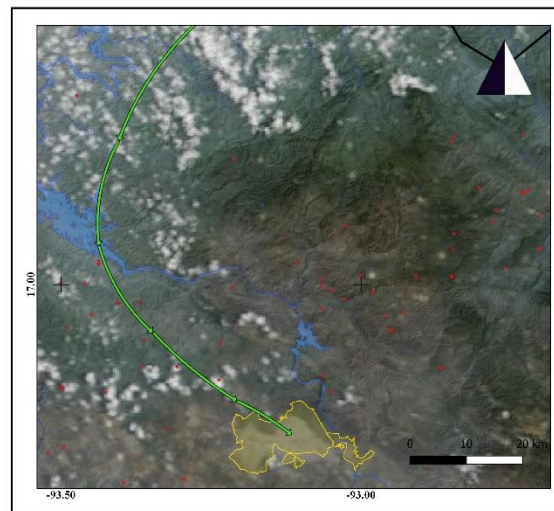


UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS

Sistema de coordenadas: UTM zona 15N

Datum: WGS 84

Elaborado por: Iván Bernardino



**SIMBOLOGÍA**

05 de mayo de 2023 07h

- Trayectoria 10m AGL.
- Puntos Calientes
- Tuxtla Gutiérrez
- Cuerpos de agua

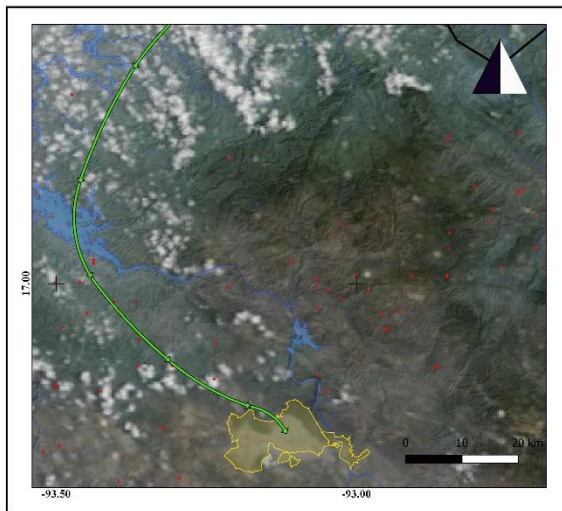


UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS

Sistema de coordenadas: UTM zona 15N

Datum: WGS 84

Elaborado por: Iván Bernardino



**SIMBOLOGÍA**

05 de mayo de 2023 08h

- Trayectoria 10m AGL
- Puntos Calientes
- Tuxtla Gutiérrez
- Cuerpos de agua

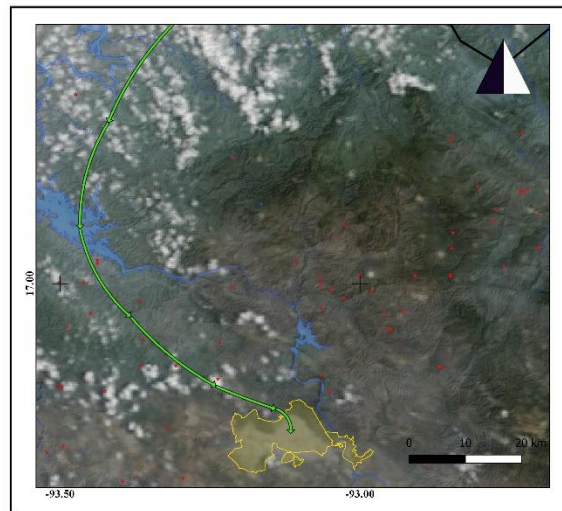


UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS

Sistema de coordenadas: UTM zona 15N

Datum: WGS 84

Elaborado por: Iván Bernardino



**SIMBOLOGÍA**

05 de mayo de 2023 09h

- Trayectoria 10m AGL
- Puntos Calientes
- Tuxtla Gutiérrez
- Cuerpos de agua

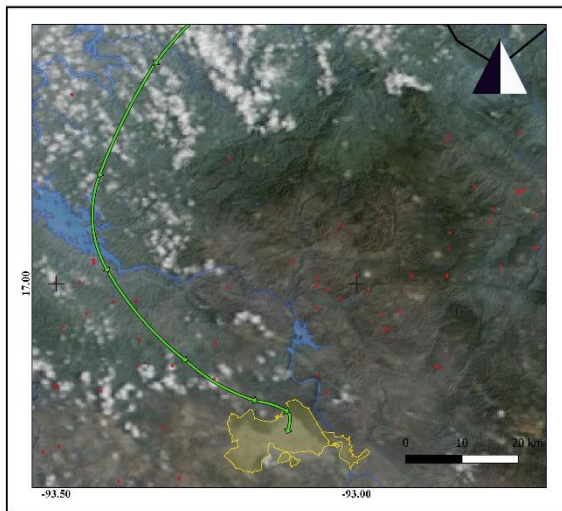


UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS

Sistema de coordenadas: UTM zona 15N

Datum: WGS 84

