



**Proyecto:**

**Sistema de soporte para el pronóstico meteorológico de  
corto plazo en zonas urbanas**

**Fondo Sectorial de Investigación y Desarrollo sobre el Agua  
Componente: Climatología de Tormentas Convectivas Severas  
Apartado adicional: Climatología de Tormentas Convectivas  
Severas de Corta Duración  
FON.SEC.27/2021**

**Informe Técnico II**

**Responsable Técnico: Dr. René Lobato Sánchez**

**AGOSTO 2023**

**CONVOCATORIA CONAGUA-CONACYT 2019 PROY. NÚM: 309343**

## **DIRECTORIO**

### **INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA (IMTA)**

**Director General**  
**Dr. Adrián Pedrozo Acuña**

**Coordinador de Seguridad Hidrica**  
**Dr. Agustín Breña Naranjo**

**Subcoordinador de Eventos Extremos y**  
**Cambio Climático**  
**Dr. Marco Rodrigo López López**

**Coordinador de la Unidad de Administración**  
**y Finanzas Administración**  
**Mtro. José de Jesús Aguirre Bautista**

## **PARTICIPANTES**

**Dr. Julio Sergio Santana Sepúlveda**  
**M.T.I. Miguel Ángel Vázquez Zavaleta**  
**Dra. Iskra Pamela Mejía Estrada**  
**M.I. Roberta Karinne Mocva Kurek**  
**Dr. Marco Rodrigo López López**

**M.C. Roberto Ramírez Villa**  
**Dr. Indalecio Mendoza Uribe**  
**Dr. Víctor Kevin Contreras Tereza**  
**M.C. Olivia Rodríguez López**  
**M.T.I. José Gpe. Rosario de la Cruz**

## **RESPONSABLE TÉCNICO**

**Dr. René Lobato Sánchez**

## **COLABORADORES TÉCNICOS**

**Dra. Mirce Ivón Morales Velázquez**  
**M.C. Oscar Pita Díaz**  
**Tec. Sup. Mónica R. Taboada Medina**

## Contenido

	Resumen	6
	Introducción	7
1	Climatología de Tormentas	9
1.1	Climatología de TCS de corta duración a partir de Reanálisis	9
1.2	Climatología de TCS de corta duración a partir de Observaciones	13
2	Pronóstico meteorológico numérico a corto plazo (24 horas) con el modelo WRF en alta resolución considerando mejoras en la capa de terreno para hacer más representativa la condición terrestre en la zona urbana (2ª parte)	19
2.1	Antecedentes	19
2.2	Esquema general del sistema	20
2.3	Estructura de archivos y directorios	21
2.4	Ejecución automática del sistema	26
2.5	Validación del modelo WRF para 15 eventos de granizo (2019-2021) en la Zona Metropolitana del Valle de México	28
2.5.1	Selección de eventos de granizo	29
2.6	Simulaciones con el modelo WRF	65
2.7	Tablas de contingencia e índices de calidad	68
3	Esquema de probabilidad de convección severa	76
3.1	Objetivo	76
3.2	Introducción	76
3.3	Metodología	76
3.4	Selección de la Clase de Modelo	80
3.5	Construcción del Modelo	84
3.5.1	Determinación de las variables predictoras	84
3.5.2	Entrenamiento del modelo	88
3.6	Ciclo de Operación del Modelo	90
4	Detección de convección profunda y rayos con imágenes de satélite	94
4.1	Introducción	94
4.2	Antecedentes y metodología	94
4.3	Aplicación a la zona de estudio	97
4.4	Ajuste de parámetros a escala local	98
4.5	Resultados	104
4.6	Implementación en tiempo real	110
4.6.1	Descarga datos del modelo GFS	110
4.6.2	Descarga datos de rayos	113
4.6.3	Descarga datos de satélite (Banda 08)	114
4.6.4	Descarga datos de satélite (Banda 13)	115
4.6.5	Genera base de datos de rayos para cada zona metropolitana (Genera_Rdata_Rayos.R)	116
4.6.6	Calcula inestabilidad e intensidad (Calcula_Inestabilidad.R)	117
4.6.7	Genera gráfico de inestabilidad y rayos (Generapng_Inestabilidad.R)	117
4.6.8	Genera gráfico de intensidad (Generapng_Intensidad.R)	118
4.7	Conclusiones	119
5	Estudio de la estimación de lluvia en tiempo real mediante información de radar meteorológico Cerro de Catedral sobre la zona metropolitana del Valle de México	120





