



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
**POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA**

# **Procesos físicos en la formación y el pronóstico de niebla**

**TESIS**

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
DOCTORA EN CIENCIAS DE LA TIERRA

PRESENTA:

POHEMA DE JESÚS GONZÁLEZ VIVEROS

DIRECTOR

DR. ERNESTO DOS SANTOS CAETANO NETO  
INSTITUTO DE GEOGRAFÍA, UNAM.

CODIRECTOR

DR. FERNANDO GARCÍA GARCÍA  
INSTITUTO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA Y CAMBIO CLIMÁTICO, UNAM.

CIUDAD DE MÉXICO, ENERO 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.

Of. No. PCT/CSG/119/19

Asunto: Aprobación de tema, asesor de tesis  
y asignación de jurado para examen de grado.

**GONZÁLEZ VIVEROS POHEMA DE JESÚS**

ESTUDIANTE DE DOCTORADO

P R E S E N T E,

El Comité Académico de Posgrado, reunido el 29 de enero del año en curso, aprobó el título de tesis **"Procesos físicos en la formación y el pronóstico de niebla"**. Así mismo ratificó al Dr. Ernesto Caetano Neto, como su asesor de tesis y designó a los siguientes investigadores como jurado para su examen de grado.

Dr. Guillermo Montero Martínez	Presidente
Dr. Agustín García Reynoso	Vocal
Dr. Ernesto Caetano Neto	Secretario
Dr. Lester Augusto Alfonso Díaz	Suplente
Dr. Juan Cervantes Pérez	Suplente

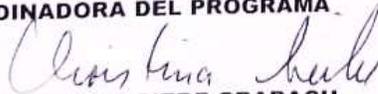
Sin otro particular por el momento, reciba un saludo cordial.

Atentamente,

**"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"**

Ciudad Universitaria, Cd. Mx., a 29 de enero de 2019.

**COORDINADORA DEL PROGRAMA**



**DRA. CHRISTINA SIEBE GRABACH**

CSG'gaba

## *---- Agradecimientos ----*

Agradezco al Posgrado en Ciencias de la Tierra, UNAM. En particular, al Instituto de Ciencias Atmosféricas y Cambio Climático por brindarme la oportunidad de obtener el grado de doctora y por todo lo que conlleva obtenerlo.

Mi total agradecimiento al Dr. Fernando García García y al Dr. Ernesto Dos Santos Caetano por dirigir esta investigación, por todo su apoyo, su tiempo y conocimiento que me brindaron. Por las enseñanzas de cómo ser un excelente tutor académico y por las oportunidades de nuevas experiencias académicas que me han permitido fortalecer mi preparación profesional. Muchas gracias por todo.

Al grupo de trabajo de Física de Nubes, Dr. Guillermo Montero y al Ing. Víctor Zarraluqui, muchas gracias porque siempre conté con su ayuda, disposición, orientación académica y buenos momentos. También, gracias al Ing. Zarraluqui por la asesoría para realizar algunos mapas.

Gracias al Ing. Gustavo Vázquez Cruz del Instituto de Geografía por su apoyo con Weather Research & Forecasting (WRF).

Gracias al Dr. Aron Jazcilevich Diamant y al Dr. Friso Holwerda por sus comentarios y evaluaciones como comité tutor.

Dr. Juan Cervantes Pérez, Dr. Guillermo Montero, Dr. Lester Alfonso y al Dr. Agustín Reinoso, sinodales de esta tesis, muchas gracias por sus comentarios y revisión de este trabajo.

Al Lic. Federico Acevedo, por sus pláticas meteorológicas y sus enseñanzas, que sirvieron en este trabajo para alimentar los temas que me apasionan.

Gracias al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca otorgada durante los años de preparación académica para este grado.

### **\*\*\* Agradecimientos personales \*\*\***

*Me encuentro eternamente agradecida por vivir esta experiencia y tener la oportunidad de estudiar e investigar lo que me apasiona.*

A mi padre: **Julián González Lendecky**, quien siempre me está enseñando que lo importante trasciende más allá de la memoria.

A mi madre: **Rosalía Viveros González**, quien con su ejemplo y fortaleza me enseña lo que es importante en esta vida.

Agradezco infinitamente su amor, su apoyo en todos los sentidos, dedicación, palabras de aliento y tantas cosas que me brindan día a día. Y eternamente agradecida porque aún puedo aprender de ustedes. Los amo.

**Alejandro Chávez Rodríguez**, gracias por ser parte de mi fuerza, por tu apoyo, comprensión, alegrías, por escucharme y alentarme, pero sobre todo por tu amor que me regalas diariamente. Gracias mi amor, 7!

A **Pohema Yollitzin**, que tengo el privilegio de ser tu madre, si en un futuro lees esto, ten la confianza de que puedes lograr lo que te propongas con determinación y metiéndole amor a lo que hagas. Un día alguien muy sabio me dijo: "si no lo disfrutas, no lo hagas".

Gracias a Romyna R. Palencia, por estar al pendiente de este proceso, lo cual muchas veces sirvió de inspiración.

Gracias a todas las personas, que durante esta investigación me brindaron de alguna forma su apoyo, creyendo en mí. Gracias.

Sé que esto es inusual y, por favor está muy alejado de que se tome como ofensa, pero hay seres más allá de seres humanos, que regalan la tranquilidad, esa tranquilidad que buscaba en los momentos que uno flaquea, sin contar que estuvieron presente en aquellos desvelos al escribir algunas páginas, sí, estoy agradecida por tener la sensibilidad de apreciar una amistad perruna: Toby y Laika.

Gracias a Dios.

---

# Índice

Resumen	1
Abstract	2
<b>Capítulo I</b>	<b>3</b>
Introducción	3
Motivación	5
Planteamiento del problema	5
Objetivos	5
Antecedentes	6
Características de niebla según su mecanismo de formación	7
Características de niebla en un radiosondeo	10
Región de estudio	13
Cuenca de México	13
Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México	14
Datos	15
Reanálisis	15
Datos GFS	16
<b>CAPITULO II: Análisis de reporte de niebla a través de los datos METAR en el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México (AICM).</b>	<b>17</b>
Metodología	17
Resultados	19

<b>CAPITULO III: Modelación de niebla en la Cuenca de México</b>	<b>23</b>
Weather Research and Forecasting (WRF)	24
Parametrizaciones	27
Parametrizaciones microfísicas	27
Metodología	30
Resultados	33
Análisis de la salida de WRF y su relación con la niebla.	48
Discusión de parametrizaciones	55
<b>CAPITULO IV: Pronóstico de niebla en la Cuenca de México</b>	<b>58</b>
Metodología	58
Resultados	59
<b>Conclusiones</b>	<b>63</b>
<b>Anexo A.</b> Eventos de niebla: Caracterización y Modelación.	65
<b>Anexo B:</b> Fechas de eventos de niebla en el AICM 1999-2018	78
<b>Anexo C:</b> Configuración de WRF	82
<b>Anexo D:</b> Configuración de WRF	85
<b>Referencias</b>	<b>86</b>

## Resumen

La niebla es un conjunto de gotitas de agua (diámetro de 2 - 50  $\mu\text{m}$ ) suspendidas en la atmósfera, cerca de la superficie, que restringe la visibilidad a menos de 1 km. Este fenómeno representa un peligro para la operación de sistemas de transporte, como aeropuertos, por lo que su predicción es esencial en temas de seguridad, teniendo un alto valor económico. Se realizó una climatología de niebla y la modelación de eventos de niebla para el periodo de 1999 – 2018 reportados por METAR del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México (AICM). Se presenta un estudio de simulación de niebla para la Cuenca de México realizado con el modelo Weather Research and Forecasting (WRF). Los parámetros evaluados incluyeron: la hora de inicio y la duración de la niebla simulada; la concentración de agua líquida de la nube; y la temperatura ambiente y la humedad medida cerca de la superficie. Se realizó un análisis de las parametrizaciones microfísicas y de capa límite planetaria de WRF aplicadas a la modelación de niebla; y se propuso una configuración del modelo para la región de interés. Los resultados indican que con WRF tiene habilidad de pronóstico de niebla para la Cuenca de México, siempre y cuando las parametrizaciones sean elegidas adecuadamente conforme a las características de formación del fenómeno.

## Abstract

The fog is a set of water droplets (diameter of 2-50  $\mu\text{m}$ ) suspended in the atmosphere, close to the surface, which restricts visibility to less than 1 km. This phenomenon represents a danger for the operation of transportation systems, such as airports, so its prediction is essential in security issues, having a high economic value. A fog climatology and the modeling of fog events were done for the period of 1999 – 2018, events reported by the Mexico City International Airport (AICM). The forecast of fog for the Basin of Mexico was realized by the Weather Research and Forecasting (WRF) model. The forecast was evaluated with historical fog events from the AICM through METAR data between 1999 and 2018. The evaluated parameters included: the start time and the predicted fog duration, the concentration of liquid water in the cloud, the ambient temperature and humidity measured near the surface. A detailed analysis of the microphysical and planetary boundary layer parameters of WRF applied to fog modeling was carried out; and a configuration of the model for the region of interest was proposed. The results indicate that WRF shows good results of fog forecast in the study area, as long as the parameterizations are chosen appropriately according to the characteristics of the phenomenon formation.

## Introducción

La niebla es un conjunto de gotitas de agua (diámetro de 2 - 50  $\mu\text{m}$ ) suspendidas en la atmósfera, cerca de la superficie, que restringe la visibilidad a menos de 1 km. Es un tipo de nube baja estratiforme. Al ser una nube contribuye en la cantidad de humedad atmosférica persistente en un lugar y forma parte del ciclo hidrológico. La presencia constante de niebla puede representar menor pérdida de agua por evapotranspiración y, por tanto, rendimientos hídricos más altos comparados con ecosistemas con poca niebla. La presencia de niebla reduce la insolación y el déficit de humedad atmosférica (Goldsmith et al., 2012) y es factor para la regeneración de árboles como un elemento hídrico que sostiene un bosque durante los meses de disminución de precipitaciones (Ek del-Val et al., 2006).

Por otro lado, la niebla puede ser es un factor crítico para la navegación tanto aérea, como marítima y terrestre, y otras actividades; debido a que es un fenómeno que reduce la visibilidad, por lo que su predicción es esencial en temas de seguridad, teniendo un alto valor económico. Cabe aclarar que no todos los eventos de niebla provocan la interrupción o paralización de las operaciones en la navegación. Particularmente, para un aeropuerto esto depende de la intensidad del evento, su duración y de las normas de seguridad según el tipo de aeropuerto del que se trate, así como el tipo de pistas con las que se cuente y el equipamiento del avión para aterrizaje y detección.

Para una mejor comprensión del fenómeno, se realizó una climatología de niebla con los eventos reportados por el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México (AICM) para el periodo de 1999 al 2018, la cual proporciona información de cuántos y qué tipos de eventos de niebla se pueden esperar en un futuro si las condiciones climáticas se mantienen como hasta ahora; incluso si existiera un cambio en dichas condiciones, una climatología ayuda a comprender y analizar la variabilidad climática y a inferir condiciones futuras.

Con esta climatología se validó el diagnóstico con modelación de eventos de niebla históricos, con el objetivo de elegir las parametrizaciones y la configuración del modelo WRF que fuera capaz de

modelar niebla para la Cuenca del México con un bajo porcentaje de error. Esta configuración se tomó como base para el modelo de pronóstico.

Es por todo esto que comprender y analizar los procesos de formación de niebla permitirá realizar una predicción certera de este fenómeno, así como contar con un pronóstico de niebla a corto plazo en el AICM y en la región de interés.

En el capítulo I se muestra un panorama general de qué es la niebla, la motivación de este trabajo, sus objetivos e hipótesis planteadas. En cada capítulo son descritos los datos usados y la metodología de esta investigación con el objetivo de establecer la metodología que se usó en este trabajo y establecer la climatología de niebla en la región de estudio. El capítulo II se enfoca en el análisis de los reportes de niebla desde 1999 al 2018 a través de los datos METeorological Aerodrome Report (METAR en el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México (AICM), cuyo objetivo principal fue caracterizar y elaborar una climatología de dichos eventos. En el capítulo III se analiza la modelación de niebla en la Cuenca de México con WRF, con reanálisis como datos de entrada para los eventos identificados en AICM de 1999 al 2018. Se propuso una configuración de WRF para modelación de la niebla en la región de interés con base en el análisis de escala, la resolución de datos, el tiempo de simulación y, principalmente, el análisis de las parametrizaciones microfísicas y de capa límite planetaria. Para el capítulo IV se presentan los resultados de las simulaciones (hindcast) de niebla con WRF con datos de entrada de Global Forecast System (GFS), tomando como base la configuración propuesta en el capítulo III de los eventos históricos de niebla. Por último, se evaluaron dichos pronósticos de niebla para el período de 2015 al 2018. Los parámetros evaluados incluyeron: la hora de inicio y la duración de la niebla pronosticada; la concentración de agua líquida de la nube; la temperatura ambiente y la humedad medida cerca de la superficie.

## Motivación

El tiempo atmosférico y el clima son parte importante para la administración de actividades del hombre moderno, es por ello que pronosticarlos correctamente es un reto, debido a las limitaciones de los modelos computacionales. Por ejemplo, no es lo mismo modelar el tiempo en un lugar en la montaña que al nivel del mar, sin mencionar lo que hay que tomar en cuenta si se habla de latitudes tropicales o latitudes altas. Es por ello que la modelación meteorológica es un reto que debe de ser profundizado según el fenómeno que se vaya a modelar. Para el caso de la niebla, al ser una nube de tipo estratiforme, se piensa que es relativamente sencillo en comparación de una nube de desarrollo vertical, donde la dinámica es más complicada (por ejemplo, en el caso de una cumulonimbos). Sin embargo, el reto principal de modelar esta nube tipo estrato recae en la resolución, ya que, así como muchos otros fenómenos atmosféricos, su formación está influenciada por sistemas de mayor escala y fenómenos de escala local. Por lo anterior, se puede concluir que la formación de una niebla propiciada por un frente frío o de una niebla por radiación tienen distinta naturaleza: en esta última, las condiciones locales dominan la formación.

## Planteamiento del problema

En México, existen pocos estudios de niebla y no existe un pronóstico especializado para ella. Al conocer la frecuencia y características de los eventos de niebla en una región específica, permite entender la capacidad de la nube como recurso hídrico y planificar mejor las actividades humanas que, en ciertas ocasiones, son afectadas por la poca visibilidad que provoca el fenómeno. Es por eso que el objetivo principal de este trabajo es analizar los procesos físicos de niebla y realizar un pronóstico de niebla que posteriormente pueda ser usado de forma operativa.

## Objetivos

- ✚ Describir los procesos físicos de niebla para la Cuenca del Valle de México
- ✚ Construir un pronóstico de niebla eficiente para la región.
- ✚ Evaluar dicho pronóstico para incorporarlo como herramienta operacional.

## Antecedentes

La niebla es un fenómeno natural que afecta la visibilidad. De acuerdo con la definición internacional, la niebla reduce la visibilidad por debajo de 1 km (Organización Meteorológica Mundial, 1992), definiéndose como visibilidad la distancia horizontal máxima a la que un observador puede distinguir claramente algunos objetos de referencia en el horizonte (Organización Meteorológica Mundial, 2010).

La niebla se define como gotitas de agua (típicamente con diámetros menores que 0.1 mm) suspendidas en la atmósfera en la proximidad de la superficie de la tierra y que afectan la visibilidad (Jiusto, 1981).

La presencia de niebla depende de varios factores, entre los que se encuentran: el relieve, la vegetación, el tipo de suelo, el clima de la región y los fenómenos atmosféricos que influyen para su formación. Debido a que la niebla es una formación nubosa de tipo estratiforme cercana a la superficie, los mismos factores que generan una niebla son los que pueden originar otro tipo de estratos (Byers, 1959). En general, los mecanismos de formación de una nube estratiforme son por enfriamiento isobárico, el cual consiste de un enfriamiento del aire por debajo de la temperatura de punto de rocío, o por adición de vapor de agua en el aire. Otro mecanismo es mediante la mezcla vertical de parcelas húmedas de aire de diferentes temperaturas (Mason, 1961).

Desde el punto de vista microfísico, para que se lleve a cabo la formación de la gotita a partir del vapor de agua, es indispensable la presencia núcleos de condensación de nube, los cuales son partículas higroscópicas suspendidas en la atmósfera; es decir, partículas de aerosol atmosférico que debido a sus propiedades propician la condensación del vapor de agua (nucleación heterogénea) en su superficie. (Salas, 2005).

Para que una pequeña gotita de disolución pueda crecer hasta convertirse en una gotita nubosa, es preciso que sean superados el radio ( $r^*$ ) y la razón de saturación ( $S^*$ ) críticos. Aunado al crecimiento por condensación, el crecimiento de las gotitas ocurre mediante la interacción entre ellas (colisión y coalescencia) debidas a las fuerzas aerodinámicas. Por lo tanto, una pequeña gota que desciende dentro de una nube formada por gotitas aún menores, chocará a lo largo de su trayectoria sólo con una pequeña fracción de las que se encuentra en su camino. Es de esperar que las nubes que contengan un número muy pequeño de gotitas mayores a 18 micrómetros serán relativamente

estables en tanto a su posible crecimiento por coalescencia, mientras que un tamaño superior a 18 micrómetros puede dar lugar a la precipitación (Korolev, 1994).

## Características de niebla según su mecanismo de formación

Existen diferentes clasificaciones de tipos de niebla. Una de ellas es por el mecanismo de formación, elaborada por Byers (1973) en la cual se pueden distinguir tres grandes tipos: **niebla por advección**, **niebla por radiación** y **niebla por sistema frontal** (Jiusto, 1981).

El tipo de **niebla por advección** ocurre cuando una masa de aire se desplaza sobre una superficie con diferentes características térmicas, provocando la condensación cercana a la superficie (Figura 2 a). Esto puede ocurrir cuando una corriente de aire cálido y húmedo se desplaza sobre una superficie más fría, o cuando pasa aire frío encima de una superficie acuática más cálida o con suficiente humedad para condensar. A medida que el aire pasa sobre la superficie, la evaporación introduce vapor de agua en la masa de aire y aumenta el contenido de humedad cerca de la superficie. El resultado es la formación de niebla en los niveles más bajos: el aire se enfría desde abajo, su humedad relativa aumenta y el vapor de agua se condensa formando la nube (Mack y Katz, 1976). Por lo tanto, la niebla por advección se forma principalmente a través de procesos dinámicos y adiabáticos de la capa límite y está dominada por procesos de escala sinóptica que afectan el evento a lo largo de su duración. Aunque estos son los procesos predominantes, en ocasiones los procesos por radiación participan en la evolución y ciclo de vida de la niebla por advección. La formación puede ocurrir con vientos entre calmos (menores a 1 km/h, escala de Beaufort) y moderados en los niveles bajos. Si el viento es intenso, es probable que la niebla se aleje del suelo, formándose otro tipo de estrato. Si el viento, por el contrario, es calmo, el vapor de agua se podría depositar sobre el suelo, formando rocío y evitando la formación de niebla.

La **niebla por radiación** se produce por el enfriamiento que sufre la atmósfera como consecuencia de la pérdida nocturna de calor que, junto con vientos calmos o débiles, propicia la condensación cerca de la superficie al producirse una mezcla turbulenta débil pero suficiente para maximizar el enfriamiento radiativo. Esto puede ser apoyado por la presencia de un anticiclón en los niveles bajos, el cual puede suprimir los vientos de superficie y desecar el aire en altura por subsidencia, lo que contribuye a crear condiciones propicias para la formación de niebla por radiación (Brown y Poach,

1976). Aunado a esto, es muy importante la presencia de humedad, ya que es muy poco probable que se forme niebla por radiación si no hay suficiente humedad en la capa límite. La humedad puede haber sido transportada a la zona o ser el producto de la evaporación diurna de la superficie o por evapotranspiración vegetal. Cuando cesa el calentamiento diurno, la existencia de condiciones secas y despejadas arriba de la capa límite acelera el enfriamiento en y cerca de la superficie (Figura 1 a). Por otro lado, si el cielo está nublado durante la noche, se estima que menos del 10% de la radiación emitida por el suelo escapa al espacio, por lo que es importante que el cielo esté despejado para que permita que entre el 20 y el 30% de la radiación escape de la atmósfera y se lleve a cabo dicho enfriamiento. Conforme la energía escapa al espacio, la superficie del suelo se enfría rápidamente e induce el enfriamiento de la capa más baja de la atmósfera (de algunos metros de profundidad) creando una inversión térmica poco profunda en la superficie (Baker et al., 2000). Así, el enfriamiento radiativo progresa hasta el punto en que el aire justo arriba del suelo queda sobresaturado y se forman gotitas de nube por condensación. Es importante mencionar que, debido al contenido de humedad más alto, en regiones tropicales húmedas se experimenta un menor enfriamiento radiativo, de modo que la inversión suele ser más débil que en las latitudes medias. Una vez que la capa de niebla alcanza varios metros de profundidad, la radiación proveniente del suelo se comienza a absorber y re-emitir, lo que reduce la velocidad de enfriamiento en el suelo, y la superficie de la capa de niebla coincide con el nivel donde los procesos de enfriamiento radiativo y condensación son más activos.

En general, la fase de mantenimiento de una capa de niebla consiste en establecer un equilibrio entre la condensación en la superficie de la capa y los procesos de evaporación y sedimentación de las gotitas, lo cual mantiene la profundidad de la capa. En la superficie de la capa de niebla, el enfriamiento radiativo reabastece la niebla de gotitas al tiempo que van sedimentando, e incluso tiende a fortalecer la inversión térmica y profundizar la capa. A la vez, la mezcla turbulenta tiende a debilitar la inversión térmica y erosionar la superficie de la capa de niebla. Normalmente, una capa de niebla por radiación se profundiza durante la fase de crecimiento hasta alcanzar la altura donde los vientos son lo suficientemente fuertes como para inducir la mezcla necesaria en la superficie de la capa para detener su crecimiento (Low, 1979).

Si se presenta una capa seca sobre la capa de niebla, la incorporación de aire seco por mezcla turbulenta en la superficie de la capa de niebla ocasiona la evaporación de las gotitas, lo cual se puede intensificar si hay cizalladura de velocidad vertical del viento dentro y por encima de la superficie de la capa de niebla. Por otro lado, si existe una capa nubosa sobre la capa de niebla, se reducirán el

enfriamiento radiativo y la condensación en la capa de niebla por lo que, cuanto menor sea la altura de la capa nubosa sobre la niebla, se incrementarán los procesos de disipación tales como la sedimentación de las gotitas

El tipo de **niebla frontal** puede considerarse como advectiva, ya que la condensación se lleva a cabo por el desplazamiento masas de aire de diferentes características térmicas sobre una superficie. Sin embargo, este tipo de niebla se destaca por el sistema sinóptico que la origina: sistemas frontales, frecuentemente frentes fríos, aunque un frente cálido podría provocar niebla si pasa sobre una superficie fría. La niebla puede formarse antes de la entrada, durante o después del paso de un frente. Es común que la niebla se forme en la cuña de aire frío debajo y junto al límite de un frente cálido a medida que el aire caliente se ve forzado a subir por encima de la cuña fría. La combinación de enfriamiento evaporativo y advección de la humedad hacia la capa permite que el aire frío subyacente quede saturado (Figura 2 b). Del mismo modo, la niebla del tipo frontal también puede adquirir su humedad por la precipitación que puede ocasionar la entrada de un frente (Martínez, 2006).

Entre los sistemas de baja presión que tienden a formar niebla delante de un frente cálido, se incluyen los sistemas de baja presión u ondas abiertas que tienen orientación paralela respecto de las isobaras y se mueven lentamente, sin intensificarse. Normalmente, las depresiones en fase de intensificación no producen mucha niebla delante de un frente cálido. Por otra parte, al paso de un frente se puede formar niebla, y estratos detrás de un frente frío cuando una bóveda poco profunda de aire frío se desplaza a determinada región y obliga al aire húmedo y cálido en altura a ascender.

En el caso de frentes estacionarios, arriba de la capa frontal puede producirse advección cálida capaz de ocasionar precipitación por la advección del aire cálido encima de aire frío. En estos casos, buena parte de la niebla y estratos se hallarán a lo largo y en ambos lados del límite frontal. Además, la convergencia a lo largo del frente estacionario puede contribuir a la formación de niebla y estratos (Jarvis, 2000).

En general, la fase de disipación de un evento de niebla es debido a que la profundidad de una capa de niebla disminuye cuando la velocidad de formación de gotitas es menor que la velocidad de sedimentación. El tamaño de las gotitas de niebla varía y las gotitas más pequeñas caen más despacio que las de mayor tamaño. La gotita de niebla promedio, que tiene un diámetro de 20 micrómetros, cae a una velocidad de aproximadamente 1 cm/s (Low, 1979).

## Características de niebla en un radiosondeo

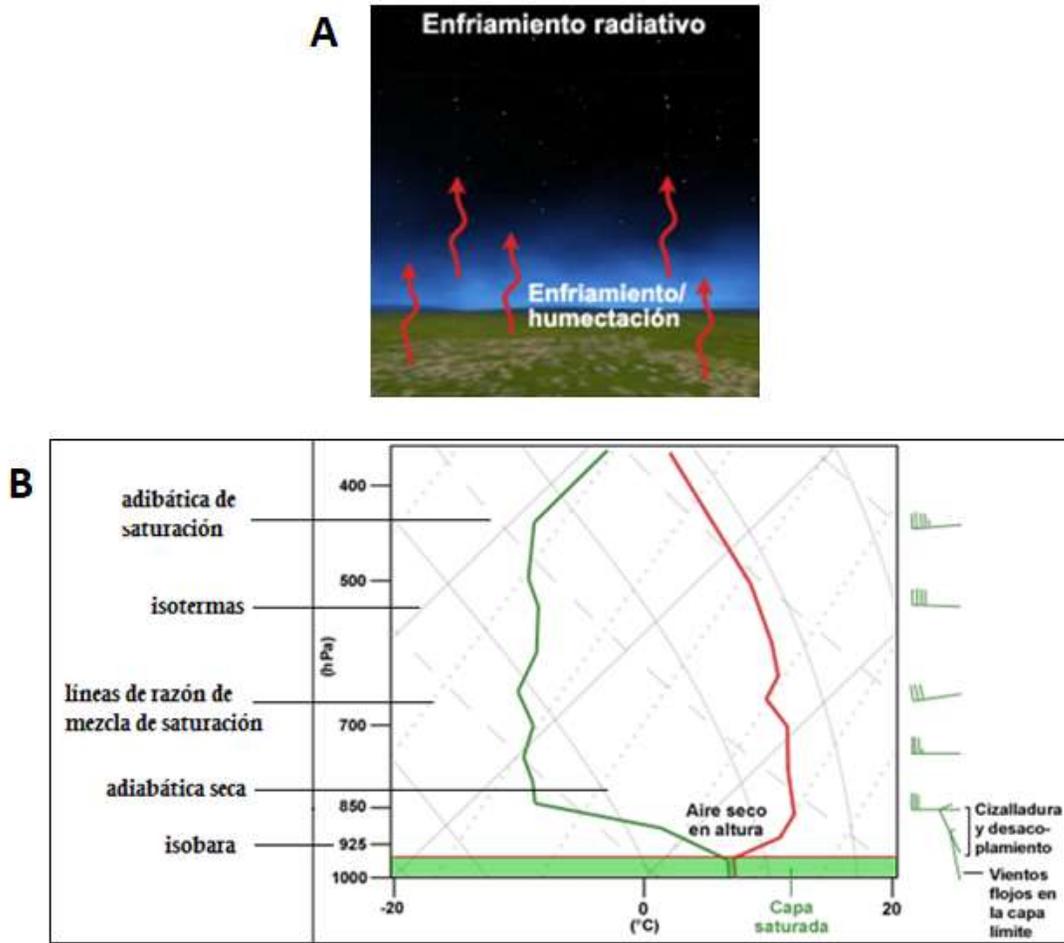
En un termodiagrama Skew T Log P, pueden observarse las características que las distinguen a los tres tipos de niebla principales: por advección, por radiación y por sistema frontal. Sin embargo, la niebla frontal comparte características similares en un termodiagrama que una de tipo por advección, lo cual es debido a la naturaleza del mecanismo de formación del evento de niebla frontal explicado anteriormente. Es por ello que en esta sección sólo se hará referencia a las características en termodiagramas de las nieblas radiativa y advectiva. Cabe mencionar que cuando un evento de niebla frontal se forma antes o durante el paso de un frente, en los datos del termodiagrama de horas previas se puede observar el aumento de presión en superficie (Martínez, 2006), característica típica de la entrada de un frente frío, ya que éste al pasar por cierto lugar desplaza un sistema de alta presión a un sistema de baja presión.

Como se mencionó anteriormente, *la niebla por radiación* es principalmente debida a un enfriamiento radiativo unas horas antes de la ocurrencia del evento, especialmente en la noche, formando niebla en la madrugada o en las primeras horas de la mañana (Hobbs, 1981). Por esta razón, cerca de la superficie de la capa de niebla hay una inversión térmica cuya base suele encontrarse unos 50 metros por debajo de la superficie de la capa de niebla. El límite superior de la inversión térmica está justo arriba de la superficie de la capa de niebla, como se observa en el termodiagrama de la figura 1b.

