



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE CIENCIAS**

**EFEECTO DE LOS FACTORES ATMOSFÉRICOS EN  
LA FORMACIÓN DE BRUMA AL SUR DE LA  
CIUDAD DE MÉXICO**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

**LICENCIADA EN CIENCIAS DE LA  
TIERRA**

**P R E S E N T A:**

**BLANCA ADILEN MIRANDA CLAUDES**



**DIRECTOR DE TESIS:  
DR. GUILLERMO MONTERO MARTÍNEZ**

**CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX., 2023**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

*Que la respuesta al miedo sea el amor que llevas dentro,  
sobre todo amor por ti.*

## AGRADECIMIENTOS

Investigación realizada gracias al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT) de la UNAM <IN101921> *Estudio de la visibilidad atmosférica en México mediante el análisis de datos de Rango Óptico Meteorológico obtenidos de la RUOA*. Agradezco a la DGAPA-UNAM la beca recibida.

Agradezco también al Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático por abrirme sus puertas, brindarme un espacio de trabajo y por el apoyo económico otorgado por la Beca de Apoyo para Titulación y Obtención de Grado mediante un Fondo Especial de Ingresos Extraordinarios del ICAYCC.

A la Red Universitaria de Observatorios Atmosféricos (UNAM) y a la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (CDMX), dependencias que proporcionaron los datos con los que fue posible realizar este trabajo.

A los miembros de mi jurado: el Dr. Luis Antonio Ladino Moreno, la Dra. Gema Luz Andraca Ayala y al Dr. Giovanni Alberto Carabalí Sandoval. Gracias por el tiempo que invirtieron leyendo mi tesis, sin duda sus comentarios y anotaciones enriquecieron mi trabajo.

Al grupo de Física de Nubes:

Dr. Fernando García, gracias por el tiempo que me ha regalado desde quinto semestre, por su apoyo y asesoría.

Ing. Víctor Zarraluqui, gracias por los consejos que ciertamente fortalecieron mi confianza.

Dr. Guillermo Montero, mi asesor. Muchas gracias por su paciencia y comprensión, por las charlas de café y por todo lo compartido durante este año de trabajo.

Agradezco a mi familia, por todo el apoyo y la inspiración que me ha llevado a concluir mi carrera y mi trabajo de tesis. Especialmente a mis padres, quienes han sido un ejemplo de constancia y dedicación. Que me han dado las herramientas para seguir mis sueños y hoy, gracias a todo su amor, estoy cumpliendo uno más. No hay algo que pueda escribir que ustedes no sepan ya, aun así:

Gracias mamá, por siempre escucharme y ver más allá de todo lo que puedo expresar;  
gracias papá, por alentarme en todo momento a ser mejor de lo que fui ayer.

Lo logramos.

A mis amigos, la familia que escogí. Gracias por acompañarme de todas las formas posibles y ser un lugar seguro durante este proceso. Gracias por todo el cariño y por siempre estar.

Antonio Claudes y Gregorio Miranda, gracias por siempre creer en mí y en las cosas que puedo lograr, mi corazón siempre estará con ustedes.

# Contenido

Lista de figuras.....	i
Lista de tablas.....	ii
Lista de abreviaturas.....	iii
Resumen .....	iv
Capítulo 1. Introducción .....	1
1.1 Visibilidad y Alcance Óptico Meteorológico ( <i>MOR</i> ) .....	1
1.2 Contaminantes atmosféricos .....	2
1.3 Importancia de las mediciones de <i>MOR</i> .....	4
1.4 Definición de bruma.....	5
Capítulo 2. Antecedentes.....	6
2.1 Mediciones de visibilidad .....	6
2.2 Estudios de la visibilidad en la Ciudad de México.....	6
Capítulo 3. Marco teórico .....	9
3.1 Coeficiente de extinción.....	9
3.2 Alcance Óptico Meteorológico .....	9
3.3 Factores atmosféricos (contaminantes y meteorología).....	10
3.4 Justificación.....	11
3.5 Objetivos .....	12
3.5.1 Objetivo general.....	12
3.5.2 Objetivos particulares .....	12
Capítulo 4. Datos y metodología .....	13
4.1 Sitio de estudio: Ciudad de México.....	13
4.2 Instrumentación .....	14
4.2.1 Disdrómetro (PWS100).....	14
4.2.2 Monitoreo de contaminantes.....	16
4.3 RUOA/RAMA.....	17
4.3.1 Bases de datos para variables meteorológicas y agentes contaminantes.....	17
4.4 Obtención de datos de visibilidad .....	17
4.5 Análisis de parámetros estadísticos con Excel .....	18
4.5.1 Análisis mensual.....	18
4.5.2 Análisis por temporada .....	18
Capítulo 5. Resultados y discusión .....	20
Capítulo 6. Conclusiones .....	30
6.1 Recomendaciones.....	31
Referencias.....	32

## Lista de figuras

<b>Figura 1.</b> Esquema que ilustra la disminución de visibilidad en la atmósfera (obtenida de Horvath, 1981). .....	2
<b>Figura 2.</b> Esquema de transmisómetros. (a) Configuración con transmisor y receptor separados y (b) configuración con transmisor y receptor en la misma caja (obtenido de de Fornel y Favennec, 2010). .....	7
<b>Figura 3.</b> Esquemas de dispersómetros. (a) Esquema de retrodispersión donde se emite el haz de luz y este es reflejado nuevamente y recogido por la celda fotoeléctrica, (b) Esquema de dispersión frontal donde el transmisor y el receptor forman un ángulo de entre entre 20° y 50° y (c) Esquema de dispersión en un ángulo grande en donde se manejan ángulos entre 0° y 120° (obtenido de de Fornel y Favennec, 2010). .....	8
<b>Figura 4.</b> Carta de climas de la Ciudad de México tomado de INEGI: Carta de climas. ....	13
<b>Figura 5.</b> Distribución anual de la precipitación en Ciudad Universitaria desde 1981 hasta 2010 (Obtenida del Observatorio Meteorológico del Colegio de Geografía, 2023). .....	14
<b>Figura 6.</b> Configuración del PWS100. (a) Vista lateral del instrumento en donde se aprecia el ángulo de los sensores respecto al emisor; (b) Vista de plano en donde es posible observar el área de detección ( $\varphi$ ) (Recuperado de Ellis, 2006). .....	15
<b>Figura 7.</b> Serie de tiempo correspondiente a los días 22, 23 y 24 de noviembre de 2015. En donde se muestra el comportamiento de MOR (línea negra), RH (línea azul) y $PM_{2.5}$ (línea punteada). .....	20
<b>Figura 8.</b> Parametrización de los valores de $t/t_c$ resultantes de la comparación de las medias mensuales de las variables meteorológicas (a) y contaminantes (b) en periodos de bruma y no bruma. ....	22
<b>Figura 9.</b> Dispersión de los valores de MOR en función de la RH y $PM_{2.5}$ para (a) la temporada de lluvia (junio-2015) y (b) la temporada seca (diciembre-2015). .....	24
<b>Figura 10.</b> Distribución de eventos de bruma en diferentes rangos de humedad en temporada de lluvia (a) y seca (b). .....	26
<b>Figura 11.</b> Distribución de eventos de bruma en diferentes rangos de concentración de partículas en temporada de lluvia (a) y seca (b). .....	27

# Lista de tablas

<b>Tabla 1.</b> Gases casi constantes en la atmósfera (Pruppacher y Klett, 2012). .....	3
<b>Tabla 2.</b> Principio de operación y método de análisis para los contaminantes criterio monitoreados en la estación CCA (obtenida de Dirección de monitoreo Atmosférico (s.f.)).	16
<b>Tabla 3.</b> Valores del promedio y desviación estándar de la media (en paréntesis) por temporada de temperatura, humedad relativa, velocidad del viento, SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> y PM <sub>2.5</sub> para los eventos de bruma y no bruma analizados en este trabajo. n en la columna de Condición óptica representa el número de datos horarios.....	21
<b>Tabla 4.</b> Estadística descriptiva de cada temporada para las variables humedad relativa (RH) y partículas (PM <sub>2.5</sub> ) durante periodos de bruma. ....	23
<b>Tabla 5.</b> Estadística inferencial para las variables humedad relativa (RH) y partículas (PM <sub>2.5</sub> ) durante periodos de bruma en las temporadas de lluvia y seca, considerando un 95% de confianza. ....	25
<b>Tabla 6.</b> Valores umbral para humedad relativa (RH) y partículas (PM <sub>2.5</sub> ) considerando una frecuencia relativa de ~80% de casos.....	28
<b>Tabla 7.</b> Resumen de los resultados reportados por Yang et al. (2021).....	28

## Lista de abreviaturas

<b>Abreviatura</b>	<b>Variable</b>
<i>RH</i>	Humedad relativa (%)
<i>TEMP</i>	Temperatura (°C)
<i>WS</i>	Velocidad del viento ( $\text{m s}^{-1}$ )
<i>MOR</i>	Alcance Óptico Meteorológico (km)
<i>PM<sub>10</sub></i>	Material particulado de diámetro menor a 10 $\mu\text{m}$ ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
<i>PM<sub>2.5</sub></i>	Material particulado de diámetro menor a 2.5 $\mu\text{m}$ ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )



# Resumen

La visibilidad es la distancia horizontal a la que es posible identificar un objeto a través de la atmósfera. Fenómenos como la precipitación y la niebla son capaces de reducir la visibilidad; sin embargo, en ausencia de ellos, la disminución de la visibilidad se atribuye a la presencia de partículas suspendidas que absorben y dispersan la luz. Cuando las partículas son capaces de reducir el valor de visibilidad por debajo de los 10 km ocurre un fenómeno llamado *bruma* y sus efectos pueden percibirse en el deterioro de la calidad del aire. Asimismo, el estudio de la visibilidad también ha permitido el desarrollo de sistemas de prevención de accidentes en materia de transporte aéreo, marítimo y terrestre y, además, se han considerado sus posibles efectos en el área de las telecomunicaciones.

Las estimaciones de la visibilidad se pueden obtener a partir de medidas instrumentales y observaciones humanas. Por su naturaleza, las observaciones humanas agregan subjetividad a la información, pues no solo están en función de las propiedades de la atmósfera y el objeto a identificar, sino que se le suma el umbral de contraste que el ojo humano puede detectar. Por el contrario, las medidas instrumentales se realizan con ayuda de dispersómetros y transmisómetros, que proporcionan datos objetivos.

Considerando esto, para evaluar la transparencia de la atmósfera de forma objetiva se utiliza el Alcance Óptico Meteorológico (*MOR*), que se basa en el efecto de la extinción de la luz, asociada a las partículas en estado sólido y líquido presentes en la atmósfera.

Con el objetivo de estudiar la relación entre factores meteorológicos y ambientales con la formación de bruma en la Ciudad de México, en este trabajo se tomaron las mediciones de *MOR* obtenidas por el instrumento PWS100 durante el periodo que comprende desde agosto de 2014 hasta diciembre de 2015 (exceptuando noviembre de 2014 y los meses de enero y octubre de 2015). La información fue comparada con datos de concentración de partículas finas ( $PM_{2.5}$ ) y humedad relativa (*RH*) para los mismos meses.

El periodo de estudio fue dividido en temporada de lluvia (junio a octubre) y temporada seca (noviembre a mayo). Por medio de un análisis estadístico se obtuvo que los eventos de bruma son altamente probables en temporada de lluvias cuando la  $RH > 75\%$  y  $PM_{2.5} > 15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ; mientras que las condiciones son más propicias en temporada seca cuando  $PM_{2.5} > 25 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y  $RH > 55\%$ .

# Capítulo 1. Introducción

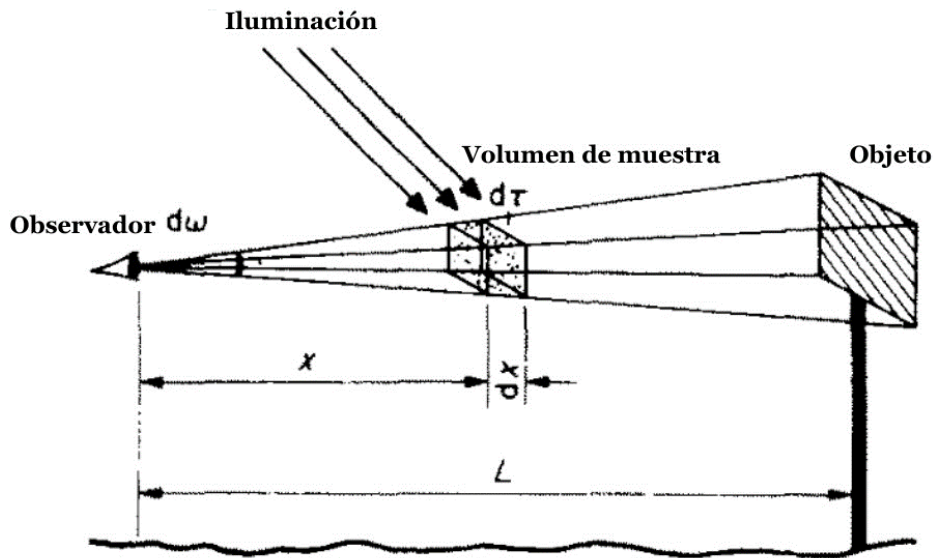
## 1.1 Visibilidad y Alcance Óptico Meteorológico (*MOR*)

Al hablar de visibilidad se hace referencia a qué tan bien podemos ver algo (Queißer, et al., 2022). Concretamente, la visibilidad atmosférica es la máxima distancia horizontal a la que es posible identificar un objeto, ubicado en el suelo, a través de la atmósfera durante el día (WMO,2008). Su estimación depende principalmente de: (1) Las propiedades ópticas de la atmósfera, (2) las propiedades del objeto y el fondo en el que se encuentra, y (3) las propiedades del ojo humano (Middleton,1957; Middleton,1960).

