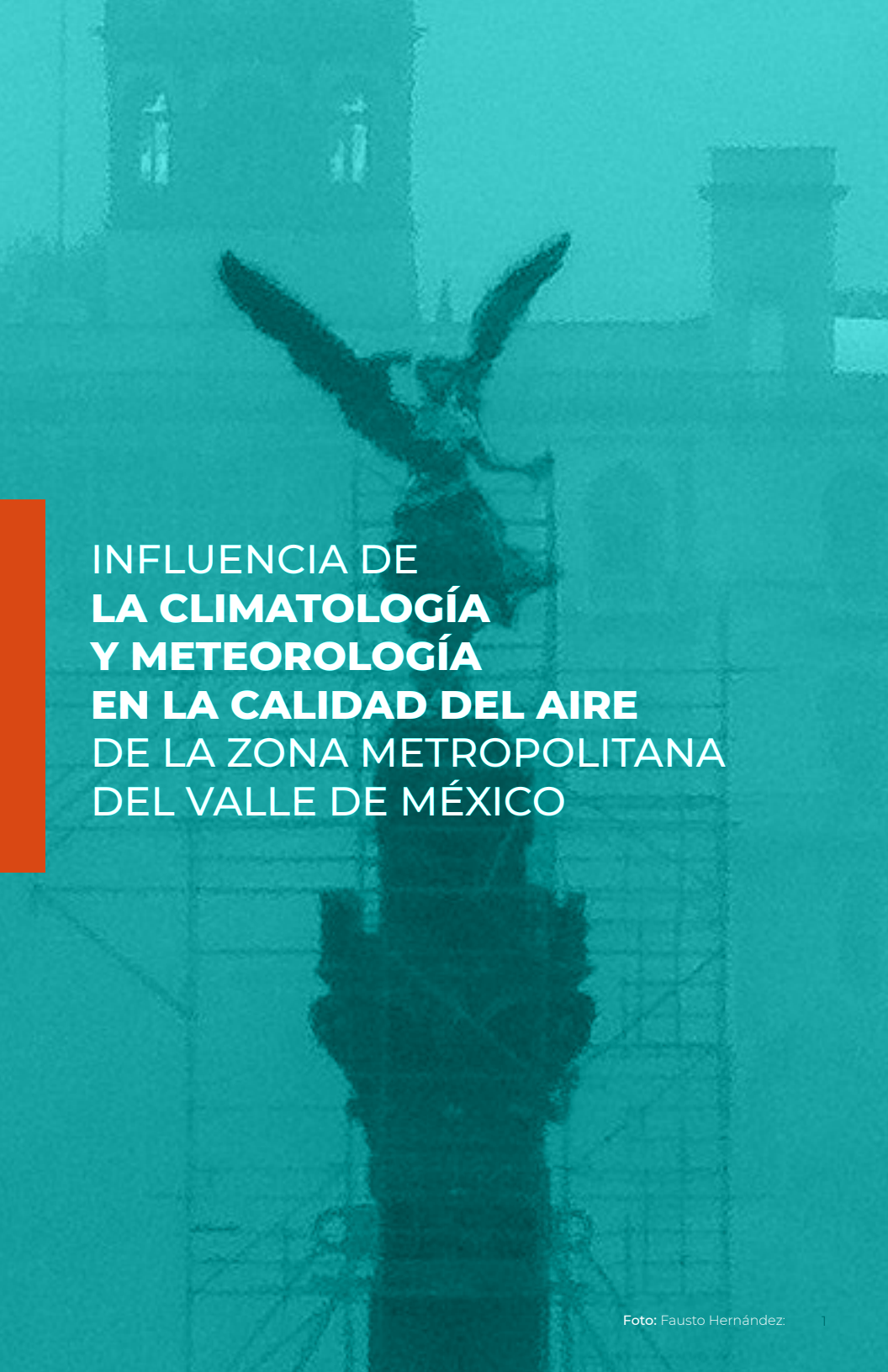




INFLUENCIA DE LA CLIMATOLOGÍA Y METEOROLOGÍA EN LA CALIDAD DEL AIRE DE LA ZONA METROPOLITANA DEL VALLE DE MÉXICO

INTRODUCCIÓN

El crecimiento de las ciudades ejerce una enorme presión sobre los recursos naturales, promoviendo el cambio de la cobertura y uso de suelo y por ende la pérdida de vegetación y zonas lacustres. Estas modificaciones provocan, a su vez, cambios en la meteorología local y en la calidad del aire.