**Tabla 1.** Características típicas observadas según el tipo de niebla

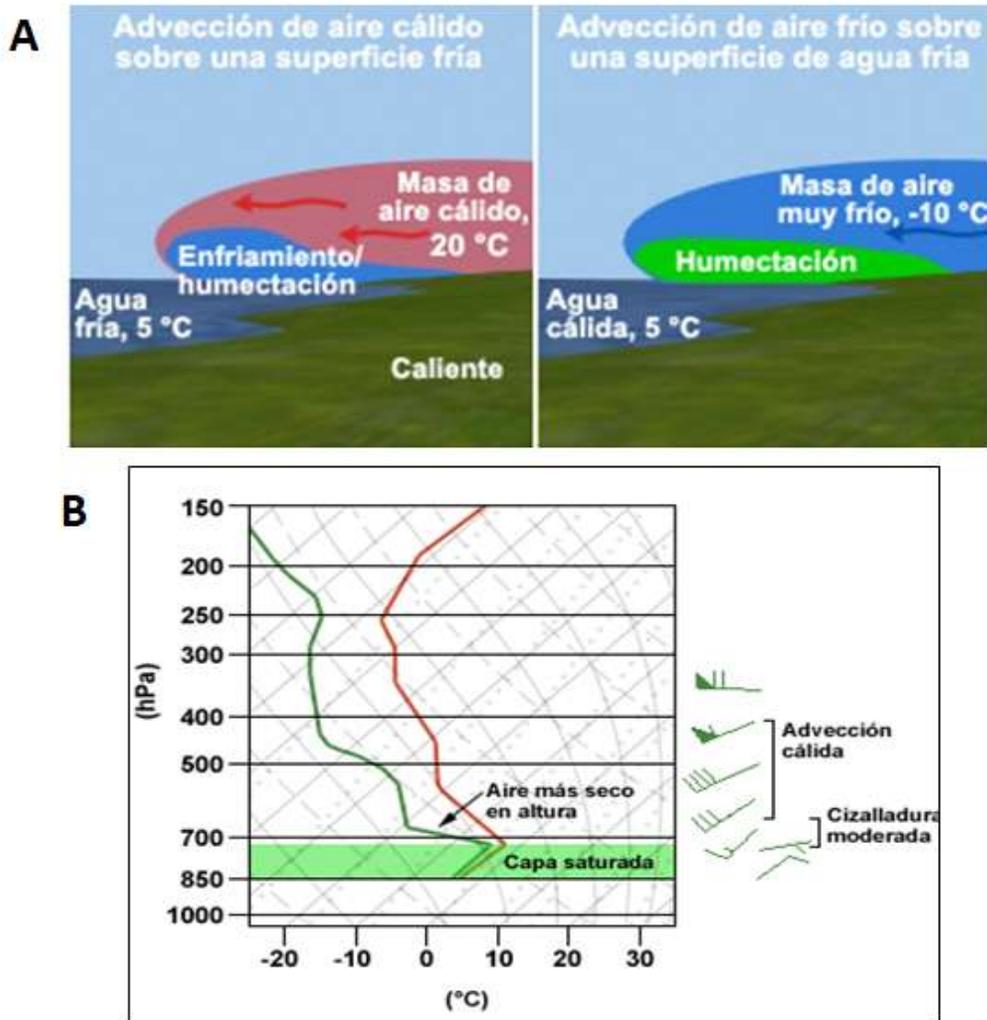
<b>Niebla por radiación</b>	<b>Niebla por advección / frontal</b>
Vientos calmos o poco intensos en superficie.	Viento débil o moderado en superficie.
Cizalladura del viento sobre la capa de niebla.	Cizalladura del viento cercana a la superficie.
Inversión de temperatura sobre la capa de niebla	Una inversión de temperatura desde superficie.
Una capa de aire seco sobre la capa de niebla. La presencia de esta capa depende de la intensidad del evento de niebla.	Advección cálida y con velocidades de viento mayores que en superficie sobre la capa de niebla

En la figura 1 se muestran las características de las nieblas por radiación y en la figura 2, por advección, particularmente los incisos B de ambas figuras muestran las características típicas de estos tipo de niebla en un termodiagrama Skew T log P, mediante un perfil vertical de temperatura ambiente (línea de color verde) y de temperatura de punto de rocío (línea color rojo), así como la intensidad del viento.



**Figura 1.** Mecanismo de formación de niebla por radiación. A) Ejemplifica en enfriamiento radiativo B) Muestra las características típicas de niebla por radiación en un termodiagrama Skew T log P.

Imágenes tomadas de: COMET: [https://www.meted.ucar.edu/fog\\_int\\_es/media\\_gallery.php](https://www.meted.ucar.edu/fog_int_es/media_gallery.php)



**Figura 2.** Mecanismo de formación de niebla por advección. A) Ejemplifica el desplazamiento de aire sobre una superficie con diferente temperatura propiciando la condensación cercana a superficie B) Muestra las características típicas de niebla por advección en un termodiagrama Skew T log P.

Imágenes tomadas de: COMET: [https://www.meted.ucar.edu/fog\\_int\\_es/media\\_gallery.php](https://www.meted.ucar.edu/fog_int_es/media_gallery.php)

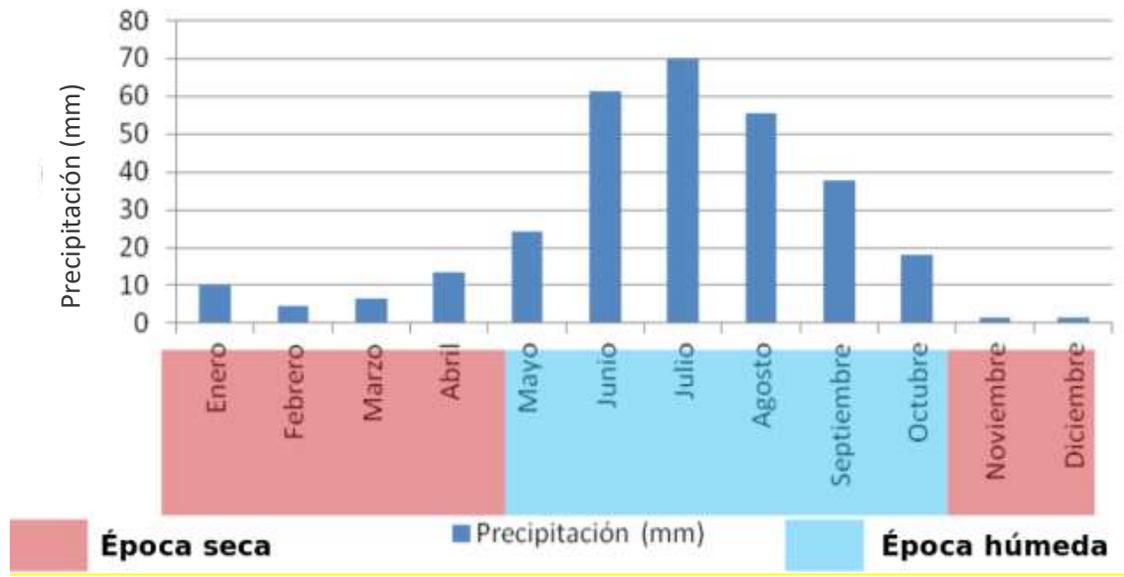
## Región de estudio

### Cuenca de México

Se estableció como área de interés la Cuenca de México, con punto central en el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México (AICM) “Benito Juárez”. La Cuenca de México tiene un área aproximada de 9,600 km<sup>2</sup> y alberga una de las ciudades más grandes del mundo: la Ciudad de México y su Zona Metropolitana (ZMCM). La cuenca se encuentra en la parte central de México, entre los meridianos 99° 30' W y 98° 10'W y los paralelos 19° 10'N y 20° 10'N; tiene una altitud media de 2,240 metros sobre el nivel medio del mar (m s. n. m.) y está rodeada por montañas de hasta 5,500 m s. n. m. La cuenca comprende cinco entidades políticas: Ciudad de México, Estado de México, Hidalgo, Puebla y Tlaxcala (Carrera-Hernández y Gaskin, 2007). Esta cuenca está rodeada por las sierras de Monte Alto, Monte Bajo, Las Cruces, Pachuca y Nevada, y por la serranía de Chichinauhtzin; esta última área fue originalmente ocupada por el Lago de Texcoco, el mayor de un sistema de lagos interconectados en la Cuenca que han sido drenados sistemáticamente desde la época colonial durante los últimos cuatrocientos años, de lo cual queda una pequeña porción (García-García y Zarraluqui, 2008).

Los sistemas meteorológicos predominantes en esta región son los frontales (típicamente de septiembre a mayo) y los tropicales (de mayo a noviembre). Sin embargo, al encontrarse en la parte central de la República Mexicana, esta región también está influenciada por el ingreso de humedad de ambos océanos que rodean al país. Es por ello que se pueden diferenciar dos épocas climáticas en términos de precipitación, como se muestra en la Figura 3: una seca y otra húmeda. La época de “lluvias” de junio a octubre, está caracterizada por aire marítimo tropical con alto contenido de humedad; mientras que la época de “secas” que se caracteriza por una menor cantidad de precipitación que proviene de masas de aire polar continental o de tipo polar-modificado continental, impulsadas principalmente por sistemas frontales.

La Cuenca de México es una región que presenta eventos de niebla en diversas épocas del año. Según los estudios realizados por García-García y Zarraluqui (2008), se conoce que el número promedio de episodios de niebla es de 7 días al mes, excepto en verano y principios de otoño (junio a septiembre) cuando la cantidad mensual máxima es de hasta 12 días al mes.



**Figura 3.** Climatología de precipitación para el Valle de México (1981-2010, SMN).

### **Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México (AICM)**

El Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México (AICM) se encuentra ubicado a 19°26'07" de latitud Norte y 99° 04' 20" de longitud Oeste, con una altitud de 2,237 m. s.n.m., con dirección en Av. Capitán Carlos León s/n. Col. Peñón de los baños, CP 15620. Delegación Venustiano Carranza, Ciudad de México. Cuenta con una superficie de 746.43 ha y opera las 24 horas del día. Es un aeropuerto categoría 9 (Aviones de 61 a 76 metros de largo y 7 metros de ancho del fuselaje, la escala más alta de acuerdo con la Organización de Aviación Civil Internacional, OACI); y se encuentra en operación desde que el 28 de junio de 1952 (Herrera et al., 2005).

Este aeropuerto cuenta con el 35% de las operaciones aéreas que se realizan en el territorio nacional, con un promedio de 54 operaciones por hora. Los mayores aviones operables son: B747-400, B 777-300 (pasajeros), ANTONOV 124-100 (carga), C-5 y C-141 (militar). Cuenta con dos pistas: 5R (derecha) - 23 L (izquierda) de 3,985 m por 45 m; y 5L (izquierda) - 23 R (derecha) de 3,963m por 45 m, orientadas a 52° y 232° del norte magnético, respectivamente; y con una pista auxiliar (Azpiri et al., 2007). A través del AICM, la capital de la República Mexicana se une con 50 ciudades del país y 40 del extranjero: 17 en Estados Unidos, 4 en Canadá, 6 en Europa, 5 en países de América Central

y del Caribe, 7 en América del Sur y 2 en Asia. El AICM atiende a más de 26 millones de pasajeros al año, por lo que es el principal aeropuerto metropolitano de América Latina.

## Datos

Los datos que se usaron en esta investigación se muestran en la tabla 2, los cuales son descritos posteriormente.

**Tabla 2. Datos**

Tipo	Nombre	Periodo
Datos de reanálisis	Ds083.2 NCEP FNL Operational Model Global Tropospheric Analyses <sup>1</sup> .	01 de enero de 1999 al 31 de diciembre del 2018
Datos para pronóstico	Ds084.1 NCEP GFS 0.25 Degree Global Forecast Grids Historical Archive <sup>2</sup>	01 de enero de 2016 al 31 de diciembre del 2018
METAR	MMMX-Mexico City MÉTéorologique Aviation Régulière (METAR).	01 de enero de 1999 al 31 de diciembre del 2018.
Radiosondeos	76679 Aerop. Intl Mexico, D. F. (Tacubaya).	01 de enero de 1999 al 31 de diciembre del 2018
Boletines meteorológicos	SMN (Servicio Meteorológico Nacional).	01 de enero de 1999 al 31 de diciembre del 2018

## Datos de Reanálisis

Los datos sobre el terreno y la cobertura terrestre se obtuvieron de la base de datos del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, 2012).

El dominio del modelo WRF vertical consistió en 42 capas, 23 de ellas asignadas a los 2.100 m más cercanos al suelo. Los datos del Sistema de Pronóstico Global de los Centros Nacionales de Predicción Ambiental (GFS - NCEP, 2015), disponibles con una resolución horizontal de  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ , proporcionaron condiciones iniciales y de contorno. El modelo utiliza condiciones de contorno anidadas unidireccionales en los tres dominios. El dominio externo se actualiza cada 6 horas con el pronóstico GFS-NCEP. Cada simulación fue de 30 horas, pero solo las últimas 18 horas fueron consideradas para análisis las primeras 12 horas restantes para el ajuste dinámico del modelo (Wang et al., 2016)

1 National Centers for Environmental Prediction/National Weather Service/NOAA/U.S. Department of Commerce, 2000: NCEP FNL Operational Model Global Tropospheric Analyses, continuing from July 1999. Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Laboratory, Boulder, CO. [Available online at <https://doi.org/10.5065/D6M043C6>.] Accessed 15/mar/2018

2 National Centers for Environmental Prediction/National Weather Service/NOAA/U.S. Department of Commerce, 2015: NCEP GFS 0.25 Degree Global Forecast Grids Historical Archive. Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Laboratory, Boulder, CO. [Available online at <https://doi.org/10.5065/D65D8PWK>.] Accessed 15/mar/2018

Los datos sobre el terreno y la cobertura terrestre se obtuvieron de la base de datos del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, 2012).

Los modelos utilizados para el reanálisis son modelos meteorológicos de predicción numérica del tiempo (NWP, por sus siglas en inglés, Numerical Weather Prediction) que asimilan las observaciones disponibles y aseguran que la solución numérica difiera lo menos posible de las observaciones donde estas son presente, y ofrece valores físicamente consistentes para regiones dispersas de datos. Los modelos comienzan en una estrategia dada por soluciones anteriores, calculan un paso adelante, comparan la solución con las observaciones que son relevantes para el tiempo, calculan el error, retroceden y modifican la condición de inicio, y así sucesivamente: iterando una solución (el 'reanálisis') se logra en el que el modelo y las observaciones son tan consistentes como sea posible dentro de sus respectivos errores. El proceso se repite para el siguiente paso de tiempo. El nuevo análisis surgió del campo de NWP ya que los modelos de NWP basan sus pronósticos en observaciones actuales y un modelo físico. Como parte de la asimilación de datos, se realiza un control de calidad basado en la física. Al mismo tiempo, los investigadores mejoran las descripciones de los procesos físicos en los modelos y se hacen disponibles nuevos análisis de los datos actualizados (Thejll, et al., 2015).

## **Datos GFS**

El Sistema de Pronóstico Global (GFS, por sus siglas en inglés, Global Forecast System) es un modelo de pronóstico del tiempo producido por los Centros Nacionales de Predicción Ambiental (NCEP) del Servicio Meteorológico Nacional de los Estados Unidos (NWS)<sup>3</sup>.

El GFS es un modelo espectral con una resolución horizontal aproximada de 13 km durante los primeros 10 días y 27 km de 240 a 384 horas (16 días). En la vertical, el modelo se divide en 64 capas y, temporalmente, produce una salida de pronóstico cada hora durante las primeras 120 horas, tres horas hasta el día 10 y 12 horas hasta el día 16. La salida del GFS también se utiliza para producir estadísticas de docenas de variables atmosféricas y terrestres, desde temperatura, viento y precipitación hasta humedad del suelo y concentración de ozono atmosférico.

## ----- CAPÍTULO II -----

### **Análisis de reporte de niebla a través de los datos METAR en el AICM**

En México, existen pocos estudios de niebla, especialmente de climatología, uno de ellos es el realizado por García-García y Zarraluqui en el 2008, el cual menciona que para la región de la Cuenca de México se tienen 7 días al mes con niebla, excepto en verano y principios de otoño (junio a septiembre) cuando la cantidad mensual máxima es de hasta 12 días al mes.

Para detección de la niebla, el principal método es la observación directa y su registro, dependiente en la mayoría de los casos de la presencia humana directa y de percepción. Estas características dificultan el desarrollo de climatologías de niebla detalladas que cubran todo el país. Ésta es una de las razones por las que no hay un amplio estudio climatológico de niebla.

Para facilitar su estudio, se puede diferenciar tipos de niebla dependiendo de su mecanismo de formación. Jiusto (1981) describió tres grandes tipos de niebla por: niebla por advección, niebla por radiación y niebla por sistema frontal, discutidos anteriormente.

### **Metodología**

Los datos METeorological Aerodrome Report (METAR) del AICM fueron analizados desde del 1 de enero de 1999 al 31 de diciembre 2018. Los datos METAR tienen la sección de fenómenos meteorológicos visibles, la nomenclatura: niebla (FG), niebla somera (MIFG), banco de niebla (BCFG) o cualquier combinación que reporte niebla fueron horarios por cada hora y reportes especiales. Las variables analizadas fueron la temperatura ambiente, la temperatura de punto de rocío, el viento (dirección e intensidad), visibilidad, presión atmosférica y precipitación. Para la variabilidad temporal, se analizaron las horas de ocurrencias de los tipos de niebla y se caracterizaron de acuerdo a su duración, intensidad y frecuencia.

Los eventos de niebla se clasificaron con los criterios que se muestran en la figura 4. Otra parte importante que se tomó del boletín meteorológico fue de dónde proviene la fuente de humedad para el evento de niebla, como primera aproximación.

Aunado a esto se consultó el radiosondeo de la Ciudad de México el cual, a partir de marzo del 1998, se realiza en el Observatorio de Tacubaya, localizado a una distancia de 12 km en línea recta del AICM, aunque en estos años no en todos los eventos reportados por METAR se muestran claramente las características de niebla en los radiosondeos de Tacubaya debido a la distancia, para los casos que no presentan las características descritas en el radiosondeo sólo se tomó en cuenta el boletín meteorológico.

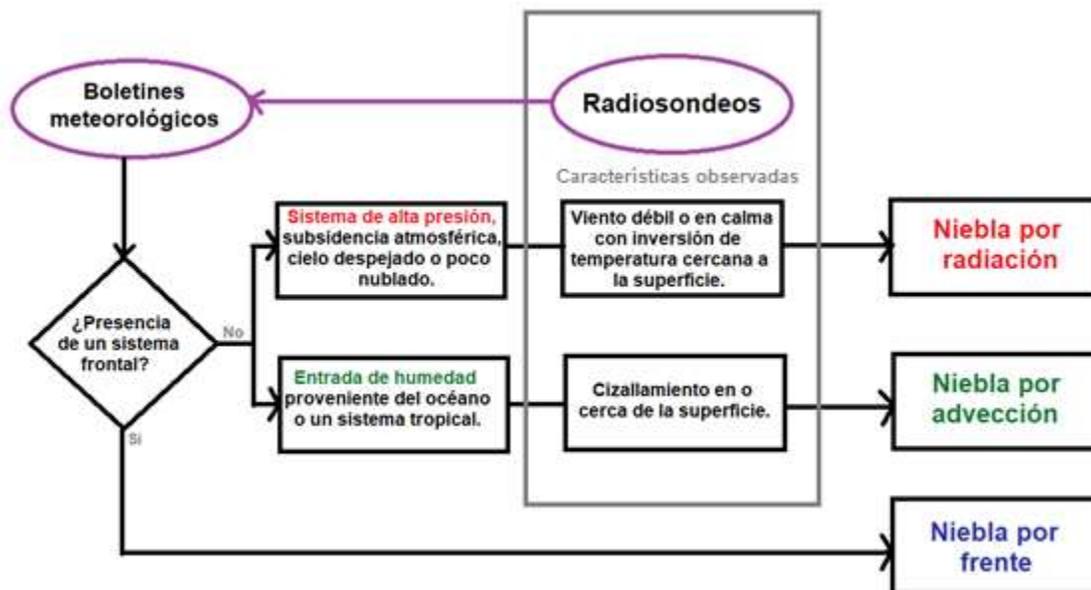


Figura 4. Metodología para la clasificación de los eventos de niebla en el AICM

## Resultados

El AICM reporta en promedio 20 eventos de niebla al año desde 1999 al 2018, ver anexo A, aunque la primera mitad del período muestra una mayor frecuencia (figura 5), a partir del 2009 se observa un número menor de eventos de niebla por año, no se puede relacionar directamente esta disminución con algún fenómeno físico ya que como son datos que dependen del observador, su criterio, la distancia de visibilidad que tenga y de los criterios para reportar el tipo de fenómeno.

Los meses con más días de niebla son noviembre y diciembre, especialmente la niebla ocasionadas por frentes fríos, las nieblas por advección tienen su máximo en verano, mientras que las nieblas por radiación son menos frecuentes, pero están presentes durante todo el año (figura 6). Precisamente, las nieblas por radiación son nieblas que duran unas cuantas horas, en su mayoría menos de una hora (figura 7), y comienza su formación alrededor de las 5 o 6 de la mañana, muy cercana su formación a la hora que se presenta la temperatura mínima del día.

Existen una minoría de eventos de niebla que pueden durar más de 5 horas, estos eventos de niebla son propiciados especialmente por frentes fríos o advección, mientras que el 40% de los eventos duran menos de una hora (figura 7).

La hora más frecuente donde comienza a reportarse la niebla es a las 6:00 a. m. (hora local), figura 8, en pocas ocasiones algunas nieblas de tipo frontal se pueden formar por la tarde o por noche, mientras que en la mayoría de los eventos de niebla se disipan antes del mediodía (figura 9).

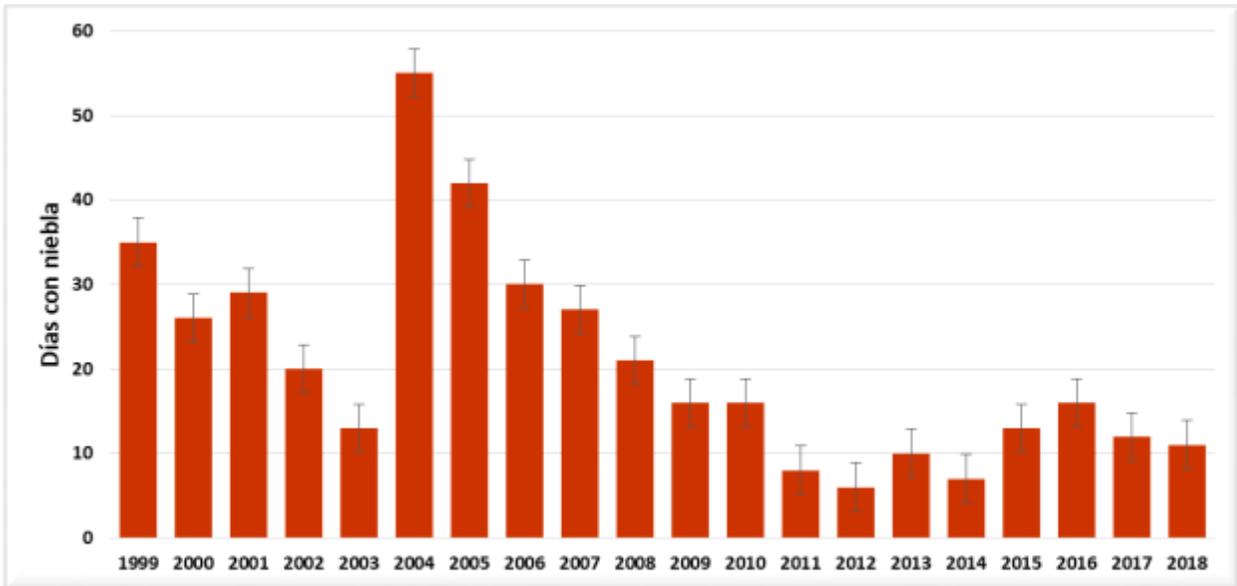


Figura 5. Días por año con niebla reportados por METAR en el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México.

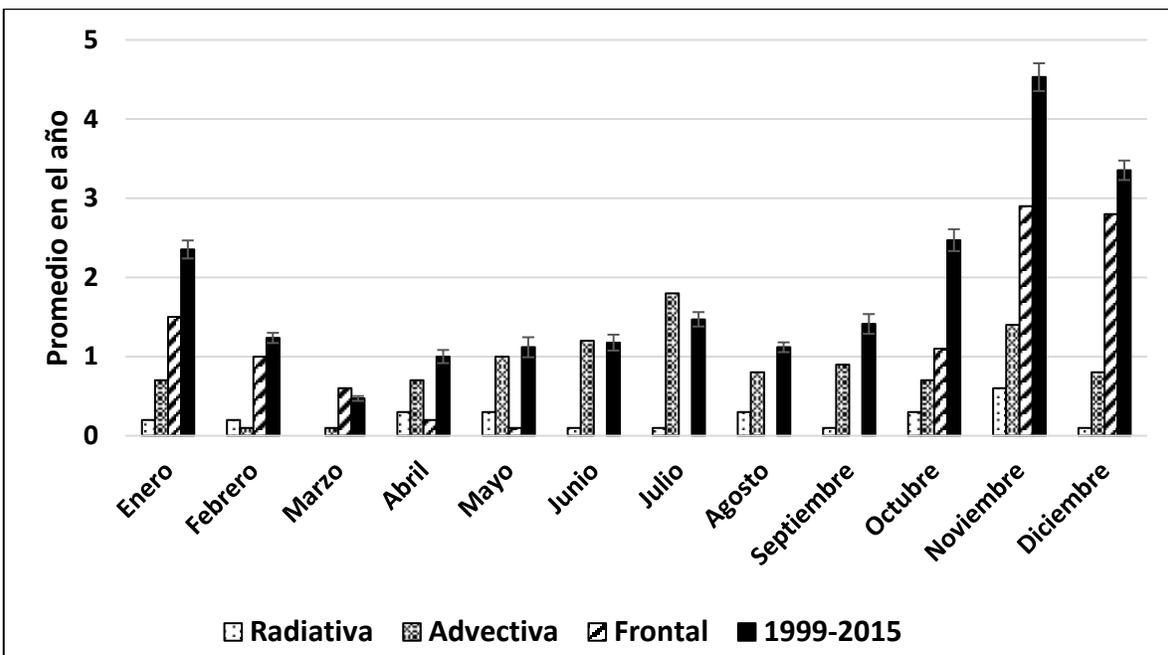
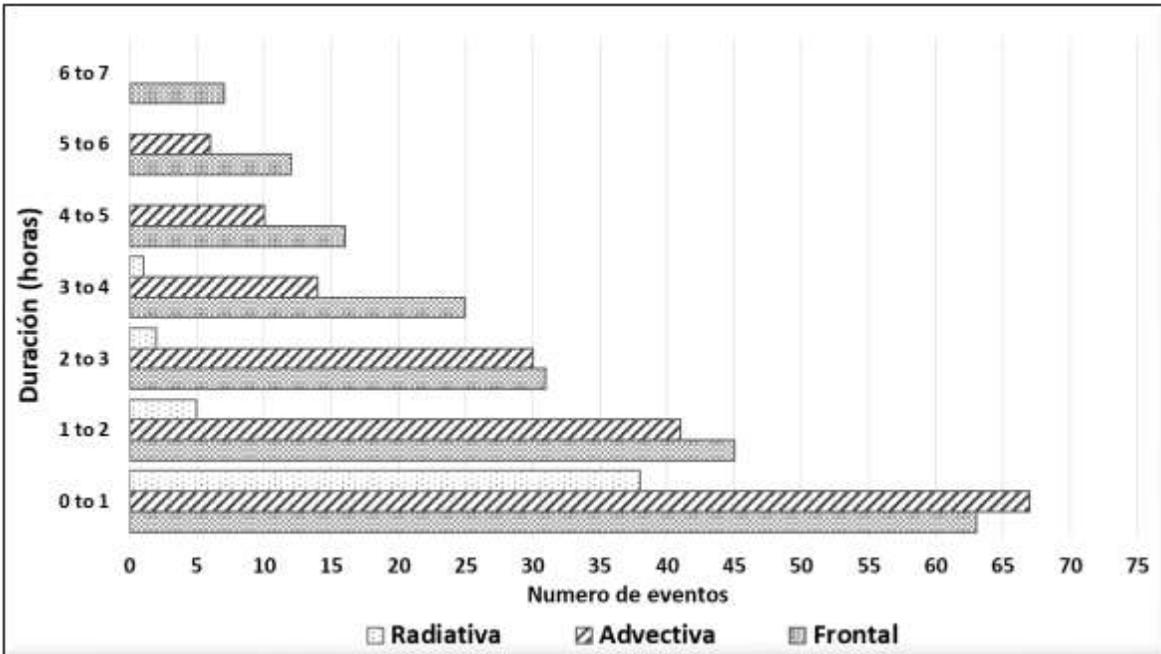
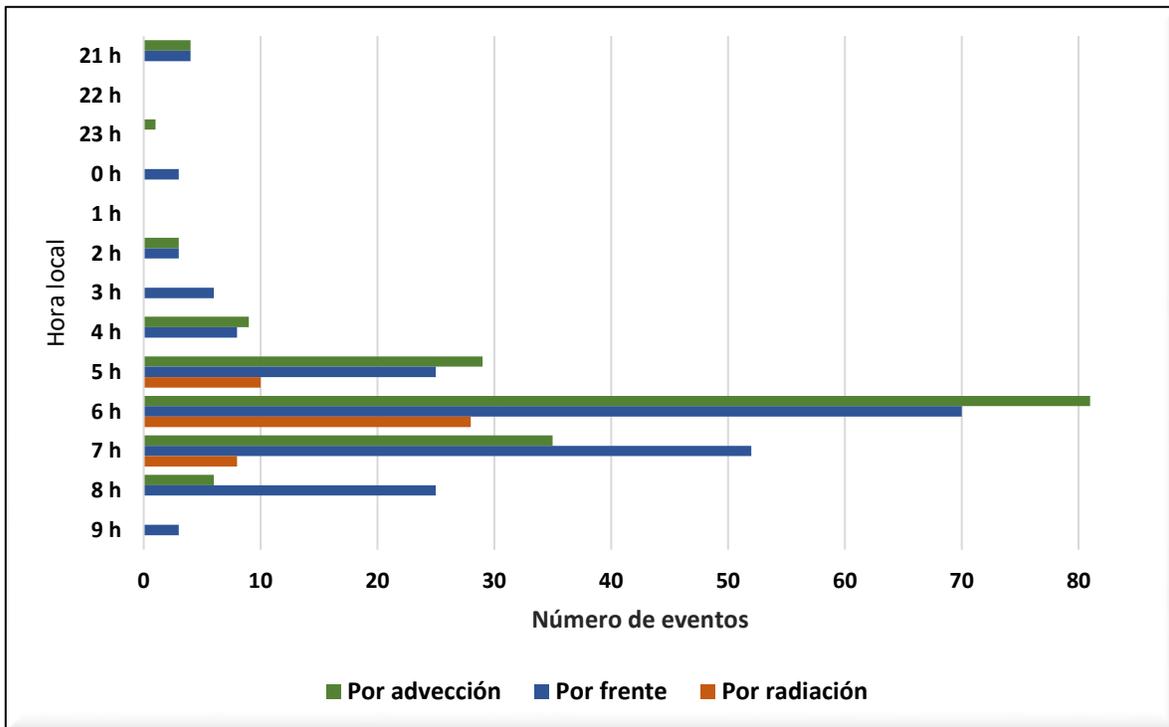


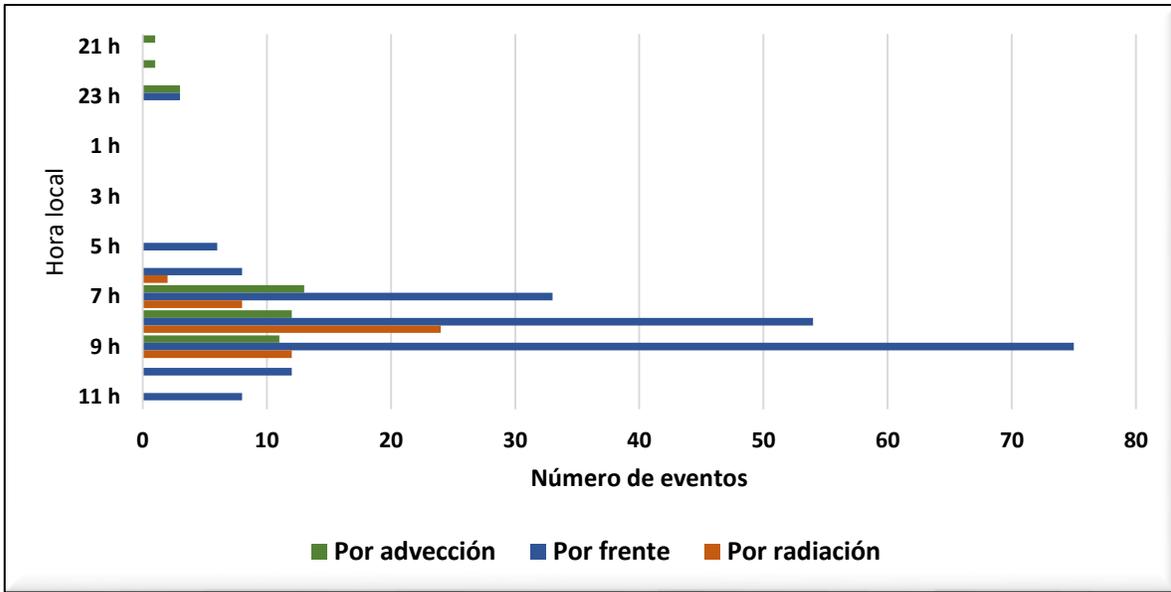
Figura 6 Promedio mensual de niebla por radiación, por advección, por frente para el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México.