Elaborado por: Iván Bernardino



**SIMBOLOGÍA**

05 de mayo de 2023 10h

- Trayectoria 10m AGL
- Puntos Calientes
- Tuxtla Gutiérrez
- Cuerpos de agua

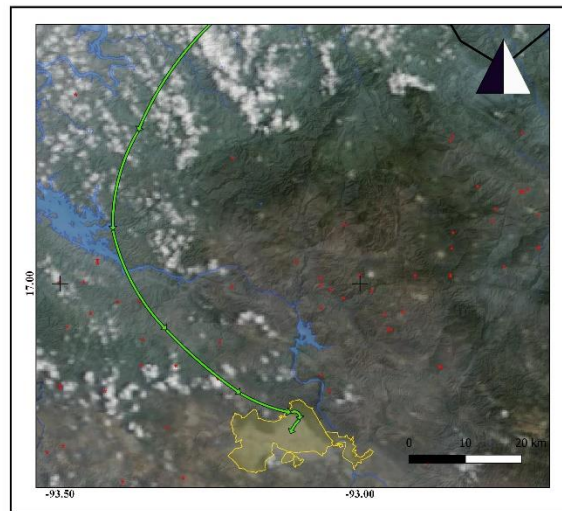


UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS

Sistema de coordenadas: UTM zona 15N

Datum: WGS 84

Elaborado por: Iván Bernardino



**SIMBOLOGÍA**

05 de mayo de 2023 11h

- Trayectoria 10m AGL
- Puntos Calientes
- Tuxtla Gutiérrez
- Cuerpos de agua

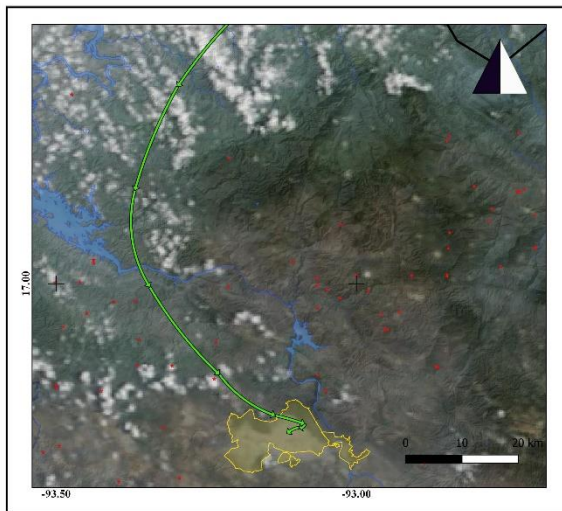


UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS

Sistema de coordenadas: UTM zona 15N

Datum: WGS 84

Elaborado por: Iván Bernardino



**SIMBOLOGÍA**

05 de mayo de 2023 12h

- Trayectoria 10m AGL
- Puntos Calientes
- Tuxtla Gutiérrez
- Cuerpos de agua

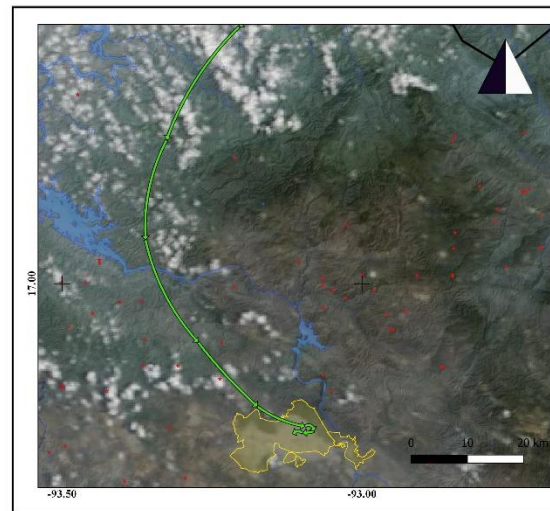


UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS

Sistema de coordenadas: UTM zona 15N

Datum: WGS 84

Elaborado por: Iván Bernardino



**SIMBOLOGÍA**

05 de mayo de 2023 13h

- Trayectoria 10m AGL
- Puntos Calientes
- Tuxtla Gutiérrez
- Cuerpos de agua