Para que un objeto pueda ser reconocido a la distancia, aparte de ser considerablemente grande, es necesario que existan diferencias entre este y el fondo contra el que se compara. En este sentido, el color y la luminosidad son variables importantes para la estimación de la visibilidad; sin embargo, la diferencia en color es despreciable puesto que, a la distancia máxima a la que un objeto puede ser visto, no siempre se puede percibir la diferencia entre el color del fondo y el objeto. Para conseguir el máximo contraste independientemente del estado óptico de la atmósfera, teniendo en cuenta que el cielo es el fondo de referencia, idealmente el objeto a identificar debe ser negro (Horvath, 1981; Lee y Shang, 2016; WMO,2008).

La distancia a la que se puede identificar un objeto puede verse limitada por componentes del aire como ciertos gases y material particulado (Kim, 2018). Estos, al dispersar la luz que viene del sol, reducen la luz que el objeto refleja hacia los ojos del observador, provocando que la atmósfera se vuelva más brillante y en consecuencia el objeto, al ser menos brillante, deja de ser visible (Middleton, 1957; Middleton, 1960; WMO, 2008). Entonces, entre más grande sea la distancia y su objetivo, el contraste entre el objeto y el fondo disminuirá (Figura 1).

La estimación de la visibilidad debe ser independiente de las condiciones meteorológicas, ya que únicamente se busca evaluar la transparencia de la atmósfera (WMO, 2008; Starchenko et al., 2016). El Alcance Óptico Meteorológico (*MOR*, por sus siglas en inglés) calcula el efecto de la extinción de la luz en la visibilidad, asociada a las partículas sólidas y líquidas suspendidas en la atmósfera (Queißer et al., 2022; WMO, 2008; Kim, 2018). Formalmente, la Organización Meteorológica Mundial (2008) define el *MOR* como la longitud del trayecto (en metros o kilómetros), a través de la atmósfera, necesaria para reducir el flujo luminoso de un haz colimado de una lámpara incandescente – con un color similar al que emitiría un cuerpo negro a una temperatura de 2700 K – al 5% de su valor original.



**Figura 1.** Esquema que ilustra la disminución de visibilidad en la atmósfera (obtenida de Horvath, 1981).

## 1.2 Contaminantes atmosféricos

La atmósfera está compuesta por diferentes gases, los cuales pueden ser clasificados de acuerdo con el tiempo de residencia: (1) constituyentes casi constantes en donde los tiempos de residencia llegan al orden de miles de años o más, (2) constituyentes de poca variación que tienen residencia de algunos meses o años y (3) constituyentes de variación rápida que llegan a durar en el orden de días o incluso menos (Pruppacher y Klett, 2012). Los gases casi constantes de la atmósfera se muestran en la Tabla 1. Estos constituyentes tienen diversas fuentes y sumideros. Entre las fuentes principales encontramos las biogénicas, la tierra sólida, océanos y formación *in situ*. Por ejemplo, el oxígeno es liberado por actividades biológicas como la fotosíntesis. Los volcanes son fuente de gases como dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ), dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), etc. Por otro lado, los sumideros de estos gases incluyen procesos como la transformación en otras especies químicas y la conversión gas-partícula, en donde se ven involucrados diferentes procesos tanto físicos como químicos (Wallace y Hobbs, 2006).

Otro componente importante es el material particulado, también llamado aerosol. Se trata de una mezcla de partículas sólidas o líquidas (de diferente composición de la del agua) suspendidas en la atmósfera. Las partículas con diámetros menores a 2.5 micrómetros ( $\mu\text{m}$ ) son llamadas finas que, al tener menor masa, su tiempo de residencia en la atmósfera es considerablemente largo, mientras que a las que son de mayor tamaño se les llama gruesas (Seinfeld y Pandis, 1998).

**Tabla 1.** Gases casi constantes en la atmósfera (Pruppacher y Klett, 2012).

<b>Gas constituyente</b>	<b>Contenido (% por volumen)</b>
Nitrógeno (N <sub>2</sub> )	78
Oxígeno (O <sub>2</sub> )	20
Argón (A)	0.93
Neón (Ne)	0.0018
Helio (He)	0.000524
Kriptón (Kr)	0.000114
Hidrógeno (H <sub>2</sub> )	0.00004
Xenón (Xe)	0.0000087

Al igual que los gases, las partículas también tienen sus propias fuentes y sumideros. Las partículas vienen principalmente de fuentes naturales y antropogénicas (Pruppacher y Klett, 2012). Algunas tienen origen en la superficie terrestre, plantas, animales, quema de combustibles, etc. Por otra parte, pueden ser removidas por diferentes fenómenos como el transporte del viento o el lavado atmosférico durante un evento de precipitación (Wallace y Hobbs, 2006). La distribución y concentración de las partículas dependen de factores como la proximidad a una fuente, de la tasa de emisión, así como de la eficiencia de los mecanismos de remoción anteriormente mencionados y de diferentes parámetros meteorológicos (Pruppacher y Klett, 2012).

Algunos gases y aerosoles deterioran la calidad del aire y son asociados con la reducción de la visibilidad. Estos episodios de baja calidad del aire ocurren cuando las emisiones sobrepasan los límites de concentración a los que los contaminantes pueden ser dispersados (Wallace y Hobbs, 2006).

Como contaminantes, los diferentes constituyentes de la atmósfera pueden ser clasificados como: (1) primarios, que son los que se emiten directamente a la atmósfera desde fuentes identificables, tales como SO<sub>2</sub>, óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), monóxido de carbono (CO), etc.; y (2) secundarios, que se forman en la atmósfera a partir de las reacciones químicas que hay entre los contaminantes primarios, como es el caso del ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) (Lutgens et al., 1995; Seinfeld y Pandis, 1998). Las partículas pueden provenir tanto de fuentes primarias como secundarias.

En Ciudad de México, los contaminantes criterio evaluados por el Índice de Calidad del Aire (antes Índice Metropolitano de la Calidad del Aire, IMECA) son el SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, CO, ozono (O<sub>3</sub>)

así como el material particulado fino ( $PM_{2.5}$ ) y grueso ( $PM_{10}$ ). Para ello se establecieron concentraciones límite y según el Informe Anual de Calidad del Aire de 2019 de la SEDEMA (2022) se han identificado tres patrones importantes en la concentración de contaminantes asociados a las condiciones meteorológicas prevalecientes en diferentes estaciones: (a) La temporada de ozono, caracterizada por niveles elevados de dicho contaminante y que se presenta desde finales de febrero hasta el inicio del periodo de lluvias; (2) la temporada de partículas, que tiene lugar de noviembre a febrero y se caracteriza por altas concentraciones de material particulado  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ ; y (3) el periodo de lluvias.

### 1.3 Importancia de las mediciones de *MOR*

El estudio de la visibilidad tiene aplicaciones en diferentes áreas. Actualmente, para estimar la visibilidad se utilizan parámetros como el *MOR*. En meteorología, las observaciones permiten inferir diferentes características de las masas de aire facilitando que se identifique el estado óptico de la atmósfera (WMO, 2008). Por ello, se ha sugerido que la visibilidad puede ser también una herramienta útil para inferir la calidad del aire debido a que contaminantes como el material particulado reducen la visibilidad (e.g. Fei et al., 2023).

Esta información también es utilizada en el ámbito del transporte y, dependiendo del área en la que se emplea, los valores que caracterizan una buena o mala visibilidad pueden variar. En aeronáutica, el *MOR* permite evaluar si es seguro aterrizar o despegar bajo condiciones de niebla o precipitación, aquí se tolera un límite de visibilidad de 10 km (WMO, 2008). Por otro lado, en materia de seguridad automotriz, se ha trabajado en el desarrollo de sistemas capaces de detectar la disminución de la visibilidad debida a diferentes fenómenos meteorológicos buscando la prevención de accidentes viales, ya que una baja visibilidad afecta la visión del conductor (Miclea, 2021; de Fornel y Favennec, 2010; Liu et al., 2022). En este sentido, también es útil para el diseño de señalizaciones viales que aseguran a los conductores el tiempo suficiente para la toma de decisiones en carretera (Miclea, 2021; WMO, 2008).

De igual forma, los datos de visibilidad se utilizan en el campo de las telecomunicaciones ópticas en el espacio libre (*FSO*, por sus siglas en inglés) (de Fornel y Favennec, 2010). Se trata de una técnica de transferencia de datos de manera inalámbrica que usa la luz como medio de comunicación; por ello, la transparencia de la atmósfera es crítica para determinar cómo la presencia de partículas afecta la posibilidad de establecer enlaces (Kim y Korevaar, 2001; Zafar y Khalid, 2021). Esta tecnología ofrece altas velocidades de transferencia de datos y se le ve como una posible alternativa al cableado de fibra óptica por su significativo ahorro en costos (Zafar y Khalid, 2021).

## 1.4 Definición de bruma

Jiusto (1981) define la bruma como el proceso de dispersión en la atmósfera causada por partículas menores a  $1.0\ \mu\text{m}$  de tamaño, secas o húmedas. El mismo autor menciona que las partículas de bruma se forman conforme la humedad relativa se incrementa por encima del punto de deliquesencia de las partículas en el aire. Es decir, por encima del valor de humedad relativa donde la partícula se disuelve en un líquido (Mauer y Taylor, 2010). Según lo reportado por Zhang et al. (2015), la Administración Meteorológica China (CMA) define la bruma como un fenómeno que causa la disminución de la visibilidad por debajo de 10 km.

La bruma es un fenómeno de escala regional que tiene lugar en ausencia de niebla y precipitación (Deng et al., 2011; Zhang et al., 2013). Por ello, la ocurrencia de la bruma suele asociarse con la dispersión producida por las altas concentraciones de contaminantes atmosféricos (Wang et al., 2012; Zhang et al., 2015). Los gases en la atmósfera tienen una extinción de la luz más débil respecto al material particulado y por esta razón la disminución de la visibilidad en zonas urbanas suele atribuirse principalmente a las emisiones de partículas  $\text{PM}_{2.5}$  provenientes de la combustión de combustibles fósiles y desperdicios industriales (Huang et al., 2019; Sun et al., 2020). Por otro lado, Went (1960) sugiere que las emisiones de compuestos orgánicos volátiles emitidos por plantas y árboles influye en la bruma que se observa sobre áreas no habitadas (e.g. Husar et al., 1981).

La bruma también tiene efectos en la calidad del aire, la salud humana, la formación de nubes y el clima global (Zhang et al., 2013). Se ha demostrado que la concentración de aerosoles no siempre es suficiente para disminuir la visibilidad, por lo que también se ha asociado a este fenómeno con diferentes factores atmosféricos como la humedad relativa ( $RH$ ), la altura de la capa límite, la velocidad del viento, etc., y no depende directamente de las fuentes de emisión (Zhang et al., 2015; Yang et al., 2021). Jiusto (1981) menciona que el escenario más común es la reducción de la visibilidad en presencia de partículas mojadas, puesto que estas aumentan su tamaño al absorber la humedad del ambiente. En China e India se ha reportado que los eventos de bruma son más activos en invierno (Zhang et al., 2013; Zhang et al., 2015; Gao et al., 2019). En Ciudad de México, las condiciones meteorológicas que favorecen las altas concentraciones de contaminantes (como las inversiones térmicas) son más frecuentes en invierno (Jáuregui, 2000) y podrían favorecer la ocurrencia de bruma en esa temporada.

## Capítulo 2. Antecedentes

### 2.1 Mediciones de visibilidad

Como se mencionó anteriormente, la variación de visibilidad está regida por el coeficiente de extinción asociado a las partículas suspendidas en la atmósfera. La Organización Meteorológica Mundial (2008) reporta que las estimaciones de la visibilidad se obtienen principalmente de dos formas: las medidas instrumentales y las observaciones humanas.

En técnicas instrumentales es común el uso de transmisómetros y dispersómetros. Los transmisómetros miden el coeficiente de extinción en un cilindro de aire horizontal colocado entre una fuente de luz constante (transmisor) y un detector. Estos instrumentos pueden tener dos configuraciones: (1) con un transmisor y un receptor colocados en cajas diferentes a una distancia conocida (Figura 2a), y (2) con el transmisor y el receptor colocados en la misma caja, aquí la luz será reflejada con ayuda de un espejo o un retroreflector (Figura 2b) (de Fornel y Favennec, 2010).

Considerando que la dispersión debida a la reflexión, refracción y difracción de las partículas es el principal factor que reduce visibilidad, los dispersómetros concentran un haz de luz sobre un volumen de aire y determinan la proporción de luz dispersada que posteriormente es integrada desde todos los ángulos para determinar el coeficiente de dispersión. En estos instrumentos se utilizan tres tipos de medidas: retrodispersión (Figura 3a), dispersión frontal (Figura 3b) y dispersión integrada en un ángulo grande (Figura 3c) (de Fornel y Favennec, 2010).

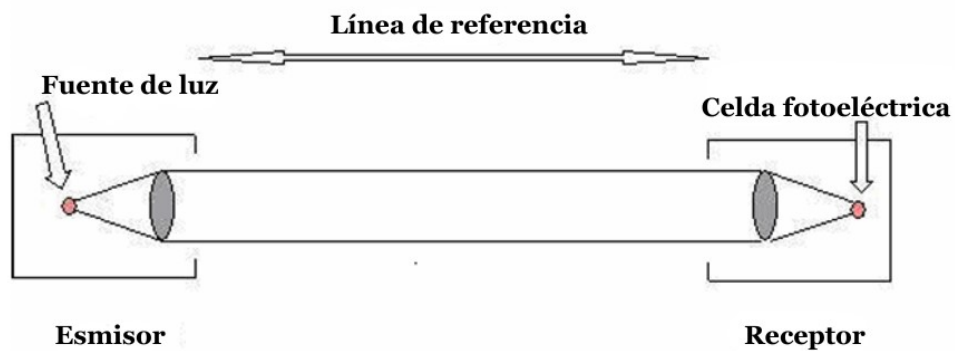
Finalmente, cuando la visibilidad es estimada por observadores humanos, el resultado no solo dependerá de las características de la atmósfera y las propiedades del objeto, ahora también estará en función del umbral del contraste del observador. Para estas prácticas, es recomendable que las estaciones de observación cuenten con inventarios de los objetos que pueden ser usados como referencia registrando la distancia a la que están y sus aspectos generales (WMO, 2008).