**Figura 7.** Duración de los eventos de niebla reportados por METAR (1999 – 2018) en el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México AICM.



**Figura 8.** Hora de formación de la niebla reportadas por METAR (1999 -2018), según su mecanismo de formación. ("Frontal")



**Figura 9.** Hora de disipación de la niebla reportadas por METAR (1999 -2018), según su mecanismo de formación en el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México.

## ----- CAPÍTULO III -----

### **Modelación de niebla en la Cuenca de México**

La formación de la niebla es influenciada directamente por fenómenos de escala local, mesoescala y sinópticos. Por lo que, la formación de niebla y su extensión en la superficie no son fáciles de predecir debido a las escalas de tiempo y espacio involucradas en los numerosos procesos que influyen en la formación, el desarrollo y la disipación de la niebla. Una de las causas de la predicción fallida de niebla es la interacción de varios procesos (Gultepe et al., 2009), por ejemplo: el enfriamiento radiativo durante la formación de niebla, los flujos de calor, la intensidad de la turbulencia durante la disipación de niebla, así como la turbulencia generada por la propia niebla (Cuxart y Jiménez, 2012), la concentración y activación de núcleos de condensación de nube (CCN), la disponibilidad de agua superficial o humedad, las condiciones de escala sinóptica, las características locales de la zona, los vientos locales, la orografía, etc.

Actualmente, los modelos típicos de pronóstico numérico carecen de suficientes resolución y parametrizaciones físicas adecuadas para representar la niebla y con un enfoque simple en la estimación de la visibilidad que lleva a una incertidumbre de más del 50% en la modelación de la niebla (Gultepe, 2007). Aparte de esto, los modelos numéricos también tienen problemas asociados con el papel de las condiciones iniciales (Remy et al., 2012; Bari et al., 2015), la modelación vertical de los sistemas (Tardif y Rasmussen, 2007) y la resolución horizontal (Tang et al., 2009).

Existe un esfuerzo continuo por parte de la comunidad modeladora para mejorar la previsión de niebla mediante la incorporación de nuevas parametrizaciones físicas (por ejemplo, Katata et al., 2011) o en un aumento de resolución de modelos para resolver con mayor precisión los procesos locales en modelos de malla (Boutle et al., 2015).

Algunos de estos problemas de modelado de niebla han sido investigados con el modelo Weather Research and Forecasting (WRF), que permite el uso de diferentes combinaciones de opciones físicas, de configuración del dominio o la aplicación de diferentes técnicas para la asimilación de datos. Muller et al. (2010) evaluaron a WRF para un caso de niebla en Midlands, Suiza y encontraron una sensibilidad particular en los esquemas microfísicos. Kim et al. (2014) también se enfocaron en los esquemas de microfísica en la modelación de niebla con hielo, y mostró cómo la congelación

homogénea genera una mayor concentración de cristales de hielo. Por otra parte, Steeneveld et al. (2015) encontraron que el inicio de la modelación de la niebla es más sensible al esquema de capa límite planetaria (PBL, por sus siglas en inglés), mientras que en la etapa de disipación encontraron una mayor dependencia de las parametrizaciones de la microfísica. Otros autores como Payra y Mohan (2014), Ryerson y Hacker (2014) y Van der Velde et al. (2010) coinciden que el contenido de agua líquida (LWC, Liquid Water Content, por sus siglas en inglés) no corresponde con lo observado. En general, existen diferentes esfuerzos enfocados para la modelación y pronóstico de niebla en diferentes regiones del mundo, donde las condiciones locales son un reto para cada uno.

Por lo tanto, en este trabajo se modeló la niebla para la Cuenca de México a través de WRF, en cual se puntualizó la sensibilidad del modelo con respecto a la resolución espacial y temporal, la estabilidad del modelo respecto al mejor tiempo para comenzar la modelación antes de la formación de la niebla y se realizó un análisis de todas las parametrizaciones microfísicas y especialmente de capa límite plantearía.

## **Weather Research and Forecasting (WRF)**

El Weather Research and Forecasting (WRF, v3.4) es un modelo de simulación de la atmósfera de área limitada, no hidrostático, sensible a las características del terreno y diseñado para predecir la circulación atmosférica a escala sinóptica, mesoescala y regional. Las principales características del modelo son: la capacidad de anidamiento múltiple de malla; la configuración dinámica y no hidrostática que permite ser usado en una escala de unos pocos kilómetros; al estar dividido en módulos, permite una gran capacidad de asimilación de información, así como la modificación o selección de parametrizaciones físicas. El WRF es utilizado ampliamente por la comunidad meteorológica ya que puede producir simulaciones basadas en condiciones atmosféricas reales (es decir, a partir de observaciones y reanálisis) o condiciones idealizadas. (Guerrero-Higuera et al., 2007).

El WRF ha sido desarrollado desde el 2004 por el National Center for Atmospheric Research (NCAR), la National Oceanic and Atmospheric Administration (representada por el National Center for Environmental Prediction (NCEP) y el Forecast Systems Laboratory (FSL)), la Air Force Weather

Agency (AFWA), el Naval Research Laboratory, la Universidad de Oklahoma y la Federal Aviation Administration (FAAA).

Los datos que componen las salidas del modelo son en formato netCDF (network Common Data Form), el cual es un conjunto de interfaces en forma de arreglos y para acceso de Fortran, C++, Java y otros lenguajes de programación. Este tipo de formato permite que se incluya información sobre los datos que contiene, que sea portable y accesible de manera eficiente, además de que es posible añadir datos sin redefinir su estructura, permitiendo accesos a los datos de forma simultánea y las versiones futuras y versiones anteriores de netCDF.

El WRF, consiste en módulos estructurados. En la figura 10 se muestra el diagrama de flujo del sistema de modelado WRF versión 3, el cual consta de estos programas principales:

- El sistema de preprocesamiento WRF (WPS)
- WRF-DA
- Solucionador ARW
- Post-procesamiento y herramientas de visualización

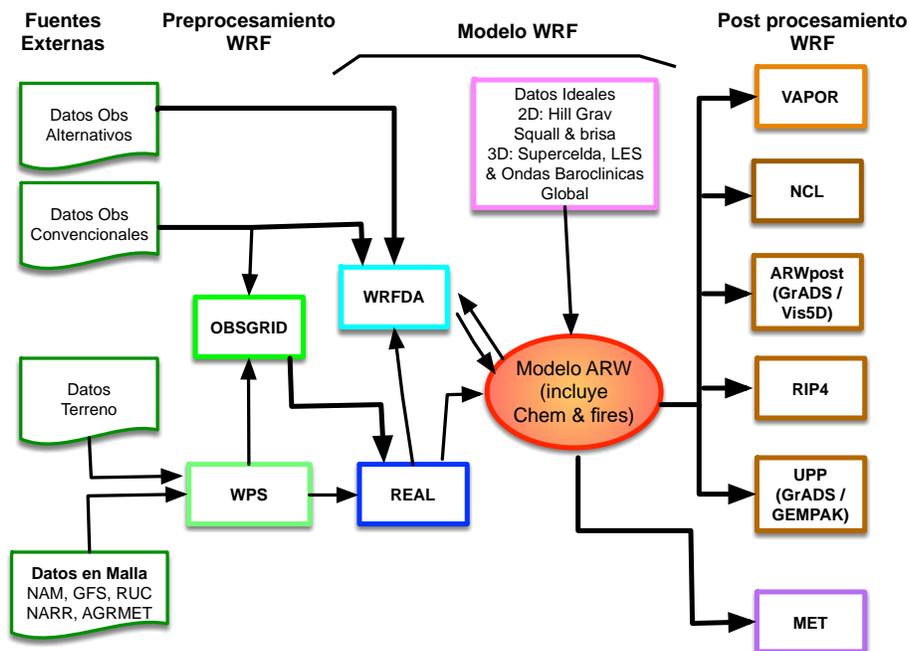


Figura 10. Estructura de WRF (Tomada de ARW, 2010).

El Sistema de pre-procesamiento de WRF (WPS) es un conjunto de tres programas (Geogrid, Ungrib y Metgrib) cuyo rol colectivo es preparar aportes al programa real para simulaciones de datos reales (Figura 11).

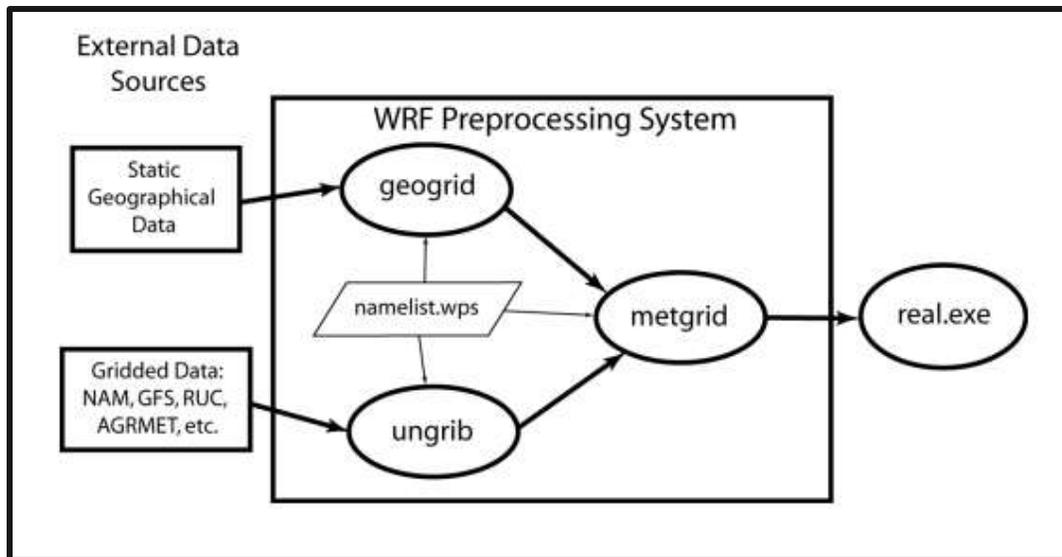
- GEOGRID: Permite configurar el área geográfica objeto de estudio, teniendo en cuenta la topografía, usos del suelo y características físicas del terreno en función de la época del año. El dominio seleccionado queda definido por las coordenadas geográficas de las fronteras de dicho dominio. El anidamiento es necesario para realizar pronósticos en áreas del orden de mesoescala. La resolución espacial de las condiciones iniciales fijadas desde un modelo de circulación general/regional obliga a definir dominios que permitan ejecutar el modelo, imponiendo las condiciones de contorno necesarias para asegurar la estabilidad de las salidas.

- UNGRIB: Prepara los datos de inicialización del modelo y las condiciones de contorno, fijados por la salida de un modelo de mayor cobertura espacial, como GFS o ECMWF, adaptándose a las características de los dominios definidos en METGRID.

- METGRID: Interpola horizontalmente los diferentes campos meteorológicos extraídos de los datos de inicialización del modelo.

- REAL: Realiza la interpolación vertical de los datos y define las coordenadas de presión.

- WRF: Contiene las ecuaciones físicas de pronóstico y diagnóstico para un cierto tiempo. En este módulo se incluyen también las parametrizaciones que permiten describir los fenómenos físicos cuyas escalas espacial y temporal son inferiores a la resolución fijada en las simulaciones (Información tomada de Web-UCAR).



**Figura 11.** Pre-procesamiento de WRF (Imagen tomada de: [http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user\\_guide\\_V3.6/ARWUsersGuideV3.6.1.pdf](http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user_guide_V3.6/ARWUsersGuideV3.6.1.pdf))

Las opciones físicas con las que cuenta WRF que se pueden configurar se encuentran en las siguientes categorías: microfísicas, Capa Límite Planetaria (CLP), de superficie – uso de suelo, de radiación, opciones dinámicas, parametrizaciones de Cúmulos y opciones topográficas de diferentes resoluciones espaciales.

## Parametrizaciones

La American Meteorological Society (AMS) define como parametrización a una representación, en un modelo dinámico, de los efectos físicos en términos de parámetros simplificados. Por lo que un parámetro, en general, es cualquier variable dependiente. Más específicamente, el término se usa a menudo para distinguir, de las variables dependientes, cantidades que pueden asignarse de manera más o menos arbitraria para los fines del problema en cuestión. En terminología estadística, es cualquier constante numérica derivada de una población o una distribución de probabilidad.

### Parametrizaciones microfísicas de WRF

La microfísica de nube se refiere al conjunto de procesos físicos que controlan la formación de gotitas de nubes y cristales de hielo, su crecimiento hasta la precipitación. Estos procesos actúan sobre las escalas de gotitas de nube e hidrometeoros, con diámetros del orden de micrómetros (6-10  $\mu\text{m}$ ) a milímetros (2 a 5 mm) para gotas y de centímetros para precipitación fría. En consecuencia, estos

procesos ocurren en escalas pequeñas muy por debajo de las que pueden resolverse mediante modelos numéricos de predicción del tiempo.

Existen ocho especies primarias de microfísica: vapor de agua, gotas de nubes, gotas de lluvia, cristales de hielo de nubes, nieve, hielo bordeado, graupel y granizo. Una parametrización microfísica no necesita incluir todas las especies microfísicas. Por ejemplo, las parametrizaciones microfísicas líquidas no incluyen especies congeladas. Solo el vapor de agua, las gotas de nubes y las gotas de lluvia, y los procesos físicos asociados con su formación, crecimiento y rompimiento, se incluyen dentro la fase líquida.

En general, las especies microfísicas líquidas son más fáciles de parametrizar que las especies microfísicas congeladas. En la primera aproximación, tanto las gotas de nubes como las gotas de lluvia son esferoides, y hay pocos procesos físicos que deben tenerse en cuenta para representar con precisión su formación, crecimiento y rompimiento. A la inversa, las especies congeladas tienen una amplia gama de formas (o hábitos) y tamaños, y existen procesos físicos poco conocidos que deben tomarse en cuenta como la densidad de partículas, la concentración del número total y la velocidad de caída.

Entonces, los procesos microfísicos de la nube pueden dar como resultado cambios de fase en las especies de agua. Dichos cambios de fase están asociados con el calentamiento latente, incluido el calentamiento (condensación, congelación, deposición) y el enfriamiento (evaporación, fusión, sublimación).

Existen dos clases de parametrizaciones microfísicas, que se distinguen por la forma en que representan la distribución de tamaño (que relaciona la concentración del número total por unidad de volumen y diámetro de partícula) para las especies microfísicas: bin y bulk. Las parametrizaciones microfísicas de tipo bin discretizan la distribución de las partículas dividida en un número finito de categorías (bins). Para cada categoría, las ecuaciones predicen la concentración del número total de partículas por unidad de volumen de cada especie. Los cambios en la concentración del número total por unidad de volumen pueden resultar de las conversiones entre especies microfísicas o del crecimiento y decrecimiento de las partículas. La existencia de un gran número de bins (categorías) y, por lo tanto, una gran cantidad de ecuaciones predictivas hace que las parametrizaciones de la microfísica de tipo bins sean costosas computacionalmente en comparación con las de bulk.

El esquema de tipo *bulk* es una distribución de tamaño que asume una forma funcional como una exponencial inversa (Marshall-Palmer), lognormal o una función de tipo gamma.

La mayoría de los esquemas de microfísicos disponibles en WRF son de tipo *bulk*.

Basado en consideraciones heurísticas, Kessler (1969) introdujo ecuaciones que describen la evolución de las concentraciones de masa de agua de nube y de agua de lluvia mediante los procesos básicos de coagulación, autoconversión y acreción. Sin embargo, como lo han demostrado Beheng y Doms (1986), el método de Kessler no puede reproducir el desarrollo temporal de la masa de agua de lluvia si se consideran diferentes distribuciones de tamaño de gotitas de nubes con el mismo contenido de agua líquida.

Las comparaciones de tipo *bulk* y el tratamiento detallado de la microfísica en la nube dentro de los modelos atmosféricos han demostrado que la tasa de autoconversión a menudo está sobreestimada por las parametrizaciones habituales, especialmente en la etapa inicial de la evolución de la nube. También para la simulación y pronóstico del agua líquida subenfriada (SLW, por sus siglas en inglés: Supercooled Liquid Water) en nubes frías, es necesaria una descripción precisa del proceso de autoconversión, ya que solo las pequeñas gotas de nube pueden formar SLW, mientras que las gotas de lluvia se eliminan muy rápidamente mediante sedimentación. Por lo tanto, una sobreestimación de la tasa de autoconversión conduce a una subestimación de SLW.

La eficiencia de estos esquemas microfísicos radica en que no consideran las ecuaciones de las distribuciones de partículas por tamaños de los distintos hidrometeoros, sino para un cierto número de momentos de la distribución. El momento de orden  $k$  de una distribución está dado por  $M^{(k)} = \int_0^{\infty} x^k f(x) dx$ , siendo  $k$  un número entero positivo. Los esquemas que usan un sólo momento de la distribución son conocidos como esquemas de un momento y usualmente calculan la masa de los hidrometeoros ( $k=1$ ), mientras que los esquemas que emplean dos momentos calculan normalmente la concentración ( $k=2$ ) y la masa ( $k=1$ ), los cuales son denominados esquemas de doble momento. El sistema de ecuaciones para calcular los momentos de la distribución no es cerrado ya que las ecuaciones para el momento  $k$ -ésimo incluye términos con momentos de orden superior (Seifert y Beheng, 2001). Este problema es típicamente representando la distribución en una función gamma.

La eficiencia de estos esquemas microfísicos radica en que no consideran las ecuaciones de las distribuciones de partículas por tamaños de los distintos hidrometeoros, sino para un cierto número de

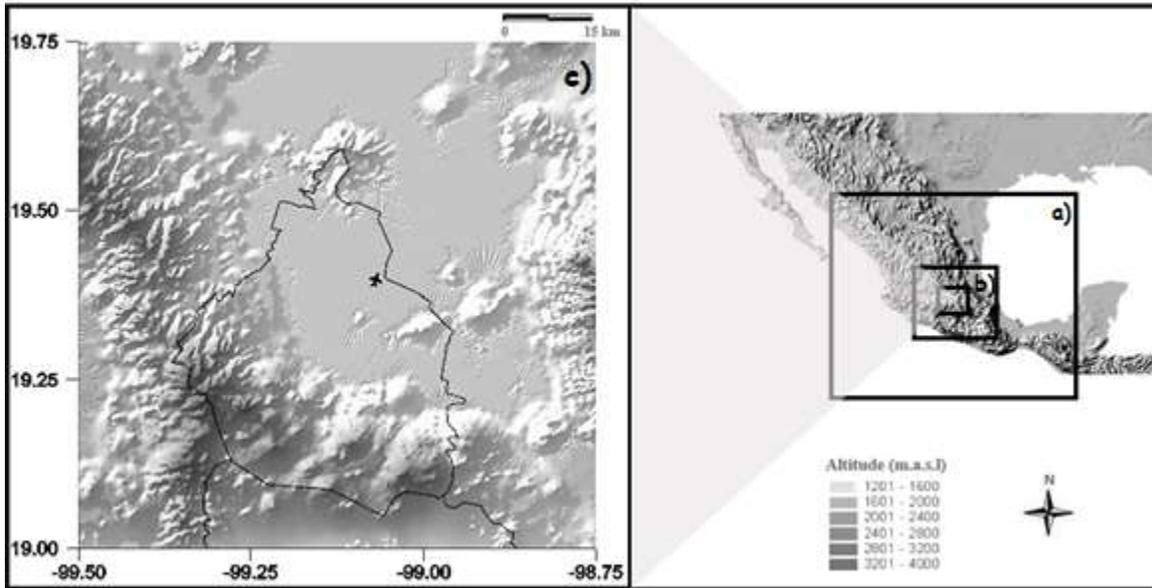
momentos de la distribución. El momento de orden  $k$  de una distribución está dado por  $M^{(k)} = \int_0^{\infty} x^k f(x) dx$ , siendo  $k$  un número entero positivo. Los esquemas que usan un sólo momento de la distribución son conocidos como esquemas de un momento y usualmente calculan la masa de los hidrometeoros ( $k=1$ ), mientras que los esquemas que emplean dos momentos calculan normalmente la concentración ( $k=2$ ) y la masa ( $k=1$ ), los cuales son denominados esquemas de doble momento. El sistema de ecuaciones para calcular los momentos de la distribución no es cerrado ya que las ecuaciones para el momento  $k$ -ésimo incluye términos con momentos de orden superior (Seifert y Beheng, 2001).

## Metodología

Para la modelación de la niebla, se tomó como base los 413 eventos reportados por METAR en el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México para el periodo de 1999 al 2018. Ver anexo A de los eventos de niebla.

Como datos de entrada para WRF, se usaron los reanálisis de NCEP (National Centers for Environmental Prediction) ds084.1 FNL Operational Model Global Tropospheric Analyses.

Se tomaron tres dominios, un dominio madre y dos anidados, con características mostradas en la figura 12, en la tabla 3 y en los archivos namelist que se muestran en el anexo B.



**Figura 12.** Dominios que se usaron para la modelación. Tres dominios anidados

**Tabla 3.** Características de los dominios en WRF

<b>Número de dominios:</b>	3
<b>Resolución:</b>	27 km, 9 km, 3 km. Mostrar
<b>Niveles en la vertical:</b>	35 niveles.
<b>Uso de suelo:</b>	Modificado (Anexo D).
<b>Condiciones iniciales y de frontera</b>	Renálisis GFS para las 00:00 horas GMT

Para determinar cuál es la parametrización que mejor resultados muestra, se realizó un análisis de estas parametrizaciones que consiste en determinar qué configuración de WRF coinciden con las observaciones. Este trabajo, se centró especialmente en las parametrizaciones microfísicas y de capa límite planetaria de WRF. El análisis consistió en examinar, en las salidas del modelo, la razón de agua de nube en la superficie; cabe aclarar que no todas las parametrizaciones logran mostrar una nube cercana a la superficie, por lo que la razón de agua de nube a 2 m es un importante indicativo de niebla en WRF. Otra característica, es que la razón de agua de nube a 2m modelada comenzara a la misma hora que el reporte de niebla observado. De la misma manera, dentro del análisis se evaluó la temperatura ambiente, la temperatura del punto de rocío, el contenido de vapor de agua. Este

análisis se realizó desde la superficie hasta los dos primeros kilómetros de altura, donde la razón de agua de nube se presentó desde la superficie hasta esta altura de forma continua.

Para elegir cuál es la mejor combinación de parametrizaciones microfísica y de capa límite planetaria que tiene mejor respuesta para la modelación de la niebla, se tomaron los años 2017 y 2018 para experimentación, donde se reportaron 23 días con eventos de niebla en el AICM, por lo que se experimentó con todas las combinaciones posibles y por lo tanto cada evento fue modelado realizándose 216 ejecuciones con el WRF.

De las combinaciones que sí mostraron razón de agua de nube cerca de la superficie, se observó una relación con el tipo de niebla clasificado anteriormente en el capítulo II. Por esta razón, se propuso una combinación de parametrizaciones microfísicas y de capa límite planetaria para la niebla por radiación y por frente o por advección.

Posteriormente, se tomó cada parametrización microfísica y de capa límite propuestas para modelar los 413 eventos de niebla reportados en los 20 años de datos por METAR, con el objetivo de confirmar si la configuración propuesta es la que muestra los mejores resultados.

Así mismo, se realizaron diferentes ejercicios de modelación respecto a la hora de comienzo, para analizar la estabilidad del modelo; el primer ejercicio comenzó a ser modelado 72 horas antes de la formación de la niebla, el segundo 48 horas, el tercero 24 horas, el cuarto 12 horas y por último 6 horas antes del primer reporte de niebla en METAR.

## Resultados

Entre los años 2017 y 2018, en METAR hay 23 eventos de niebla (12 y 11 eventos, respectivamente). Cada evento se modeló con todas las parametrizaciones microfísicas y de capa límite planetaria.

A continuación, se presentan tres casos ejemplo de cómo se hizo el análisis para la clasificación de los eventos y la modelación en WRF, tomando un ejemplo de cada tipo de niebla: niebla por frente/advección y niebla por radiación.

Sin embargo, esto se hizo para cada uno de los 413 eventos de niebla.

### Caso 1: Niebla por advección.

#### Evento

9 de noviembre del 2012

#### Clasificación

1.- Con los datos diarios de METAR del AICM, se seleccionaron aquellos los días que tenían reporte de niebla, en METAR la niebla está dada con el código: **FG**= Fog, niebla.