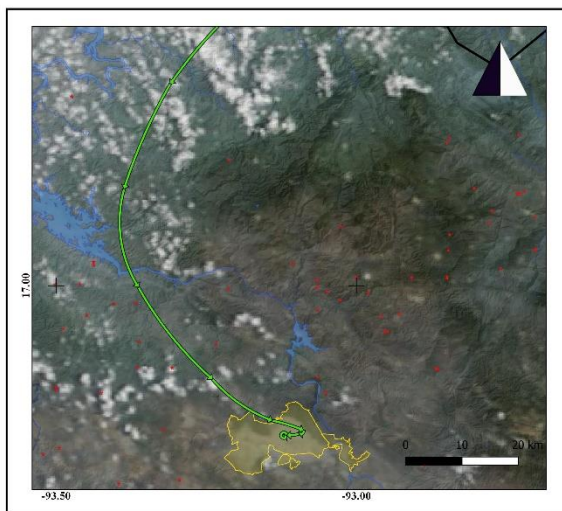


UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS

Sistema de coordenadas: UTM zona 15N

Datum: WGS 84

Elaborado por: Iván Bernardino



**SIMBOLOGÍA**

05 de mayo de 2023 14h

- Trayectoria 10m AGL
- Puntos Calientes
- Tuxtla Gutiérrez
- Cuerpos de agua

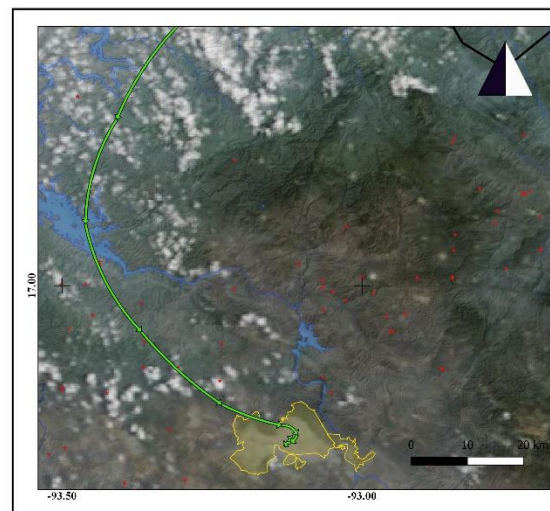


UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS

Sistema de coordenadas: UTM zona 15N

Datum: WGS 84

Elaborado por: Iván Bernardino



**SIMBOLOGÍA**

05 de mayo de 2023 15h

- Trayectoria 10m AGL
- Puntos Calientes
- Tuxtla Gutiérrez
- Cuerpos de agua

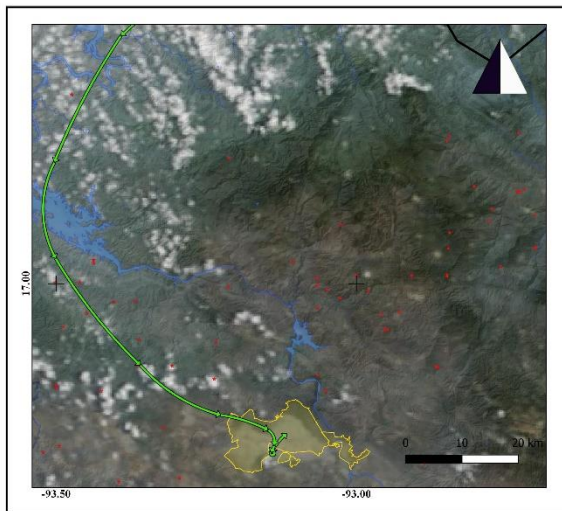


UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS

Sistema de coordenadas: UTM zona 15N

Datum: WGS 84

Elaborado por: Iván Bernardino



**SIMBOLOGÍA**

05 de mayo de 2023 16h

- Trayectoria 10m AGL
- Puntos Calientes
- Tuxtla Gutiérrez
- Cuerpos de agua

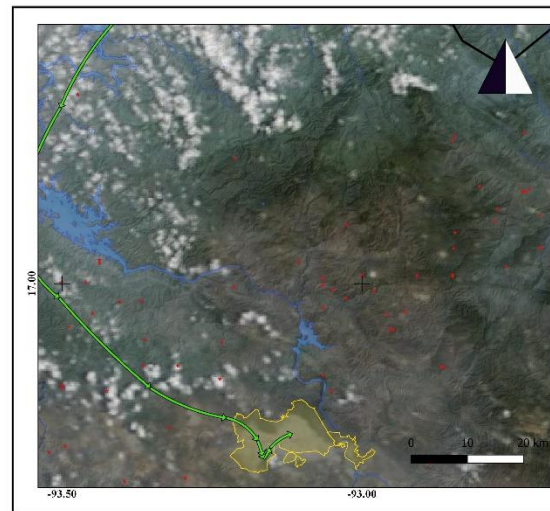


UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS

Sistema de coordenadas: UTM zona 15N

Datum: WGS 84