Las alteraciones en la meteorología local, como la dirección y rapidez del viento, la altura de la capa límite, la humedad relativa, la radiación ultravioleta y la temperatura del aire y suelo, influyen en la formación y dispersión de los contaminantes.

Abordar el desafío de la contaminación atmosférica en las ciudades, requiere reconocer la complejidad del problema con un enfoque integral que considere todos los factores que influyen, desde las emisiones, la química atmosférica, el impacto de la cobertura del suelo, la meteorología, la climatología y las posibles soluciones al respecto.

Estas actividades tienen el propósito de que a través de medidas coordinadas y decisiones informadas se podrá lograr una mejor mitigación de los efectos de la contaminación en las ciudades.

Desde el **Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático (ICAYCC) de la UNAM**, en colaboración con la **Secretaría de Educación, Ciencia, Tecnología e Innovación (SECTEI) de la Ciudad de México** y la **Secretaría de Medio Ambiente (SEDEMA) de la Ciudad de México**, se realizan esfuerzos para comprender y buscar medidas que ayuden a disminuir la contaminación atmosférica de la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), enfocándose al estudio de la contaminación por ozono (O_3).

Entre los aspectos que se investigaron alrededor de la problemática de contaminación por ozono se encuentran las variaciones de temperatura del aire y del suelo asociados al crecimiento urbano y al cambio climático. También se investigó la concentración de ozono y su relación con el aumento de temperatura, así como el impacto de implementar medidas para su mitigación.



SECTEI

SEDEMA



Foto: David Gracia de Pexels

ÍNDICE

- 01** PROCESOS FÍSICOS QUE DETERMINAN LA TEMPERATURA DE LA SUPERFICIE Y DE LA ATMÓSFERA. 05
- 02** ALBEDO Y COBERTURA DE LA SUPERFICIE TERRESTRE: SU IMPACTO EN LAS CONDICIONES METEOROLÓGICAS Y EN LA TEMPERATURA DEL AIRE Y DEL SUELO. 07
- 03** INTERCAMBIO DE MASAS DE AIRE ENTRE LA CIUDAD DE MÉXICO Y ÁREAS ADYACENTES. 12
- 04** INCENDIOS FORESTALES EN EL VALLE DE MÉXICO: PRONÓSTICO DE TRAYECTORIA DE HUMO. 15
- 05** CRÉDITOS. 17



PROCESOS FÍSICOS QUE DETERMINAN LA TEMPERATURA DE LA SUPERFICIE Y DE LA ATMÓSFERA

Los flujos de calor entre el suelo y la atmósfera son transferencias de energía que modifican las condiciones meteorológicas de una zona.

En las grandes ciudades la temperatura superficial y del aire han aumentado debido al cambio de la cobertura vegetal y uso de suelo, asociados principalmente con el aumento de la cobertura urbana y debido al cambio climático global. Estos cambios han modificado la interacción entre el suelo y la atmósfera.

Cuando la radiación solar emitida por el sol llega a la su-

perficie terrestre, parte de ella es absorbida y convertida en energía térmica, la cual provoca un aumento en la temperatura superficial que a su vez emite radiación de onda larga hacia la atmósfera. Parte de la energía incidente de onda corta no es absorbida sino reflejada, dependiendo del tipo de cobertura de la superficie, a la fracción de energía reflejada se le conoce como **albedo**.



Foto: Mikhail Nilov de Pexels

Diferencia entre calor y temperatura.

El **calor**, es la energía térmica que se transfiere de un sistema a otro por una diferencia de temperatura entre ambos. En física la **temperatura** se define a partir de la Ley Cero de la Termodinámica, que permite la comparación de temperatura en diferentes sistemas. Se define como magnitud escalar relacionada con la energía interna de un sistema termodinámico. Cuando dos sistemas no intercambian energía térmica con un tercer sistema, están a la misma temperatura y, por lo tanto, en equilibrio térmico.

Superficies con un albedo bajo absorben más radiación solar; dicha energía se convierte en calor, aumentando la temperatura del suelo. El aumento de la temperatura de la superficie depende del calor específico del material del cual está hecho, y de la conductividad del calor hacia abajo.