#### Datos METAR para el 9 de noviembre de 2012:

```
MMMX 090853Z 0000KT 8SM SKC 08/06 A3035 NOSIG RMK SLP144 57006 955 HZY CI
METAR MMMX 090945Z 07004KT 7SM SKC 08/06 A3034 NOSIG RMK HZY CI
MMMX 090945Z 07004KT 7SM SKC 08/06 A3034 NOSIG RMK HZY CI
METAR MMMX 091052Z 08007KT 5SM SKC 07/05 A3034 NOSIG RMK HZY FG 1QUAD
MMMX 091052Z 08007KT 5SM SKC 07/05 A3034 NOSIG RMK HZY FG 1QUAD
SPECI MMMX 091146Z 08005KT 1/2SM FG HZ SKC 06/05 A3035 NOSIG RMK VIS TWR
MMMX 091146Z 08005KT 1/2SM FG HZ SKC 06/05 A3035 NOSIG RMK VIS TWR
METAR MMMX 091155Z 06003KT 1/2SM FG HZ BKN010 07/06 A3036 TEMPO 1/4SM FG
  RMK SLP162 52007 907 8/600 VIS TWR
MMMX 091155Z 06003KT 1/2SM FG HZ BKN010 07/06 A3036 TEMPO 1/4SM FG RMK
  SLP162 52007 907 8/600 VIS TWR
SPECI MMMX 091207Z 05004KT 1/4SM FG VV002 07/06 A3036 TEMPO OSM FG RMK
  8//// TWR VIS
MMMX 091207Z 05004KT 1/4SM FG VV002 07/06 A3036 TEMPO OSM FG RMK 8//// TWR
  VIS
METAR MMMX 091250Z 0000KT 1/8SM FG VV002 07/07 A3037 TEMPO 0SM FG RMK
MMMX 091250Z 0000KT 1/8SM FG VV002 07/07 A3037 TEMPO 0SM FG RMK 8//// TWR
METAR MMMX 091325Z 0000KT 1/8SM FG VV002 07/07 A3038 TEMPO 0SM FG VV005
  RMK 8//// VSBY TWR
MMMX 091325Z 0000KT 1/8SM FG VV002 07/07 A3038 TEMPO 0SM FG VV005 RMK
  8//// VSBY TWR
```

METAR MMMX 091349Z 04002KT 0SM FG VV002 07/07 A3038 TEMPO FM1500Z 1/2SM FG VV005 RMK 8//// VSBY TWR  
 MMMX 091349Z 04002KT 0SM FG VV002 07/07 A3038 TEMPO FM1500Z 1/2SM FG VV005  
 SPECI MMMX 091444Z 07004KT 1/4SM FG VV005 08/08 A3040 FM1500Z 1/2SM FG  
 SCT010 TEMPO 1SM BR HZ RMK 8//// VSBY TWR  
 MMMX 091444Z 07004KT 1/4SM FG VV005 08/08 A3040 FM1500Z 1/2SM FG SCT010  
 TEMPO 1SM BR HZ RMK 8//// VSBY TWR  
 MMMX 091451Z 07004KT 1/4SM FG VV005 08/08 A3040 FM1500Z 1/2SM FG SCT010  
 TEMPO 1SM BR HZ SCT010 RMK SLP178 52006 962 8//// VSBY TWR  
 SPECI MMMX 091509Z 08002KT 1SM BR HZ SCT010 10/09 A3040 TEMPO 2SM BR HZ RMK  
 8/600 VSBY TWR  
 MMMX 091509Z 08002KT 1SM BR HZ SCT010 10/09 A3040 TEMPO 2SM BR HZ RMK 8/600  
 VSBY TWR  
 METAR MMMX 091525Z 04003KT 1SM BR HZ SCT010 11/10 A3039 TEMPO 2SM BR HZ RMK  
 MMMX 091525Z 04003KT 1SM BR HZ SCT010 11/10 A3039 TEMPO 2SM BR HZ RMK 8/600  
 SPECI MMMX 091545Z 04003KT 2SM BR HZ SCT010 13/10 A3039 TEMPO 3SM BR HZ SKC  
 RMK 8/600 VSBY TWR

2.- Posteriormente, con el objetivo de analizar el comportamiento atmosférico previo al evento de niebla, se realizó la decodificación del resto de la información METAR desde 48 horas antes del reporte de niebla. En la siguiente tabla se muestra un fragmento de los datos con las horas que reportaron niebla:

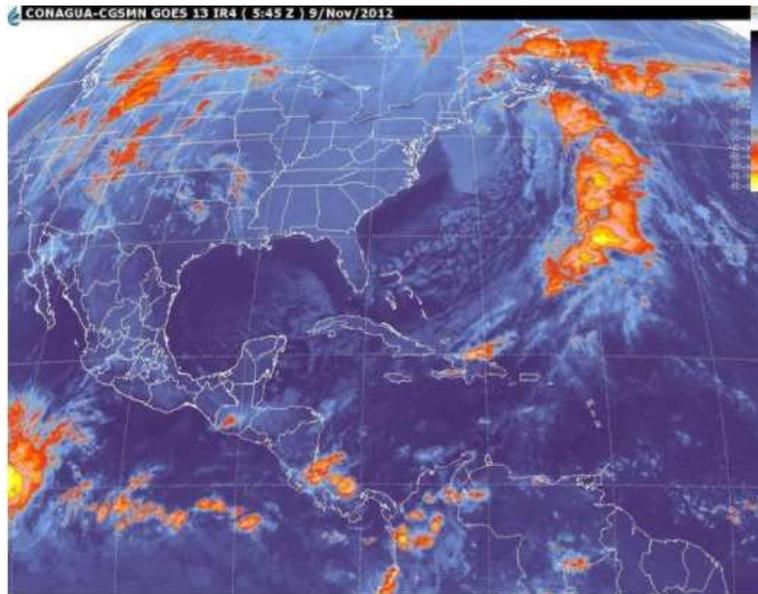
Hora	Temperatura ambiente	Temperatura de punto de rocío	Visibilidad	Viento Dirección	Viento Intensidad	Ubicación de la niebla
10:52z	7°C	5°C	5 SM	80	7 Kt	1° Cuadrante
11:46z	6°C	5°C	½ SM	80	5 Kt	En el AICM
12:50z	7°C	7°C	1/8 SM	---	0 Kt	En el AICM
13:49z	7°C	7°C	0 SM	40	2 Kt	En el AICM
14:44z	8°C	8°C	¼ SM	70	4 Kt	En el AICM
14:51z	8°C	8°C	¼ SM	70	4 Kt	En el AICM

Hora de inicio y final de la niebla, según el reporte:

<b>Inicio</b>	10:52z
<b>Final</b>	14:51z
<b>Duración</b>	4 horas

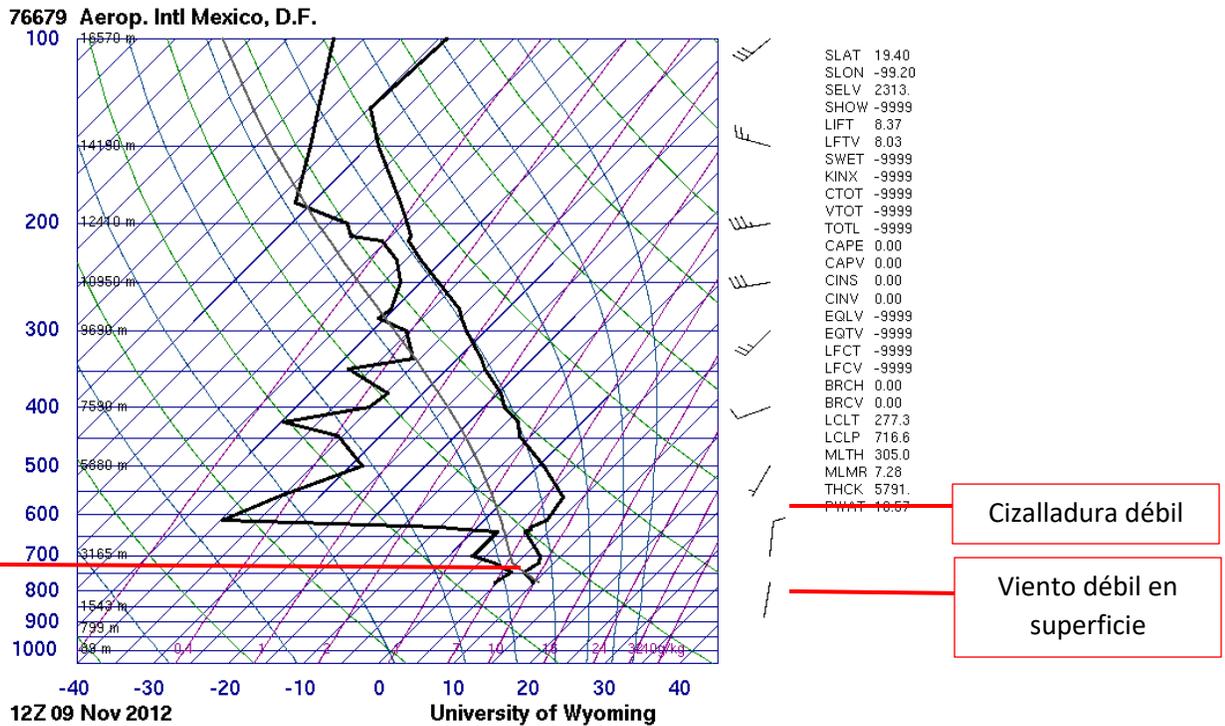
3. Para comprender qué fenómenos meteorológicos están asociados a las condiciones de niebla en la región de interés se revisaron los sistemas atmosféricos y las condiciones meteorológicas mencionadas en el boletín, el siguiente párrafo son las condiciones descritas en el boletín meteorológico del 9 de noviembre del 2012:

La **circulación de la dorsal sobre el Golfo de México** mantendrá el viento del sur y sureste en la mayor parte de la región hasta el próximo domingo. Tal situación continuara apoyándose con **subsistencia en la atmósfera alta para mantener las condiciones estables** durante este periodo, permitiendo temperaturas altas durante el día, pero persistiendo el ambiente fresco a frío por la noche en zonas de montaña con heladas significativas al amanecer en partes altas. Finalmente, en información tropical, un nuevo disturbio se ha desarrollado al oeste-suroeste de las Islas de Cabo Verde, mostrando baja probabilidad para su desarrollo



**Figura 13.** Imagen satelital del boletín meteorológico del 9 de noviembre del 2012

4 – También, para analizar las características meteorológicas locales durante el evento de niebla, se analizaron los datos de radiosondeo, buscando las características descritas en la figura 4:



**Figura 14.** Radiosondeo de la Ciudad de México del 9 de noviembre 2009 a las 12z.

4.- Por lo tanto, tomando los datos anteriormente mencionados y la metodología para clasificar el tipo de niebla mostrada en la figura 4 se realizó la clasificación de cada evento de niebla:

En el boletín meteorológico, ¿se menciona un sistema frontal?	No	Tipo de niebla según su sistema precursor:  <b>Niebla por advección</b>
El boletín meteorológico, ¿menciona entrada de humedad del océano (por un sistema sinóptico) o un sistema tropical?	Sí	
El radiosondeo, ¿muestra cizalladura débil en o cerca de la superficie?	Sí	

## Caso niebla por advección:

### Evento

9 de noviembre del 2012

### Clasificación

1.- Con los datos diarios de METAR del AICM, se seleccionaron aquellos los días que tenían reporte de niebla, en METAR la niebla está dada con el código: **FG**= Fog, niebla.

#### Datos METAR

MMM 090853Z 0000KT 8SM SKC 08/06 A3035 NOSIG RMK SLP144 57006 955 HZY CI  
METAR MMM 090945Z 07004KT 7SM SKC 08/06 A3034 NOSIG RMK HZY CI  
MMM 090945Z 07004KT 7SM SKC 08/06 A3034 NOSIG RMK HZY CI  
METAR MMM 091052Z 08007KT 5SM SKC 07/05 A3034 NOSIG RMK HZY **FG** 1QUAD  
MMM 091052Z 08007KT 5SM SKC 07/05 A3034 NOSIG RMK HZY **FG** 1QUAD  
SPECI MMM 091146Z 08005KT 1/2SM **FG** HZ SKC 06/05 A3035 NOSIG RMK VIS TWR  
MMM 091146Z 08005KT 1/2SM **FG** HZ SKC 06/05 A3035 NOSIG RMK VIS TWR  
METAR MMM 091155Z 06003KT 1/2SM **FG** HZ BKN010 07/06 A3036 TEMPO 1/4SM **FG**  
RMK SLP162 52007 907 8/600 VIS TWR  
MMM 091155Z 06003KT 1/2SM **FG** HZ BKN010 07/06 A3036 TEMPO 1/4SM **FG** RMK  
SLP162 52007 907 8/600 VIS TWR  
SPECI MMM 091207Z 05004KT 1/4SM **FG** VV002 07/06 A3036 TEMPO OSM **FG** RMK  
8//// TWR VIS  
MMM 091207Z 05004KT 1/4SM **FG** VV002 07/06 A3036 TEMPO OSM **FG** RMK 8//// TWR  
VIS  
METAR MMM 091250Z 0000KT 1/8SM **FG** VV002 07/07 A3037 TEMPO 0SM **FG** RMK  
MMM 091250Z 0000KT 1/8SM **FG** VV002 07/07 A3037 TEMPO 0SM **FG** RMK 8//// TWR  
METAR MMM 091325Z 0000KT 1/8SM **FG** VV002 07/07 A3038 TEMPO 0SM **FG** VV005  
RMK 8//// VSBY TWR  
MMM 091325Z 0000KT 1/8SM **FG** VV002 07/07 A3038 TEMPO 0SM **FG** VV005 RMK  
8//// VSBY TWR  
METAR MMM 091349Z 04002KT 0SM **FG** VV002 07/07 A3038 TEMPO FM1500Z 1/2SM **FG**  
VV005 RMK 8//// VSBY TWR  
MMM 091349Z 04002KT 0SM **FG** VV002 07/07 A3038 TEMPO FM1500Z 1/2SM **FG** VV005  
SPECI MMM 091444Z 07004KT 1/4SM **FG** VV005 08/08 A3040 FM1500Z 1/2SM **FG**  
SCT010 TEMPO 1SM BR HZ RMK 8//// VSBY TWR  
MMM 091444Z 07004KT 1/4SM **FG** VV005 08/08 A3040 FM1500Z 1/2SM **FG** SCT010  
TEMPO 1SM BR HZ RMK 8//// VSBY TWR  
MMM 091451Z 07004KT 1/4SM **FG** VV005 08/08 A3040 FM1500Z 1/2SM **FG** SCT010  
TEMPO 1SM BR HZ SCT010 RMK SLP178 52006 962 8//// VSBY TWR  
SPECI MMM 091509Z 08002KT 1SM BR HZ SCT010 10/09 A3040 TEMPO 2SM BR HZ RMK  
8/600 VSBY TWR  
MMM 091509Z 08002KT 1SM BR HZ SCT010 10/09 A3040 TEMPO 2SM BR HZ RMK 8/600  
VSBY TWR  
METAR MMM 091525Z 04003KT 1SM BR HZ SCT010 11/10 A3039 TEMPO 2SM BR HZ RMK  
MMM 091525Z 04003KT 1SM BR HZ SCT010 11/10 A3039 TEMPO 2SM BR HZ RMK 8/600

SPECI MMMX 091545Z 04003KT 2SM BR HZ SCT010 13/10 A3039 TEMPO 3SM BR HZ SKC  
 RMK 8/600 VSBY TWR

2.- Posteriormente, con el objetivo de analizar el comportamiento atmosférico previo al evento de niebla, se realizó la decodificación del resto de la información METAR desde 48 horas antes del reporte de niebla. En la siguiente tabla se muestra un fragmento de los datos con las horas que reportaron niebla:

Hora	Temperatura ambiente	Temperatura de punto de rocío	Visibilidad	Viento Dirección	Viento Intensidad	Ubicación de la niebla
10:52z	7°C	5°C	5 SM	80	7 Kt	1° Cuadrante
11:46z	6°C	5°C	½ SM	80	5 Kt	En el AICM
12:50z	7°C	7°C	1/8 SM	----	0 Kt	En el AICM
13:49z	7°C	7°C	0 SM	40	2 Kt	En el AICM
14:44z	8°C	8°C	¼ SM	70	4 Kt	En el AICM
14:51z	8°C	8°C	¼ SM	70	4 Kt	En el AICM

Hora de inicio y final de la niebla, según el reporte:

Inicio	10:52z
Final	14:51z
Duración	4 horas

3.- Para comprender qué fenómenos meteorológicos están asociados a las condiciones de niebla en la región de interés se revisaron los sistemas atmosféricos y las condiciones meteorológicas mencionadas en el boletín. El siguiente párrafo son las condiciones descritas y la imagen de satélite (Figura 14) en el boletín meteorológico del 9 de noviembre del 2012:

*La **circulación de la dorsal sobre el Golfo de México** mantendrá el viento del sur y sureste en la mayor parte de la región hasta el próximo domingo. Tal situación continuara apoyándose con **subsistencia en la atmósfera alta para mantener las condiciones estables** durante este periodo, permitiendo temperaturas altas durante el día, pero persistiendo el ambiente fresco a frío por la noche en zonas de montaña con heladas significativas al amanecer en partes altas. Finalmente, en información tropical, un nuevo disturbio se ha desarrollado al oeste-suroeste de las Islas de Cabo Verde, mostrando baja probabilidad para su desarrollo.*

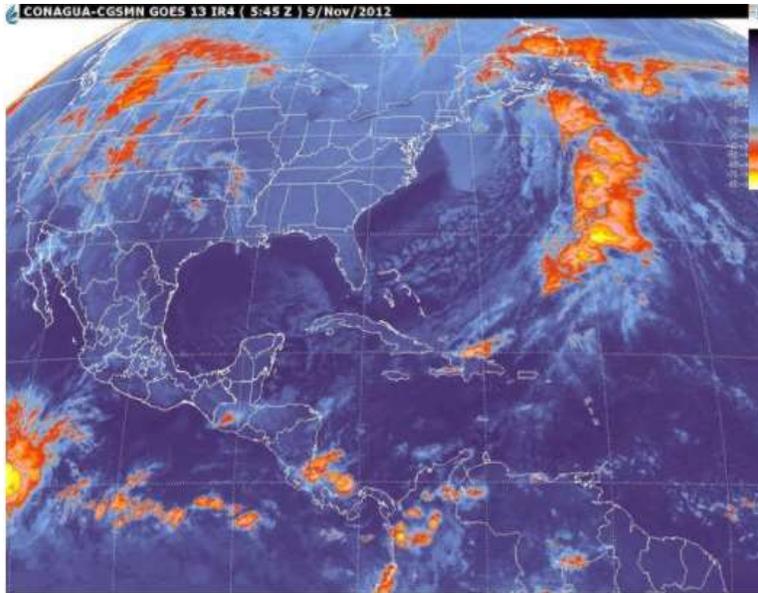


Figura 15. Imagen satelital del boletín meteorológico del 9 de noviembre del 2012

4.- También, para analizar las características meteorológicas locales durante el evento de niebla, se analizaron los datos de radiosondeo, buscando las características descritas en la figura 4:

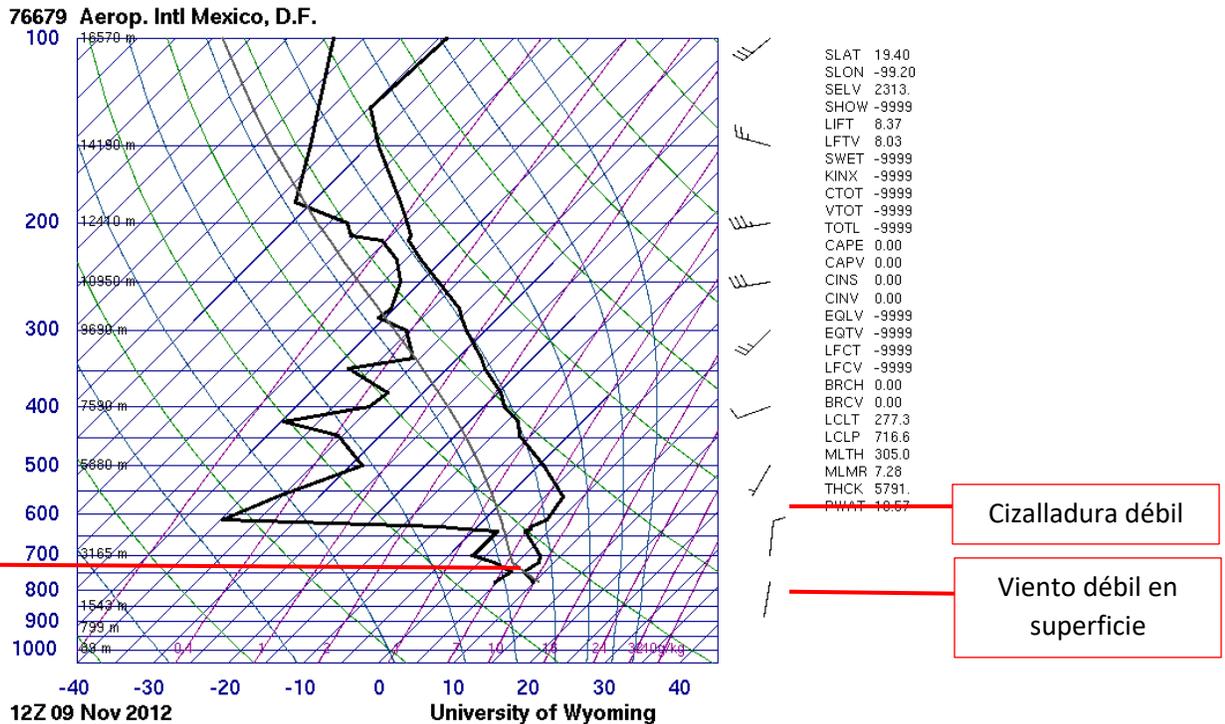


Figura. 16. Radiosondeo de la Ciudad de México del 9 de noviembre 2009 a las 12Z.

4.- Por lo tanto, tomando los datos anteriormente mencionados y la metodología para clasificar el tipo de niebla mostrada en la figura 4 se realizó la clasificación de cada evento de niebla:

En el boletín meteorológico, ¿se menciona un sistema frontal?	No	Tipo de niebla según su sistema precursor:  <b>Niebla por advección</b>
El boletín meteorológico, ¿menciona entrada de humedad del océano (por un sistema sinóptico) o un sistema tropical?	Sí	
El radiosondeo, ¿muestra cizalladura débil en o cerca de la superficie?	Sí	

**Elección de la configuración del modelo: análisis del comportamiento de las parametrizaciones: microfísicas y de capa límite, en el tiempo de modelación.**

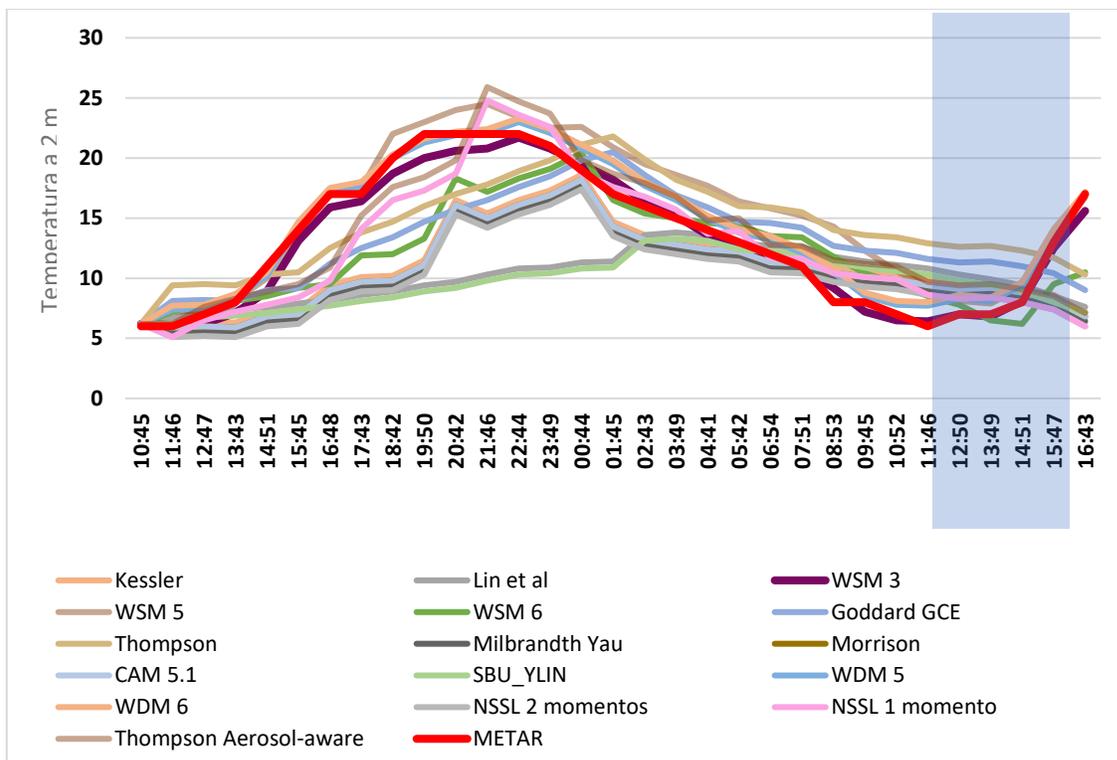
Para describir cómo se realizó la modelación de cada día con niebla identificado en el periodo 1999-2018, como ejemplo, se continúa explicando la modelación del día con niebla del 9 de noviembre del 2012.

Con el objetivo de analizar cuál es el comportamiento de las parametrizaciones microfísicas de WRF, se realizaron modelaciones con cada una parametrización microfísica precargadas de WRF.

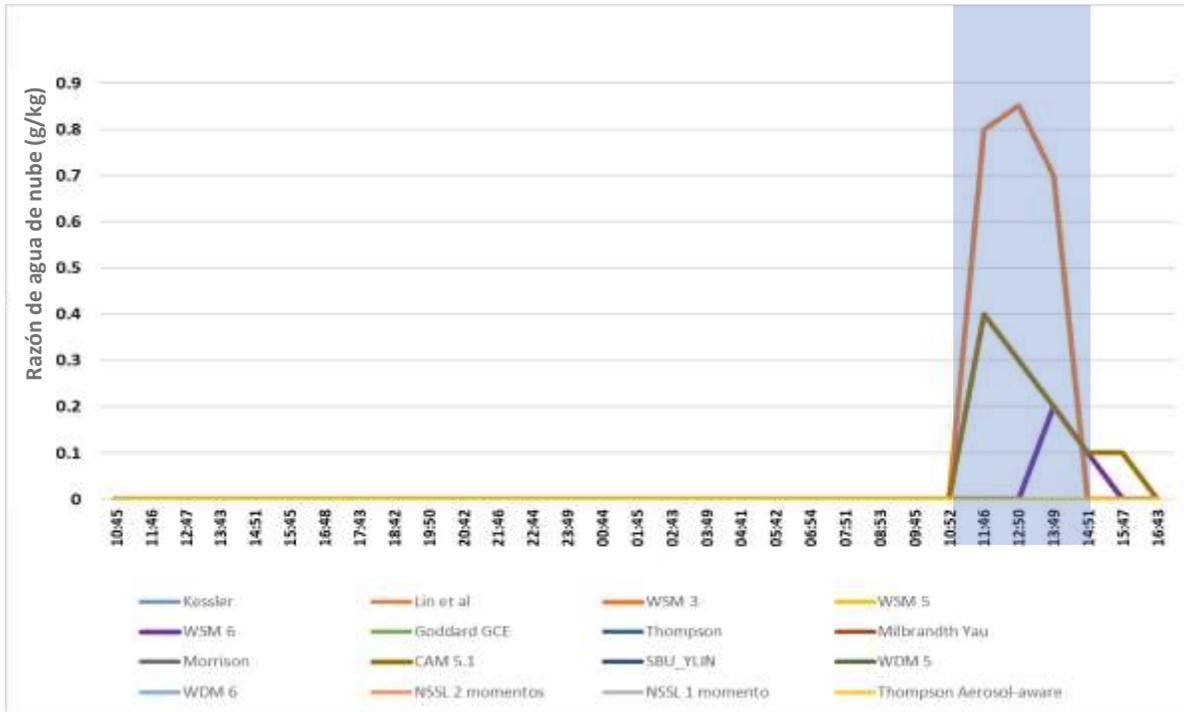
Al comparar la observación contra cada salida al elegir una parametrización microfísica de WRF para cada corrida, se obtiene que la que tiene un comportamiento más cercano a la observación es la parametrización WSM3 para niebla por advección/frente. Observando que la figura 17 muestra temperatura a 2 m y la figura 18, razón de agua de nube a 2m, la cual se puede observar en el mismo rango de tiempo y de valores que los datos de observación, especialmente en el inicio del evento y fin del evento, lo cual en las figuras 17 y 18 se encuentra resaltado en el área azul. Lo que nos da un buen indicativo de la modelación.

Particularmente, en la figura 18, se puede observar que la parametrización WSM3 para este evento por advección destaca por su valor de contenido de agua de nube, donde su máximo de 0.85 g/kg

está en un rango descrito por otros autores, como Jiusto (1981), donde el valor de entre 0.3 y 0.8 g/kg es dado para nieblas en regiones montañosas.



**Figura 17.** Temperatura a 2m con todas las parametrizaciones de WRF. Evento: niebla por advección, 09 de noviembre del 2012 de 10:52 a 14:51 Z.



**Figura 18.** Razón de agua de nube a 2m con todas las parametrizaciones de WRF. Evento: niebla por advección, 09 de noviembre del 2012 de 10:52 a 14:51 Z

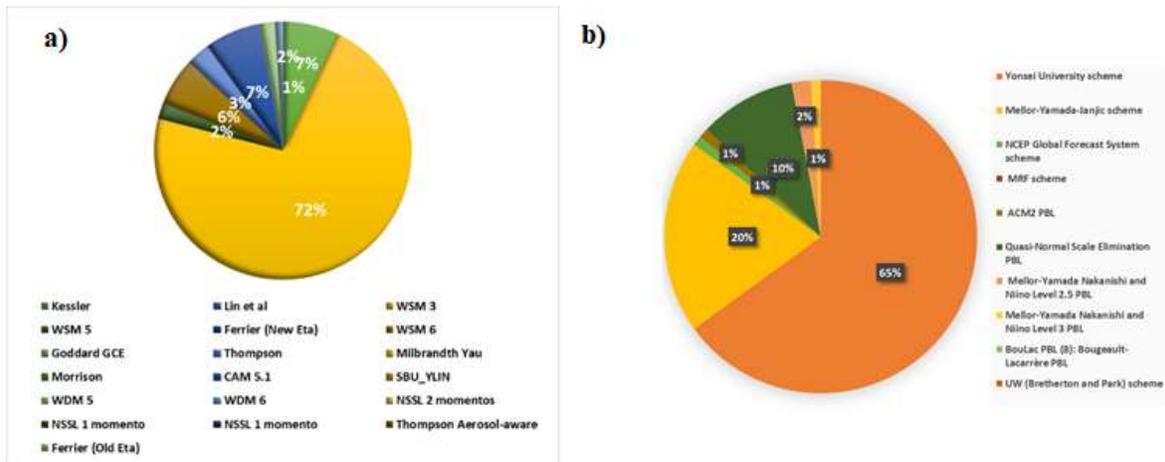
La tabla 4 muestra los porcentajes de eventos con acierto según las combinaciones microfísicas y de capa límite planetaria. Se observa que la parametrización microfísica WSM3 (Hong et al. 2004) es la que tiene mayor porcentaje en casos modelados que presentan niebla en combinación con la parametrización Yonsei University Scheme (Hong, 2010; Hong et al., 2006) para capa límite planetaria (CLP); sin embargo, los eventos clasificados como niebla por radiación no logran ser modelados satisfactoriamente por esta combinación. No obstante, estos eventos de niebla por radiación son modelados satisfactoriamente por la parametrización microfísica CAM (Collins, W. D., et al, 2004) y Quasi-Normal Scale Elimination de CLP (QNSE, Sukoriansky et al., 2005 ). La figura 19 muestra las combinaciones de parametrizaciones microfísicas y de CLP con más aciertos respecto a cada tipo de niebla.

**Tabla 4.** Cantidad de aciertos de eventos certeros de niebla modelados respecto las parametrizaciones microfísicas y de CLP de WRF.

	Yonsei University scheme	Mellor-Yamada-Janjic scheme	NCEP Global Forecast System scheme	MRF scheme	ACM2 PBL	Quasi-Normal Scale Eliminati on PBL	Mellor-Yamada Nakanishi and Niino Level 2.5 PBL	Mellor-Yamada Nakanishi and Niino Level 3 PBL	BouLac PBL (8): Bougeault-Lacarrère PBL	UW (Bretherton and Park) scheme	Total Energy Mass Flux (TEMF) scheme	topo_w ind:	Porcentaje de eventos modelados
Kessler	7	8	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	78%
Lin et al	2	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	22%
WSM 3	19	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	91%
WSM 5	8	4	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	57%
Ferrier (New Eta)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0%
WSM 6	7	3	1	0	0	2	0	0	0	0	0	0	57%
Goddard GCE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0%
Thompson	0	2	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	13%
Milbrandth Yau	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0%
Morrison	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0%
CAM 5.1	8	2	1	0	0	3	0	0	0	0	0	0	61%
SBU_YLIN	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0%
WDM 5	3	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	22%
WDM 6	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9%
NSSL momentos 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0%
NSSL momento 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0%
NSSL momento 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0%
Thompson Aerosol-aware	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0%
Ferrier (Old Eta)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0%

Tomando la mejor combinación de parametrización microfísica y de CLP, según el tipo de niebla, se realizó la modelación de los 20 años de datos del AICM.