Elaborado por: Iván Bernardino



**SIMBOLOGÍA**

05 de mayo de 2023 17h

- Trayectoria 10m AGL
- Puntos Calientes
- Tuxtla Gutiérrez
- Cuerpos de agua

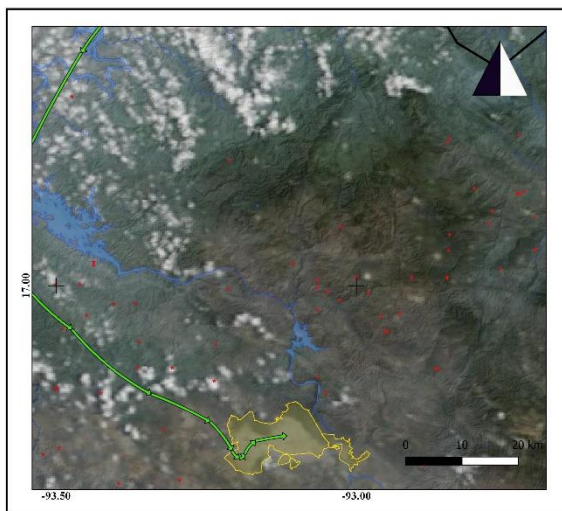


UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS

Sistema de coordenadas: UTM zona 15N

Datum: WGS 84

Elaborado por: Iván Bernardino



**SIMBOLOGÍA**

05 de mayo de 2023 18h

- Trayectoria 10m AGL
- Puntos Calientes
- Tuxtla Gutiérrez
- Cuerpos de agua

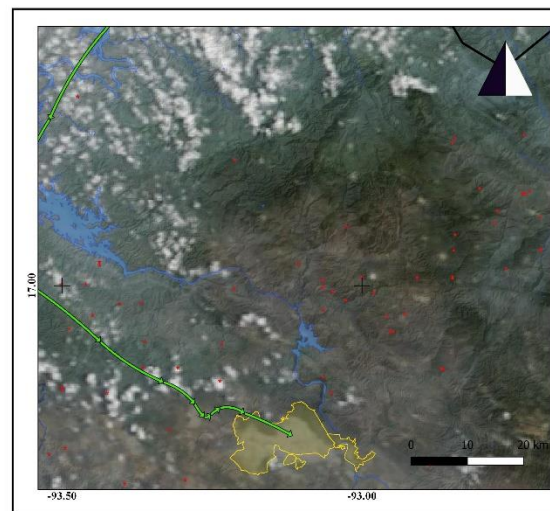


UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS

Sistema de coordenadas: UTM zona 15N

Datum: WGS 84

Elaborado por: Iván Bernardino



**SIMBOLOGÍA**

05 de mayo de 2023 19h

- Trayectoria 10m AGL
- Puntos Calientes
- Tuxtla Gutiérrez
- Cuerpos de agua

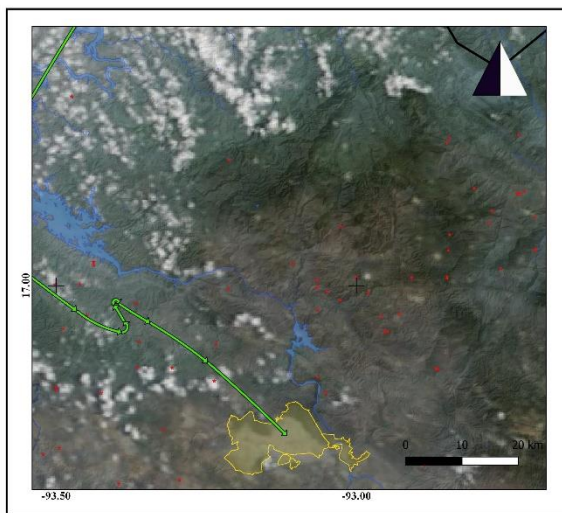


UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS

Sistema de coordenadas: UTM zona 15N

Datum: WGS 84

Elaborado por: Iván Bernardino



**SIMBOLOGÍA**

05 de mayo de 2023 20h

- Trayectoria 10m AGL
- Puntos Calientes
- Tuxtla Gutiérrez
- Cuerpos de agua