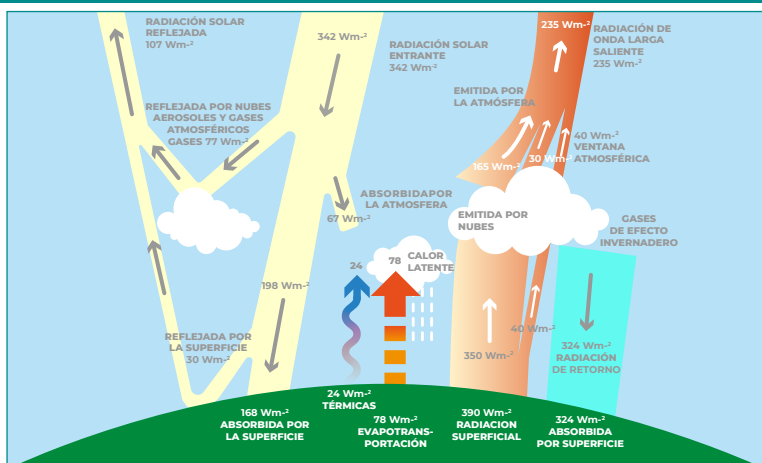
Por otra parte, el enfriamiento ocurre por emisión de radiación de onda larga, por el contacto en la interfaz suelo-atmósfera, llamado calor sensible, y por el calor latente asociado a la evaporación y la evapotranspiración.

El flujo de calor latente se asocia

a la transferencia de humedad de la superficie o de las plantas hacia la atmósfera, es la energía consumida cuando el agua cambia de fase líquida a fase vapor, en este caso la temperatura local de la atmósfera no aumenta, ya que la condensación que ocurre cuando el vapor se enfría y pasa a estado líquido ocurre en otro sitio.

En cuanto al flujo de calor sensible, se asocia a la energía que fluye desde la superficie a la atmósfera sin que haya un cambio de fase del agua, este último tiene un impacto significativo en los flujos de energía en coberturas urbanas.

DIFERENCIA ENTRE FLUJO DE CALOR SENSIBLE Y FLUJO DE CALOR LATENTE.



Se muestra el balance energético entre la entrada de radiación solar y la que es reflejada, absorbida y emitida. Elaborado a partir de la propuesta del IPCC (2001) sobre el equilibrio y los problemas energéticos globales en Ohmura Atsumu (2012). Present status and variations in the Arctic energy balance. Polar Science (6). 5-13.

En los suelos con cobertura vegetal o cubiertos por agua, la evaporación remueve una gran cantidad de calor, limitando el aumento de la temperatura de la superficie. Cuando no hay humedad en el suelo, su temperatura se eleva más y sólo pierde calor por radiación de onda larga y calor sen-

sible, resultando en una mayor elevación de la temperatura del suelo. Por consiguiente, la relación entre el flujo de calor a través del suelo y la temperatura del aire puede ser compleja y depende de varios factores, como la cobertura del suelo, la humedad en la superficie y la radiación solar.

ALBEDO Y COBERTURA DE LA SUPERFICIE TERRESTRE:

SU IMPACTO EN LAS CONDICIONES METEOROLÓGICAS, EN LA TEMPERATURA DEL AIRE Y DEL SUELO

La cobertura de la superficie terrestre influye en características clave como el albedo y la temperatura del aire y del suelo. Se analiza el impacto en los vientos, el vapor de agua y la atmósfera.

Los tipos de cubierta terrestre son un factor determinante en la meteorología de un lugar debido a sus diversas propiedades bio-geofísicas. Tales propiedades influyen en los siguientes aspectos:

- **Albedo:** se refiere al porcentaje de radiación que una superficie puede reflejar respecto a la que incide sobre ella. Puede medirse numéricamente en una escala de 0 a 1 o porcentualmente. Las superficies con albedo alto reflejan un mayor porcentaje de la radiación solar y absorben menos energía; por el contrario, superficies con albedo bajo absorben más radiación solar y se calientan más.

VALORES DE ALBEDO PARA SUPERFICIES TERRESTRES



El porcentaje de albedo indica la radiación solar incidente que es reflejada a la atmósfera. El esquema muestra la comparación de distintas superficies, es necesario considerar que un valor equivalente al 0% significa que toda la radiación incidente es absorbida por esa superficie, mientras que el 100% significa que refleja toda la radiación solar incidente y no la absorbe.