5.1	Metodología	121
5.1.1	Evaluación del bloqueo de haz de la señal del radar	122
5.1.2	Estudio de los coeficientes de la relación Z-R	123
5.2	Análisis e interpretación de la información	124
5.2.1	Comentarios sobre los datos del radar de Catedral	124
5.2.2	Análisis de la fracción de bloqueo de haz	127
5.2.3	Estudio de los coeficientes locales para la relación Z-R	131
5.2.4	Calibración de los datos del radar y estimación de la precipitación	133
5.2.5	Comentarios para la estimación de la lluvia en tiempo real	137
6	Sistema de visualización y consulta que integre los resultados de las salidas numéricas del modelo WRF, probabilidad de convección severa y corrección de lluvia y detección de convección severa por satélite	138
6.1	Marco Teórico	138
6.2	Arquitectura de desarrollo	140
6.3	Modelo de negocio	140
6.4	Descripción de los actores del sistema	143
6.5	Descripción de casos de uso	143
6.6	Implementación del sistema	148
6.7	Estructura interna del sistema	148
6.8	Estructura general del sistema de visualización	149
6.9	Submódulos de las zonas metropolitanas	151
6.9.1	Submódulo modelo WRF	152
6.9.2	Submódulo climatología de tormentas	156
6.9.3	Submódulo seguimiento de satélite	161
7	Referencias	167
7.1	Referencias Capítulo 2 (Modelación numérica)	167
7.2	Referencias Capítulo 3 (Probabilidad de tormentas)	168
7.3	Referencias Capítulo 4 (Detección de convección profunda)	169
7.4	Referencias Capítulo 5 (Radares)	169
7.5	Referencias Capítulo 6 (Visualización del sistema)	171
	Anexos	
	Anexo I Climatología de Tormentas (A1, A2 y A3)	
	Anexo II Programa de Capacitación para el personal de la CGSMN	
	Anexo III Tesistas Participantes	
	Anexo IV Difusión de resultados (participación en foros)	
	Anexo V Contrato de comodato	

## Resumen

Se presentan avances correspondientes a la segunda y última parte del proyecto. Con respecto a las primeras actividades correspondientes a la etapa I, se reportan resultados a productos generados a petición de la Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) derivados de reuniones de trabajo y avances que se realizaron durante este segundo semestre de ejecución. Para la etapa II, se presentan resultados de las componentes de meteorología satelital en sus modalidades de corrección de estimación de lluvia, detección de convección severa y descargas eléctricas (rayos); cálculo de probabilidad de convección severa considerando los resultados del pronóstico numérico con el modelo WRF; estimación de lluvia a través del radar meteorológico de Cerro de Catedral ubicado en el Estado de México; y el sistema de visualización que mostrará todos los productos desarrollados, la mayoría de ellos a tiempo casi real para uso exclusivo del grupo de previsión meteorológica del SMN. Todo este compendio de productos, proporcionarán al meteorólogo operativo herramientas muy útiles para el pronóstico meteorológico de corto y muy corto plazo principalmente para las tres grandes urbes de México que son las Zonas Metropolitanas del Valle de México, Guadalajara y Monterrey. El sistema de visualización quedará funcionando en un servidor de cómputo que estará ubicado en las instalaciones del SMN funcionando de manera ininterrumpida las 24 horas del día.

## Introducción

El presente informe de actividades reporta las correspondientes a la segunda parte de su ejecución; comprende la corrección de sesgo, detección de convección severa y descargas eléctricas atmosféricas (rayos) a través de la meteorología satelital; el cálculo de probabilidad de tormenta severa mediante el uso de resultados del modelo numérico WRF; estimación de lluvia mediante el uso del radar meteorológico de Cerro de Catedral ubicado en el Estado de México; y el sistema de visualización que mostrará los resultados de cada una de las componentes en forma gráfica y espacial de manera que la información generada esté disponible al personal operativo en el tiempo lo más cercano posible a la ocurrencia del fenómeno, además de los pronósticos numéricos a corto plazo con resoluciones espaciales y temporales de alta resolución.