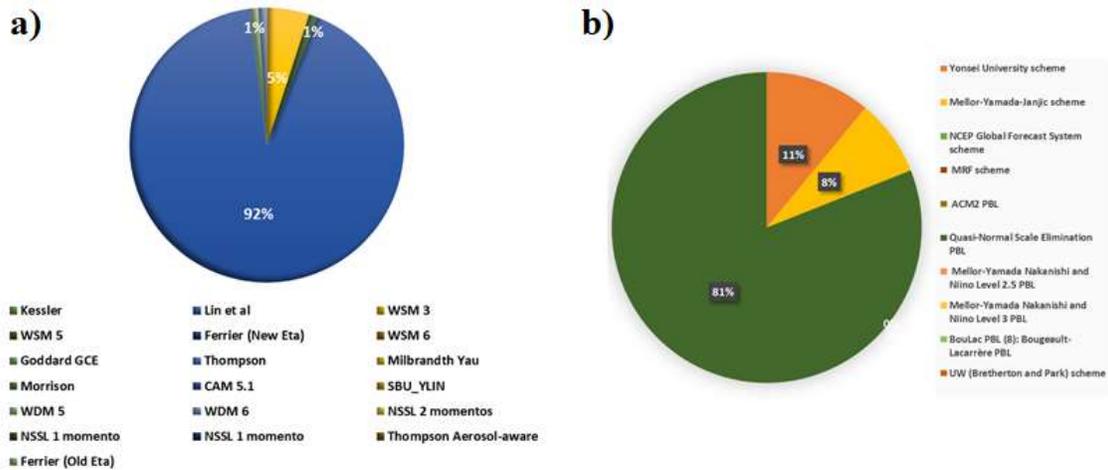
La figura 20 muestra los resultados de combinar la parametrización de CLP YSU con cada parametrización microfísica, donde se observa que 72% de los eventos de niebla por advección/frente tienen resultados satisfactorios con la parametrización microfísica WSM3. Posteriormente, se hizo el mismo ejercicio, se fijó la parametrización WSM3, para los eventos de niebla por advección/frente, para combinarla con cada parametrización de CLP, donde se obtuvo que el 65% de los eventos fueron modelados satisfactoriamente con la parametrización YSU.



**Figura 19.** Porcentaje de aciertos respecto a cada parametrización microfísica de WRF de casos de eventos de niebla por advección o un sistema frontal: a) Parametrizaciones microfísicas, b) Parametrizaciones de CLP.

Para niebla por radiación, se usó la parametrización QNSE con cada parametrización microfísica, con la cual se obtuvo que el 92% de los eventos de niebla por radiación son satisfactoriamente modelados con la parametrización microfísica CAM. Posteriormente, se fijó la parametrización microfísica CAM, la cual fue combinada con cada parametrización de CLP. Los resultados muestran que el 81% de los eventos fueron modelados satisfactoriamente con la parametrización QNSE, figura 20.

El mecanismo de formación de la niebla, es relevante cuando se realiza la modelación debido a la influencia del sistema y la escala meteorológica al que pertenece (Jacobson y Mark, 2005), permitiendo diferenciar la influencia de los mecanismos de formación y la configuración de las parametrizaciones de WRF.

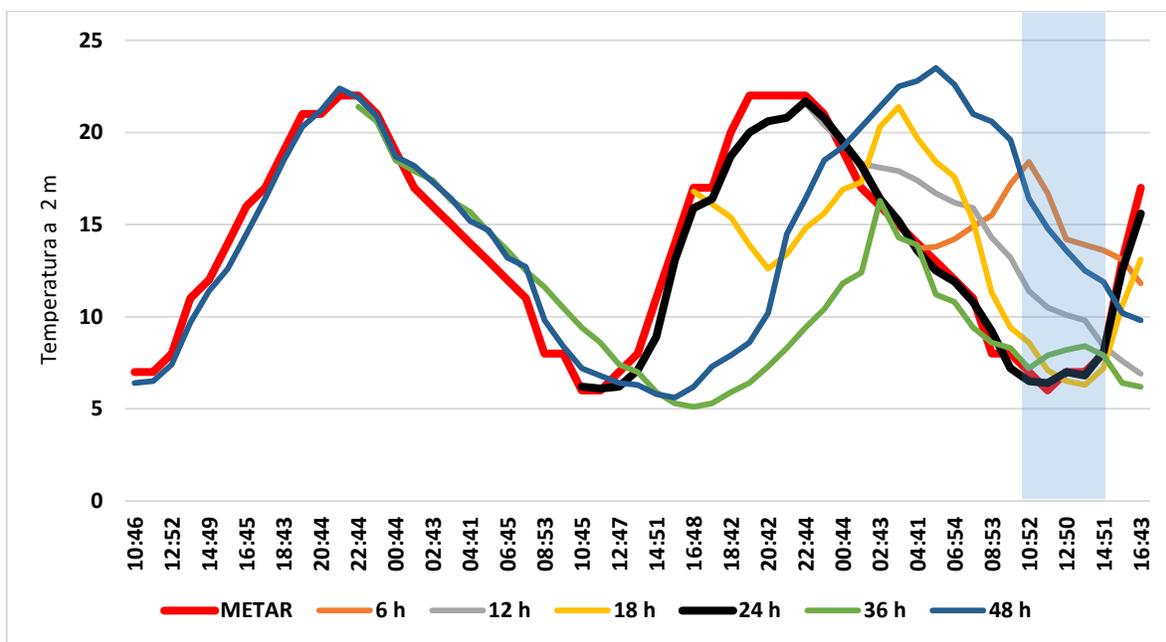


**Figura 20.** Porcentaje de aciertos respecto a cada parametrización microfísica de WRF de casos de eventos de niebla por radiación: a) Parametrizaciones microfísicas, b) Parametrizaciones de CLP.

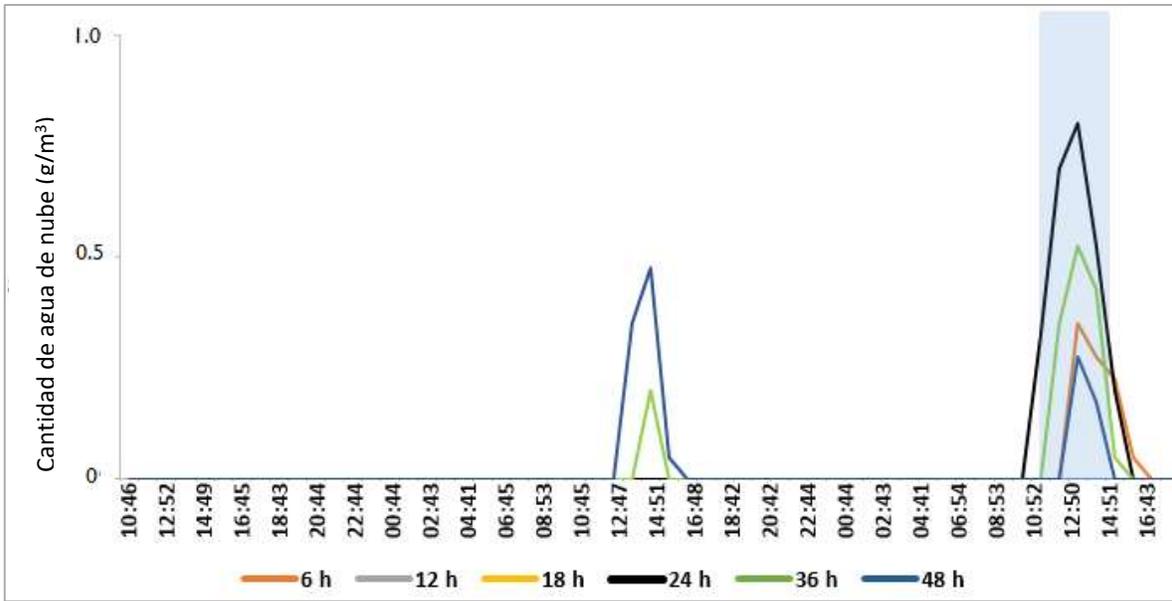
Una vez que se determinó cuáles son las parametrizaciones microfísicas y de capa límite planetaria que establecen resultados muy cercanos a los datos de observación. Se hicieron pruebas de sensibilidad de horas previas de inicio de la simulación con la hora de ocurrencia del evento. Así se observó que correr WRF 24 horas antes del inicio de la niebla con la configuración propuesta. En la figura 21, como ejemplo de lo realizado, se muestra el caso del 9 de noviembre del 2009 donde se comparó diferentes inicios de tiempo de modelación, donde correr el modelo 24 h previas al evento es cuando se obtuvieron los mejores resultados.

En la figura 22, se comparan los resultados del comienzo de modelación: 6, 12, 24, 36 y 48 h previas antes del evento de niebla. Donde se puede observar que la cantidad de agua de nube a los 2 m en la modelación de 24 h previas al evento tiene resultados valores mayores a 0.5 g/m<sup>3</sup>, los cuales están en el rango reportado por otros autores, como Jiusto (1981), en el tipo de niebla por advección. Además, tomando la cantidad de agua de nube modelada cercana a superficie, diferente de cero, como un parámetro de existencia de niebla modelada, se puede observar que el rango de duración del evento de niebla reportado por METAR (10:52 a 14:51 z) coincide con la salida de modelo de 24

h previas al evento. Aunque las salidas de 48 y 36 h muestran una cantidad diferente de cero de la cantidad de agua de nube un día antes del evento de niebla, en los datos METAR, no hay reporte de niebla en ese rango en el día previo de interés en esta modelación (ver descripción del caso en la página 30).



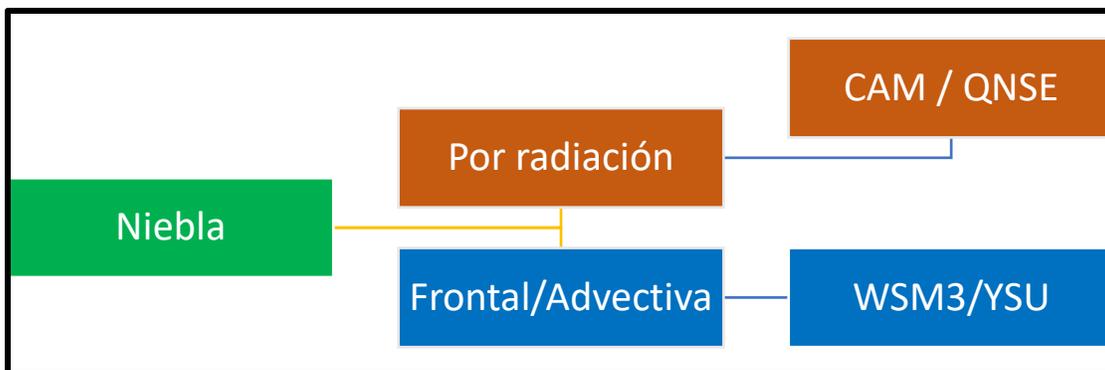
**Figura 21.** Salidas de WRF (temperatura a 2 m) comenzando a distintas horas previas al evento de niebla: 6h, 12h, 18h, 24 h, 36 y 48 h. La región sombreada de azul, indica el evento de niebla: 9 de noviembre del 2012 de 10:52 a 14:51 Z.



**Figura 22.** Salidas de WRF (cantidad de agua de nube) comenzando a distintas horas previas al evento de niebla: 6h, 12h, 18h, 24 h, 36 y 48 h. La región sombreada de azul, indica el evento de niebla: 9 de noviembre del 2012 de 10:52 a 14:51 Z.

Por lo tanto, se consideró acierto en la modelación cuando se tienen las siguientes características:

- 1) Se observa la presencia de contenido de agua líquida cercana a superficie con un grosor de por lo menos 5 metros en adelante.
- 2) Que la presencia de contenido de agua líquida mencionado en el punto 1 coincida con las horas de reporte de niebla de los datos METAR.
- 3) A 2 m, las variables de temperatura ambiente, temperatura de punto de rocío y humedad estén en el rango de observación de los datos reportados por METAR.



**Figura 23.** Resultado del tipo de niebla y las parametrizaciones microfísicas y de CLP con mayor número de aciertos.

## **Análisis de la salida de WRF y su relación con la niebla.**

Al tener identificado la configuración de WRF que mejor resultado mostró para modelación de niebla, respecto a: la combinación de parametrizaciones microfísicas y de capa límite planetaria; y el tiempo de modelación, posteriormente se analizó el comportamiento de la niebla en la modelación con WRF, concentrando los resultados en valores de las observaciones: temperatura, humedad relativa y duración; y comparando los valores de espesor de la capa de niebla, contenido de agua líquida, particularmente razón de agua de nube con las observaciones de otros autores en casos similares.

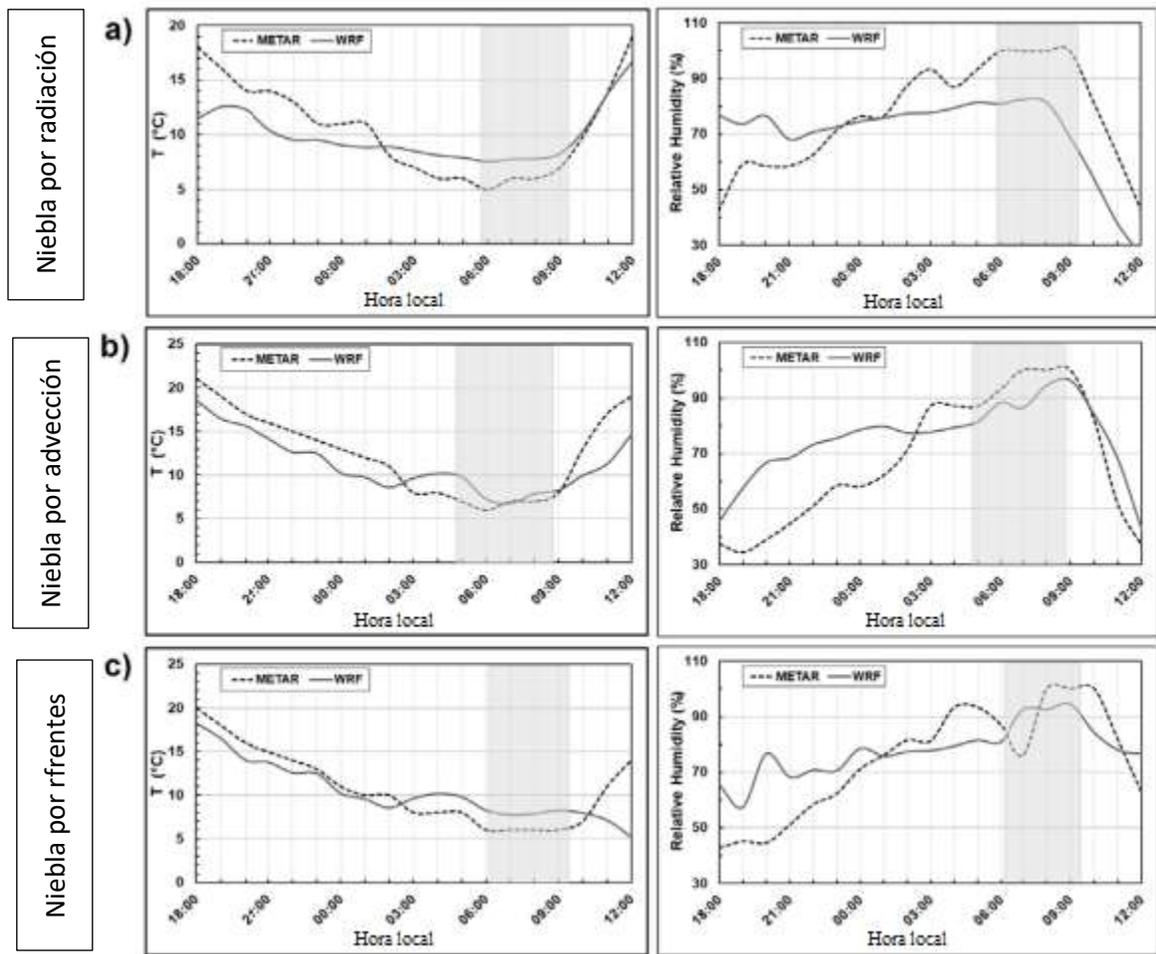
Considerando que las combinaciones diferentes de: parametrizaciones microfísicas/capa límite propuestas fueron:

- ✚ Para nieblas por radiación: CAM 5.1/QNSE.
- ✚ Para nieblas por advección o por frentes: WSM3/YSU.

A continuación, se describen los resultados para tres simulaciones representativas de cada tipo de evento de niebla, según su mecanismo de formación descrito en el Capítulo I.

Para el evento de niebla de radiación, los datos METAR informaron niebla a partir de las 05:51 LST. La figura 24a muestra que los primeros valores la temperatura (a 2 m) están por debajo de lo previsto en el día tiempo antes de las 03:00 LST, aumentando gradualmente.

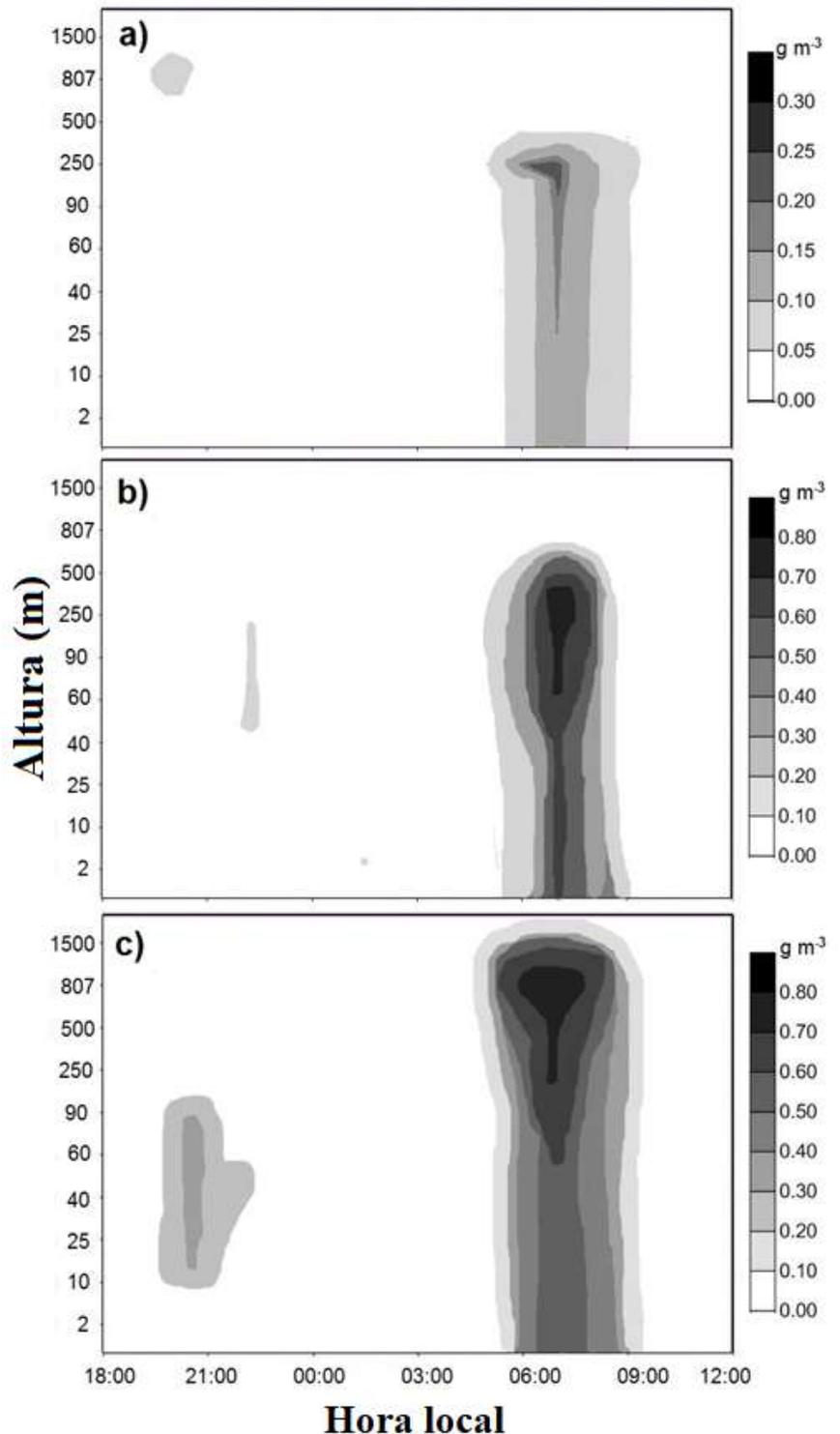
En el momento de la formación de la niebla, tal predicción excesiva alcanza alrededor de 2,5 °C en comparación con los datos de observación METAR.



**Figura 24.** Temperatura observada y simulada (paneles de la izquierda) y humedad relativa (paneles de la derecha) a 2 m sobre el suelo para tres eventos de niebla. a) Niebla de radiación el 26 Noviembre de 2008, formación METAR - tiempos de disipación: 05:51 LST–09:20 LST; b) niebla por advección el 9 de noviembre de 2012, formación METAR - tiempos de disipación: 04:52 LST–08:51 LST; y c) niebla por frentes el 2 de enero de 2004, formación METAR - tiempos de disipación: 06:10 LST–09:20 LST.

En cuanto a los casos de niebla por advección y por frentes, la sobreestimación de la temperatura de la superficie en el momento de la formación de niebla es ligeramente más pequeña que en la niebla de radiación (alrededor de 2°C), y la saturación también comienza alrededor del 80% humedad relativa (Figs. 21(b) y 21(c)). Los espesores de niebla simulada fueron, como era de esperar, mayores: alrededor 600 m y 1.500 m para las nieblas por advección o por frentes, respectivamente (Figs. 22(b) y 22(c)). Es interesante notar que en las tres simulaciones la formación de niebla comienza en lo alto (a una altura de unos 250 m para nieblas de radiación y advección, y unos 800 m para la niebla frontal), luego extendiéndose y hacia abajo para llegar al suelo después de 30 a 60 minutos.

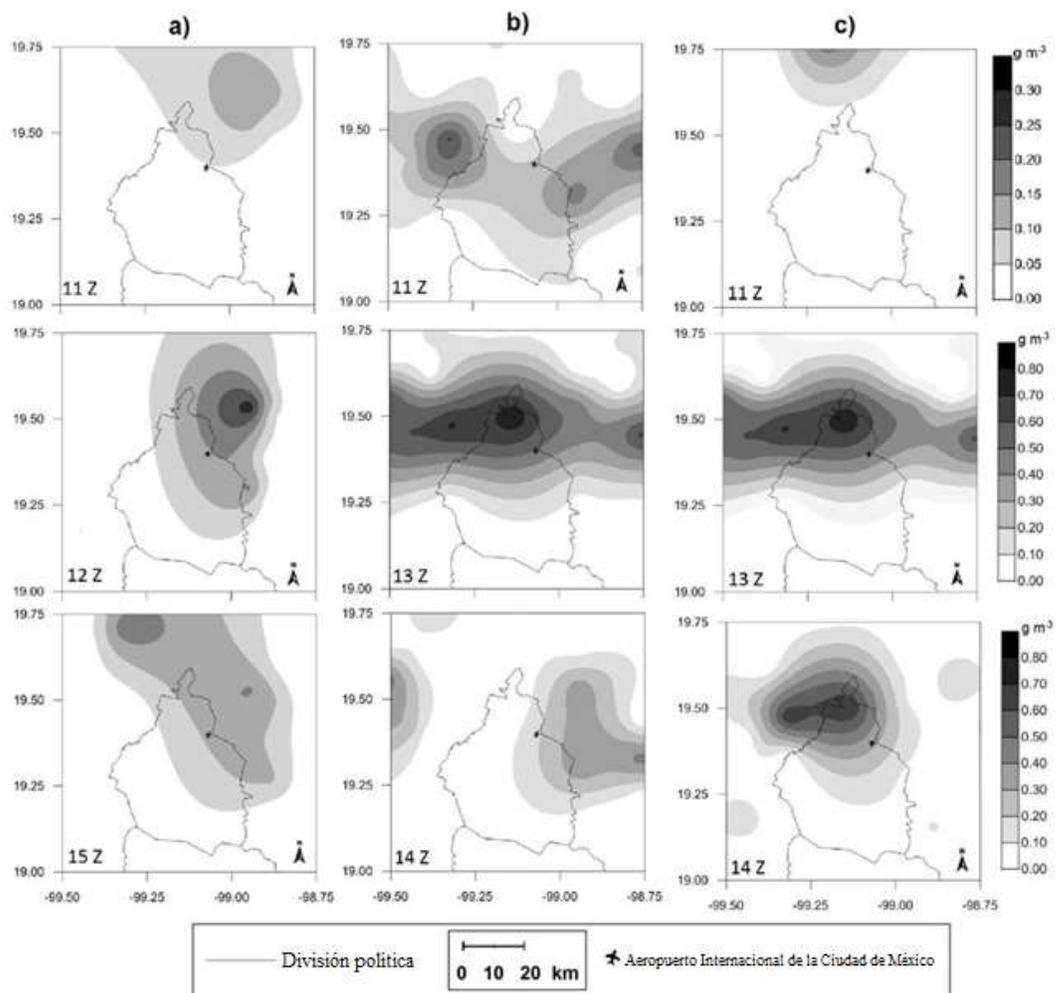
Respecto al espesor de niebla simulado para este evento, fue de alrededor de 250 m, como se define por el contorno de 0,10  $\text{g m}^{-3}$  en la Fig. 22(a). Realizando un análisis espacial del contenido de agua de nube a un nivel de 2 m sobre el suelo, el contenido de agua de nube es del mismo orden de magnitud según las observaciones reportadas por varios



**Figura 25.** Evolución temporal de los perfiles verticales del contenido de agua líquida de las nubes (en  $\text{g m}^{-3}$ ), para tres eventos de niebla del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México a) Niebla de radiación; b) niebla de advección; y c) niebla frontal. Observe el cambio en la escala del contenido de agua líquida de la nube entre los tres tipos de niebla: por radiación y por advección y los episodios de niebla por frentes.

autores (Jiusto, 1981) y particularmente en la región del AICM la presencia de contenido de agua de nube coinciden en el rango temporal de los informes de niebla METAR. Los resultados de la distribución espacial para los eventos por advección o por frente, y los tiempos de formación y disipación también fueron bastante bien reproducidos para los tres tipos de niebla (Fig. 23(b) y 23(c)).

Pagowski et al. (2004) encontraron un comportamiento similar de la formación inicial de la niebla en altura simulando una densa neblina de advección en Canadá, mientras que Zhou y Ferrier (2008) indicaron que esto se debe a la existencia de ciertas turbulencias cerca del suelo.



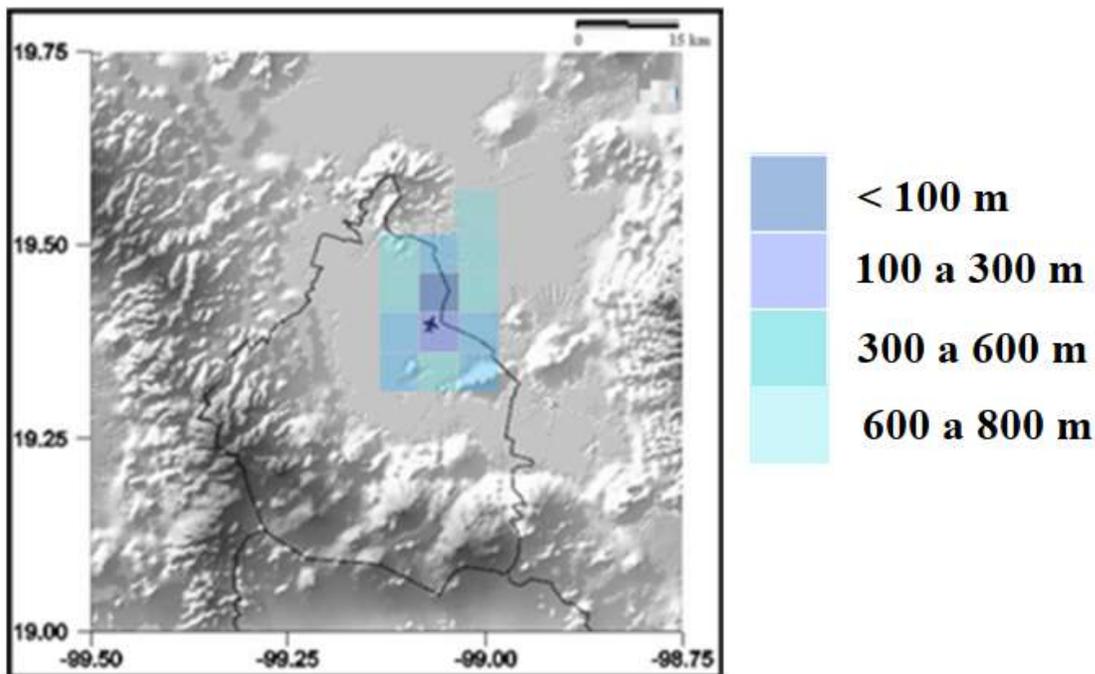
**Figura 26.** Serie temporal de distribución espacial (contenido de agua líquida en la nube, en  $\text{g m}^{-3}$ , a 2 m sobre el suelo) simulada para tres eventos de niebla que se muestran en la Fig. 17. a) Niebla de radiación; b) niebla de advección; y c) niebla frontal. Horarios mostrados en cada panel corresponden aproximadamente, de izquierda a derecha, a las etapas de

formación, maduración y disipación. Observe el cambio de escala para contenido de agua líquida de la nube entre la radiación y la advección y los episodios de niebla frontal

Para estimar la visibilidad durante un evento de niebla, se aplicó una relación que la visibilidad observada ( $Vis_{obs}$ ) y el índice de niebla (Gultepe, et al, 2009).

$$Vis_{obs} = \frac{1.002}{(LWC \cdot N_d)^{0.6473}} \cdot \dots \dots Ec. 1$$

Donde  $LWC [g m^{-3}]$  es el contenido de agua líquida y  $N_d [cm^3]$  es la concentración de gotitas de nubes. Obteniendo una visibilidad de menor de 100 m en las regiones más cercanas al Aeropuerto (Figura 27) donde también podemos especificar que se trata de niebla, por la propia definición de dicho evento.