- **Variación de la temperatura.**

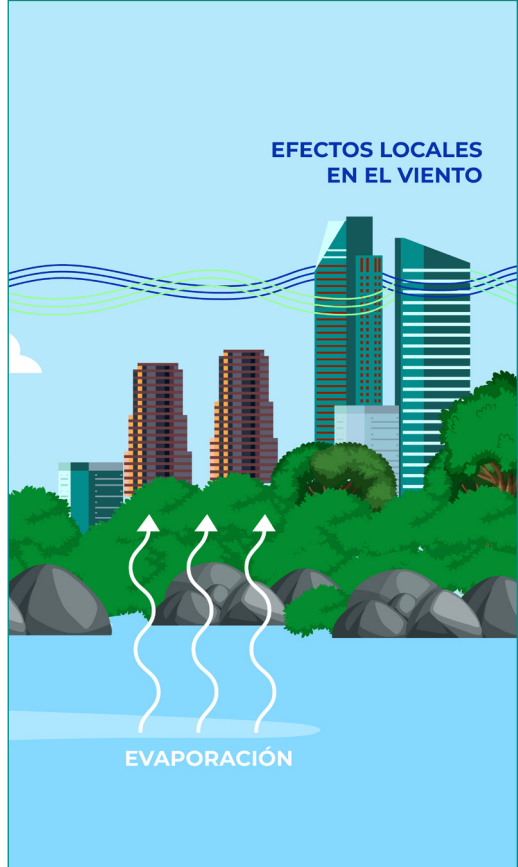
Depende del calor específico de los materiales y de la transferencia de calor en la vertical por conducción o difusión.

- **Efectos locales en el viento:**

las superficies rugosas de las ciudades obstaculizan la circulación de aire, debilitando la magnitud de los vientos y modificando su dirección.

- **Vapor de agua:**

el vapor de agua en la atmósfera, favorecido por la presencia de cuerpos de agua o por la evapotranspiración de la vegetación, tiene un impacto en las características meteorológicas y climáticas de una zona, promoviendo la formación de nubes y precipitación, así como una regulación en la temperatura.



Calor específico:

Propiedad física que describe la cantidad de calor necesaria para elevar la temperatura de una unidad de masa

Aire y viento:

Aire: es la mezcla de gases que constituyen la atmósfera, como oxígeno y nitrógeno, incluidos también los GEI, además de otros gases y partículas.

Viento: es el movimiento del aire de manera horizontal causado por diferencias de presión debidas a cambios en la temperatura y altitud

Capa límite:

Es la capa de aire inferior de la atmósfera y que está en contacto con la superficie, en ella los movimientos turbulentos son más intensos y las propiedades como temperatura, humedad relativa y composición química varían relativamente poco por lo que tiene influencia de la misma, por ejemplo, de la humedad y temperatura del suelo, influyendo en afectando los vientos, la formación de nubes y la calidad del aire. En general las nubes no se observan dentro de la capa límite sino por encima de esta.

Rugosidad:

Se refiere a las distintas texturas de la superficie terrestre, que afectan a la velocidad y dirección del viento en la capa límite. Tiene implicaciones en la meteorología y clima de una zona.

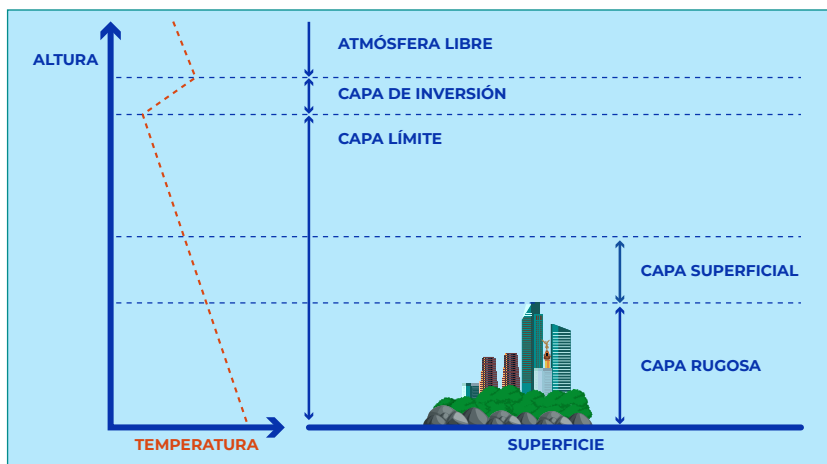
Cambios en la meteorología local contribuyen a la formación, transporte y dispersión de contaminantes en la atmósfera.

Por ejemplo, el cambio en los vientos, las superficies urbanas rugosas, la falta de vegetación y la desaparición del sistema de lagos contribuyen al aumento de temperatura del aire, y la altura de la capa límite.