### 2.2 Estudios de la visibilidad en la Ciudad de México

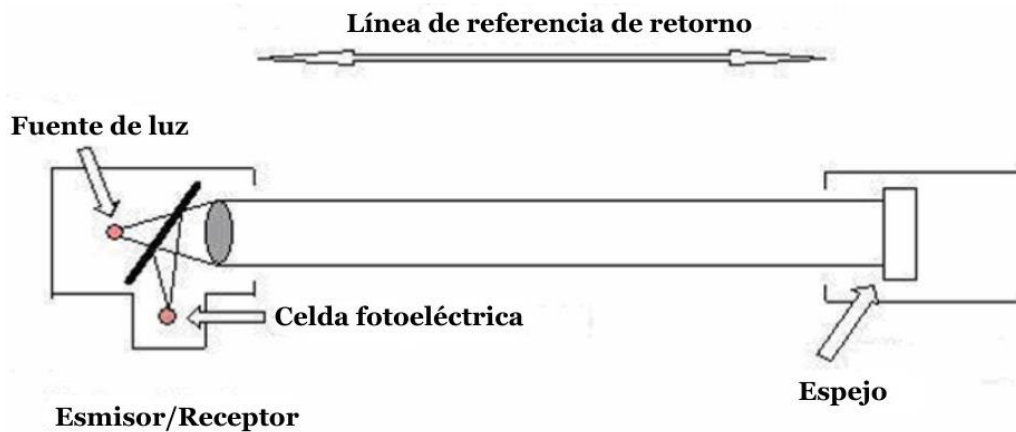
En México existen pocos estudios de visibilidad atmosférica. Hay registros de este parámetro en Tacubaya desde la primera mitad del siglo XX. Jáuregui (1971) reporta un deterioro de la visibilidad en el periodo de la década de 1930 a 1970 como consecuencia del aumento del área urbana; posteriormente, el mismo autor reporta una ligera disminución de los periodos de baja visibilidad desde 1975 hasta 1980 que atribuye a las normativas ambientales impuestas durante ese tiempo (Jáuregui, 1983). Bravo et al. (1988), en un estudio realizado

para el periodo de marzo a agosto de 1981, atribuyen la reducción de la visibilidad a los contenidos de carbono (elemental y orgánicos) y sulfato en las partículas finas. Por su lado, Eidels-Dubovoi (2002), con base en mediciones de un etalómetro y un nefelómetro durante marzo de 1997, reporta que las estimaciones de visibilidad en el centro de la Ciudad de México disminuyen por debajo de los 5 km durante las mañanas y están correlacionadas con las concentraciones de carbón elemental y aerosoles secundarios. Además, menciona que la visibilidad en el sureste de la ciudad tiene valores más altos con respecto a los del centro. Por otro lado, Munoz-Alpizar et al. (2003) concluyen que la visibilidad en la cuenca de México depende de muchos factores, tales como la composición del aerosol, la *RH*, temperatura patrones de transporte de contaminantes, entre muchos otros.

(a)



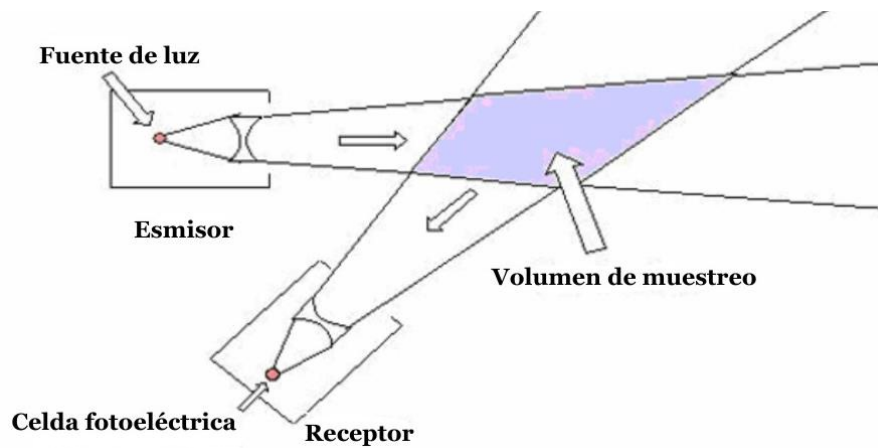
(b)



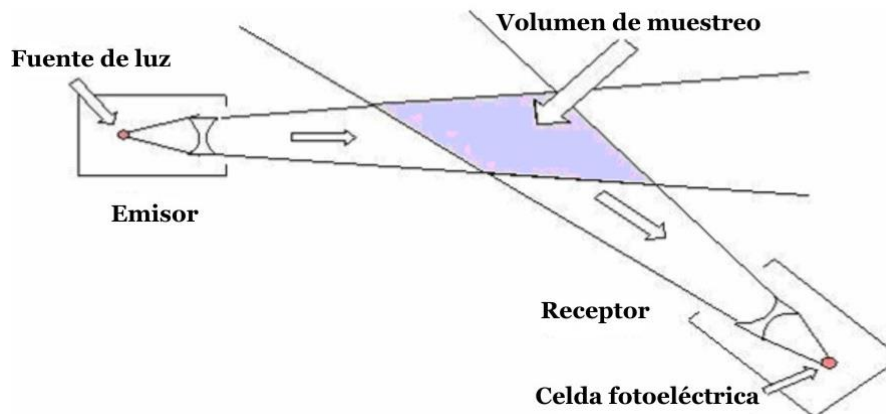
**Figura 2.** Esquema de transmísómetros. (a) Configuración con transmisor y receptor separados y (b) configuración con transmisor y receptor en la misma caja (obtenido de de Fornel y Favennec, 2010).



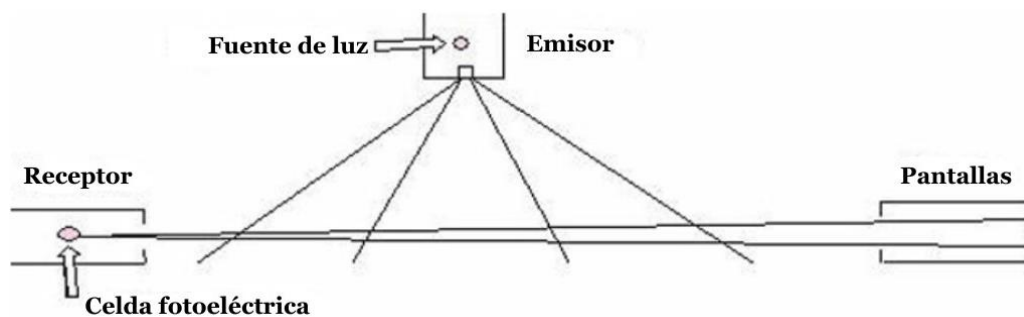
(a)



(b)



(c)



**Figura 3.** Esquemas de dispersómetros. (a) Esquema de retrodispersión donde se emite el haz de luz y este es reflejado nuevamente y recogido por la celda fotoeléctrica, (b) Esquema de dispersión frontal donde el transmisor y el receptor forman un ángulo de entre  $20^\circ$  y  $50^\circ$  y (c) Esquema de dispersión en un ángulo grande en donde se manejan ángulos entre  $0^\circ$  y  $120^\circ$  (obtenido de de Fornel y Favennec, 2010).

## Capítulo 3. Marco teórico

### 3.1 Coeficiente de extinción

La atenuación de la luz en una trayectoria es proporcional a la cantidad de luz presente en ese lugar. Este coeficiente de proporcionalidad es lo que conocemos como coeficiente de extinción (Malm, 1999). Al tratarse de la pérdida de luz por unidad de distancia suele expresarse en  $km^{-1}$  y se representa con la letra  $b$ . La interacción entre los gases y partículas en la atmósfera con la luz del Sol da lugar a los procesos de dispersión y absorción. La dispersión se refiere al efecto que tienen los componentes de la atmósfera, provocando una redistribución o cambio en la dirección en la que se propaga la radiación sin necesariamente modificar su longitud de onda. Por su parte, la absorción provoca la desaparición de los fotones resultando en un aumento de la energía interna de las moléculas o partículas del medio. Cabe aclarar que, a diferencia de lo que sucede durante la absorción, la luz dispersada no desaparece (Malm, 1999; de Fornel y Favennec, 2010).

Entonces, la ley de Beer-Lambert-Bouguer describe la proporción de intensidad de luz ( $B$ ) que un haz de luz pierde al atravesar una distancia  $x$  a través de un medio (e.g. la atmósfera) y se expresa como la ecuación (1) (Horvath y Noll, 1969; WMO, 2008):

$$B = B_0 e^{-bx} \quad (1)$$

Donde  $B_0$  corresponde a la intensidad de la luz inicial (a una distancia  $x = 0$ ) y  $b$  al coeficiente de extinción resultado de sumar la parte de la luz que es absorbida ( $b_{abs}$ ) y la que es dispersada ( $b_{scat}$ ) (ecuación 2):

$$b = b_{abs} + b_{scat} \quad (2)$$

Cabe destacar que los cambios en la visibilidad son principalmente atribuidos a la luz dispersada por las partículas por lo que la absorción suele despreciarse (Horvath y Noll, 1969).

### 3.2 Alcance Óptico Meteorológico

Aunado a lo mencionado en la *Sección 3.1*, los objetos son reconocidos a la distancia gracias a la diferencia normalizada entre la luz que emiten respecto al fondo, esta propiedad es llamada contraste ( $C$ ) (Horvath, 1981; Middleton, 1957). El valor mínimo de contraste que puede ser detectado por el ojo humano es conocido como *umbral de contraste* ( $\epsilon$ ) y

normalmente se toma un valor de 0.02; sin embargo, la Organización Meteorológica Mundial recomienda 0.05 para aplicaciones en aviación. Entonces, la visibilidad ( $V$ ) también se define como la distancia a la que el contraste del objeto ( $C$ ) es igual a  $\varepsilon$  (WMO, 2008; Horvath, 1981):

$$\varepsilon = C_0 e^{-bV} \quad (3)$$

En la ecuación (3), la variable  $C_0$  representa el contraste inicial del objeto (a una distancia  $x = 0$ ). A partir de dicha ecuación se interpreta que el contraste aparente de un objeto contra el horizonte disminuye exponencialmente al aumentar la distancia entre el observador y el objeto, pareciéndose cada vez más al horizonte hasta que la diferencia entre ellos parece invisible (US EPA, 1979). Como se mencionó en la *Sección 1.1*, para conseguir idealmente el máximo contraste el objeto a identificar debe ser negro, por lo que  $C_0$  toma el valor de  $-1$ . Según Horvath (1981), ya que el contraste es negativo si se trata de un objeto más oscuro que el fondo o positivo en el caso contrario, los valores de  $\bar{C}$  y  $\varepsilon$  deben tener una magnitud absoluta. Al definir  $\varepsilon = 0.05$  y despejar la visibilidad ( $MOR$ ), se obtiene (Middleton, 1957; WMO, 2008):

$$MOR = \frac{1}{b} \ln\left(\frac{1}{0.05}\right) \quad (4)$$

Cuando se evalúan los valores establecidos se llega a la ecuación:

$$MOR \approx \frac{3}{b} \quad (5)$$

### 3.3 Factores atmosféricos (contaminantes y meteorología)

El alcance visual se ve restringido por diferentes elementos presentes en la atmósfera. La Organización de Internacional de Aviación Civil (1981) reporta que la atenuación en la atmósfera está asociada a fenómenos como la niebla, la precipitación y la bruma. La niebla es la suspensión de gotitas de agua o, en algunos casos, cristales de hielo en las capas más bajas de la atmósfera, y produce disminuciones de visibilidad por debajo de 1 km (Justo, 1981). La visibilidad también se ve afectada por eventos de precipitación líquida cuando esta es particularmente intensa; sin embargo, la precipitación sólida es más eficiente a la hora de dispersar la luz. El efecto de ambos fenómenos en la visibilidad es de importancia operativa para la gestión de tráfico aéreo, terrestre y marítimo (ICAO, 1981; WMO, 2008).

Como se mencionó en la *Sección 1.4*, las partículas suspendidas también están relacionadas con la disminución en la visibilidad. Hay varios factores meteorológicos que afectan la concentración de aerosoles. Lutgens et al. (1995) indica que cuando los vientos son fuertes, son capaces de transportar los contaminantes emitidos desde una fuente hacia otros lugares;

por ello, las altas concentraciones de contaminantes que provocan bajas en la visibilidad están asociadas a vientos calmos. Mientras que la velocidad del viento tiene consecuencias en la distancia que pueden alcanzar los contaminantes transportados, la altura de la capa de mezcla limita el volumen dentro del que se mueven los contaminantes (Lutgens et al., 1995). Cuanto menor sea su altura hace más propicia la acumulación de contaminantes y puede ser indicativa de la presencia de bruma (Wu et al., 2017).

Otra condición que favorece la alta concentración de contaminantes en la atmósfera es la presencia de aire estratificado donde el aire frío se encuentra cerca del suelo (Jáuregui, 2000). Lutgens et al. (1995) explica que la radiación incidente del Sol calienta la superficie y este calor es liberado aumentando la temperatura del aire adyacente, el cual, al ser menos denso, asciende y poco a poco disminuye su temperatura. Sin embargo, en ocasiones, durante la noche la superficie se enfría rápidamente enfriando el aire cercano, por lo que al amanecer el aire frío (y pesado) está cerca del suelo (Jáuregui, 2000); por otro lado, la parte más alta de la atmósfera se calienta por el proceso mencionado anteriormente, entonces por diferencias de densidad, se impide la mezcla de aire (Lutgens et al., 1995). Este fenómeno es conocido como inversión térmica y por sus implicaciones permite la acumulación de contaminantes favoreciendo, nuevamente, la formación de bruma (Wu et al., 2017).