**Figura 27.** Visibilidad de la niebla. Evento: 9 de noviembre 2012, niebla por radiación.

Con el objetivo de analizar la microfísica en las salidas del modelo con la configuración elegida, se estimó el valor de la concentración del número de gotas por unidad de volumen,  $N_d (m^{-3})$  a través del

contenido de agua (LWC) y el diámetro masivo medio ( $\bar{D}$ ) a partir de las salidas del modelo (tabla 5). La concentración de gotitas, o densidad numérica N, es el número total de gotitas, por unidad de volumen para todos los tamaños presentes:

$$N_d = \int n(r)dr \dots \dots Ec. 2$$

El radio efectivo de la gota  $r_e$  (Hansen & Travis, 1974) y el contenido de agua líquida LWC son:

$$r_e = \frac{\int r^3 n(r)dr}{\int r^2 n(r)dr} \dots \dots Ec. 3$$

$$LW = \frac{4 \pi \rho_w}{3} \int r^3 n(r)dr \dots \dots Ec. 4$$

Las mediciones de la concentración del número de partículas y su masa permiten una estimación del diámetro del volumen medio  $\bar{D}$  de las partículas de las nubes

$$\bar{D} = \left( \frac{6 LW}{\pi N_d} \right)^{1/3} \dots \dots Ec. 5$$

En la tabla 5 se obtuvo que el diámetro volumétrico medio tiene un rango de 7 a 14  $\mu\text{m}$  durante el evento de niebla, el cual es un rango reportado por otros autores como Jiusto (1980). Así mismo, observando que la presencia de gotitas de agua de nube coincidente con el rango temporal donde se reporta el evento de niebla advectiva del 9 de noviembre de 2012, formación METAR - tiempos de disipación: 04:52 LST–08:51; siendo un buen indicio de la modelación de la niebla.

**Tabla 5.** Estimación del diámetro volumétrico medio de la dispersión de gotitas de niebla para el evento de niebla advectiva.

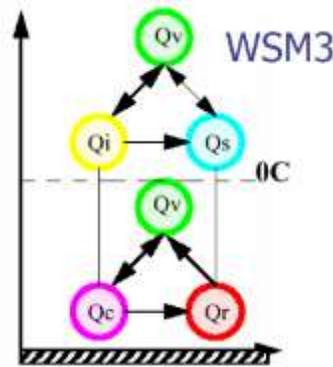
HORA	Concentración de número de gotitas (Droplet Number concentration) ( $\text{kg}^{-1}$ )	Concentración de número de gotitas (Droplet Number concentration) ( $\text{cm}^{-3}$ )	Contenido de agua líquida (LWC) ( $\text{g kg}^{-1}$ ) = ( $\text{g m}^{-3}$ )	Contenido de agua líquida (LWC) ( $\text{mg m}^{-3}$ )	CCN ( $\text{kg}^{-1}$ )	Diámetro volumétrico medio ( $\mu\text{m}$ )
0	0.0E+00	0	0.000	0	0.0E+00	0
1	1.0E-12	0	0.000	0	1.0E+08	0
2	1.3E-06	0	0.000	0	1.0E+08	0
3	3.2E-03	0	0.000	0	1.0E+08	0
4	3.8E+00	0	0.000	0	1.0E+08	0
5	2.7E+00	0	0.000	0	9.9E+07	0
6	5.5E+07	55	0.000	0	9.6E+07	0
7	1.5E+08	146	0.000	0	8.0E+07	0
8	1.7E+08	167	0.000	0	4.5E+07	0
9	2.2E+08	222	0.287	287	2.3E+06	14
10	3.2E+08	322	0.258	258	5.2E+04	12
11	3.9E+08	389	0.054	54	2.7E+05	6
12	4.4E+08	435	0.139	139	1.1E+06	8
13	7.2E+08	721	0.143	143	6.9E+05	7
14	1.1E+09	1093	0.124	124	2.1E+05	6
15	1.3E+09	1292	0.111	111	1.9E+04	5
16	1.4E+09	1371	0.041	41	1.7E+03	4
17	1.4E+09	1423	0.000	0	5.8E+02	0
18	3.4E-01	0	0.000	0	5.1E+06	0
19	2.9E+00	0	0.000	0	6.7E+07	0
20	9.1E+00	0	0.000	0	4.9E+07	0
21	1.2E+01	0	0.000	0	6.6E+07	0
22	6.0E+00	0	0.000	0	7.3E+07	0
23	5.1E+00	0	0.000	0	7.2E+07	0
24	4.1E+00	0	0.000	0	7.6E+07	0

LWC= liquid water content / Contenido de agua líquida

CCN= Cloud Condensation Nucleus/ Núcleos de condensación de Nube

## Discusión sobre parametrizaciones:

Las parametrizaciones microfísicas WSM3 y CAM son las que mejor dieron resultados para niebla por advección/frentes y niebla por radiación, respectivamente. La WSM3 es una parametrización de momento simple que hace diferencia entre las razones de mezcla de agua en estado líquido, gaseoso o sólido respecto a la temperatura de congelación del agua, donde  $Q_v$  es la transferencia de calor del vapor,  $Q_i$  respecto al hielo,  $Q_s$  respecto a nieve,  $Q_c$  respecto a agua de nube y  $Q_r$  respecto a precipitación.



**Figura 28.** Esquema de la parametrización de microfísica WSM3.

En el esquema WSM3, Song-You et al. (2003) establecen que es un esquema simple de tipo bulk como un esquema eficiente para la mesoescala en una malla con resolución menor a 25 km.

WSM3 predice tres categorías de humedad: vapor, agua de nube/hielo y lluvia/nieve. El hielo de la nube y el agua de la nube se cuentan como la misma categoría, y se distinguen por la temperatura, temperatura  $>0$  °C para considerar al hielo (figura 28). Esto puede explicar porque este esquema muestra mejor resultados para simulaciones de niebla en la cuenca de México, donde las temperaturas medias mínimas en la regiones más frías del año son superiores a 1°C (Jáuregui, 2000).

Aunque WSM3 en un principio tiene la base de la parametrización de Kessler, tiene la particularidad de considerar un radio crítico inicial de 8  $\mu\text{m}$ . Este valor es menor que el radio crítico la que considera la parametrización de Kessler de 12  $\mu\text{m}$  (Kessler, 1969). Este valor al ser más pequeño provoca una menor tasa de autoconversión menor entre el agua líquida de nube y el agua líquida precipitable (Liu and Daum, 2004).

También, al tener la parametrización un radio crítico de  $8 \mu\text{m}$  está dentro del rango de tamaños de gotitas de niebla presentado en observaciones como las de Justo en 1980, donde observó que un rango menor de  $10 \mu\text{m}$  es el tamaño típico del radio de la mayoría de gotitas de niebla en continente.

Otra característica de WSM3, es en la autoconversión de agua de nube a lluvia, donde los autores establecen una razón de mezcla mixta de  $0.5 \times 10^{-3}$  o  $0.7 \times 10^{-3} \text{ kg/kg}$ , un valor menor que al otros autores como Kessler de  $1 \times 10^{-3} \text{ kg/kg}$ , lo cual significa que menos gotitas de nube se autoconvierten por procesos de colisión unas con otras, esto contribuye a que existan en mayor medida gotitas de nube que precipitación, confirmando con los experimentos realizados en este trabajo la existencia de niebla en la mayoría de los casos en niebla por advección.

Sin embargo, cuando se modelaron los eventos de niebla por radiación, no se tuvo los mismos resultados al usar WSM3, sólo modelando asertivamente el 5% de los eventos por radiación.

Una de las características de CAM 5.1 es que hace diferencia en un ajuste del umbral de humedad relativa para nubes baja y nubes altas e interpolando la humedad para nubes de nivel medio. De esta forma, esta parametrización produce condensación y evaporación para fracciones de nubes cambiantes (Rasch y Kristjánsson, 1998; Park et al., 2014). Es por eso, que CAM 5.0 es la mejor opción de modelación de eventos de niebla por radiación, teniendo el porcentaje de acierto del 92% (figura 20).

Respecto a las parametrizaciones de Capa Límite Planetaria y los flujos de calor, la combinación de WSM3 con la parametrización YSU es la que obtuvo el mayor porcentaje de aciertos en los casos modelados, 97%.

La parametrización YSU es un algoritmo donde la difusión vertical está basada en un coeficiente de mezcla turbulenta no local en la capa límite planetaria (CLP). El YSU aumenta la mezcla de la capa límite planetaria en el régimen de convección libre inducida térmicamente y la disminuye en el régimen de convección forzada inducida mecánicamente, lo que alivia los problemas bien conocidos en el PBL de pronóstico a mediano plazo. Así mismo, esta parametrización, resuelve el exceso de mezcla en la capa de mezcla en presencia de fuertes vientos y muestra un crecimiento lento de la CLP (Hong et al., 2006).

Como se muestra en la tabla 4, para la niebla radiativa, la parametrización CAM 5.1 es aplicada junto con la parametrización QNSE (Quasi-Normal Scale Elimination). Esta combinación tiene que el 81% de los eventos de niebla por radiación fueron modelados de manera satisfactoria (figura 20).

QNSE se basa en una teoría de la turbulencia con condiciones estables y estratificación débilmente inestable. La teoría acomoda la disparidad inducida por la estratificación entre los procesos de transporte en las direcciones horizontal y vertical. Predice varias características importantes de estabilidad en flujos estratificados, los cuales dependen del número de Prandtl ( $Pr$ ), donde QNSE tiene un valor inicial de  $Pr_0 = 0.71$ , el cual es cercano a uno, definiendo procesos neutros en relación entre la viscosidad y la conductividad térmica, lo cual interviene en procesos con poca turbulencia (Gustafson, et al, (2014). Las condiciones estables y de estratificación atmosférica contribuyen a establecer la capa de niebla, especialmente durante la fase de mantenimiento, se establece un equilibrio entre la condensación en la parte superior de la capa de niebla y los procesos de evaporación y asentamiento de las gotitas, lo cual mantiene el espesor de la capa de niebla y el enfriamiento radiativo propicia la condensación en la parte superior de la capa de niebla provocando que la niebla de radiación pueda mantenerse o incluso aumente su profundidad (Holets & Swanson, 1981).

## CAPÍTULO IV

### Pronóstico de niebla en la Cuenca de México

#### Metodología

El pronóstico de niebla se realizó por medio del modelo WRF con datos de entrada y frontera para las 00:00 GMT del modelo GFS: NCEP GFS 0.25° Global Forecast Grids Historical Archive ds084.1, los cuales están disponibles desde el 2015 hasta 72 horas del día presente.

Para su validación, se usó la técnica dicotómica por medio de una de tabla de contingencia (tabla 6), en el que los elementos de la tabla denotan el número de pronósticos positivos que corresponden a un evento observado (hits, H), de eventos ocurridos que se pronosticaron negativamente (misses, M), de pronósticos positivos que no se observaron realmente (false alarms, F), y de eventos no estimados que no tenían ningún evento asociado (null, N) [Schaefer, 1990]. De esta tabla de contingencia hay varios parámetros (puntajes de habilidad) que pueden usarse para evaluar las observaciones o pronósticos sobre probabilidad aleatoria, persistencia o clima [Tartaglione, 2010]. En particular, la verificación es útil para responder preguntas sobre algunos aspectos meteorológicos, específicamente para este análisis: (1) ¿Qué tan confiable es la configuración propuesta en el modelo para detectar la niebla? (Probability of detection, POD); (2) ¿Con frecuencia el pronóstico indica niebla en situaciones que no hay niebla en la observación? (False alarm ratio. FAR); (3) ¿cuál la frecuencia de las estimaciones en el pronóstico para pronosticar niebla? (Frequency bias, FB). Aunque el propósito de los puntajes de habilidad es la cuantificación del acuerdo entre el pronóstico y las observaciones, está claro que no se puede usar un puntaje único para indicar la habilidad de pronóstico, pero varios de ellos deben considerarse para dar una mejor perspectiva de su desempeño [Doswelletal., 1990; Schaefer, 1990; Stephenson, 2000].

**Tabla 6.** Metodología Dicotómica

Frequency bias FB= $(\text{hits} + \text{false alarms})/(\text{hits} + \text{misses})$
Probability of detection POD= $\text{hits}/(\text{hits} + \text{misses})$
False alarm ratio FAR= $\text{False alarms}/(\text{hits} + \text{false alarms})$
Proportion correct PC= $(\text{hits} + \text{null})/\text{Total}$

## Resultados

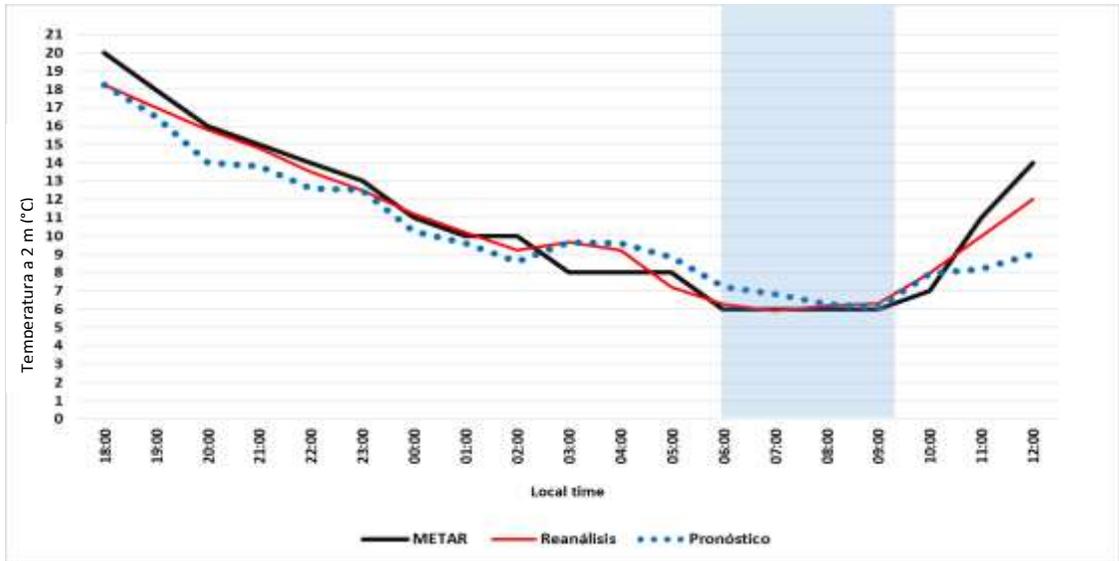
De los eventos pronosticados de niebla, entre el 2015 al 2018, se obtuvieron los resultados con la prueba dicotómica, tabla 7. Se puede observar que, de los 13 eventos pronósticos de niebla por radiación, 12 han sido aciertos, un evento no fue mostrado por el pronóstico, pero no hubo falsas alarmas ni errores. Para el pronóstico de nieblas por advección/frente, de los 32 pronósticos, 29 fueron aciertos y sólo 3 no fueron mostrados por el pronóstico. Por lo tanto, se observa que las frecuencias de los eventos pronosticados están por arriba de 0.9, donde la sensibilidad del pronóstico para falsas alarmas es cero, lo que podemos concluir que la configuración propuesta para detectar la niebla es confiable, por lo que menos del 10% de los eventos de niebla no fueron pronosticados, lo cual analizando su origen, los cuatro eventos fueron reportados por METAR pero con una duración menor a 20 minutos (Ver fechas en anexo A).

**Tabla 7.** Resultados de la metodología dicotómica

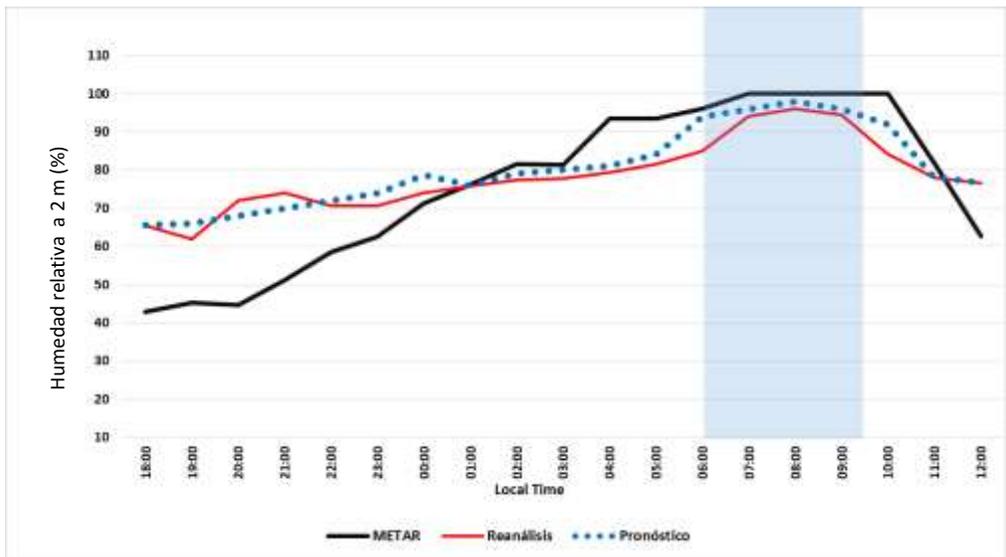
Tipo de niebla	H	F	M	N	FB	POD	FAR	PC
<b>Por radiación</b>	12	0	1	0	0.92	0.92	0	0.92
<b>Por frente/advección</b>	29	0	3	0	0.90	0.90	0	0.90

En la figura 28, se puede observar que el descenso de temperatura ocasionado por el frente durante 24 h, es modelado por WRF, particularmente durante el evento de niebla. La temperatura respecto de la modelación con reanálisis como datos de entrada tiene un comportamiento similar a la observación, manteniéndose casi constante la temperatura ambiente durante el evento de niebla.

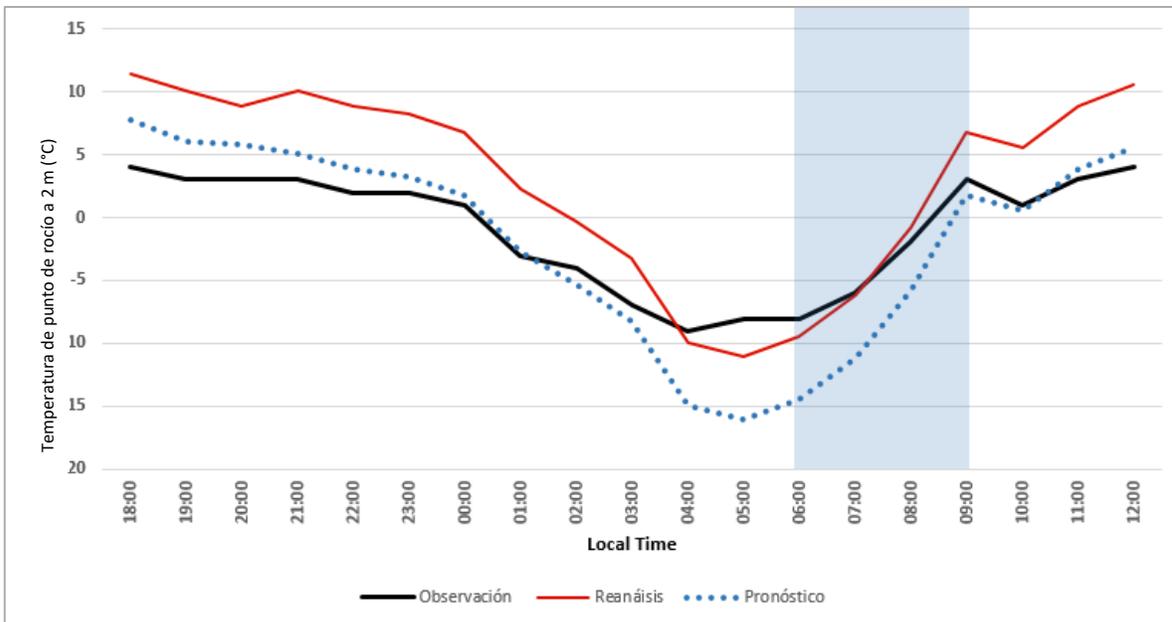
Respecto a la humedad relativa (figura 29), se puede observar humedad relativa del 100% desde las 7 hasta las 10 LTC en datos METAR, aunque, particularmente, METAR comienza a reportar la presencia de la niebla en el AICM en el rango de 06:10 LST–09:20 LST. Y posteriormente de 09:20 LST, no reporta niebla en el AICM, observando que tanto con datos de reanálisis y de pronóstico, se muestran valores por arriba del 90% de humedad relativa pero no del 100%. Para explicar el porqué de este comportamiento en WRF, se propone, como trabajo futuro, revisar las parametrizaciones de flujo de calor del modelo para optimizar resultados.



**Figura 29.** Comparación entre modelación con datos de reanálisis, con datos de entrada del GFS y observaciones. Temperatura a 2 m. Evento: Niebla por frente, el 2 de enero de 2004, formación METAR - tiempos de disipación: 06:10 LST–09:20 LST.

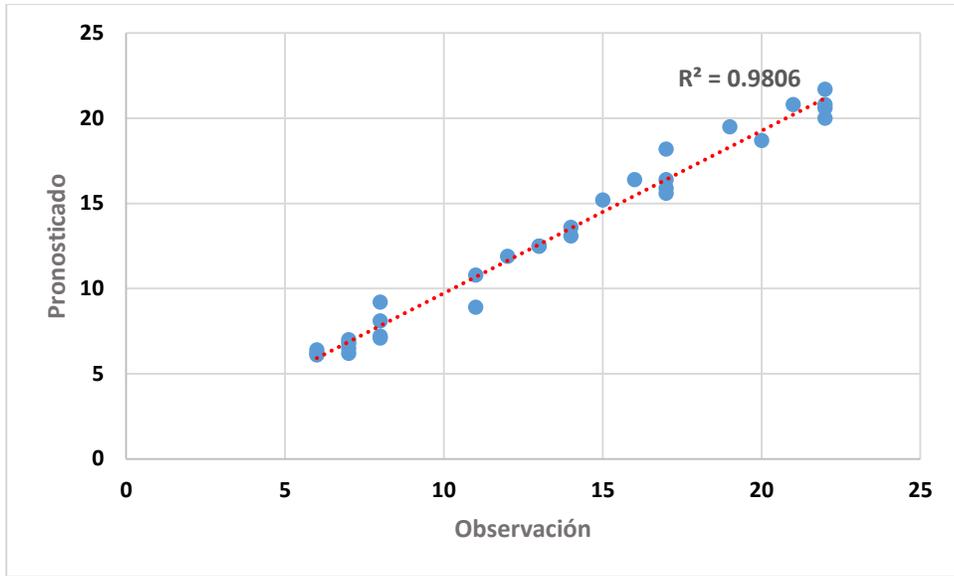


**Figura 30.** Comparación entre modelación con datos de reanálisis, datos de entrada del GFS y observaciones. Humedad relativa a 2 m. Evento: Niebla por frente, el 2 de enero de 2004, formación METAR - tiempos de disipación: 06:10 LST–09:20 LST.

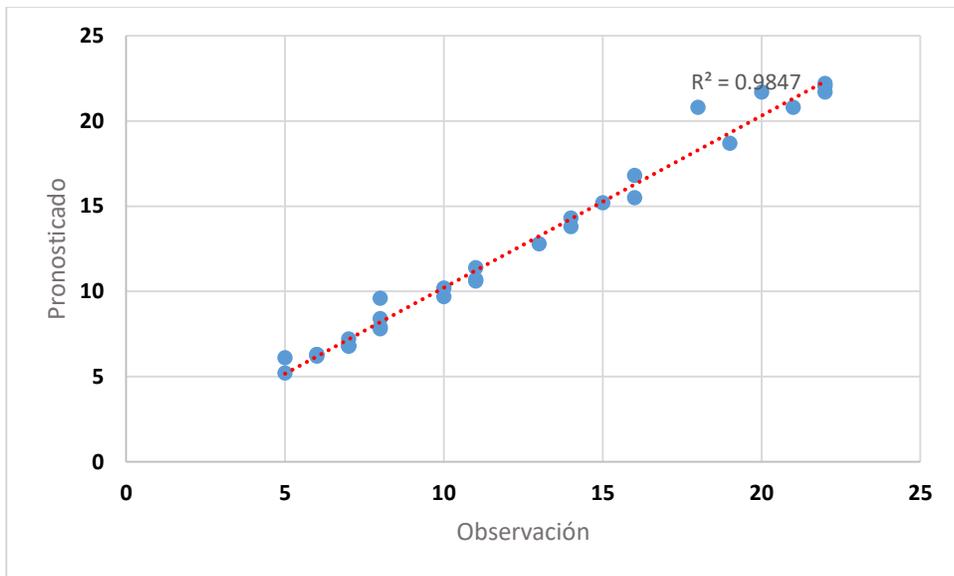


**Figura 31.** Comparación entre modelación con datos de reanálisis, datos de entrada del GFS y observaciones. Temperatura del punto de rocío a 2 m. Evento: Niebla por frente, el 2 de enero de 2004, formación METAR - tiempos de disipación: 06:10 LST–09:20 LST.

Para finalizar, al realizar una regresión lineal entre lo pronosticado y la observación de la temperatura durante los eventos de niebla, se obtuvo que tiene una  $R^2$  de 0.98, lo cual es un buen indicio de que WRF muestra un comportamiento adecuado para la modelación de niebla, muestra los valores de temperatura similares a las observaciones durante el evento, siendo un indicativo para la duración de la niebla con relación a la relación de temperatura ambiente y temperatura de punto de rocío, como se puede ver en la figura 32 y 33. Particularmente, como se observó en la figura 22, el contenido de agua de nubes cercano a superficie es un factor determinante para establecer que las salidas del modelo se refieren a niebla y no sólo a procesos de saturación en el ambiente que no necesariamente producen condensación.



**Figura 32.** Depresión de temperatura a 2 m reportada por METAR contra pronóstico realizado en WRF. Evento por advección/frente.



**Figura 33.** Depresión de temperatura a 2 m reportada por METAR contra pronóstico realizado en WRF. Evento por radiación.

## Conclusiones

La niebla para la cuenca de México es un fenómeno que se observa en todos los meses del año; sin embargo, su mayor frecuencia e intensidad es la época invernal, formándose principalmente por la mañana.

La mayoría de los casos de nieblas por sistemas frontales ocurren después del paso del sistema y durante éste, lo cual se explica por las características de la masa fría (humedad alta) y que la velocidad de viento es menor que cuando entra el sistema a la región. Una depresión de temperatura cercana a cero y una humedad alta (por arriba del 80%) no son condiciones suficientes para formación de niebla, la rapidez del viento es un factor que importante: si existe viento intenso, los procesos de turbulencia provocan una atmosfera inestable y que la inversión térmica no se llegue a formar.

En ciertos casos, los tipos de niebla advectiva y frontal pueden presentar características similares seis horas previas al evento (tendencia de la temperatura, humedad y viento). Es por ello que, para diferenciar cada tipo, es importante recurrir al mecanismo de formación por medio de información sinóptica.

El estudio de sensibilidad indica que los resultados del modelado dependen en gran medida de la configuración utilizada, que a su vez depende del mecanismo de formación de niebla. Por lo que tomar en cuenta los tipos de sistemas atmosféricos que intervienen la formación de niebla y las escalas meteorológicas a las que pertenecen dichos fenómenos, ayuda a definir mejor las parametrizaciones de WRF a usar.

Por lo tanto, este estudio el análisis de los sistemas atmosféricos asociados a la formación de niebla en la Cuenca de México y la climatología realizada en el AICM, ayudaron a que la configuración elegida de WRF, pronostique adecuadamente la formación y el desarrollo de eventos de niebla en esta región.

Dentro de la configuración propuesta del modelo WRF, se eligieron tres dominios anidados, donde el dominio más pequeño es de 3 km. Con el objetivo de evitar perturbaciones debidas a diferentes tamaños de dominios. Centrando este trabajo, en el análisis de las parametrizaciones microfísicas de capa límite de WRF. Por lo tanto, se propuso que las condiciones iniciales de dominios en WRF fueran las mismas para todos los tipos de niebla de la región de estudio, (un área dentro de latitudes tropicales), si bien para la región de estudios son nieblas de escala local, los fenómenos que las

impulsan pertenecen a diferentes escalas meteorológicas, por lo que la elección de tres dominios: 27, 9 y 3 km, evitando discontinuidades en la modelación dinámica del fluido. Algunos autores, como Steeneveld G-J, et al., (2015) proponen la elección de un sólo dominio para la modelación de la niebla radiativa; sin embargo, proponemos que parametrizaciones microfísicas y capa límite planetaria contribuyen a una modelación satisfactoria para esta región de estudio donde, en especial, la modelación de los eventos de niebla radiativa fueron consistentes con las observaciones.

Los pronósticos de cada tipo de niebla con WRF, mostraron que los resultados coinciden con los tiempos de inicio y finalización de los eventos, según lo informado por las observaciones METAR y para la cantidad de agua de nube observada por otros autores.

Así mismo, en este trabajo se observó que el plazo de previsión de 24 horas ha mostrado el mejor rendimiento, en cuanto a modelación y pronóstico.

Otro resultado de este trabajo, respecto a los análisis dicotómicos, muestra que la probabilidad de detección de niebla es alta a la hora de modelar y que la configuración propuesta para el pronóstico no muestra falsas alarmas, lo cual puede contribuir a la mejora del pronóstico meteorológico de forma operativa para la niebla para la región de la Cuenca de México

Si bien este trabajo es una forma de diagnóstico, modelación y pronóstico de los eventos de niebla para la región de la Cuenca de México, con la cual se pueden establecer bases para comprender los procesos físicos en la formación y el pronóstico de niebla, aún quedan preguntas cómo ayudar al pronóstico operativo con esta información, lo cual se espera que se pueda realizar en un trabajo futuro.

Por lo tanto, aún quedan incógnitas, como:

- Realizar un eje de pronóstico por medio de un ensamble, en el cual la identificación del tipo de mecanismo de formación de niebla esté aunado a la elección del tipo de configuración y parametrizaciones con el objetivo de que la dinámica y la microfísica sea elegida dependiendo del tipo de niebla, ya que el fenómenos precursores de la niebla pueden ser de diferentes escalas: locales, mesoescala o sinóptica.
- Profundizar la investigación de parametrizaciones de microfísica, como por ejemplo en la fase de autoconservación inicial de formación de gotitas como lo explica Rodríguez- Geno y Alfonso L (2021).
- Analizar las parametrizaciones de flujo de calor del WRF para optimizar resultados.