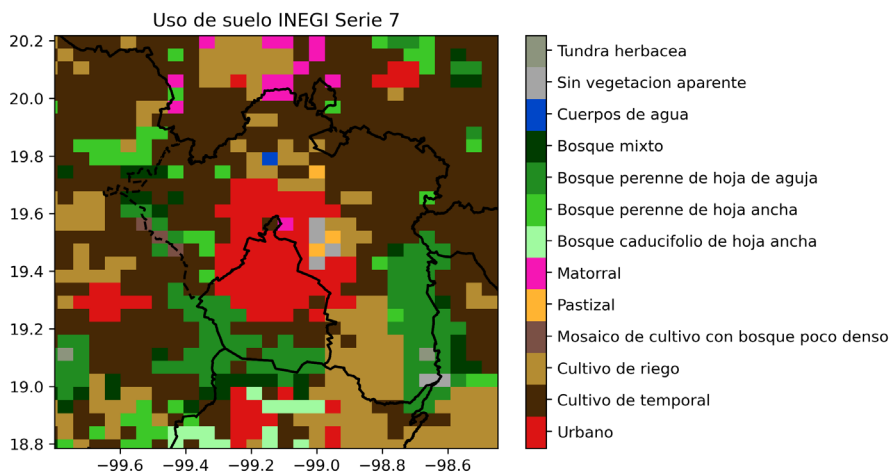


Foto: Mikhail Nilov de Pexels

La capa límite atmosférica es la capa más baja de la tropósfera y está directamente influenciada por las variables atmosféricas cerca de la superficie terrestre, es decir, que la reducción de la temperatura superficial por la implementación de techos blancos o frescos, así como el aumento de cobertura vegetal podrían generar un impacto tanto en la meteorología regional como en el clima.



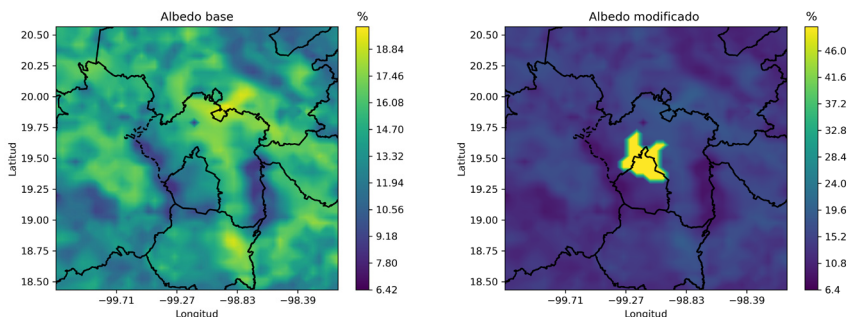
MAPAS DE CAMBIO DE USO DE SUELO



El mapa muestra los principales tipos de vegetación y el uso de suelo de la Zona Metropolitana y del Valle de México. El 40.49% del área está dedicada a actividades agrícolas, el 22,7% a asentamientos humanos y vialidades, el 21.05% a áreas con bosque, el 10.86% a pastizales, matorrales con el 2.26%, otros tipos de vegetación equivalen al 1.76% y los cuerpos de agua representan el 0.71%.

El mapa fue elaborado a partir de datos de la Serie 7 de Uso de Suelo y Vegetación del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI).

MAPAS DE ALBEDO



A la izquierda se muestra un mapa con albedo base o pre determinado y a la izquierda la comparativa con el albedo modificado aumentado a 50% en las localidades urbanas del centro de la CDMX y municipios colindantes del EDOMEX, este aumento supone una menor retención de la radiación solar en las azoteas de las viviendas. Los porcentajes y colores en el lado derecho de los mapas indican el % de radiación reflejada.



Resultados

Para determinar el impacto en la temperatura del suelo y del aire por modificaciones en el albedo, se desarrolló un modelo numérico que busca tener una mejor representación de los efectos de modificar el albedo en las ciudades para así poder simular adecuadamente los flujos de calor.

Se simularon tres escenarios con diferentes resoluciones verticales, es decir, con diferentes alturas, desde la superficie hasta una altura de 3,000 m. Las diferentes resoluciones o alturas permiten conocer con mayor claridad cambios en diferentes condiciones.