En el desarrollo de la bruma también están involucradas diferentes condiciones de *RH*. La *RH* por sí sola no reduce la visibilidad, pero su efecto es perceptible a medida que aumenta y las partículas pueden “adsorber” el vapor de agua, aumentando la eficiencia de extinción (Deng et al., 2011; Zhang et al., 2015; Wu et al., 2017; Yang et al., 2021).

### 3.4 Justificación

En la Ciudad de México y sus alrededores han sido pocos los estudios que analizan las tendencias del comportamiento de la visibilidad a diferentes escalas temporales; sin embargo, la mayoría señala a los contaminantes atmosféricos como uno de los principales factores responsable de las fluctuaciones de esta variable. En la estación de la Red Universitaria de Observatorios Atmosféricos instalada en Ciudad Universitaria se cuenta con una base de datos por minuto que permite analizar detalladamente el comportamiento de la visibilidad a través del *MOR*, al contrastar esta información con la de otras variables meteorológicas se podrían identificar múltiples eventos de bruma en el sitio.

La obtención de datos de *MOR* ha permitido el estudio y caracterización de los factores que afectan la formación de bruma en diferentes países. Al ser un fenómeno que ocurre en ausencia de precipitación y niebla, se considera que es consecuencia de la interacción entre el material particulado suspendido en la atmósfera y la luz visible. Por ello, el estudio de las condiciones meteorológicas y ambientales bajo las que ocurre este fenómeno servirá como

una herramienta complementaria para evaluar el grado de contaminación en Ciudad de México ya que facilitará la estimación de la calidad del aire en función de la transparencia de la atmosfera.

Entonces, se propone como hipótesis que la alta concentración de partículas suspendidas en la atmósfera es el factor determinante para la ocurrencia de bruma en el sur de la cuenca de México.

## 3.5 Objetivos

### 3.5.1 Objetivo general

Estudiar los posibles factores meteorológicos (*RH*, temperatura y velocidad del viento) y ambientales (*PM<sub>2.5</sub>*, *SO<sub>2</sub>* y *NO<sub>x</sub>*) que influyen en el fenómeno de bruma en la Ciudad de México y la relación que existe entre ellos.

### 3.5.2 Objetivos particulares

- Estudiar la evolución de los cambios de visibilidad en el sitio de muestreo.
- Establecer una metodología para definir los periodos de ocurrencia de bruma.
- Definir los factores más importantes que propician la ocurrencia de bruma y establecer valores críticos.

# Capítulo 4. Datos y metodología

## 4.1 Sitio de estudio: Ciudad de México

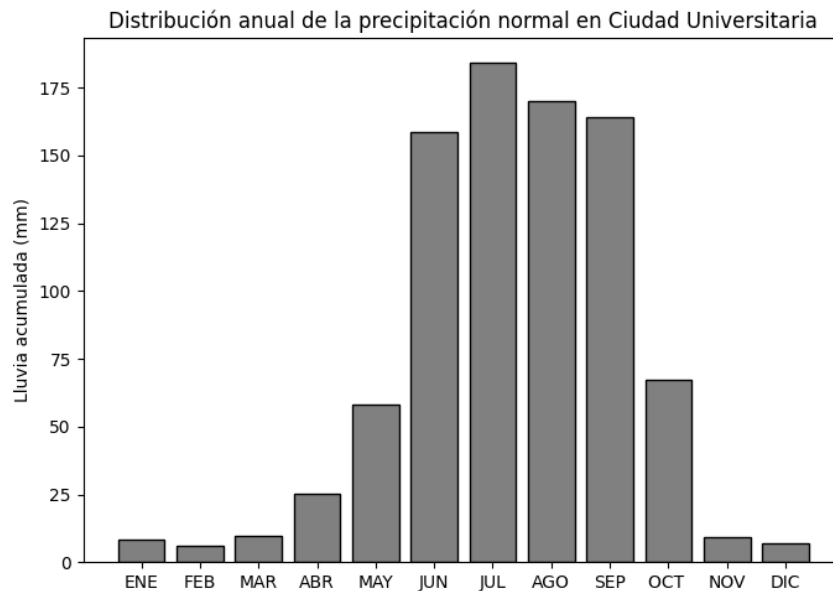
La Ciudad de México está localizada a una altitud de 2,250 m s.n.m. al interior de la cuenca de México (Jáuregui y Romales, 1996). Los climas predominantes según la clasificación de Koppen reportada por Jáuregui (2000) son seco de tipo estepa hacia el noreste y templado en el centro-sur, siendo este último el que caracteriza a la alcaldía de Coyoacán (Figura 4) (INEGI, 2010). La ciudad presenta un patrón de precipitación que va desde los 400 mm/año (región seca) hasta los 1000 mm/año en la región húmeda (Jáuregui y Romales, 1996). Debido a las montañas que la rodean los vientos suelen ser débiles dentro de la cuenca (Molina, et al., 2009).



**Figura 4.** Carta de climas de la Ciudad de México tomado de INEGI: Carta de climas.

Para fines de este análisis se definió la temporada de lluvias desde junio hasta octubre para los años de 2014 y 2015, mientras que la temporada de secas fue desde noviembre hasta mayo. Esto se delimitó a partir de los datos proporcionados por el Observatorio Meteorológico del Colegio de Geografía (UNAM) (<https://goo.su/L780E>), en donde se observa un aumento significativo de la precipitación a partir de los meses antes mencionados (Figura 5).

El sitio de muestreo está situado en el techo del Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático. La plataforma de medición cuenta con equipos que monitorean la meteorología, la capa límite, campo eléctrico, perfiles de viento, así como el depósito seco y húmedo. Además, se encuentra un sensor de tiempo presente PWS100, que se describirá con más detalle en la *Sección 4.2.1*, para obtener estimaciones de MOR y otras mediciones microfísicas de la precipitación pluvial. Los instrumentos que generaron la información utilizada en este análisis fueron el termohigrómetro y el anemómetro, ambos instrumentos son componentes del sistema de monitoreo de meteorología (RUOA, 2021).



**Figura 5.** Distribución anual de la precipitación en Ciudad Universitaria desde 1981 hasta 2010 (Obtenida del Observatorio Meteorológico del Colegio de Geografía, 2023).

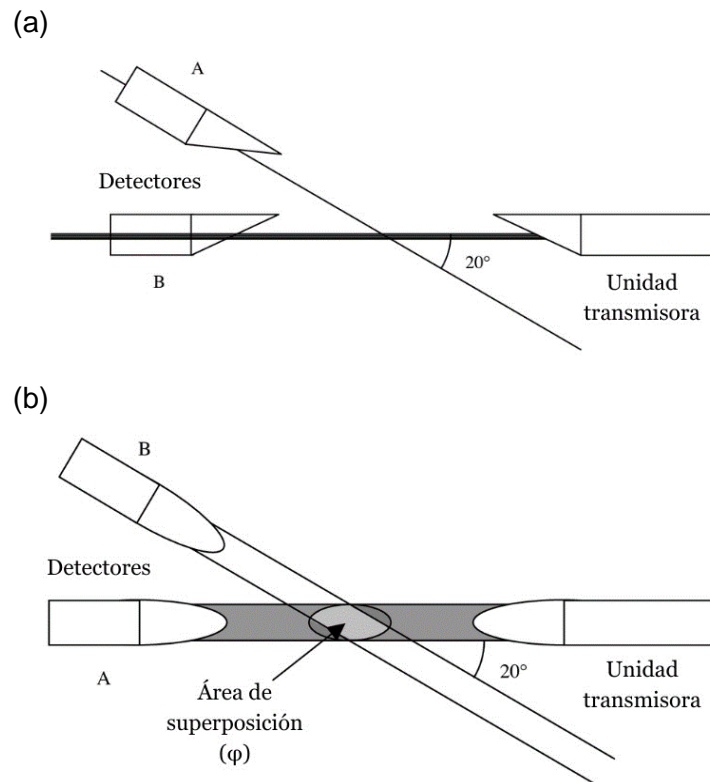
## 4.2 Instrumentación

### 4.2.1 Disdrómetro (PWS100)

Según la Organización Meteorológica Mundial (2008), las observaciones del *tiempo presente* describen el estado de la atmósfera y sus fenómenos al momento en que ocurren. Dichas observaciones inicialmente estaban sujetas a la percepción humana, por lo que la información resultante se considera subjetiva (Sheng-Jie, 2014). Posteriormente se desarrollaron los Sensores de Tiempo Presente (PWS, por sus siglas en inglés) que son capaces de hacer observaciones continuas y, al contar con una escala predeterminada, proporcionan información objetiva (Ellis, 2006).

Los sensores ópticos se basan en tres principios de interacción de la luz: transmitancia, dispersión y oclusión (Sheng-Jie, 2014; Bennett, 2012). La primera se refiere a la emisión de uno o varios haces de luz que son detectados por un emisor (véase Figura 6a) (Bennett,

2012), por su lado, la dispersión se da por la presencia de partículas suspendidas en la atmósfera que redistribuyen la luz en distintos ángulos (de Fornel y Favennec, 2010); la luz es dispersada por mecanismos de reflexión, difracción y refracción (Ellis, 2006). Finalmente, la oclusión consiste en medir la amplitud y duración de la luz obstruida por partículas de diferentes tamaños (Sheng-Jie, 2014).



**Figura 6.** Configuración del PWS100. (a) Vista lateral del instrumento en donde se aprecia el ángulo de los sensores respecto al emisor; (b) Vista de plano en donde es posible observar el área de detección ( $\varphi$ ) (Recuperado de Ellis, 2006).

Por su geometría, el PWS100 es similar a otros instrumentos convencionales de visibilidad. El PWS100 está compuesto por dos sensores receptores y un emisor láser (Figura 6). Los sensores están a 20° respecto al eje del emisor uno en el plano vertical y otro en el plano horizontal como se muestran en la Figura 6a. Por otro lado, en la Figura 6b se ve señalada el área de detección (donde los haces de luz de la unidad emisora y el área que cubren los detectores se superponen) es de aproximadamente 40 cm<sup>2</sup> (Campbell, 2012). Los detectores pueden medir la intensidad promedio de la luz dispersada y, suponiendo que esta es proporcional al coeficiente de dispersión, hacer una estimación de ese parámetro. Además, el algoritmo del instrumento también asume que no existe un efecto apreciable por la absorción de la luz y utiliza un valor de contraste de 0.05. De esta forma, las mediciones de MOR proporcionadas por el PWS100 se determinan utilizando la ecuación (5) (Ellis, 2006).



El rango de medición de *MOR* es de 0 a 20,000 m con una exactitud de 10% y una resolución de 0.0001 mm para la acumulación de lluvia (Campbell, 2012). El instrumento puede estar sincronizado con otros sensores (de humedad y temperatura) que le serán útiles para proporcionar datos más precisos para determinar si se está midiendo precipitación en estado sólido o líquido (Campbell, 2012) y distinguir fenómenos como la lluvia, niebla o bruma (Sheng-Jie, 2014).

#### 4.2.2 Monitoreo de contaminantes

El termohigrómetro (HMP155A-L) proporciona mediciones de humedad y temperatura; la primera se mide en un rango de 0 a 100% y la segunda de  $-80^{\circ}$  a  $+60^{\circ}$  °C (Campbell, 2021). Por otro lado, el anemómetro (WINDSONIC4-L) mide dirección y velocidad del viento dentro del rango de 0 a 60 m/s (Campbell, 2022).

Los contaminantes atmosféricos que se monitorean en la estación correspondiente son  $SO_2$ , monóxido de carbono (CO),  $NO_x$ , ozono ( $O_3$ ) y material particulado ( $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ ). Con base a lo reportado en la página de internet de la Dirección de Monitoreo Atmosférico (s.f.), para el caso de los gases se usan diferentes métodos de análisis específicos para cada uno (Tabla 2), por lo que refiere al material particulado se usa un monitor radiométrico de masa de partículas (Thermo FH62C-14) que mide concentraciones de masa de partículas  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  (EPA Systems, 2018; Thermo, 2010).

**Tabla 2.** Principio de operación y método de análisis para los contaminantes criterio monitoreados en la estación CCA (obtenida de Dirección de monitoreo Atmosférico (s.f.)).

Contaminantes	Equipo	Principio de operación
$SO_2$	Teledyne API Model 100E UV Fluorescence $SO_2$	Fluorescencia UV
CO	Teledyne API Model T300 Gas Filter Correlation Carbon Monoxide Analyzer	Absorción en el infrarrojo
$NO_2$	Teledyne API Model 200E Chemiluminescent $NO_x$ Analyzer	Quimioluminiscencia
$O_3$	API Model 400E Photometric Ozone Analyzer	Fotometría UV
$PM_{10}$ y $PM_{2.5}$	Beta Gauge Continuous Ambient Particulate Monitor Thermo Model FH62C-14	Atenuación de radiación beta

## 4.3 RUOA/RAMA

### 4.3.1 Bases de datos para variables meteorológicas y agentes contaminantes

Se analizaron los datos de parámetros meteorológicos (*RH*, temperatura, velocidad de viento), *MOR* y contaminantes ( $PM_{2.5}$ ,  $SO_2$ ,  $NO_x$ ) para los años 2014 y 2015 de la estación ubicada en el Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático. Los datos de meteorología y *MOR* se obtuvieron de la página de la Red Universitaria de Observatorios Atmosféricos (RUOA-UNAM) mientras que los correspondientes a partículas y gases criterio se consiguieron de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA-CCA).

Los datos de RUOA tienen una resolución temporal de un minuto mientras que los de la RAMA son por hora, por lo que se tuvieron que promediar los datos de *RH* y *MOR* para que estos fueran comparables con los de  $PM_{2.5}$ .