# Anexo A

La siguiente tabla muestra las fechas de reporte de niebla en el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México en datos METAR desde 1999 al año 2018, donde se analizó todos los datos de este periodo, datos horarios y eventos especiales ocasionados por cambios en las condiciones meteorológicas, filtrando los eventos de niebla como fenómeno observable en el aeropuerto o cerca de él, basándose en la codificación internacional del código **SPECI** (*Selección Especial del Informe Meteorológico para la Aviación*).

**Tabla 8.** Eventos de niebla reportador en el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México desde Enero 1999 a Diciembre 2018.

	AÑO	MES	DIA	Inicio	Fin	Tipo	Duración (HH:MM)
1	1999	Enero	3	09:45	15:20	Por frente	05:35
2	1999	Enero	5	11:05	14:45	Por radiación	03:40
3	1999	Enero	12	13:20	Sin especificar	Por advección	Menor a una hora
4	1999	Enero	31	14:15	16:17	Por frente	02:02
5	1999	Febrero	6	13:20	13:45	Por radiación	00:25
6	1999	Febrero	22	10:45	14:45	Por frente	04:00
7	1999	Febrero	24	12:45	15:20	Por frente	02:35
8	1999	Julio	5	12:45	Sin especificar	Por advección	Menor a una hora
9	1999	Agosto	20	12:45	13:20	Por advección	00:35
10	1999	Agosto	30	12:30	12:45	Por advección	00:15
11	1999	Septiembre	7	13:45	Sin especificar	Por advección	Menor a una hora
12	1999	Septiembre	19	12:15	15:20	Por advección	03:05
13	1999	Septiembre	20	12:25	14:45	Por radiación	02:20
14	1999	Septiembre	21	12:45	Sin especificar	Por frente	Menor a una hora
15	1999	Septiembre	22	12:45	Sin especificar	Por frente	Menor a una hora
16	1999	Septiembre	23	14:19	Sin especificar	Por frente	Menor a una hora
17	1999	Septiembre	26	12:45	Sin especificar	Por frente	Menor a una hora
18	1999	Septiembre	30	12:20	12:45	Por advección	00:25
19	1999	Octubre	7	06:20	06:45	Por advección	00:25
20	1999	Octubre	9	12:20	Sin especificar	Por frente	Menor a una hora
21	1999	Octubre	15	12:25	13:45	Por advección	01:20
22	1999	Octubre	24	13:22	13:45	Por frente	00:23
23	1999	Octubre	30	08:58 Y 13:00	11:45 Y 13:25	Por frente	2:47 Y 0:25

24	1999	Noviembre	1	09:32	14:20	Por frente	04:48
25	1999	Noviembre	4	09:28	15:20	Por advección	05:52
26	1999	Noviembre	5	10:45	15:45	Por advección	05:00
27	1999	Noviembre	10	12:10	15:20	Por advección	03:10
28	1999	Noviembre	11	10:16	10:45	Por advección	00:29
29	1999	Noviembre	24	14:45	Sin especificar	Por frente	Menor a una hora
30	1999	Diciembre	6	11:35	15:45	Por frente	04:10
31	1999	Diciembre	11	13:45	Sin especificar	Por advección	Menor a una hora
32	1999	Diciembre	16	13:45	14:20	Por frente	00:35
33	1999	Diciembre	17	11:45	14:45	Por frente	03:00
34	1999	Diciembre	25	08:45 Y 12:45	09:18 Y 13:45	Por frente	0:33 y 1:00
35	1999	Diciembre	29	13:20	Sin especificar	Por radiación	Menor a una hora

	AÑO	MES	DIA	Inicio	Fin	Tipo	Duración
36	2000	Enero	1	13:30	14:20	Por advección	00:50
37	2000	Enero	10	12:20	Sin especificar	Por frente	Menor a una hora
38	2000	Febrero	3	11:07	14:45	Por frente	03:38
39	2000	Marzo	13	12:45	13:20	Por frente	00:35
40	2000	Abril	5	12:46	14:00	Por frente	01:14
41	2000	Abril	29	12:30	13:20	Por advección	00:50
42	2000	Mayo	5	13:45	Sin especificar	Por advección	Menor a una hora
43	2000	Julio	22	12:48	13:20	Por advección	00:32
44	2000	Julio	29	13:45	Sin especificar	Por advección	Menor a una hora
45	2000	Agosto	8	13:45	14:20	Por advección	00:35
46	2000	Agosto	14	12:20	13:45	Por advección	01:25
47	2000	Septiembre	11	13:25	13:45	Por advección	00:20
48	2000	Octubre	4	12:55	15:00	Por advección	02:05
49	2000	Octubre	10	11:45	Sin especificar	Por frente	Menor a una hora
50	2000	Octubre	12	11:45	12:20	Por frente	00:35
51	2000	Octubre	15	10:45	12:45	Por advección	02:00
52	2000	Octubre	17	11:45	Sin especificar	Por frente	Menor a una hora
53	2000	Octubre	22	13:20	Sin especificar	Por advección	Menor a una hora
54	2000	Octubre	24	13:20	Sin especificar	Por advección	Menor a una hora
55	2000	Octubre	28	13:00	14:20	Por advección	01:20
56	2000	Noviembre	3	11:22	11:45	Por advección	00:23

57	2000	Noviembre	5	12:15	14:45	Por frente	02:30
58	2000	Noviembre	27	12:45	Sin especificar	Por frente	Menor a una hora
59	2000	Noviembre	29	10:45	11:45	Por frente	01:00
60	2000	Diciembre	1	13:25	14:20	Por advección	00:55
61	2000	Diciembre	4	12:20	13:45	Por frente	01:25
62	2001	Enero	2	11:49	14:45	Por frente	02:56
63	2001	Enero	25	10:45	14:20	Por frente	03:35
64	2001	Febrero	1	09:50	14:45	Por frente	04:55
65	2001	Mayo	11	11:45	Sin especificar	Por advección	Menor a una hora
66	2001	Junio	20	11:45	Sin especificar	Por advección	Menor a una hora
67	2001	Junio	28	06:45	09:45	Por advección	03:00
68	2001	Julio	10	09:45	11:45	Por advección	02:00
69	2001	Julio	22	12:45	13:45	Por radiación	01:00

	AÑO	MES	DIA	Inicio	Fin	Tipo	Duración
70	2001	Agosto	5	10:45	Sin especificar	Por radiación	Menor a una hora
71	2001	Agosto	11	11:45	Sin especificar	Por advección	Menor a una hora
72	2001	Agosto	13	08:45	Sin especificar	Por advección	Menor a una hora
73	2001	Septiembre	11	08:45	11:45	Por frente	03:00
74	2001	Septiembre	28	10:45	Sin especificar	Por frente	Menor a una hora
75	2001	Septiembre	30	12:20	13:20	Por frente	01:00
76	2001	Octubre	19	06:45	09:45	Por frente	03:00
77	2001	Octubre	20	12:45	Sin especificar	Por frente	Menor a una hora
78	2001	Octubre	21	07:45	11:45	Por frente	04:00
79	2001	Octubre	23	08:45	Sin especificar	Por frente	Menor a una hora
80	2001	Octubre	29	13:20	14:45	Por advección	01:25
81	2001	Noviembre	1	12:45	13:20	Por radiación	00:35
82	2001	Noviembre	18	12:20	15:12	Por frente	02:52
83	2001	Noviembre	19	10:44	15:24	Por frente	04:40
84	2001	Noviembre	20	09:45	12:20	Por frente	02:35
85	2001	Noviembre	22	12:45	13:20	Por advección	00:35
86	2001	Diciembre	2	12:12	12:45	Por radiación	00:33
87	2001	Diciembre	4	13:20	15:20	Por advección	02:00
88	2001	Diciembre	5	09:20	13:45	Por frente	04:25
89	2001	Diciembre	8	12:45	Sin especificar	Por frente	Menor a una hora

90	2001	Diciembre	20	11:45	12:20	Por frente	00:35
91	2002	Enero	15	12:20	13:45	Por radiación	01:25
92	2002	Enero	26	10:00	15:45	Por frente	05:45
93	2002	Febrero	2	12:45	14:45	Por frente	02:00
94	2002	Febrero	8	11:45	14:05	Por frente	02:20
95	2002	Febrero	14	09:55	15:45	Por frente	05:50
96	2002	Abril	5	09:45	13:20	Por radiación	03:35
97	2002	Abril	6	11:45	Sin especificar	Por radiación	Menor a una hora
98	2002	Abril	17	11:45	Sin especificar	Por advección	Menor a una hora
99	2002	Mayo	17	12:45	13:20	Por advección	00:35
100	2002	Mayo	25	12:20	12:46	Por advección	00:26
101	2002	Junio	2	11:45	12:20	Por advección	00:35
102	2002	Junio	9	12:20	Sin especificar	Por advección	Menor a una hora
103	2002	Junio	16	12:44	Sin especificar	Por advección	Menor a una hora
104	2002	Junio	27	12:45	Sin especificar	Por advección	Menor a una hora
105	2002	Julio	13	14:23	Sin especificar	Por advección	Menor a una hora

	AÑO	MES	DIA	Inicio	Fin	Tipo	Duración
106	2002	Agosto	27	10:45	Sin especificar	Por advección	Menor a una hora
107	2002	Septiembre	12	08:45	09:45	Por advección	01:00
108	2002	Octubre	2	13:50	14:45	Por advección	00:55
109	2002	Diciembre	6	11:45	16:15	Por frente	04:30
110	2002	Diciembre	20	13:55	14:45	Por frente	00:50
111	2003	Enero	15	13:04	13:45	Por advección	00:41
112	2003	Marzo	10	14:00	14:22	Por frente	00:22
113	2003	Agosto	11	12:23	12:46	Por radiación	00:23
114	2003	Agosto	23	12:45	13:20	Por advección	00:35
115	2003	Octubre	8	12:20	12:35	Por advección	00:15
116	2003	Noviembre	4	13:44	14:35	Por advección	00:51
117	2003	Noviembre	10	12:46	14:20	Por frente	01:34
118	2003	Noviembre	12	12:20	12:45	Por advección	00:25
119	2003	Noviembre	15	10:25	15:22	Por frente	04:57
120	2003	Diciembre	3	11:45	14:44	Por frente	02:59
121	2003	Diciembre	5	10:45	12:20	Por frente	01:35
122	2003	Diciembre	9	12:45	13:20	Por frente	00:35
123	2003	Diciembre	14	11:45	14:45	Por frente	03:00
124	2004	Enero	2	12:10	15:20	Por frente	03:10
125	2004	Enero	18	13:20	14:20	Por radiación	01:00

126	2004	Enero	31	13:10	14:44	Por radiación	01:34
127	2004	Febrero	3	12:30	15:45	Por advección	03:15
128	2004	Febrero	21	12:45	13:45	Por frente	01:00
129	2004	Marzo	24	12:45	13:20	Por advección	00:35
130	2004	Abril	3	13:20	13:44	Por radiación	00:24
131	2004	Abril	13	12:20	12:45	Por advección	00:25
132	2004	Abril	23	12:23	13:20	Por advección	00:57
133	2004	Mayo	3	11:45	12:20	Por frente	00:35
134	2004	Mayo	4	11:45	12:45	Por frente	01:00
135	2004	Mayo	7	12:07	13:20	Por radiación	01:13
136	2004	Mayo	8	12:20	12:45	Por advección	00:25
137	2004	Mayo	10	12:20	12:45	Por radiación	00:25
138	2004	Mayo	11	12:20	12:45	Por advección	00:25
139	2004	Mayo	13	12:45	13:46	Por advección	01:01

	AÑO	MES	DIA	Inicio	Fin	Tipo	Duración
140	2004	Mayo	16	12:23	13:20	Por advección	00:57
141	2004	Mayo	31	11:45	12:25	Por advección	00:40
142	2004	Junio	3	13:20	13:45	Por advección	00:25
143	2004	Junio	5	12:45	13:45	Por advección	01:00
144	2004	Junio	7	11:45	12:20	Por advección	00:35
145	2004	Junio	18	11:45	13:20	Por advección	01:35
146	2004	Junio	19	11:38	11:45	Por advección	00:07
147	2004	Junio	24	12:45	13:45	Por advección	01:00
148	2004	Julio	25	12:20	13:20	Por advección	01:00
149	2004	Julio	28	12:00	12:20	Por advección	00:20
150	2004	Agosto	5	11:45	12:05	Por radiación	00:20
151	2004	Agosto	13	13:45	14:47	Por advección	01:02
152	2004	Septiembre	7	13:46	14:47	Por advección	01:01
153	2004	Septiembre	14	11:45	12:25	Por advección	00:40
154	2004	Septiembre	15	12:20	13:20	Por advección	01:00
155	2004	Septiembre	21	12:45	13:23	Por advección	00:38
156	2004	Septiembre	29	12:47	14:46	Por frente	01:59
157	2004	Octubre	8	10:31	11:45	Por advección	01:14
158	2004	Octubre	10	11:45	12:45	Por radiación	01:00

159	2004	Octubre	19	13:20	13:46	Por advección	00:26
160	2004	Octubre	20	13:46	14:20	Por radiación	00:34
161	2004	Octubre	28	13:20	13:46	Por radiación	00:26
162	2004	Octubre	29	12:45	13:45	Por frente	01:00
163	2004	Noviembre	2	12:20	12:45	Por frente	00:25
164	2004	Noviembre	4	13:20	13:46	Por frente	00:26
165	2004	Noviembre	5	12:45	13:20	Por frente	00:35
166	2004	Noviembre	6	11:30	14:45	Por frente	03:15
167	2004	Noviembre	9	12:20	12:45	Por radiación	00:25
168	2004	Noviembre	11	13:20	13:45	Por radiación	00:25
169	2004	Noviembre	17	12:20	13:20	Por advección	01:00
170	2004	Noviembre	18	13:45	14:20	Por advección	00:35
171	2004	Noviembre	21	12:20	13:25	Por advección	01:05
172	2004	Noviembre	26	13:20	14:20	Por advección	01:00
173	2004	Noviembre	27	14:20	15:20	Por frente	01:00
174	2004	Diciembre	1	12:45	13:20	Por frente	00:35
175	2004	Diciembre	3	09:45	10:20	Por frente	00:35

	AÑO	MES	DIA	Inicio	Fin	Tipo	Duración
176	2004	Diciembre	4	13:45	14:45	Por frente	01:00
177	2004	Diciembre	11	13:20	15:45	Por frente	02:25
178	2004	Diciembre	15	13:45	14:45	Por frente	01:00
179	2005	Enero	5	13:45	14:20	Por frente	00:35
180	2005	Enero	9	12:45	13:20	Por frente	00:35
181	2005	Enero	10	14:20	14:45	Por frente	00:25
182	2005	Enero	11	13:45	14:20	Por frente	00:35
183	2005	Enero	12	14:20	Sin especificar	Por frente	Menor a una hora
184	2005	Enero	19	14:45	15:20	Por advección	00:35
185	2005	Enero	26	13:20	13:45	Por advección	00:25
186	2005	Enero	31	13:46	14:20	Por frente	00:34
187	2005	Febrero	25	05:45	11:45	Por frente	06:00
188	2005	Marzo	23	12:20	13:20	Por frente	01:00
189	2005	Abril	16	12:15	12:20	Por frente	00:05
190	2005	Mayo	19	12:20	13:20	Por advección	01:00
191	2005	Mayo	20	11:45	12:20	Por advección	00:35
192	2005	Junio	17	11:45	12:45	Por advección	01:00
193	2005	Junio	22	14:20	14:50	Por radiación	00:30
194	2005	Junio	23	12:47	13:20	Por advección	00:33

195	2005	Julio	7	12:20	12:45	Por advección	00:25
196	2005	Julio	19	13:45	14:20	Por advección	00:35
197	2005	Julio	22	12:00	13:20	Por advección	01:20
198	2005	Agosto	9	12:05	12:46	Por advección	00:41
199	2005	Agosto	12	13:20	13:45	Por advección	00:25

	AÑO	MES	DIA	Inicio	Fin	Tipo	Duración
200	2005	Agosto	26	14:20	14:45	Por advección	00:25
201	2005	Septiembre	6	12:20	12:45	Por advección	00:25
202	2005	Octubre	7	13:50	14:20	Por frente	00:30
203	2005	Octubre	11	11:45	12:45	Por frente	01:00
204	2005	Octubre	13	13:46	14:20	Por frente	00:34
205	2005	Octubre	19	10:45	14:10	Por advección	03:25
206	2005	Octubre	31	12:45	13:20	Por frente	00:35
207	2005	Noviembre	2	11:45	11:55	Por frente	00:10
208	2005	Noviembre	4	12:20	13:20	Por frente	01:00
209	2005	Noviembre	12	12:45	14:45	Por advección	02:00
210	2005	Noviembre	20	10:26	10:45	Por frente	00:19
211	2005	Noviembre	21	10:18	10:30	Por frente	00:12
212	2005	Noviembre	30	12:46	13:20	Por frente	00:34
213	2005	Diciembre	2	13:46	14:20	Por frente	00:34
214	2005	Diciembre	10	10:10	10:25	Por frente	00:15
215	2005	Diciembre	14	14:05	14:47	Por advección	00:42
216	2005	Diciembre	18	10:45	11:45	Por frente	01:00
217	2005	Diciembre	19	11:20	15:20	Por frente	04:00
218	2005	Diciembre	20	11:30	15:20	Por frente	03:50
219	2005	Diciembre	22	12:55	13:20	Por frente	00:25
220	2005	Diciembre	25	15:20	16:45	Por frente	01:25
221	2006	Enero	25	13:20	14:20	Por frente	01:00
222	2006	Enero	31	13:45	14:45	Por frente	01:00
223	2006	Marzo	25	13:20	13:45	Por frente	00:25
224	2006	Abril	3	13:20	13:45	Por radiación	00:25
225	2006	Mayo	6	12:20	13:20	Por advección	01:00
226	2006	Junio	4	12:20	14:45	Por advección	02:25
227	2006	Julio	13	12:52	13:20	Por advección	00:28
228	2006	Julio	17	12:20	12:47	Por advección	00:27
229	2006	Julio	19	12:20	13:20	Por advección	01:00

230	2006	Julio	22	12:45	13:24	Por advección	00:39
231	2006	Julio	24	12:20	15:20	Por advección	03:00
232	2006	Julio	26	12:05	12:45	Por advección	00:40
233	2006	Agosto	4	13:20	13:45	Por advección	00:25
234	2006	Octubre	21	13:20	14:20	Por frente	01:00
235	2006	Octubre	25	09:50	10:45	Por frente	00:55

	AÑO	MES	DIA	Inicio	Fin	Tipo	Duración
236	2006	Octubre	30	12:20	13:20	Por frente	01:00
237	2006	Octubre	31	12:45	13:45	Por frente	01:00
238	2006	Noviembre	1	12:20	13:20	Por frente	01:00
239	2006	Noviembre	5	12:45	13:00	Por radiación	00:15
240	2006	Noviembre	10	12:45	13:45	Por advección	01:00
241	2006	Noviembre	15	12:45	13:20	Por frente	00:35
242	2006	Noviembre	23	12:46	13:20	Por radiación	00:34
243	2006	Noviembre	29	13:45	14:20	Por frente	00:35
244	2006	Diciembre	5	12:18	12:51	Por frente	00:33
245	2006	Diciembre	7	12:47	13:20	Por frente	00:33
246	2006	Diciembre	14	13:00	14:45	Por advección	01:45
247	2006	Diciembre	15	13:20	14:23	Por advección	01:03
248	2006	Diciembre	19	12:56	13:20	Por advección	00:24
249	2006	Diciembre	25	13:20	14:20	Por advección	01:00
250	2007	Enero	2	11:50	12:45	Por frente	00:55
251	2007	Enero	13	12:20	12:45	Por advección	00:25
252	2007	Enero	18	12:45	13:20	Por frente	00:35
253	2007	Enero	19	12:20	12:45	Por frente	00:25
254	2007	Enero	29	11:45	12:20	Por advección	00:35
255	2007	Febrero	6	10:46	11:30	Por frente	00:44
256	2007	Febrero	7	13:20	14:45	Por frente	01:25
257	2007	Febrero	13	13:21	14:22	Por radiación	01:01
258	2007	Marzo	15	12:45	13:20	Por frente	00:35
259	2007	Abril	3	12:20	12:40	Por frente	00:20
260	2007	Abril	22	12:20	12:45	Por advección	00:25
261	2007	Abril	23	12:20	13:20	Por radiación	01:00
262	2007	Mayo	19	11:45	12:00	Por advección	00:15
263	2007	Julio	4	10:45	11:45	Por advección	01:00
264	2007	Julio	18	12:21	13:22	Por advección	01:01
265	2007	Agosto	2	12:07	12:20	Por radiación	00:13

266	2007	Septiembre	22	13:07	13:18	Por advección	00:11
267	2007	Octubre	20	11:43	12:45	Por frente	01:02
268	2007	Noviembre	2	13:20	13:39	Por frente	00:19
269	2007	Noviembre	5	12:47	13:20	Por frente	00:33

	AÑO	MES	DIA	Inicio	Fin	Tipo	Duración
270	2007	Noviembre	9	08:45	13:23	Por frente	04:38
271	2007	Noviembre	13	12:45	13:23	Por advección	00:38
272	2007	Noviembre	14	10:45	14:48	Por frente	04:03
273	2007	Diciembre	1	12:54	13:22	Por advección	00:28
274	2007	Diciembre	6	13:45	14:23	Por advección	00:38
275	2007	Diciembre	28	13:48	14:18	Por frente	00:30
276	2007	Diciembre	29	13:49	14:24	Por frente	00:35
277	2008	Enero	4	11:45	15:36	Por advección	03:51
278	2008	Enero	20	11:45	16:14	Por frente	04:29
279	2008	Enero	27	11:55	12:39	Por frente	00:44
280	2008	Febrero	12	11:11	11:47	Por radiación	00:36
281	2008	Febrero	19	11:48	12:21	Por frente	00:33
282	2008	Mayo	10	12:20	13:23	Por radiación	01:03
283	2008	Mayo	21	12:48	13:41	Por advección	00:53
284	2008	Junio	18	11:48	12:16	Por advección	00:28
285	2008	Julio	6	09:28	09:43	Por advección	00:15
286	2008	Julio	31	12:27	13:23	Por advección	00:56
287	2008	Julio	11	12:27	12:45	Por advección	00:18
288	2008	Octubre	7	13:04	14:14	Por advección	01:10
289	2008	Noviembre	2	12:47	13:22	Por radiación	00:35
290	2008	Noviembre	17	12:45	13:20	Por frente	00:35
291	2008	Noviembre	18	11:41	15:05	Por frente	03:24
292	2008	Noviembre	20	10:20	12:45	Por frente	02:25
293	2008	Noviembre	21	13:20	14:20	Por frente	01:00
294	2008	Noviembre	22	12:12	14:46	Por frente	02:34
295	2008	Noviembre	24	09:30	11:24	Por frente	01:54
296	2008	Noviembre	26	11:51	15:20	Por radiación	03:29
297	2008	Diciembre	3	11:43	14:45	Por radiación	03:02
298	2008	Diciembre	24	07:54	08:54	Por frente	01:00

299	2009	Enero	18	13:20	13:45	Por advección	00:25
300	2009	Febrero	12	12:48	15:20	Por frente	02:32
301	2009	Febrero	23	12:41	13:00	Por frente	00:19
302	2009	Marzo	13	12:38	12:52	Por frente	00:14
303	2009	Junio	29	12:22	13:45	Por advección	01:23
304	2009	Julio	5	12:39	13:32	Por radiación	00:53

	AÑO	MES	DIA	Inicio	Fin	Tipo	Duración
305	2009	Julio	24	12:13	12:47	Por advección	00:34
306	2009	Septiembre	5	13:45	15:41	Por advección	01:56
307	2009	Octubre	2	12:20	13:20	Por advección	01:00
308	2009	Noviembre	13	13:21	14:04	Por frente	00:43
309	2009	Noviembre	14	13:21	14:19	Por frente	00:58
310	2009	Noviembre	20	12:46	15:14	Por frente	02:28
311	2009	Noviembre	27	13:20	14:21	Por advección	01:01
312	2009	Diciembre	2	13:47	14:50	Por advección	01:03
313	2009	Diciembre	18	02:51	03:10	Por frente	00:19
314	2009	Diciembre	21	12:44	14:03	Por frente	01:19
315	2010	Febrero	6	13:46	14:16	Por frente	00:30
316	2010	Marzo	26	12:25	12:53	Por frente	00:28
317	2010	Abril	12	03:04	03:14	Por advección	00:10
318	2010	Abril	17	12:17	14:20	Por advección	02:03
319	2010	Abril	19	12:52	13:24	Por advección	00:32
320	2010	Abril	22	12:43	15:20	Por advección	02:37
321	2010	Junio	16	12:07	12:24	Por advección	00:17
322	2010	Julio	15	12:15	12:20	Por advección	00:05
323	2010	Julio	26	11:40	12:23	Por advección	00:43
324	2010	Agosto	7	12:28	12:31	Por advección	00:03
325	2010	Agosto	29	14:44	14:52	Por advección	00:08
326	2010	Septiembre	26	13:48	14:19	Por advección	00:31
327	2010	Noviembre	11	12:45	13:20	Por advección	00:35
328	2010	Noviembre	27	12:44	13:20	Por frente	00:36
329	2010	Diciembre	9	02:45	02:47	Por frente	00:02
330	2010	Diciembre	13	10:10	15:16	Por frente	05:06
331	2011	Febrero	13	13:22	13:43	Por frente	00:21
332	2011	Agosto	19	12:06	12:09	Por advección	00:03
333	2011	Septiembre	14	12:40	13:01	Por advección	00:21

334	2011	Octubre	13	13:25	13:47	Por advección	00:22
335	2011	Noviembre	14	12:47	14:20	Por radiación	01:33
336	2011	Diciembre	6	13:53	14:20	Por frente	00:27
337	2011	Diciembre	11	10:45	14:20	Por frente	03:35
338	2011	Diciembre	23	12:51	14:47	Por frente	01:56
339	2012	Enero	7	13:20	13:45	Por frente	00:25

	AÑO	MES	DIA	Inicio	Fin	Tipo	Duración
340	2012	Febrero	26	13:21	15:00	Por frente	01:39
341	2012	Octubre	28	12:50	13:26	Por frente	00:36
342	2012	Noviembre	9	10:52	11:51	Por advección	00:59
343	2012	Noviembre	20	12:46	13:00	Por advección	00:14
344	2012	Diciembre	18	11:54	13:48	Por frente	01:54
345	2013	Enero	4	13:17	15:48	Por frente	02:31
346	2013	Enero	7	10:19	16:51	Por frente	06:32
347	2013	Mayo	15	12:49	13:24	Por radiación	00:35
348	2013	Junio	15	13:12	14:15	Por advección	01:03
349	2013	Septiembre	14	12:23	13:48	Por advección	01:25
350	2013	Octubre	2	13:52	14:36	Por frente	00:44
351	2013	Noviembre	10	14:20	14:46	Por frente	00:26
352	2013	Noviembre	24	13:10	16:44	Por frente	03:34
353	2013	Noviembre	28	13:21	14:42	Por frente	01:21
354	2013	Diciembre	1	09:37	15:20	Por frente	05:43
355	2014	Enero	1	09:36	13:45	Por frente	04:09
356	2014	Enero	18	14:21	Sin especificar	Por radiación	Menor a una hora
357	2014	Octubre	30	12:05	15:15	Por frente	03:10
358	2014	Noviembre	4	10:51	11:42	Por advección	00:51
359	2014	Diciembre	7	14:03	14:08	Por frente	00:05
360	2014	Diciembre	16	09:49	Sin especificar	Por advección	Menor a una hora
361	2014	Diciembre	31	10:47	14:50	Por frente	04:03
362	2015	Enero	1	13:17	13:24	Por frente	00:07
363	2015	Enero	6	11:43	14:43	Por frente	03:00
364	2015	Octubre	8	12:02	13:46	Por advección	01:44
365	2015	Noviembre	2	10:48	12:05	Por frente	01:17
366	2015	Noviembre	5	13:29	14:42	Por frente	01:13
367	2015	Noviembre	6	12:12	14:22	Por frente	02:10
368	2015	Noviembre	10	09:52	14:43	Por frente	04:51

369	2015	Noviembre	19	11:08	13:44	Por frente	02:36
370	2015	Noviembre	20	14:36	14:45	Por frente	00:09
371	2015	Noviembre	23	09:01	13:45	Por frente	04:44
372	2015	Noviembre	27	11:27	13:09	Por advección	01:42
373	2015	Noviembre	30	08:48	15:12	Por advección	06:24
374	2015	Diciembre	18	11:44	12:20	Por frente	00:36

	AÑO	MES	DIA	Inicio	Fin	Tipo	Duración
375	2016	Enero	1	13:20	14:45	Por frente	01:25
376	2016	Enero	4	10:22	13:08	Por advección	02:46
377	2016	Enero	19	13:42	Sin especificar	Por radiación	Menor a una hora
378	2016	Febrero	4	11:48	14:49	Por frente	03:01
379	2016	Febrero	20	11:45	14:45	Por advección	03:00
380	2016	Mayo	24	08:45	Sin especificar	Por frente	Menor a una hora
381	2016	Mayo	29	12:18	12:50	Por radiación	00:32
382	2016	Junio	17	12:24	Sin especificar	Por advección	Menor a una hora
383	2016	Julio	23	12:43	13:43	Por advección	01:00
384	2016	Julio	24	12:21	13:20	Por radiación	00:59
385	2016	Octubre	3	13:46	Sin especificar	Por radiación	Menor a una hora
386	2016	Octubre	17	12:45	14:44	Por advección	01:59
387	2016	Noviembre	2	13:52	14:30	Por frente	00:38
388	2016	Noviembre	13	12:49	Sin especificar	Por frente	Menor a una hora
389	2016	Diciembre	23	13:32	14:45	Por frente	01:13
390	2016	Diciembre	27	14:09	14:52	Por frente	00:43
391	2017	Enero	9	09:15	11:50	Por frente	02:35
392	2017	Enero	13	17:41	Sin especificar	Por radiación	Menor a una hora
393	2017	Noviembre	9	11:41	14:53	Por advección	03:12
394	2017	Noviembre	12	13:21	14:48	Por frente	01:27
395	2017	Noviembre	15	12:46	12:52	Por frente	00:06
396	2017	Noviembre	17	10:11	13:57	Por frente	03:46
397	2017	Noviembre	20	08:22	13:45	Por frente	05:23
398	2017	Noviembre	28	13:07	14:52	Por frente	01:45
399	2017	Noviembre	30	11:44	12:44	Por frente	01:00