Cada una de las actividades conformadas en componentes han sido desarrolladas con metodologías dentro del estado del arte de la investigación en la materia. Los resultados de cada componente proporcionan información valiosa para que el meteorólogo operativo realice su trabajo de una manera más confiable, sobre todo cuando se presentan tormentas severas que por su corta duración resulta complejo su seguimiento y pronóstico, que al final de cuentas, este es el objetivo del proyecto con la culminación de un sistema de visualización.

Se espera que el presente desarrollo sirva como punto de partida para que nuevas aplicaciones dirigidas al pronóstico operativo puedan incorporarse. El sistema operativo, como la paquetería y los lenguajes de programación son del tipo “open source”, esto fue así en el sentido de contar con un producto que no esté ligado a un software comercial cuya licencia de uso esté limitada a el pago de una cuota, que en muchas ocasiones no se dispone de este recurso dentro del presupuesto.

Debido al tiempo disponible para la ejecución del proyecto y que algunas aplicaciones requieren de un tiempo razonable para su calibración y ajuste, se recomienda al grupo del SMN evaluar estas aplicaciones y en la medida de sus capacidades y tiempo, realizar los ajustes correspondientes.

Con relación a los entregables del proyecto, se describe la actividad total dentro del informe, puntualizando de la siguiente manera:

1. Sistema de análisis, pronóstico y visualización de tormentas severas y granizo. Se ha desarrollado la interfaz gráfica en ambiente WEB donde se concentran todas las actividades comprometidas en los componentes I y II. Todas las componentes, incluyendo sus gráficos pueden consultarse en el siguiente enlace:

<http://172.16.19.121>

2. Servidor de alto desempeño con el sistema de análisis, pronóstico y visualización de tormentas severas y granizo operando en forma automática. El servidor se encuentra operando normalmente haciendo las corridas diarias con el modelo WRF, la corrección de lluvia y detección de convección severa satelital operando en tiempo casi real, el cálculo de la probabilidad de tormenta severa para pronóstico de muy corto plazo con la información que provee el modelo WRF, así como el análisis de lluvia estimada mediante el radar meteorológico de Cerro de Catedral para la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. Todos los programas de cómputo están instalados y funcionando en el servidor, así como los manuales correspondientes.

3. Curso de capacitación del uso del sistema de pronóstico meteorológico de corto plazo. Se realizó un curso a distancia del 16 al 20 de mayo del presente año sobre las bases y aplicación del modelo WRF donde los instructores fueron los Dres. Indalecio Mendoza Uribe, Pamela Iskra Mejía Estrada y Victor Kevin Contreras Tereza.

## 1. Climatología de Tormentas

En la climatología de Tormentas Convectivas Severas (TCS) se identificó el comportamiento histórico espacial y temporal de variables meteorológicas asociadas con entornos favorables para la severidad de tormentas, así como su ocurrencia a partir de valores de precipitación que superaron los 50 y 75 mm en 24 horas, para las tres zonas metropolitanas (ZM) de estudio. No obstante, también es relevante conocer aspectos relacionados con eventos fuertes de precipitación que pueden presentarse en periodos breves de tiempo y derivar en afectaciones importantes, los cuales serán referidos en este apartado como TCS de corta duración.

A partir de datos de precipitación provenientes de reanálisis, se identificaron eventos que superaron umbrales de precipitación relacionados con la probable ocurrencia de TCS de corta duración. A partir de la información obtenida se construyeron promedios espaciales y temporales para la generación de mapas mensuales y estacionales, para las 3 zonas metropolitanas de estudio, en los cuales se puede apreciar las regiones y temporadas de mayor actividad de este tipo de sistemas.