## 4.4 Obtención de datos de visibilidad

El PWS100 estima los valores de *MOR* usando la técnica de dispersión frontal (Campbell, 2012). Los datos que ofrece este instrumento se encuentran en un rango que va desde los 0 a 20,000 m (Campbell, 2012). Los casos de bruma estudiados en este trabajo se determinaron usando la definición de la Administración Meteorológica de China (CMA) que, en términos de la visibilidad atmosférica, propone considerar un evento de bruma cuando esta sea menor a 10 km (Wang et al., 2012). Para que un caso fuera considerado relevante para el análisis debía durar al menos dos horas seguidas. Se descartó que la disminución de la visibilidad atmosférica estuviera influenciada por eventos de precipitación pluvial. Con este objetivo, se agregó la información que ofrece el disdrómetro PWS100 a la base de datos para detectar los eventos de llovizna. Para el análisis estadístico se seleccionaron dos casos de bruma que serían representativos de cada mes. Se buscaron los eventos de bruma de mayor duración que fueran consecutivos durante un mismo periodo cada 24 horas. Cuando esta condición no fue posible, se eligieron los casos más extensos independientemente de la condición que hubiese al día siguiente. Además, se tomaron otros periodos (con una duración similar) 24 horas antes del inicio de cada evento de bruma previamente seleccionado. Los valores de *MOR* durante estos periodos debían ser superiores a los 10 km. A estos últimos lapsos se les nombró periodos de *no bruma* y fueron útiles para contrastar la evolución de los parámetros que pueden ser determinantes en la formación de bruma.

Entonces, se compararon las medias mensuales de las variables meteorológicas – temperatura (*TEMP*), *RH* y velocidad del viento (*WS*) – y contaminantes ( $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$  y  $\text{PM}_{2.5}$ ) en condiciones de bruma y no bruma. Se debe recordar que para hacer comparable la información de las bases de datos de la RAMA y la RUOA, fue necesario promediar por hora la información meteorológica.

## 4.5 Análisis de parámetros estadísticos con Excel

### 4.5.1 Análisis mensual

Para identificar el comportamiento de las variables meteorológicas durante los eventos de bruma fue necesario tener un punto de comparación. A la par de la selección de casos se separaron periodos sin bruma antes y/o después de cada evento que, preferentemente, tuvieran lugar en el mismo día. De esta información se obtuvieron los promedios mensuales para las variables meteorológicas y ambientales en condiciones de bruma y no bruma.

Con esto, se aplicó una prueba de significancia a fin de saber si la diferencia entre las medias de las variables en condiciones de bruma y no bruma caen dentro de lo esperado por azar o no. Por el número de casos ( $n < 30$ ) para cada temporada, se realizó una prueba *t* (Morales-Vallejo, 2008):

$$t = \frac{|\bar{X}_1 - \bar{X}_2|}{\sqrt{\frac{S_1^2}{n_1 - 1} + \frac{S_2^2}{n_2 - 1}}} \quad (6)$$

Donde  $\bar{X}_x$  representa la media de cada muestra,  $S_x^2$  es la varianza que a su vez es el cuadrado de la desviación estándar y  $n_x$  indica el número de muestras. Como hipótesis nula se consideró que la diferencia observada entre las medias de ambas temporadas se debe al azar. Con un nivel de confianza ( $\alpha$ ) de 0.05.

### 4.5.2 Análisis por temporada

A fin de evaluar el comportamiento de los parámetros más significativos durante la ocurrencia de bruma, se obtuvo la media mensual de los casos de bruma más extensos de estas variables, permitiendo dividir la información en temporada de lluvia (junio a octubre) y seca (noviembre a mayo). A los datos por temporada se le aplicó una prueba *t*, similar a lo descrito en la *Sección 4.5.1*; sin embargo, una diferencia estadísticamente significativa no necesariamente significa que esta sea grande. Es decir, la prueba *t* solamente nos dice que tan probable (o no) es que la diferencia sea cero (Morales-Vallejo, 2008). Por ello fue

necesario acompañar los resultados de la prueba con el cálculo del tamaño del efecto ( $g$ ), su resultado nos dirá en qué grado la hipótesis nula es (o no) falsa (ecuación 7):

$$g = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sigma} \quad (7)$$

Donde  $\sigma$  es la desviación estándar, definida en la ecuación (8):

$$\sigma = \sqrt{\frac{(N_1)\sigma_{n-1(1)}^2 + (N_2)\sigma_{n-1(2)}^2}{N_1 + N_2 - 2}} \quad (8)$$

En este trabajo se utilizó el estadístico de Hedges en el que la desviación estándar utilizada es estimada usando en el denominador el término  $(n-1)$ . El tamaño de efecto puede interpretarse de acuerdo con valores relacionados con el grado en que el fenómeno está presente: meramente estadístico ( $g \sim 0.2$ ), sutil ( $g \sim 0.5$ ), y obvio ( $g \sim 0.8$ ) (Cohen, 1988; Fritz et al., 2012).

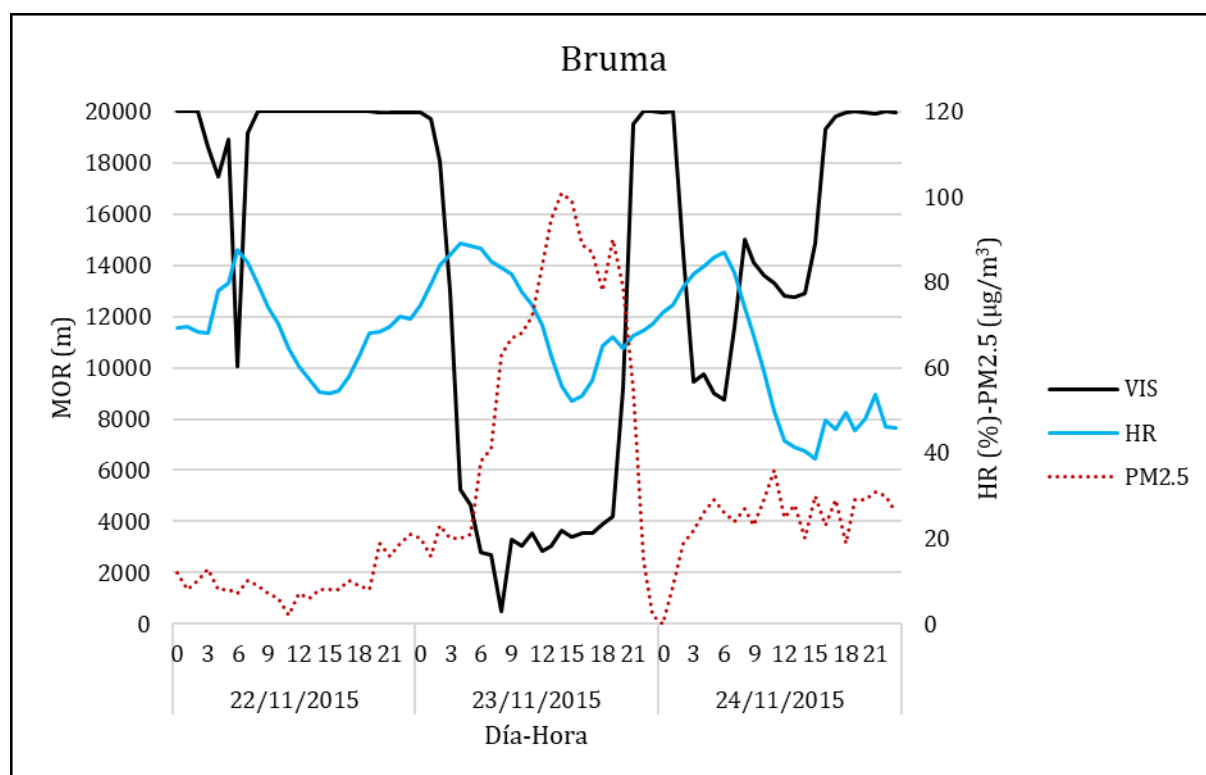
#### 4.5.2.1 Definición de valores umbrales

Se obtuvo la distribución de las frecuencias de los eventos de bruma en cada temporada. A partir de ello, fue posible establecer valores umbrales de ocurrencia tomando en consideración la frecuencia relativa de los eventos.

## Capítulo 5. Resultados y discusión

En este trabajo se analizó el periodo que abarca desde agosto de 2014 hasta diciembre de 2015, a excepción de enero de 2015 debido a la falta de datos del disdrómetro PWS100. En este análisis tampoco se consideraron los datos correspondientes al mes de noviembre de 2014 y octubre de 2015 ya que no se contaba con información suficiente de  $NO_x$ .

La Figura 7, muestra una serie de tiempo que permite comparar el comportamiento del  $MOR$  (línea negra),  $RH$  (línea azul) y  $PM_{2.5}$  (línea punteada) durante dos días sin bruma (22 y 24 de noviembre) con un caso de bruma (23 de noviembre). En el caso de la  $RH$  se observa el comportamiento que corresponde al ciclo diario característico de la variable. Por otro lado, durante el 23 de noviembre los valores de  $MOR$  se mantienen por debajo de los 10 km la mayor parte del día, mientras que la concentración de  $PM_{2.5}$  muestra el comportamiento contrario – es decir, las concentraciones de  $PM_{2.5}$  se encuentran en sus valores máximos – lo que sugiere una posible relación entre las variables.



**Figura 7.** Serie de tiempo correspondiente a los días 22, 23 y 24 de noviembre de 2015. En donde se muestra el comportamiento de  $MOR$  (línea negra),  $RH$  (línea azul) y  $PM_{2.5}$  (línea punteada).

Una vez que se definieron los períodos de ocurrencia de bruma basándose en la definición de la CMA (períodos donde los valores de  $MOR$  son menores a 10 km), se compararon las

medias mensuales de las variables meteorológicas (*TEMP*, *RH* y *WS*) y contaminantes (*NO<sub>x</sub>*, *SO<sub>2</sub>* y *PM<sub>2.5</sub>*) en condiciones de bruma y no bruma. El cálculo del estadístico *t* para cada mes se normalizó respecto al valor crítico observado en tablas (*t<sub>c</sub>*). Los resultados se graficaron en conjunto para las variables meteorológicas (Figura 8a) y contaminantes (Figura 8b). Es necesario tener en cuenta en la Figura 8 que la diferencia entre las variables (meteorológicas y contaminantes) en condiciones de bruma y no bruma se debe considerar significativa si el valor de *t/t<sub>c</sub>* es mayor a la unidad – indicado por la línea punteada –. Nótese que en ambas figuras no es posible observar algún patrón claro de significancia, puesto que todas las variables son significativas (o no) en diferentes meses de ambos años.

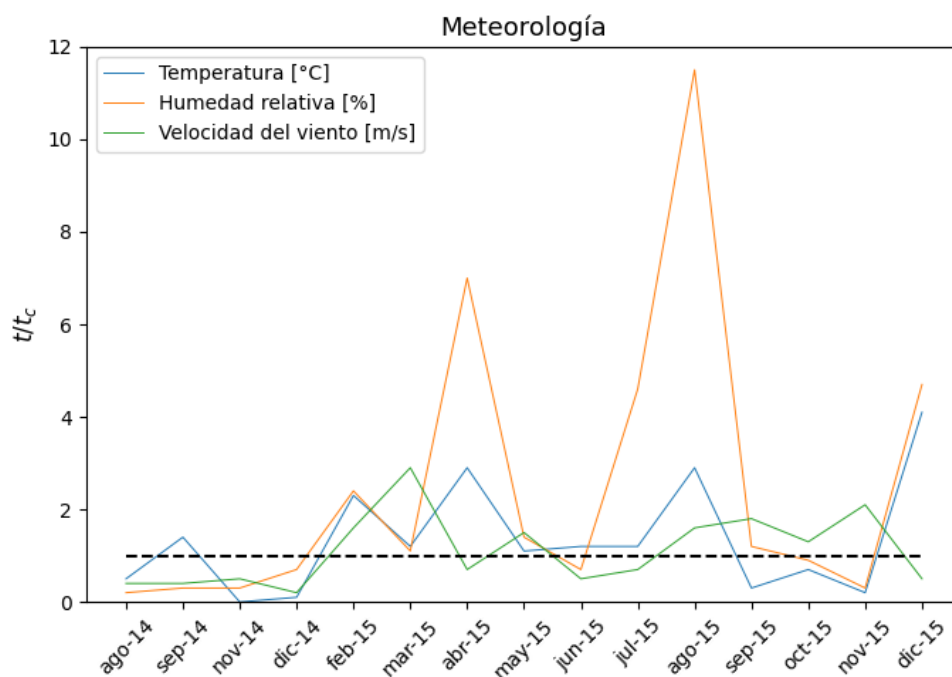
Con el propósito de encontrar algún cambio en la evolución de las variables durante los episodios de bruma, los meses seleccionados en este trabajo se dividieron en temporada de lluvia (junio a octubre) y seca (noviembre a mayo). La Tabla 3, presenta un resumen de los promedios de cada variable (que tienen una resolución horaria) durante los periodos seleccionados con condiciones de bruma y no bruma de ambos años para las temporadas mencionadas.

**Tabla 3.** Valores del promedio y desviación estándar de la media (en paréntesis) por temporada de temperatura, humedad relativa, velocidad del viento, *SO<sub>2</sub>*, *NO<sub>x</sub>* y *PM<sub>2.5</sub>* para los eventos de bruma y no bruma analizados en este trabajo. *n* en la columna de Condición óptica representa el número de datos horarios.