	<b>AÑO</b>	<b>MES</b>	<b>DIA</b>	<b>Inicio</b>	<b>Fin</b>	<b>Tipo</b>	<b>Duración</b>
400	2017	Diciembre	1	09:51	12:45	Por frente	02:54
401	2017	Diciembre	2	11:49	14:44	Por frente	02:55
402	2017	Diciembre	3	11:43	Sin especificar	Por frente	Menor a una hora
403	2018	Enero	15	09:45	12:42	Por radiación	02:57
404	2018	Enero	23	13:13	14:52	Por frente	01:39
405	2018	Enero	26	15:01	Sin especificar	Por advección	Menor a una hora
406	2018	Febrero	13	12:35	13:48	Por frente	01:13
407	2018	Octubre	23	10:03	13:59	Por advección	03:56
408	2018	Octubre	31	13:40	13:41	Por advección	00:01
409	2018	Noviembre	21	10:47	14:42	Por frente	03:55
410	2018	Diciembre	4	11:52	14:46	Por frente	02:54
411	2018	Diciembre	11	09:56	10:11	Por radiación	00:15
412	2018	Diciembre	15	12:52	14:20	Por frente	01:28
413	2018	Diciembre	30	09:45	14:45	Por frente	05:00

# Anexo B

## Configuración en WRF

### namelist.wps

```
&share
wrf_core = 'ARW',
max_dom = 3,
start_date = '2004-11-08_12:00:00','2004-11-08_12:00:00','2004-11-08_12:00:00',
end_date = '2004-11-09_18:00:00','2004-11-09_18:00:00','2004-11-09_18:00:00',
interval_seconds = 21600
io_form_geogrid = 2,
/
```

```
&geogrid
parent_id      = 1, 1, 2,
parent_grid_ratio = 1, 3, 3,
i_parent_start = 1, 31, 9,
j_parent_start = 1, 17, 30,
e_we          = 74, 112, 94,
e_sn          = 61, 97, 91,
geog_data_res = '10m','2m','2m',
dx = 27000,
dy = 27000,
map_proj = 'mercator',
ref_lat = 19.43
ref_lon = -99.07,
truelat1 = 30.0,
truelat2 = 60.0,
stand_lon = -98.0,
geog_data_path = '/home/wrf/WRF/geog/geog'
/
```

```
&ungrib
out_format = 'WPS',
prefix = 'FILE',
/
```

```
&metgrid
fg_name = 'FILE'
io_form_metgrid = 2,
/
```

## namelist.input

```
time_control
run_days           = 0,
run_hours          = 30,
run_minutes        = 0,
run_seconds        = 0,
start_year         = 2004, 2004, 2004,
start_month        = 11, 11, 11,
start_day          = 08, 08, 08,
start_hour         = 12, 12, 12,
start_minute       = 00, 00, 00,
start_second       = 00, 00, 00,
end_year           = 2004, 2004, 2004,
end_month          = 11, 11, 11,
end_day            = 09, 09, 09,
end_hour           = 18, 18, 18,
end_minute         = 00, 00, 00,
end_second         = 00, 00, 00,
interval_seconds   = 21600
input_from_file    = .true.,.true.,.true.,
history_interval   = 60, 60, 60,
frames_per_outfile = 1000, 1000, 1000,
restart            = .false.,
restart_interval   = 5000,
io_form_history    = 2
io_form_restart    = 2
io_form_input      = 2
io_form_boundary   = 2
debug_level        = 0
auxinput1_inname = "metoa_em.d<domain>.<date>"
/

&domains
time_step          = 180,
time_step_fract_num = 0,
time_step_fract_den = 1,
max_dom            = 3,
e_we               = 74, 112, 94,
e_sn                = 61, 97, 91,
e_vert             = 35, 35, 35,
eta_levels          = 1.000, 0.995, 0.990, 0.985, 0.978,
                   0.969, 0.964, 0.958, 0.951, 0.946,
                   0.941, 0.938, 0.922, 0.894, 0.860,
                   0.817, 0.766, 0.707, 0.644, 0.576,
```

```

0.507, 0.444, 0.380, 0.324, 0.273,
0.228, 0.188, 0.152, 0.121, 0.093,
0.069, 0.048, 0.029, 0.014, 0.000,
num_metgrid_levels      = 27,
num_metgrid_soil_levels = 2,
dx                      = 27000,9000,3000,
dy                      = 27000,9000,3000,
grid_id                 = 1, 2, 3,
parent_id               = 1, 1, 2,
i_parent_start          = 1, 31, 9,
j_parent_start          = 1, 17, 30,
parent_grid_ratio       = 1, 3, 3,
parent_time_step_ratio  = 1, 3, 3,
feedback                = 1,
smooth_option           = 0
/

```

```

&physics
mp_physics              = 3, 3, 3,
ra_lw_physics           = 1, 1, 1,
ra_sw_physics           = 1, 1, 1,
radt                    = 27, 27, 27,
sf_sfclay_physics      = 1, 1, 1,
sf_surface_physics     = 1, 1, 1,
bl_pbl_physics         = 1, 1, 1,
bldt                    = 0, 0, 0,
cu_physics              = 1, 1, 0,
cudt                    = 5, 5, 5,
isfflx                  = 1,
ifsnow                  = 1,
icloud                  = 1,
surface_input_source    = 1,
num_soil_layers         = 4,
sf_urban_physics       = 0, 0, 0,
/

```

```

&fdda
/

```

```

&dynamics
w_damping               = 0,
diff_opt                 = 1,
km_opt                   = 4,
diff_6th_opt            = 0, 0, 0,
diff_6th_factor         = 0.12, 0.12, 0.12,
base_temp                = 290.
damp_opt                 = 0,

```

```
zdamp          = 5000., 5000., 5000.,
dampcoef       = 0.2, 0.2, 0.2
khdif          = 0, 0, 0,
kvdif          = 0, 0, 0,
non_hydrostatic = .true., .true., .true.,
moist_adv_opt  = 1, 1, 1,
scalar_adv_opt = 1, 1, 1,
/
```

```
&bdy_control
spec_bdy_width = 5,
spec_zone      = 1,
relax_zone     = 4,
specified      = .true., .false., .false.,
nested        = .false., .true., .true.,
/
```

```
&grib2
/
```

```
&namelist_quilt
nio_tasks_per_group = 0,
nio_groups = 1,
/
```

# Anexo C

## METAR

El formato METAR está dividido en grupos de números y letras, los cuales proporcionan información de variables meteorológicas, como se muestra a continuación:

**METAR CCCC YYGGggZ dddff(f)Gf<sub>m</sub>f<sub>m</sub>(f<sub>m</sub>)KT d<sub>n</sub>d<sub>n</sub>d<sub>n</sub>Vd<sub>x</sub>d<sub>x</sub>d<sub>x</sub> VVVVSM**  
**w'w'(ww) T'T'/Td'Td' AP<sub>H</sub>P<sub>H</sub>P<sub>H</sub>P<sub>H</sub> RMK SLPP<sub>o</sub>P<sub>o</sub>P<sub>o</sub> 5appp 6RRRtr**  
**8/CLC<sub>M</sub>CH9P<sub>24</sub>P<sub>24</sub> Rew'w'**

Donde cada sección representa:

**CCCC:** Identificador de Lugar. Se utilizan los indicadores de lugar establecidos por OACI.

**YYGGggZ:** Fecha y Hora del Informe. La fecha de la observación debe indicarse con dos cifras seguidas de la hora efectiva en la cual se realizó la observación, en horas y minutos UTC, seguida de la letra Z.

**dddff(f)Gf<sub>m</sub>f<sub>m</sub>(f<sub>m</sub>)KT d<sub>n</sub>d<sub>n</sub>d<sub>n</sub>v<sub>d</sub>x<sub>d</sub>x<sub>d</sub>x:** Dirección e Intensidad del Viento, **dirección (ddd)**, **intensidad (ff(f))**, **rachas (Gf<sub>m</sub>f<sub>m</sub>(f<sub>m</sub>))**, puede estar acompañado de otra sección donde se especifique otras características del viento (**d<sub>n</sub>d<sub>n</sub>d<sub>n</sub>Vd<sub>x</sub>d<sub>x</sub>d<sub>x</sub>**).

**VVVVSM:** Visibilidad dada en millas estándar, SM (Statute Miles).

**w'w'(ww):** Tiempo Significativo (presente).- Son los fenómenos que ocurren en el momento de la observación, como por ejemplo: FG Niebla, BR bruma, GR granizo, RA lluvia, entre otros. En esta sección también se puede especificar la intensidad del fenómeno observado, así como si estás en el lugar de observación o a qué distancia se observan.

Para el caso de niebla en esta sección, algunos indicativos son:

**VCFG** Se utilizará para indicar cualquier tipo de niebla observada en las proximidades (entre 5 y 10 millas), es decir la niebla se encuentra fuera del punto de observación.

**PRFG** indica que una parte sustancial de la estación está cubierta por niebla mientras que el resto está limpia de niebla.

**BCFG** Se utilizará para indicar bancos (parches) de niebla al azar cubriendo la estación.

**MIFG** Se utilizará cuando la visibilidad a 2 metros por encima del suelo sea de 5/8SM o más y la visibilidad aparente en la capa de niebla sea menor de 5/8SM

Por ejemplo, Se tienen bancos de niebla alrededor de la estación, y la visibilidad predominante es de 4SM, se puede reportar de 2 formas 4SM BCFG en los fenómenos de tiempo presente o 4SM BR y en la sección de notas BCFG.

*METAR MMMX 311145Z 19010KT 4SM BCFG OVC020 13/13 A3028 RMK 8/7//=  
o*

*METAR MMMX 311145Z 19010KT 4SM BR OVC020 13/13 A3028 RMK 8/7//  
BCFG=*

Nota: Solo cuando la visibilidad sea mayor o igual a 5SM se podrá reportar VCFG.

**T'T'/T'dT'd:** Temperatura ambiente y Temperatura de Punto de Rocío. Se codificarán en dos dígitos, en grados Celsius enteros.

**APhPHPHPH:** Ajuste altimétrico (QNH). QNH: Se utiliza cuando el avión vuela por debajo de lo que se conoce como altitud de transición. Es la presión atmosférica del aeródromo referida al nivel del mar. En América se da en pulgadas de mercurio. El valor de QNH se codificará en cuatro dígitos precedidos de la letra "A" que indica que este valor esta dado en pulgadas de mercurio y se debe aproximar hasta las centenas.

**RMK:** Sección para el grupo de notas.

**SLPPoPoPo:** Presión Reducida al Nivel Medio del Mar. Este grupo será incluido en el informe de cada 3 horas (00Z, 03Z, 06Z, 09Z, 12Z, 15Z, 18Z y 21Z).

**5appp:** variación trihoraria de la presión. Este grupo representa el cambio de presión al nivel de la estación durante las últimas tres horas, el cual es incluido en el informe de cada 3 horas (00Z, 03Z, 06Z, 09Z, 12Z, 15Z, 18Z y 21Z).

**6RRRrR:** Es la cantidad de precipitación caída en la hora precedente al informe, la cual deberá ser reportada en un grupo de cinco cifras.

**8/CLCMCH:** Grupo de las nubes. Este grupo consta de 5 caracteres y será codificado en forma horaria, el tipo de nubes se reportará de acuerdo al código internacional de nubes (OMM), donde: **8/** es el indicador del grupo de nubes, **CL** tipo de Nubes Bajas, **CM** Tipo de Nubes Medias, **CH** Tipo de Nubes Altas.

**9P24P24:** Valor de cambio de la presión en 24 horas. Este grupo será incluido en el informe de cada 3 horas (00Z, 03Z, 06Z, 09Z, 12Z, 15Z, 18Z y 21Z).

**Rew'w':** Condiciones Meteorológicas Recientes. Si el fenómeno meteorológico ha sido observado durante el periodo de la última observación de rutina se codifica como fenómeno reciente, en esta sección no se requiere indicar intensidad y descriptor del fenómeno (SMN, Manual del Meteorólogo Observador, 2004).

*Ejemplo de METAR del AICM:*

- Presencia de Niebla a cierta distancia observable:

200907241225 METAR MMMX 241225Z 05006KT 2 1/2SM BR HZ SCT200 12/10 RMK 8/002 **BCFG NE** VIS TWR=

Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México (MMMX), Fecha: 24 de Julio 2009 12:25Z (06:25 a. m. hora local), Viento: 50° (NE) de 6 kt (3.08 m/s), Visibilidad de 2 1/2 de milla (4,023.35m), presencia de bruma en el lugar de observación, Cantidad de nubosidad: medio nublado de 3/8 - 4/8 octas (SCT) con altura de la base de la nube más baja de 20000 ft (6,096m), Temperatura ambiente de 12°C y Temperatura de Punto de Rocío de 10°C, Nubes: Altas del tipo Cirrus Spissatus, con Banco de Niebla visible al Noreste del punto de observación. Torre visible.

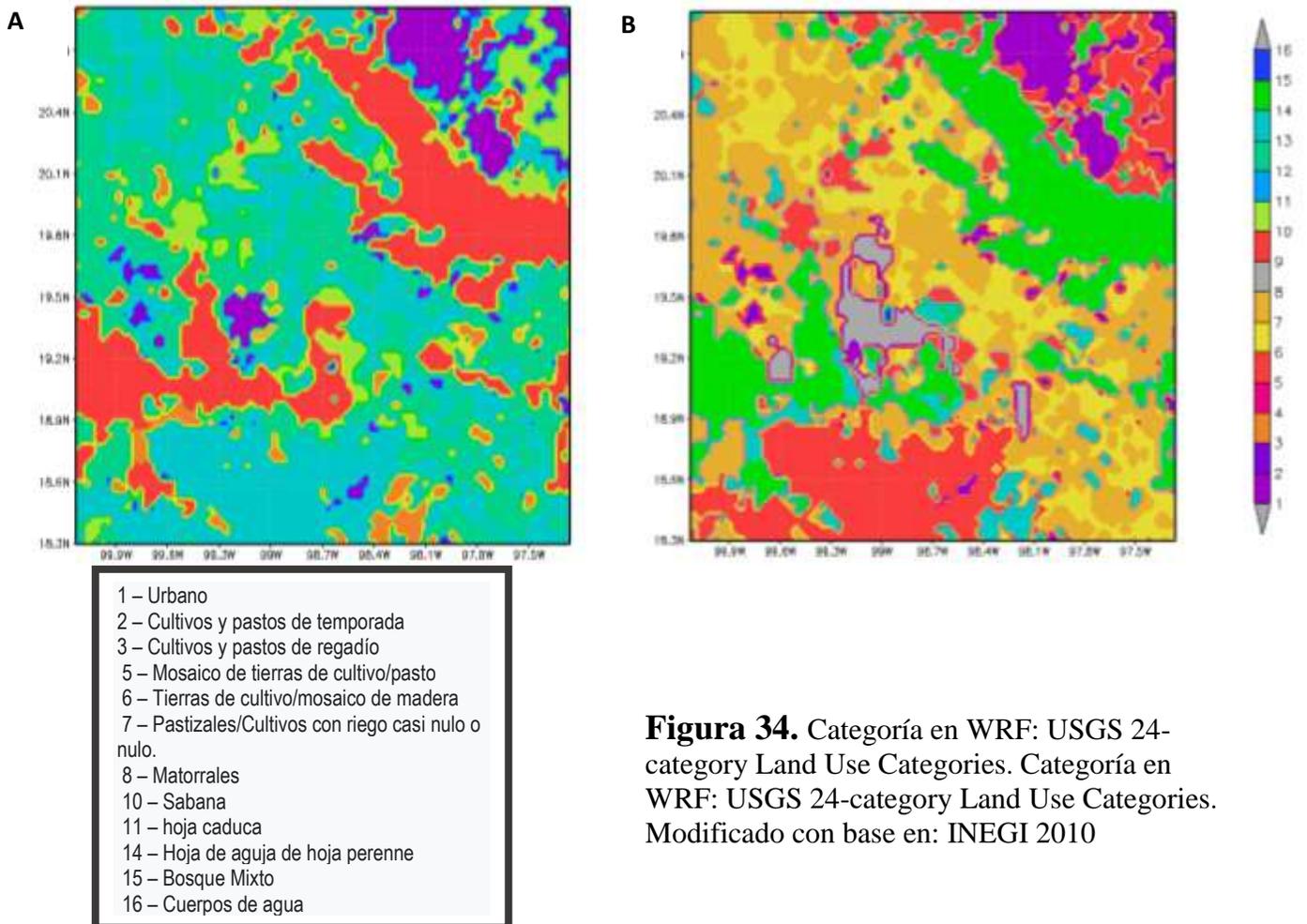
# Anexo D

## Uso de suelo en el dominio III de WRF

Con el fin de optimizar las características locales en la modelación, al no ser la niebla un fenómeno de gran escala en la región, se modificó el uso de suelo que tiene configurado el modelo WRF por el uso de suelo que reporta INEGI en el año 2010 en la zona de interés, tomando los valores bases que utilizan las categorías de uso de suelo USGS 24.

En la figura 34A, el uso de suelo graficado es el uso de suelo precargado de WRF de USG24, se puede observar que domina más la categoría de cubierta vegetal de hojas perenes y no se observa suelo urbano, lo cual en la latitud de 19° 03' a 19° 36' de latitud norte y de 98° 57' a 99° 22' de longitud oeste, se sitúa la Ciudad de México y tampoco se observa la zona conurbada del Estado de México.

Por lo tanto, en la figura 34B se configuró tomando como base el tipo de suelo de INEGI 2010, donde se puede apreciar la zona conurbada en especial de Ciudad de México y el Estado de México y las zonas de agricultura.



**Figura 34.** Categoría en WRF: USGS 24-category Land Use Categories. Categoría en WRF: USGS 24-category Land Use Categories. Modificado con base en: INEGI 2010

## *Referencias*

---

ARW (2010): Version 3 Modeling System User's Guide. National Center for Atmospheric Research (NCAR), Mesoscale & Microscale Meteorology Division.

Azpiri, P., Hernández, E., Orucuta, A., Rodríguez, R. (2007): Desarrollo de un Programa Preliminar de Simulación para Determinar la Capacidad de Pistas del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México. Tesina de proyecto. Instituto Politécnico Nacional. México, D. F., Agosto 2007.

Baker, R., Cramer, J., Peters J. (2000): Radiation fog: UPS Airlines Conceptual Models and Forecast Methods. UPS Airlines, Louisville, KY. U. S. A.

Byers, H. R. (1959): General Meteorology. McGraw-Hill Book Company, Tercera edición. Estados Unidos. 480-510 pp.

Byers, H. R. (1973): Elements of Cloud Physics. The University of Chicago Press, 191 pp.

Brown, R., & Poach, W. T. (1976): The physics of radiation fog. Quart. J. Roy. Meteorol. Soc. 102, 335 – 354.

Cano, D., Palacio, I., Téllez, B., Albaladejo, J. (2001): Estudios de niebla realizados en el CMT en Castilla – La Mancha, V Simposio Nacional de Predicción, INM, Madrid.

Chen, S.-H., & Sun, W.Y. (2002): A one-dimensional time dependent cloud model. J. Meteor. Soc. Japan, 80, 99–118.

Cheol-Han, B., Ji-Woo, L., Song-You, H. (2008): Predictability experiments of fog and visibility in local airports over Korea using the WRF Model. J. KOSAE, 24, Korean Soc. Atmos. Environ. 92-101.

Collins, W. D., Rasch Byron, A. Boville James, J. Hack James, R. McCaa David, L. Williamson Jeffrey, T. Kiehl y Bruce Briegleb (2004): Description of the NCAR Community Atmosphere Model (CAM3.0), NCAR Tech. Note NCAR/TN-4641STR, pp. 214, the National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colo.

García-García, F & Zarraluqui, V. (2008): A fog climatology for Mexico. *Zeitschrift der Gesellschaft fue Erdkunde zu Berlín. Die Erde* 139 (1- 2). Berlín, Alemania. pp. 45 – 60.

Goldsmith, G. R., Muñoz-Villers, L. E., Holwerda, F., McDonnell, J. J., Asbjornsen, H., Dawson, T. E. (2012): Stable Isotopes Reveal Linkages among Ecohydrological Processes in a Seasonally Dry Tropical Montane Cloud Forest. *Ecohydrology*. 5(6), 779-90.

Guerrero-Higueras, A. M., García-Ortega, E., Matellán-Olivera, V., Sánchez, J.L. (2007): Procesamiento paralelo de los pronósticos meteorológicos del modelo WRF mediante NCL. Sociedad de Arquitectura y Tecnología de Computadores (SARTECO), Jornadas de Computación Reconfigurable y Aplicaciones (JCRA). Universidad Europea Miguel de Cervantes, España.

Gustafson Jr., W. I., P.-L. Ma, & B. Singh (2014), Precipitation characteristics of CAM5 physics at mesoscale resolution during MC3E and the impact of convective timescale choice, *J. Adv. Model. Earth Syst.*, 6, 1271–1287, doi: 10.1002/2014MS00033

Hansen, J., & Travis, L. (1974). Light scattering in planetary atmospheres. *Space Science Reviews*, 16(4), 527–610. <https://doi.org/10.1007/BF00168069>

Herrera, A., Bustos, A., Martner, C., Rico, O., Acha, J., Aguerrebere, R., Heredia, F., Gradilla, L. (2005): Diagnóstico del Transporte de Carga Aérea en México. Instituto Mexicano del Transporte. Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Publicación técnica No. 273, Sanfandila, Qro, México. Grupo de Física de la Atmósfera, Universidad de León, España.

Hilliker, J. L. & Fritsch, J.M. (1999): An observations-based statistical system for warm season hourly problematic forecasts of low ceiling at the San Francisco International Airport. *J. Appl. Meteorol.*, 38, 1692-1705.

Hobbs P. (1981): *Clouds their formation, optical properties, and effects*. University of Wahington, Acedemic Press. 497 pp.

Holets, S., R. Swanson, 1981: High-Inversion Fog Episodes in Central California. *Journal of Applied Meteorology*, 20, 890–899

Hong, S.-Y., & Lim, J. O. J. (2006): The WRF Single-Moment 6-Class Microphysics Scheme (WSM6), *J. Korean Meteor. Soc.*, 42, 129–151.

Hong, Y., Hsu K. , Moradkhani H. , and Sorooshian S. , (2006): Uncertainty quantification of satellite precipitation estimation and Monte Carlo assessment of the error propagation into hydrologic response. *Water Resour. Res.*, 42, W08421, doi:10.1029/2005WR004398.

Ingraham, N.L. & Matthews, R. A. (1988): Fog Drip as a Source of Ground Water Recharge in Northern Kenya. – *Water Resources Research* 24: 1406-1410.

INEGI (2010). Datos de uso de suelo del Valle de México. Esc. 1: 250 000. Sistema Nacional de Información Geográfica. <https://www.inegi.org.mx/temas/usosuelo/#Descargas>

Jacobson, Mark Z. (June 2005). *Fundamentals of Atmospheric Modeling* (paperback) (2nd ed.). New York: Cambridge University Press. p. 828. ISBN 978-0-521-54865-6.

S.-Y. Hong, Y. Noh, J. Dudhia (2006). A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes. *Mon. Weather Rev.*, 134 (9), pp. 2318-2341, 10.1175/MWR3199.1

Jiusto, J., (1981): Fog Structure. In: Clouds: Their formation, optical properties, and effects. P. V. Hobbs and A. Deepak (Eds.) Academic Press, 187-239.

Jerez, A., (2011): Tesis de licenciatura: Estudio de las Condiciones en la Formación de Niebla en el Aeropuerto de Toluca como una Herramienta en la Mitigación de Riesgos en las Operaciones Aeronáuticas. Instituto Politécnico Nacional. México, DF.

Kessler, E., (1969): On the distribution and continuity of water substance in atmospheric circulation. Meteor Monogr10(32), 84.

Labajo, J. J., de Pablo, F., García E, L. (1991): An equation relating temporal changes of relative humidity and temperature: case of variable intervals of time. *Atmósfera*, 4, 257 – 264.

Labajo, J. J., Hernández, P, Izquierdo, J. (1995): Un modelo de pronóstico de temperaturas de formación de niebla de radiación. *Atmósfera*, 8, 115– 126.

Lin, Y. L., Farley, R. D., Orville, H. D. (1983): Bulk parameterization of the snow field in a cloud model. *J. Climate Appl. Meteor.*, 22, 1065–1092.

Liu, Y., and P. H. Daum, 2004: Parameterization of the autoconversion process. Part I: Analytical formulation of the Kesslertype parameterizations. *J. Atmos. Sci.*, 61, 1539–1548.

Low, R. D. H. (1979): A theoretical investigation of cloud/fog extinction coefficients and their spectral correlations. *Contributions Atmos. Phy.*, 52. 44–57.

Mack, E. J., and Katz, U. (1976): The characteristics of marine fog occurring off the coast of Nova Scotia, report No. CJ-5756-M1, Calspan Corp. (Buffalo, NY)

Martínez, F, X. (2006): *Meteorología Aplicada a la Navegación*. Editorial Centre de Publicacions del Campus Nord, Barcelona, 220 pp.

Mason, B. J. (1961): *The Physics of Cloud*, Claredon Press., Oxford, 671 pp.

Moran, F. (1944): *Apuntes de Termodinámica de la Atmósfera*. I. N. M., Publicaciones serie B (Textos), No. 4 (Ed. Facsímil 1984), Madrid, 345 pp.

Muller, M. D. Masbou, M & Bott, A. (2010). Three - dimensional fog forecasting in complex terrain. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 136, 2189-2202.

Ramírez, A., Pérez., S., Gómez J., Casasola, L., Avalos, J., Hernández M. (2001): *Informe Climatológico Ambiental*. Cuenca del Valle de México. Secretaría del Medio Ambiente. Gobierno del Distrito Federal.

Rodríguez-Genó, C. F, & Alfonso, L. (2021): Parameterization of the collision-coalescence process using series of basis functions: COLNETv1.0.0 model development using a machine learning approach. *Geoscientific Model Development*. <https://doi.org/10.5194/gmd-2021-125>

Rutledge, S. A., & Hobbs, P. V. (1984): The mesoscale and microscale structure and organization of clouds and precipitation in midlatitude cyclones. XII: A diagnostic modeling study of precipitation development in narrow cloud-frontal rainbands. *J. Atmos. Sci.*, 20, 2949–2972.

Salas, J, Q. (2005): *Climatología Aplicada*. Publicacions de la Universitat Jaume I., España, 2005. 260 pp

Skamarock, W., Klemp, J., Dudhia, J., Gill, D., Barker, D., Duda, M., Huang, X., Wang, W., Powers, J. (2008): *A Description of the Advanced Research WRF Version 3*. NCAR Technical Note. National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado, USA. 125 pp.

Song-You, Hong., Jimy, Dudhia. Shu-Hua, Chen. (2003). A Revised Approach to Ice Microphysical Processes for the Bulk Parameterization of Clouds and Precipitation. *Monthly Weather Review*, 132(1):103-120. doi: 10.1175/1520-0493(2004)132<0103:ARATIM>2.0.CO;2

Steenefeld, G-J., Holtslag, Bert., Ronda, R.-J., 2015. The challenge of forecasting the onset and development of radiation fog using mesoscale atmospheric models. *Boundary-Layer Meteorology*. DOI: 10.1007/s10546-014-9973-8

Sukoriansky S, B. Galperin, V. Perov (2005): Application of a new spectral theory of stably stratified turbulence to the atmospheric boundary layer over sea ice *Bound.-Lay. Meteorol*, 117 pp. 231-257

SMN Servicio Meteorológico Nacional (2004): Manual del Meteorólogo Observador. Capítulo 9. Datos METAR.

Tao, W.-K., J. Simpson, D. Baker, S. Braun, M.-D. Chou, B. Ferrier, D. Johnson, A. Khain, S. Lang, B. Lynn, C.-L. Shie, D. Starr, C.-H. Sui, Y. Wang, Wetzell, P. (2003): Microphysics, radiation and surface processes in the Goddard Cumulus Ensemble (GCE) model. *Meteor. and Atmos. Phys.*, 82, 97–137.

Tverskoi, P. N. (1965): *Physics of the atmosphere*. Israel prog. For Scientific Translations, 561 pp.

Van Schalkwyk, L. & Dyson, L. (2013): *Climatological Characteristics of Fog at Cape Town International Airport*. American Meteorological Society. Junio, 2013.

Vislocky, R.L., Fritsch, J.M. (1997): An automated observations-based system for short-term prediction of ceiling and visibility. *Wea. Forecasting*, 12, 31-43.

### ***Páginas Web Consultadas Febrero 2022:***

Web-SMN, Glosario del Servicio Meteorológico Mundial:

<http://smn.cna.gob.mx/glosario/glosario.html>

Web-MetEd1: [https://www.meted.ucar.edu/mesoprim/dynfog\\_es/](https://www.meted.ucar.edu/mesoprim/dynfog_es/)

Web-UCAR: [http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user\\_guide\\_V3/contents.html](http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user_guide_V3/contents.html)

Web-MetEd2: [http://www.meted.ucar.edu/fog\\_int\\_es/](http://www.meted.ucar.edu/fog_int_es/)

Web-MetEd3: <http://www.meted.ucar.edu/dlac/lesson1/print.htm>

Web-RDA: <http://rda.ucar.edu/datasets/ds083.2/#!/description>

Web-WMO:

[http://www.wmo.int/gsearch/gresults\\_es.html?q=Niebla&submit.x=0&submit.y=0&submit=SEARCH#gsc.tab=0&gsc.q=Niebla&gsc.page=4](http://www.wmo.int/gsearch/gresults_es.html?q=Niebla&submit.x=0&submit.y=0&submit=SEARCH#gsc.tab=0&gsc.q=Niebla&gsc.page=4)

Web-MetEd4: [http://www.meted.ucar.edu/mesoprim/skewt\\_es/dry\\_adiabat.htm](http://www.meted.ucar.edu/mesoprim/skewt_es/dry_adiabat.htm)