Modelos numéricos:

Son herramientas matemáticas que permiten simular el comportamiento de ciertas variables, ayudan a predecir cómo se podría comportar la meteorología y el clima en el futuro. En el caso de la escalada de tiempo meteorológico ayudan a pronosticar la evolución de las variables meteorológicas a partir de las condiciones en un tiempo determinado. En el caso de cambios a mediano plazo permiten analizar los cambios climáticos al realizar algunas modificaciones del uso y cobertura del suelo. En resumen, busca entender comportamientos futuros de acuerdo a las condiciones actuales, contribuyendo a la toma de decisiones informadas.

INTERCAMBIO DE MASAS DE AIRE ENTRE LA CIUDAD DE MÉXICO Y ÁREAS ADYACENTES.

El movimiento de las masas de aire en la atmósfera es clave para entender la dispersión de contaminantes. Se analizan los mecanismos que determinan la calidad del aire en la Ciudad de México y zonas aledañas.

Los vientos son parcelas de aire que se mueven tanto horizontal como verticalmente debido a diferencias en la presión y en temperatura. Estas masas de aire se desplazan desde áreas de alta presión hacia áreas de baja presión, afectadas por la rotación de la tierra o Fuerza de Coriolis, además de la orografía, lo que provoca un intercambio de masas de aire.

Los contaminantes atmosféricos, incluido el ozono, se transportan en la atmósfera de manera horizontal y vertical.

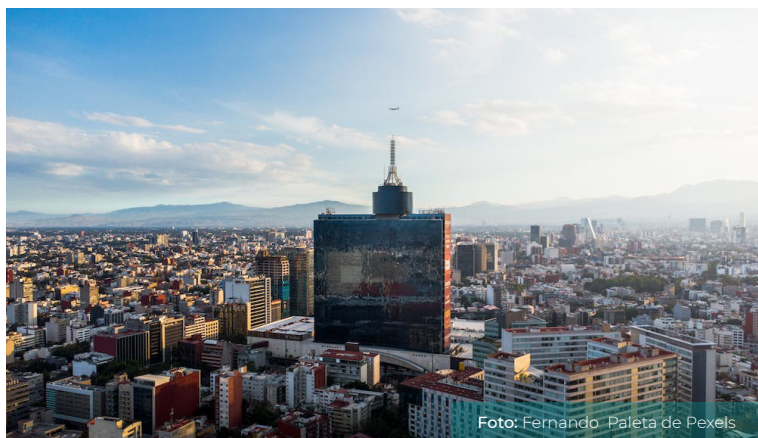


Foto: Fernando Paleta de Pexels

Partículas advectadas:

Son partículas como polvo, humo u otros contaminantes que se desplazan horizontalmente por el movimiento del aire. Conocer el comportamiento de los vientos ayuda a determinar la dispersión de contaminantes y evaluar la calidad del aire.

Algunos mecanismos que influyen en el transporte de contaminantes son:

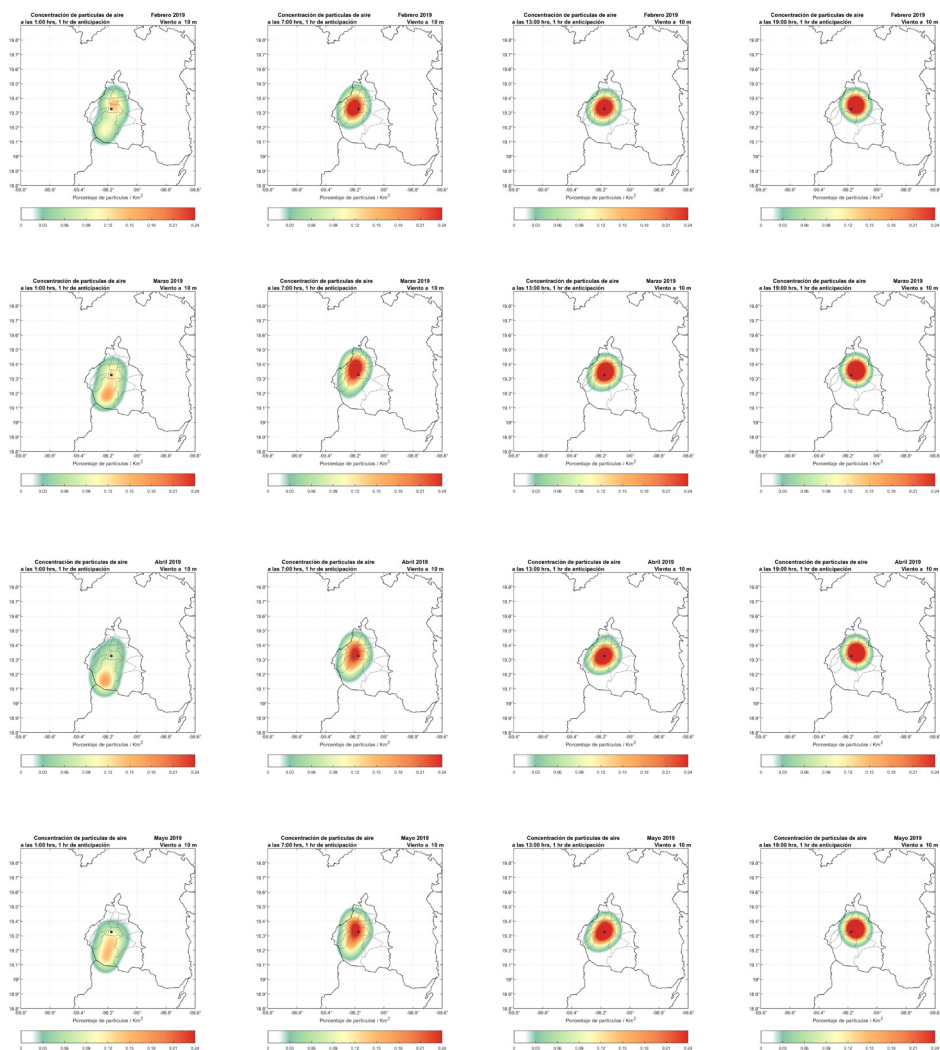
- **Advección:** Se refiere al transporte horizontal de las masas de aire; en este sentido, la dirección y magnitud del viento influyen en la dispersión de contaminantes.
- **Difusión turbulenta:** En este proceso los contaminantes se mezclan horizontal y verticalmente debido a movimientos turbulentos en la atmósfera.
- **Mezcla convectiva:** Esta ocurre cuando el aire caliente sube por diferencia de densidad provocando que el aire frío descienda, produciéndose así una mezcla vertical de masas de aire y contaminantes.
- **Estabilidad atmosférica:** Esta ocurre cuando el aire más caliente está por encima del aire más frío, lo que limita la dispersión de contaminantes.
- **Topografía:** En este caso, las montañas forman una barrera natural que limita el viento, provocando que en algunas zonas se acumulen los contaminantes.

Con el objetivo de caracterizar la variación diurna de la advección se realizó la representación con partículas inertes de un ciclo diurno (24 horas) durante la temporada de ozono de 2019, de esta manera se comprende su comportamiento a distintas horas del día.

Temporada de ozono:

En la ZMVM es la época donde es más común que se presenten las contingencias ambientales por ozono. Coincide con la temporada seca-caliente (**marzo-mayo**), caracterizada por tener pocas precipitaciones, altas temperaturas y cielos despejados.

MAPAS DE INTERCAMBIO DE MASAS DE AIRE



Se muestra la variación diurna de la distancia de partículas a distintas horas del día. Los mapas muestran una disminución del alcance de partículas en las horas del día en que incide la radiación solar, a su vez se muestra la dirección de las partículas de noroeste a noreste. Reconocer estos patrones de movimiento permite identificar zonas influyentes en la activación de contingencias atmosféricas. Estos mapas fueron elaborados a partir de las observaciones de los meses febrero, marzo, abril y mayo del 2019.

INCENDIOS FORESTALES EN EL VALLE DE MÉXICO:

PRONÓSTICO DE TRAYECTORIA DE HUMO

Los incendios afectan a la atmósfera y la salud humana al generar humo compuesto por partículas y gases perjudiciales. Este humo, además, contiene moléculas que, al reaccionar con otros elementos dan origen al ozono. Los pronósticos de la trayectoria del humo contribuyen a la mitigación de desastres.

Los incendios son parte natural de los ecosistemas, sin embargo, estos son cada vez más frecuentes por las altas temperaturas, sequías prolongadas, y en algunos casos ocasionados para uso agrícola.

Los daños que los incendios traen consigo incluyen la producción y propagación de humo, que es dañino a la atmósfera y al ser humano debido a los residuos que emiten

Los componentes del humo de un incendio incluyen partículas sólidas, monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), óxidos de nitrógeno (NOx) y compuestos orgánicos volátiles (COV); los dos últimos precursores de ozono (O₃).