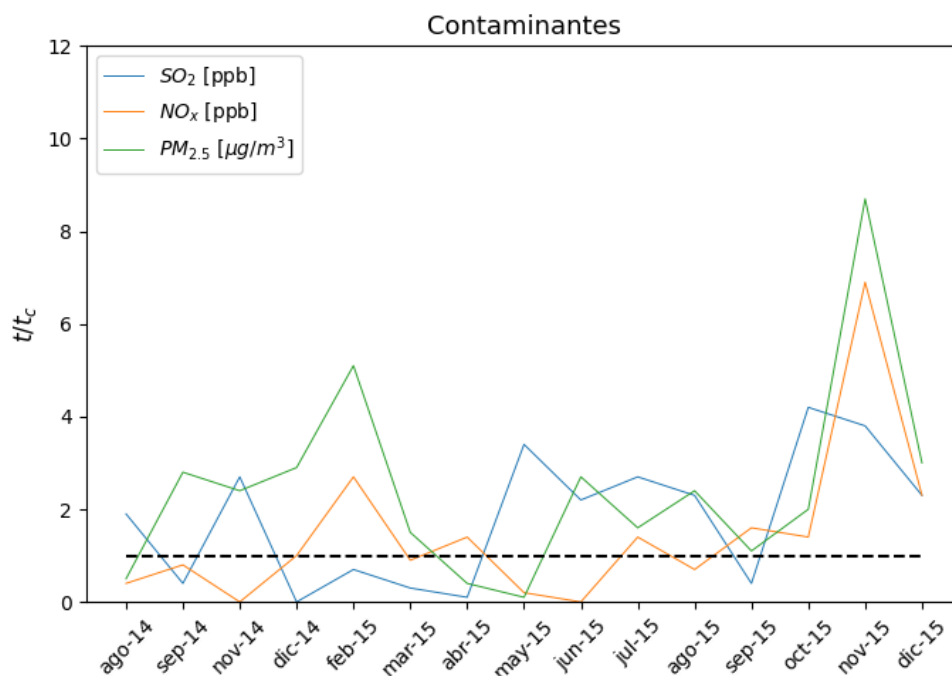
Temporada	Condición óptica	<i>TEMP</i> (°C)	<i>RH</i> (%)	<i>WS</i> (m/s)	<i>SO<sub>2</sub></i> (ppb)	<i>NO<sub>x</sub></i> (ppb)	<i>PM<sub>2.5</sub></i> (µg/m <sup>3</sup> )
Lluvia	Bruma (152)	15.2 (1.1)	84.1 (5.3)	1 (0.3)	2.8 (1.4)	39.6 (18.1)	19.2 (3.7)
	No bruma (92)	15.1 (1.4)	79.3 (7.1)	1 (0.3)	2 (0.7)	43.8 (16.5)	13.8 (4.5)
Seca	Bruma (104)	12.5 (1.2)	63.2 (4.9)	1 (0.2)	4.6 (22.2)	58 (16.4)	33.9 (5.4)
	No bruma (71)	13.8 (1.1)	53.4 (4.2)	1.2 (0.2)	4.2 (2.1)	42.8 (18.3)	18.7 (4.1)

Para el caso de la meteorología durante la temporada seca, se observa que la diferencia entre los valores de la media de la *TEMP* y *WS* en ambas condiciones es pequeña, pero se nota una variación mayor en la *RH*. Por el lado de los contaminantes atmosféricos, las diferencias más notables se dan entre las concentraciones de *NO<sub>x</sub>* y *PM<sub>2.5</sub>*. Para la temporada de lluvia, nuevamente toma mayor importancia la humedad relativa respecto a las demás variables meteorológicas. En el caso de los contaminantes atmosféricos, las diferencias de *NO<sub>x</sub>* y *PM<sub>2.5</sub>* disminuyen en magnitud con respecto a las de la temporada seca.

(a)



(b)



**Figura 8.** Parametrización de los valores de  $t/t_c$  resultantes de la comparación de las medias mensuales de las variables meteorológicas (a) y contaminantes (b) en periodos de bruma y no bruma.

Al considerar que los  $NO_x$  y el  $SO_2$  son compuestos precursores de la formación de aerosoles en la atmósfera (Zhao et al., 2018), la investigación se enfocó en el estudio de la relación del MOR con el efecto combinado de la RH y las concentraciones de las  $PM_{2.5}$ . En la Figura 9 se

muestra el comportamiento del *MOR*, *RH* y concentración de  $PM_{2.5}$  durante la temporada de lluvia y seca en el periodo estudiado. Durante la temporada de lluvia (Figura 9a) se observa que, independientemente del valor de *MOR*, la concentración de  $PM_{2.5}$  no rebasa los  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Aunque los episodios donde la visibilidad es baja ( $MOR < 10 \text{ km}$ ) se encuentran a lo largo de un rango amplio de *RH*, estos se ven mayormente acumulados entre aproximadamente el 70% y el 90% de *RH*; sin embargo, dentro de este intervalo, la concentración de  $PM_{2.5}$  se mantiene por debajo de  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Por otro lado, en la temporada seca (Figura 9b), el rango de concentración de  $PM_{2.5}$  se amplía hasta  $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ; sin embargo, la disminución de los valores de *MOR* se engloba a partir del 40% de *RH*. Aquí se muestra que la ocurrencia de baja visibilidad por debajo del 70% de *RH*, coincide con un aumento en la concentración de  $PM_{2.5}$ ; por ejemplo, en los casos de baja visibilidad que se encuentran cerca del mínimo de *RH* (~40%), la concentración de  $PM_{2.5}$  aumenta por encima de  $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

En resumen, la Figura 9 exhibe dos patrones de interacción entre la concentración de  $PM_{2.5}$  y la *RH* durante la ocurrencia de bruma. Se encontró que, para el caso de la temporada de lluvia, teniendo niveles elevados de *RH*, no es necesario contar con alta concentración de  $PM_{2.5}$  para tener un evento de bruma. Mientras que, durante la temporada seca ocurre lo contrario, en ocurrencia de bruma se cuenta con niveles menores de humedad y una alta concentración de  $PM_{2.5}$ .

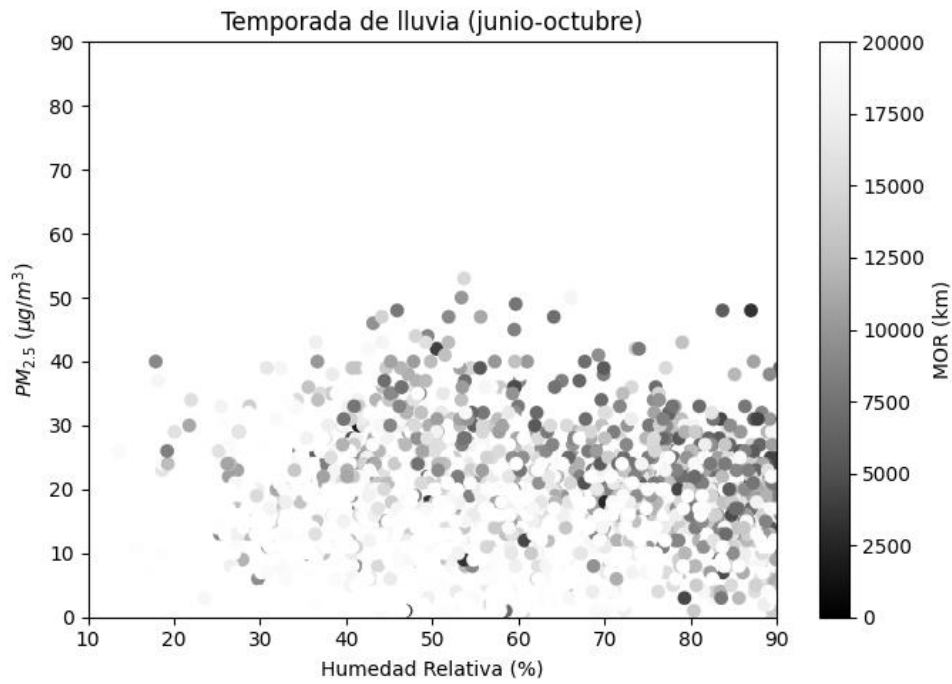
De este modo, la Tabla 4 resume los estadígrafos (media y desviación estándar) para *RH* y  $PM_{2.5}$ . En la tabla se observa que la media de  $PM_{2.5}$  alcanza aproximadamente el doble de unidades en la temporada seca con respecto a la de lluvia. Por su parte, la diferencia para las medias de la *RH*, a pesar de ser menor que la anterior, también presenta una diferencia considerable.

**Tabla 4.** Estadística descriptiva de cada temporada para las variables humedad relativa (*RH*) y partículas ( $PM_{2.5}$ ) durante periodos de bruma.

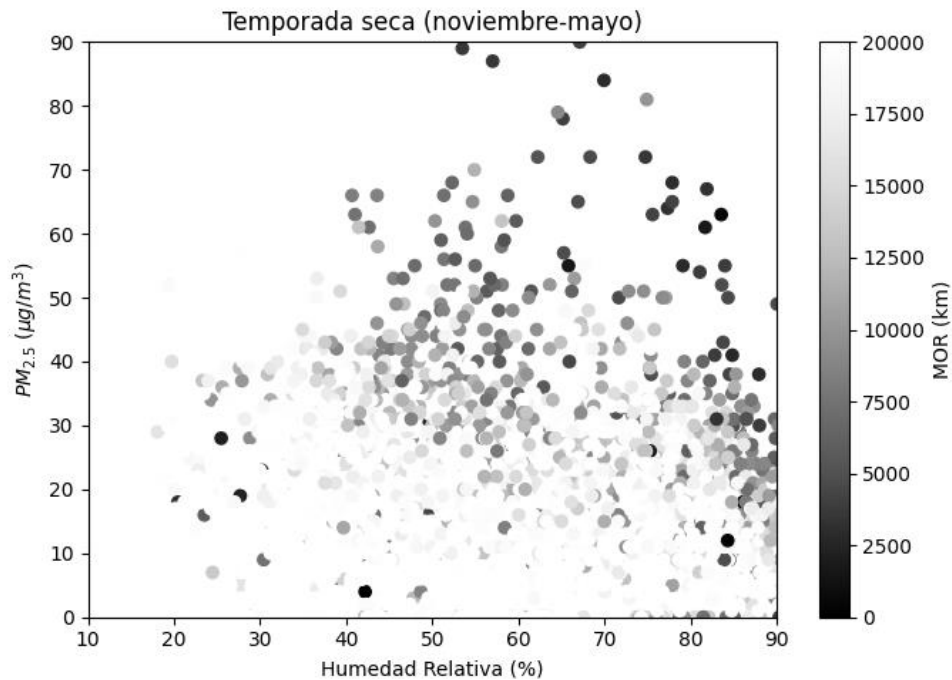
Variables	<i>RH</i> (%)		$PM_{2.5}$ ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	
	Lluvia	Seca	Lluvia	Seca
Media	81.4	63.2	19.2	33.9
Desviación estándar	5.3	4.9	3.7	5.4



(a)



(b)



**Figura 9.** Dispersión de los valores de *MOR* en función de la *RH* y  $PM_{2.5}$  para (a) la temporada de lluvia (junio-2015) y (b) la temporada seca (diciembre-2015).

La Tabla 5 resume los resultados del contraste de medias de la *RH* y de  $PM_{2.5}$  en condiciones de bruma durante la temporada de lluvia (junio a octubre) y seca (noviembre a mayo) y permite comparar los resultados del cálculo de *t* contra el valor crítico de la misma para las dos pruebas que se realizaron. Para ambas, la hipótesis nula planteaba que no había

diferencia entre las medias de la variable (*RH* o *PM<sub>2.5</sub>*) de las dos temporadas establecidas. Entonces, considerando que la hipótesis nula se rechaza cuando  $t_{calculada} > t_{crítica}$ , los resultados confirman que tanto para la *RH* como para las *PM<sub>2.5</sub>* la diferencia entre las medias de las temporadas puede considerarse estadísticamente significativa. No obstante, como se mencionó en la *Sección 4.5.2*, si bien este resultado señala que la diferencia observada se encuentra fuera de lo que podría atribuirse al azar o casualidad, no indica el grado de la diferencia.

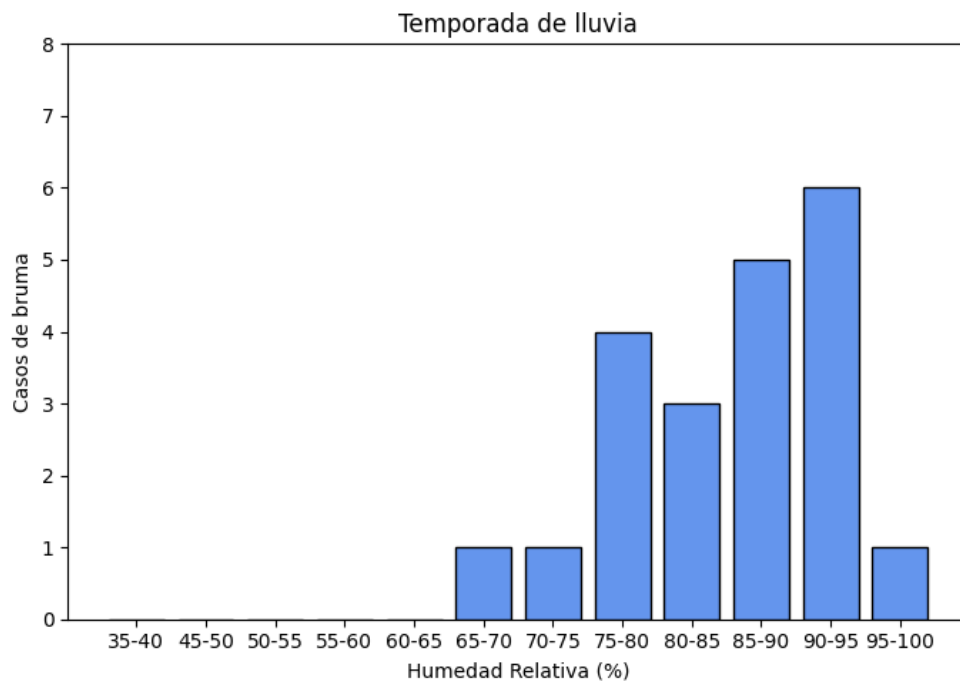
**Tabla 5.** Estadística inferencial para las variables humedad relativa (*RH*) y partículas (*PM<sub>2.5</sub>*) durante periodos de bruma en las temporadas de lluvia y seca, considerando un 95% de confianza.