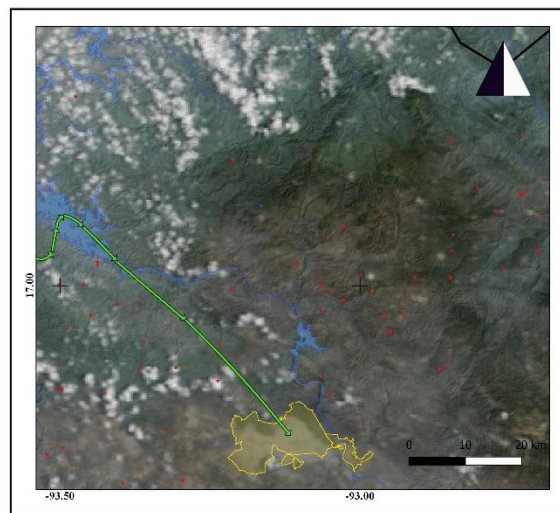


UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS

Sistema de coordenadas: UTM zona 15N

Datum: WGS 84

Elaborado por: Iván Bernardino



**SIMBOLOGÍA**

05 de mayo de 2023 21h

- Trayectoria 10m AGL
- Puntos Calientes
- Tuxtla Gutiérrez
- Cuerpos de agua

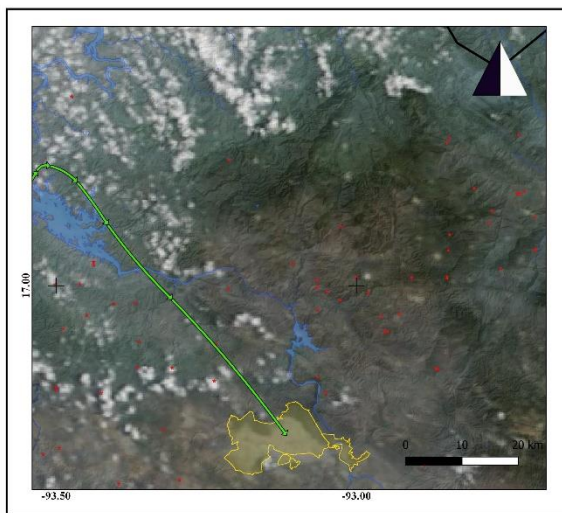


UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS

Sistema de coordenadas: UTM zona 15N

Datum: WGS 84

Elaborado por: Iván Bernardino



**SIMBOLOGÍA**

05 de mayo de 2023 22h

- Trayectoria 10m AGL
- Puntos Calientes
- Tuxtla Gutiérrez
- Cuerpos de agua

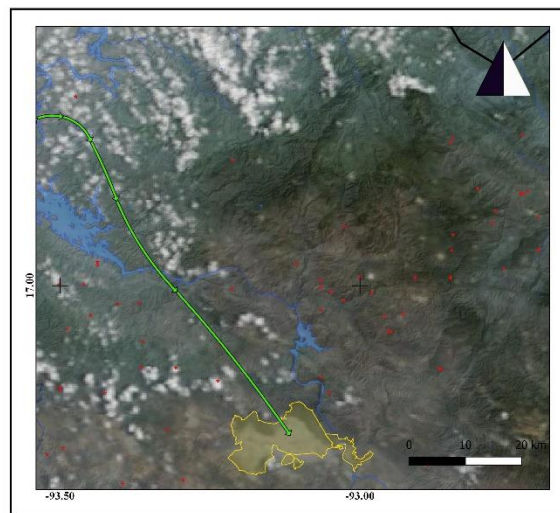


UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS

Sistema de coordenadas: UTM zona 15N

Datum: WGS 84

Elaborado por: Iván Bernardino



**SIMBOLOGÍA**

05 de mayo de 2023 23h

- Trayectoria 10m AGL
- Puntos Calientes
- Tuxtla Gutiérrez
- Cuerpos de agua



UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS

Sistema de coordenadas: UTM zona 15N

Datum: WGS 84

Elaborado por: Iván Bernardino