En la temporada seca caliente, las altas temperaturas e incendios traen consigo también incrementos en las concentraciones de partículas y ozono en la atmósfera. Es por



Foto: Recep Tayyip Çelik de Pexels

ello que es necesario contar con pronósticos precisos y expedidos de la trayectoria y dispersión del humo de incendios en la Zona Metropolitana del Valle de México.

Uno de los resultados del proyecto consistió en el desarrollo de un simulador de trayectorias del humo de incendios

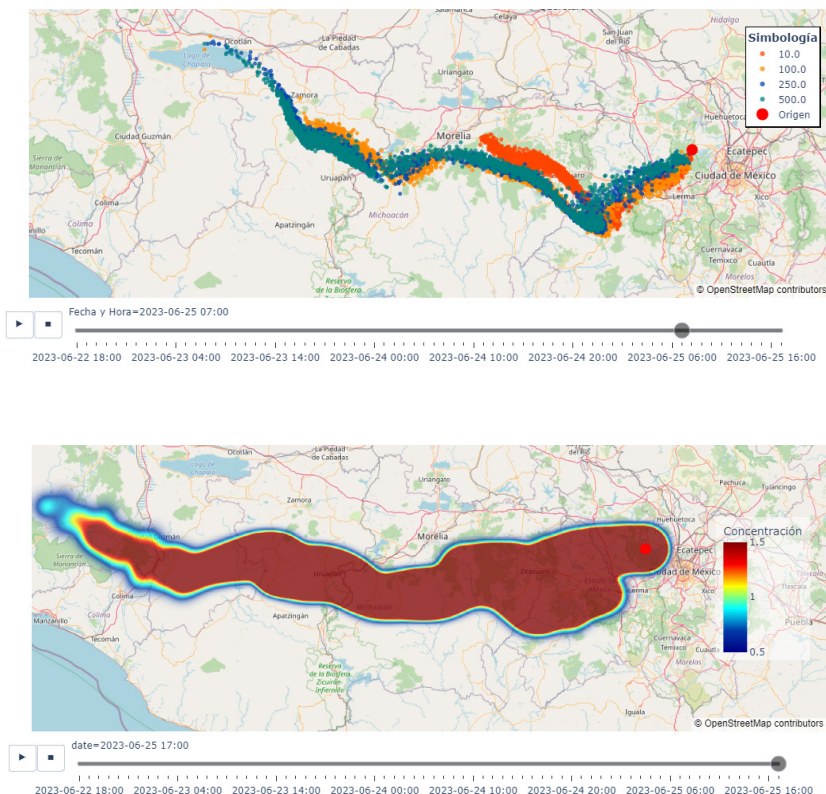
Plumas de incendios

Son columnas de humo visibles producidas durante incendios de gran magnitud. El aire caliente durante un incendio asciende y lleva consigo las partículas y gases generados por la combustión de los materiales.

forestales para determinar sitios que puedan verse afectados por las plumas que estos desprenden.

En este pronóstico, los usuarios pueden generar un mapa con la simulación de la trayectoria de la pluma de humo hasta 72 horas después del inicio del incendio, utilizando las coordenadas del foco de fuego. Esta herramienta pone a disposición información para que tanto usuarios como autoridades elaboren escenarios eficaces para la mitigación de desastres.

MAPAS DE SIMULACIÓN DE LA TRAYECTORIA DEL HUMO DE INCENDIOS



Se presenta la simulación de la trayectoria de humo. Se encuentra disponible de manera pública para su acceso y consulta en la página web: <https://pronosticos.atmosfera.unam.mx:2000/>

CRÉDITOS

INVESTIGADORES:

Jorge Zavala Hidalgo

Rosario de Lourdes Romero Centeno

Erika Danaé López Espinoza

Saulo Leonardo Rivera Martínez

Erika Guadalupe Jiménez Delgadillo

Anette Alonso Gamiño

Jorge Eduardo Velasco Zavala

REVISORES:

Jorge Zavala Hidalgo

Rosario de Lourdes Romero Centeno

Erika Danaé López Espinoza

Angelica Pedraza Díaz

CONTENIDO Y DISEÑO:

Silvia Sánchez Ramírez

Guadalupe Segura Chávez

Agradecemos el financiamiento otorgado por el Proyecto SECTEI/168/2022, la Coordinación de la Investigación Científica y el Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático de la UNAM. También reconocemos la valiosa colaboración de todas las investigadoras e investigadores que han contribuido al desarrollo de este proyecto.

**INSTITUTO DE CIENCIAS DE LA
ATMÓSFERA Y CAMBIO CLIMÁTICO**