<b>Variabes</b>	<b><i>RH</i></b>	<b><i>PM<sub>2.5</sub></i></b>
<b><i>t</i> calculada</b>	7.8	6.2
<b><i>t</i> crítica (dos colas)</b>	2.1	
<b>Valor p (dos colas)</b>	2.7E-06	3.2E-05
<b>Tamaño del efecto (g)</b>	4.1	3.1

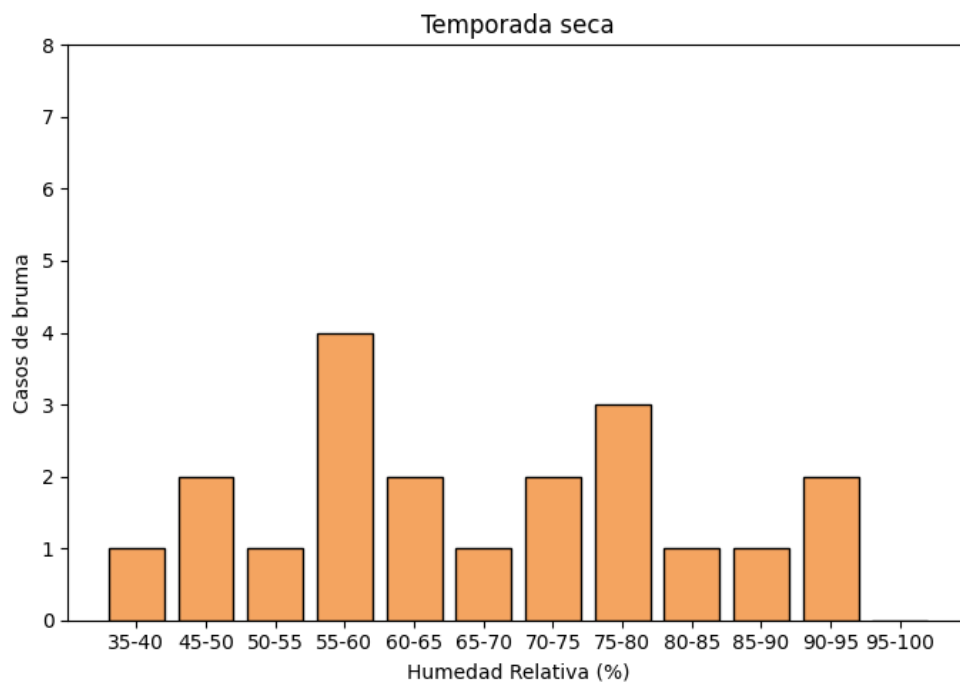
La Tabla 5 también muestra que el cálculo del tamaño del efecto (*g*) es mayor que 0.8, lo que indica que la diferencia entre las medias es evidente (Cohen, 1988 y Fritz et al., 2012). Este resultado indica que las condiciones que propician la ocurrencia de eventos de lluvia son muy diferentes en las temporadas del año.

Gracias a los resultados anteriores, se siguió con el análisis de la ocurrencia de bruma bajo diferentes condiciones meteorológicas y ambientales. Para ello, se obtuvo la distribución de la frecuencia de eventos de bruma para diferentes rangos, tanto de *RH* (Figura 10) como de concentración de *PM<sub>2.5</sub>* (Figura 11), en las temporadas de lluvia y seca. En la Figura 9a, la frecuencia en temporada de lluvia muestra un aumento importante en el número de eventos de bruma a partir del rango del 75-80% mientras que para la temporada seca (Figura 10b) esto ocurre antes en la categoría del 55-60%. Por otro lado, la concentración de *PM<sub>2.5</sub>* (Figura 11) en temporada de lluvia presenta un número importante de eventos de bruma desde los 15-20  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ; en tanto que, para la temporada seca, la ocurrencia de bruma aumenta a partir del rango de 30-35  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

(a)

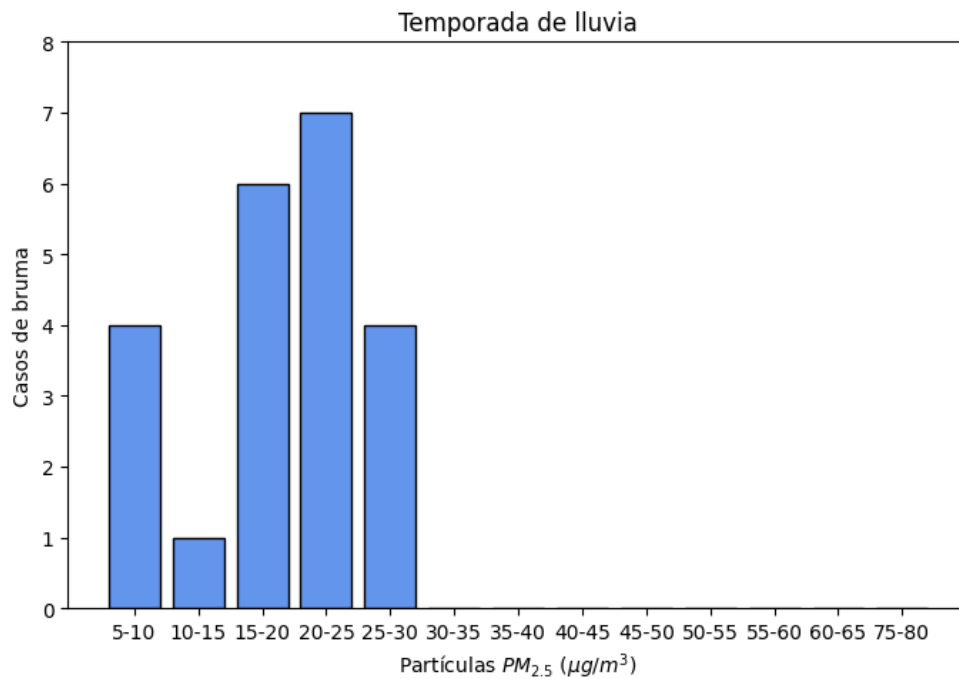


(b)

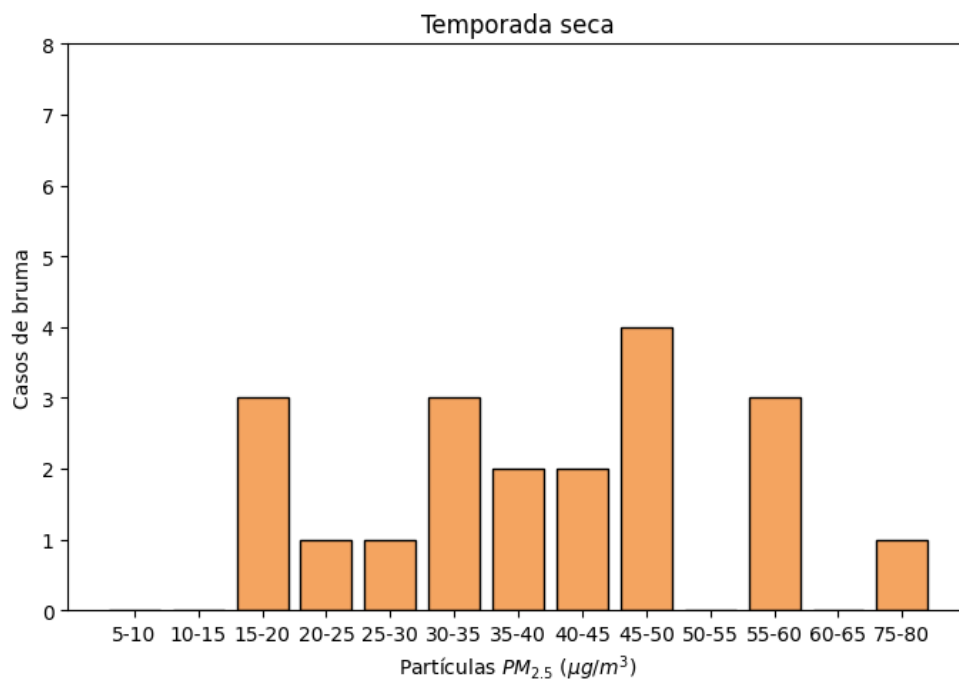


**Figura 10.** Distribución de eventos de bruma en diferentes rangos de humedad en temporada de lluvia (a) y seca (b).

(a)



(b)



**Figura 11.** Distribución de eventos de bruma en diferentes rangos de concentración de partículas en temporada de lluvia (a) y seca (b).

Una vez analizados los histogramas, se buscó definir la probabilidad de ocurrencia de bruma estableciendo los valores umbrales de  $RH$  y  $PM_{2.5}$  para que exista la probabilidad de ocurrencia de bruma (Tabla 6). Para ello, se utilizó una frecuencia relativa del 80% de los eventos registrados y se obtuvo que:

- a) Para la temporada de lluvia (junio a octubre) se necesita, como mínimo, un 75% de *RH*, así como una concentración mayor a  $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para que los valores de *MOR* puedan disminuir por debajo de 10 km.
- b) En cambio, para obtener bruma durante la temporada seca (diciembre a mayo) el valor de la *RH* disminuye hasta el 55%; sin embargo, el valor umbral de la concentración de  $\text{PM}_{2.5}$  aumenta a casi el doble de las necesarias para la temporada de lluvia, alcanzando  $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

**Tabla 6.** Valores umbral para humedad relativa (*RH*) y partículas ( $\text{PM}_{2.5}$ ) considerando una frecuencia relativa de ~80% de casos.

Temporada	<i>RH</i> (%)	$\text{PM}_{2.5}$ ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
Lluvia	75	15
Seca	55	25

Varios autores han estudiado la relación que existe entre *RH* y  $\text{PM}_{2.5}$ . En relación con la *RH*, Liu et al. (2018) reporta que la CMA establece un valor de  $RH < 80\%$  para la ocurrencia de bruma; de forma similar, Quan et al. (2011) recopila información de diversos reportes y concluye que, de forma general, la *RH* se mantiene por debajo del 95% en condiciones de bruma. Bajo este criterio, los resultados muestran coherencia puesto que se mantienen por debajo del límite establecido de *RH*.

Otros autores también han caracterizado diferentes condiciones de *RH*. Tal es el caso de Guo et al. (2020) en donde se definen la bruma seca ( $RH < 60\%$ ) y bruma húmeda ( $RH > 60\%$ ); de forma similar Yang et al. (2021) establece diferentes condiciones de *RH* más específicas (Tabla 7).

**Tabla 7.** Resumen de los resultados reportados por Yang et al. (2021)

Condición de <i>RH</i>	<i>RH</i> (%)
Seca	$< 40$
Moderada	$86 > RH > 40$
Alta	$> 86$

Comparando los resultados de la Tabla 6 con la información que proporciona la Tabla 7 es posible notar que los valores umbral para las temporadas establecidas en nuestro estudio recaen dentro de la *RH* moderada. Esto no es desalentador para nuestros resultados puesto que son estudios realizados en sitios con condiciones atmosféricas diferentes. Por otro lado, considerando la clasificación de Guo et al. (2020), los valores obtenidos para las temporadas

seca y húmeda coinciden con los rangos establecidos para la bruma seca y húmeda, respectivamente. Dentro del análisis que ofrece Yang et al. (2021), también se describe la forma en que las  $PM_{2.5}$  afectan en los diferentes rangos de  $RH$ . Dentro de las condiciones secas ( $RH < 40\%$ ) se explica que las  $PM_{2.5}$  son el principal factor que disminuye la visibilidad, mientras que en condiciones moderadas ( $86 > RH > 40$ ) explican que la  $RH$  tiene mayor influencia en la visibilidad. Lo cual coincidiría con lo obtenido en la Tabla 6.

Finalmente, Wang et al. (2019) describe que el efecto que las  $PM_{2.5}$  tienen sobre la visibilidad está fuertemente relacionado con la  $RH$  del ambiente. En sus conclusiones establece concentraciones de  $PM_{2.5}$  bajo las cuales hay un efecto en la visibilidad; sin embargo, los valores reportados son de 50-100  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , los cuales se encuentran muy por arriba de las concentraciones observadas en este estudio. No obstante, se confirma que cuando la  $RH$  es mayor que 40%, el efecto de esta variable sobre la visibilidad es indiscutible.

## Capítulo 6. Conclusiones

En este estudio se analizaron los datos meteorológicos, ambientales y del *Alcance Óptico Meteorológico (MOR)* obtenidos durante los años 2014 y 2015 en la plataforma de muestreo instalada en el techo del Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático, al sur de la Ciudad de México. La plataforma pertenece a la Red Universitaria de Observatorios Atmosféricos de la UNAM. Los resultados del análisis realizado permiten concluir:

- Los eventos de ocurrencia de bruma fueron definidos considerando disminuciones de *MOR* por debajo de 10 km en ausencia de precipitación pluvial. Los casos seleccionados para el análisis se contrastaron con eventos sin bruma ( $MOR > 10$  km) 24 horas antes para que la capa límite atmosférica en el área de estudio tuviera características similares.
- Mediante pruebas de significancia, se determinó que el comportamiento de las variables *RH* y  $PM_{2.5}$  presenta diferencias importantes entre condiciones de bruma y no bruma.
- La bruma no ocurre bajo las mismas condiciones de *RH* y concentración de  $PM_{2.5}$  a lo largo del año. Un análisis más detallado, separando los eventos de bruma durante la temporada de lluvia (junio a octubre) y seca (noviembre a mayo) en el sitio de estudio, muestra diferencias significativas y relevantes en el comportamiento de la *RH* y la concentración de  $PM_{2.5}$  durante las temporadas establecidas.
- Se establecieron valores umbrales a partir de los cuales se tiene un 80% de probabilidad de ocurrencia de bruma para cada temporada.
  - En temporada de lluvias se observó que la bruma ocurre cuando la *RH* alcanza un mínimo de 75% y  $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$  de concentración de  $PM_{2.5}$ .
  - En temporada seca el valor umbral de  $PM_{2.5}$  aumenta a  $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , pero el de *RH* disminuye hasta 55%.

Durante la temporada de lluvias, las partículas “disponibles” en la atmósfera pueden ser removidas por diversos factores como las nubes y las constantes precipitaciones, así como por los vientos, lo que produce bajos valores de concentración de  $PM_{2.5}$ . En este caso, los resultados obtenidos sugieren que es necesaria una alta humedad – la cual es aportada por las mismas condiciones del ambiente en esta temporada – para que las partículas “crezcan” lo suficiente y den lugar al fenómeno de bruma. Por otro lado, en la temporada de secas – cuando las concentraciones de  $PM_{2.5}$  se mantienen altas – no es necesario que la partícula “crezca”, puesto que el factor clave bajo estas condiciones es la cantidad de las mismas y no su tamaño.

## 6.1 Recomendaciones

Para complementar el estudio se sugiere mejorar la resolución de los datos de gases precursores de partículas  $PM_{2.5}$  para lograr un estudio detallado sobre el comportamiento de estos factores durante la ocurrencia de bruma y conocer más acerca de los posibles procesos involucrados en la ocurrencia de este fenómeno.

Además, sería interesante realizar un estudio similar en diferentes sitios para verificar si otros contaminantes atmosféricos y variables meteorológicas pueden afectar la formación de bruma bajo diferentes condiciones ambientales.



# Referencias

1. Bennett, A. (2012). Introduction to atmospheric visibility estimation. Bristol Industrial and Research Associates Limited.
2. Bravo, H. A., Saavedra, M. I., Torres, R. J., Lomas, G. A., Nava, D. T., Tirado, D. S. (1988). Particulate carbon, a significant contributor to the visibility reduction of Mexico City. *Geofísica Internacional*, 27-2. 241-261.
3. Campbell Scientific Inc. (2012). PWS100 present weather sensor. Instruction manual. Revision 3/12. Logan, UT: Campbell Scientific, Inc.
4. Campbell Scientific Inc. (2021). HMP155A Temperature and Relative Humidity Probe. Product Manual. Revisión 10/21.
5. Campbell Scientific Inc. (2022). WindSonic4. Two-Dimensional Sonic Anemometer with SDI-12 Output. Product Manual. Revisión 01/22.
6. Cohen, J., (1988). *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences*, second ed. Lawrence Earlbaum Associates, New Jersey.
7. de Fornel, F., y Favennec, P. N. (Eds.). (2010). *Measurements Using Optic and RF Waves*. ISTE.
8. Deng, J., Wang, T., Jiang, Z., Xie, M., Zhang, R., Huang, X., y Zhu, J. (2011). Characterization of visibility and its affecting factors over Nanjing, China. *Atmospheric Research*, 101(3), 681-691.
9. Dirección de Monitoreo Atmosférico. (s.f.). <http://www.aire.cdmx.gob.mx/aire/default.php?opc=%27ZaBhnmI=%27&dc=Yg==>
10. Eidels-Dubovoi, S. (2002). Aerosol impacts on visible light extinction in the atmosphere of Mexico City. *The Science of the Total Environment*, 287. 213-220.
11. Ellis, R. A., Sandford, A. P., Jones, G. E., Richards, J., Petzing, J., y Coupland, J. M. (2006). New laser technology to determine present weather parameters. *Measurement Science and Technology*, 17(7), 1715–1722.
12. EPA Systems. (2018). SIMAT Air Quality Monitoring Site Audit Report.
13. Fei, Y., Liao, J., y Zhang, Z. (2023). Consistency and Discrepancy between Visibility and PM<sub>2.5</sub> Measurements: Potential Application of Visibility Observation to Air Quality Study. *Sensors*, 23(2), 898.
14. Fritz, C.O., Morris, P.E., Richler, J.J., (2012). Effect size estimates: current use, calculations, and interpretation. *Journal of experimental psychology. General* 141, 2–18. <https://doi.org/10.1037/a0024338>.
15. Gao, M., Sherman, P., Song, S., Yu, Y., Wu, Z., y McElroy, M. B. (2019). Seasonal prediction of Indian wintertime aerosol pollution using the ocean memory effect. *Science advances*, 5(7), eaav4157.
16. Goulet-Pelletier, J.-C., Cousineau, D., (2018). A review of effect sizes and their confidence intervals, Part I: The Cohen's d family, *The Quantitative Methods for Psychology* 14, 242–265. doi: 10.20982/tqmp.14.4. p242.
17. Guo, B., Wang, Y., Zhang, X., Che, H., Zhong, J., Chu, Y., y Cheng, L. (2020). Temporal and spatial variations of haze and fog and the characteristics of PM<sub>2.5</sub> during heavy pollution episodes in China from 2013 to 2018. *Atmospheric Pollution Research*, 11(10), 1847-1856.
18. Horvath, H. (1981). Atmospheric visibility. *Atmospheric Environment* (1967), 15(10-11), 1785-1796.

19. Horvath, H., y Noll, K. E. (1969). The relationship between atmospheric light scattering coefficient and visibility. *Atmospheric Environment* (1967), 3(5), 543-550.
20. Huang, W., Cai, L., Dang, H., Jiao, Z., Fan, H., y Cheng, F. (2019). Review on formation mechanism analysis method and control strategy of urban haze in China. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 27(7), 1572-1577.
21. Husar, R. B., Holloway, J. M., Patterson, D. E., y Wilson, W. E. (1981). Spatial and temporal pattern of eastern US haziness: A summary. *Atmospheric Environment* (1967), 15(10-11), 1919-1928.
22. INEGI. Compendio de información geográfica municipal 2010. Coyoacán, Distrito Federal. 2010
23. International Civil Aviation Organization. (1981). *Manual of Runway Visual Range Observing Reporting Practices*. The Organization.
24. Jáuregui, E. (1983). Visibility trends in Mexico City. *Erdkunde*, 296-299.
25. Jáuregui, E. (2000). *El clima de la ciudad de México* (Vol. 1). Plaza y Valdés.
26. Jáuregui, E., y Romales, E. (1996). Urban effects on convective precipitation in Mexico City. *Atmospheric Environment*, 30(20), 3383-3389.
27. Jáuregui, E.O., (1971). Mesomicroclima de la Ciudad de Mexico. *Boletín del Instituto de Geografía, UNAM, Mexico*.
28. Jiusto, J. E. (1981). Fog structure. *Clouds- Their formation, optical properties, and effects*, 236-239.
29. Kim, I. I., y Korevaar, E. J. (2001). Availability of free-space optics (FSO) and hybrid FSO/RF systems. In *Optical Wireless Communications IV* (Vol. 4530, pp. 84-95). SPIE.
30. Kim, K. W. (2018). The comparison of visibility measurement between image-based visual range, human eye-based visual range, and meteorological optical range. *Atmospheric Environment*, 190, 74-86.
31. Lee, Z., y Shang, S. (2016). Visibility: how applicable is the century-old Koschmieder model? *Journal of the Atmospheric Sciences*, 73(11), 4573-4581.
32. Liu, W., Han, Y., Li, J., Tian, X., y Liu, Y. (2018). Factors affecting relative humidity and its relationship with the long-term variation of fog-haze events in the Yangtze River Delta. *Atmospheric Environment*, 193, 242-250.
33. Liu, Z., Chen, Y., Gu, X., Yeoh, J. K., y Zhang, Q. (2022). Visibility classification and influencing-factors analysis of airport: A deep learning approach. *Atmospheric Environment*, 278, 119085.
34. Lutgens, F. K., Tarbuck, E. J., y Tusa, D. (1995). *The atmosphere* (Vol. 462). Englewood Cliffs, NJ, USA: Prentice-Hall.
35. Malm, W. C. (1999). *Introduction to visibility* (Doctoral dissertation, Colorado State University. Libraries).
36. Mauer, L. J., y Taylor, L. S. (2010). Water-solids interactions: deliquescence. *Annual review of food science and technology*, 1, 41-63.
37. Miclea, R. C., Ungureanu, V. I., Sandru, F. D., y Silea, I. (2021). Visibility enhancement and fog detection: Solutions presented in recent scientific papers with potential for application to mobile systems. *Sensors*, 21(10), 3370.
38. Middleton, W. E. K. (1957). Vision through the atmosphere. In *geophysik ii/geophysics ii* (pp. 254-287). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
39. Middleton, W. K. (1960). Bouguer, Lambert, and the theory of horizontal visibility. *Isis*, 51(2), 145-149.

40. Molina, L. T., de Foy, B., Martínez, O. V., y Paramo Figueroa, V. H. (2009). Air quality, weather and climate in Mexico City. *World Meteorological Organization (WMO) Bulletin*, 58(1), 48.
41. Morales-Vallejo, P. (2008), *Estadística Aplicada a las Ciencias Sociales*. Universidad Pontificia Comillas: Madrid.
42. Munoz-Alpizar, R., Blanchet, J. P., Quintanar, A. I. (2003). Application of the NARCM model to high-resolution aerosol simulations: Case study of Mexico City basin during the Investigación sobre Materia Particulada y Deterioro Atmosférico-Aerosol and Visibility Research measurements campaign. *Journal of Geophysical Research*, 108. 4462.
43. Observatorio Meteorológico del Colegio de Geografía. (2023, 11 de marzo). Normales Climatológicas. <https://goo.su/L780E>
44. Pruppacher, H. R., y Klett, J. D. (2012). *Microphysics of clouds and precipitation: Reprinted 1980*. Springer Science & Business Media.
45. Quan, J., Zhang, Q., He, H., Liu, J., Huang, M., y Jin, H. (2011). Analysis of the formation of fog and haze in North China Plain (NCP). *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11(15), 8205-8214.
46. Queißer, M., Harris, M., y Knoop, S. (2022). Atmospheric visibility inferred from continuous-wave Doppler wind lidar. *Atmospheric Measurement Techniques*, 15(18), 5527-5544.
47. Red Universitaria de Observatorios Atmosféricos. (2021, 22 de marzo). Observatorio Atmosférico UNAM. Ficha técnica. <https://goo.su/ufdzu>.
48. Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México, SEDEMA. (2022). *Calidad del aire en la Ciudad de México, Informe 2019*. Dirección General de Calidad del Aire, Dirección de Monitoreo de Calidad del Aire.
49. Seinfeld, J. I. y Pandis, S. N. (1998). Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change. *Environment: Science and Policy for Sustainable Development*, 40(7), 26-26.
50. Sheng-Jie, J., Da-Ren, L., y Yue-Jian, X. (2014). An optical disdrometer for measuring present weather parameters. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 7(6), 559-563.
51. Starchenko, A. V., Barashkova, N. K., Kizhner, L. I., Volkova, M. A., Kuzhevskaya, I. V., y Bart, A. A. (2016). Meteorological optical range predictability with the use of high resolution mesoscale models. In *22nd International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics (Vol. 10035, pp. 1475-1479)*. SPIE.
52. Sun, X., Zhao, T., Liu, D., Gong, S., Xu, J., y Ma, X. (2020). Quantifying the influences of PM<sub>2.5</sub> and relative humidity on change of atmospheric visibility over recent winters in an urban area of East China. *Atmosphere*, 11(5), 461.
53. Thermo Scientific.(2010). FH62C14 Instruction Manual: Continuous Ambient Particulate Monitor.
54. United States. Environmental Protection Agency. Office of Air Quality Planning and Standards. (1979). *Protecting Visibility: An EPA Report to Congress*. US Environmental Protection Agency.
55. Wallace, J. M., y Hobbs, P. V. (2006). *Atmospheric science: an introductory survey (Vol. 92)*. Elsevier.
56. Wang, L., Xu, J., Yang, J., Zhao, X, Wei, W., Cheng, D., Pan, X. y Su, J. (2012). Understanding haze pollution over the southern Hebei area of China using the CMAQ model. *Atmospheric Environment*, 56, 69-79.

57. Wang, X., Zhang, R., & Yu, W. (2019). The effects of PM<sub>2.5</sub> concentrations and relative humidity on atmospheric visibility in Beijing. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124(4), 2235-2259.
58. Went, F. W. (1960). Organic matter in the atmosphere, and its possible relation to petroleum formation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 46(2), 212-221.
59. World Meteorological Organization. (2008). Guide to meteorological instruments and methods of observation. Secretariat of the World Meteorological Organization.
60. World Meteorological Organization. (2008). Guide to meteorological instruments and methods of observation. Secretariat of the World Meteorological Organization.
61. Wu, Y., Lv, M., An, L. y Xu, H. (2017) Analysis of Meteorological Conditions for Fog and Haze in the Eastern and Central Regions of China during January, 2013. *Atmospheric and Climate Sciences*, 7, 577-587. doi: 10.4236/acs.2017.74042.
62. Yang, Y., Ge, B., Chen, X., Yang, W., Wang, Z., Chen, H., ... y Wang, Z. (2021). Impact of water vapor content on visibility: Fog-haze conversion and its implications to pollution control. *Atmospheric Research*, 256, 105565.
63. Zafar, S., y Khalid, H. (2021). Free space optical networks: applications, challenges and research directions. *Wireless Personal Communications*, 121(1), 429-457.
64. Zhang F., Xu, L., Chen, J., Chen, X., Niu, Z., Lei, T., Li, C. y Zhao, J. (2013). Chemical characteristics of PM<sub>2.5</sub> during haze episodes in the urban of Fuzhou, China. *Particuology*, 11(3), 264-272.
65. Zhang, Q., Quan, J., Tie, X., Li, X., Liu, Q., Gao, Y., y Zhao, D. (2015). Effects of meteorology and secondary particle formation on visibility during heavy haze events in Beijing, China. *Science of the Total Environment*, 502, 578-584.
66. Zhao D, and Schmitt, S. H. and Wang, M. y Acir, I.-H. y Tillmann, R. y Tan, Z. y Novelli, A. y Fuchs, H. y Pullinen, I. y Wegener, R. y Rohrer, F. y Wildt, J. y Kiendler-Scharr, A. y Wahner, A. y Mentel, T. F., (2018) Effects of NO<sub>x</sub> and SO<sub>2</sub> on the secondary organic aerosol formation from photooxidation of  $\alpha$ -pinene and limonene. <https://doi.org/10.5194/acp-18-1611-2018>