Por otra parte, para el análisis de TCS de corta duración mediante observaciones, se eligió un método diferente, pues la densidad y disponibilidad de información observada en superficie con resolución temporal horaria, es significativamente menor con respecto a la red de estaciones climáticas convencionales. En este análisis propuesto se identificaron los eventos de lluvia acumulada que superaron los umbrales establecidos en periodos de 4 horas o menos, lo que permitió el cálculo de los promedios mensuales para todo el periodo, y para cada una de las estaciones con suficiente información. Como producto final se generaron diagramas tipo Hovmöller que muestran el número mensual de TCS de corta duración que se presentaron durante el periodo de estudio.

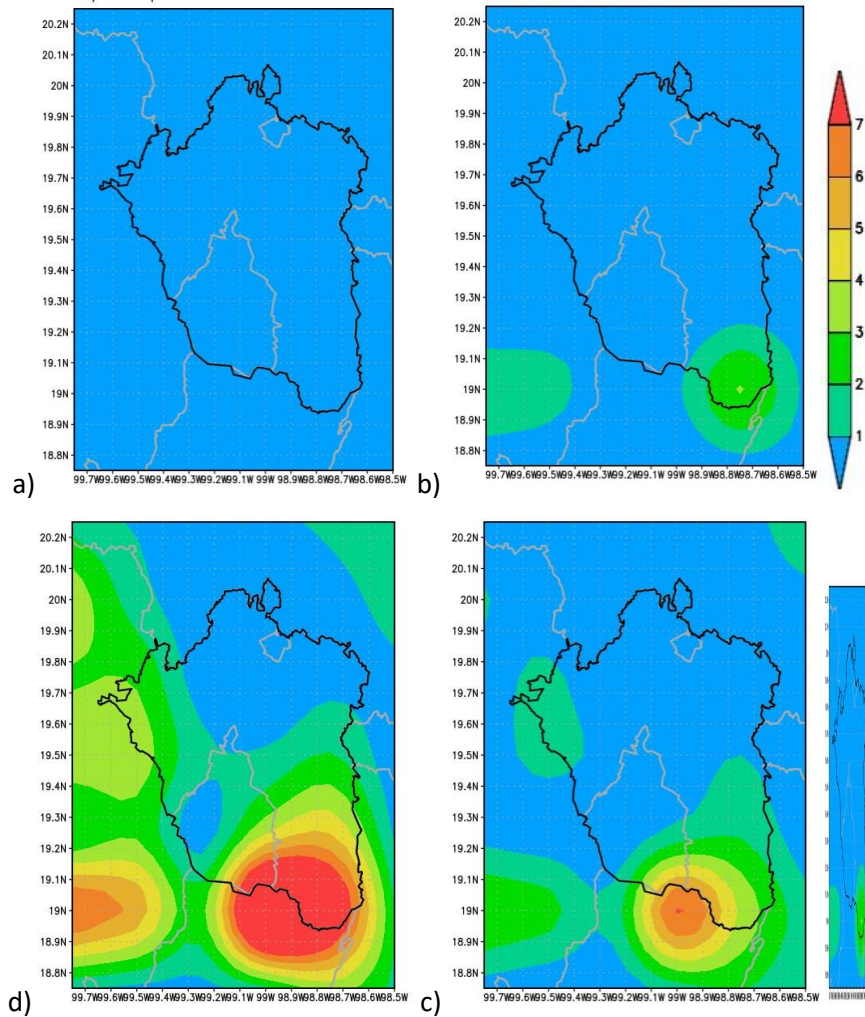
### 1.1. Climatología de TCS de corta duración a partir de Reanálisis

El análisis espacial en una malla regular de los eventos identificados como TCS de corta duración requirió de una fuente de información referida como reanálisis ERA-5 (ECMWF), la cual fue descrita en el apartado de TCS. A partir de estas bases de datos fueron extraídos los dominios espaciales que corresponden a las zonas metropolitanas del Valle de México, Guadalajara y Monterrey, para la variable de precipitación acumulada con resolución horaria, correspondiente al nivel de superficie, para un periodo total de 30 años (1989-2018).

Una vez conformados los registros a emplear, se establecieron los umbrales de precipitación que debían ser identificados en 4 horas o menos, para que pudiera calificar como una TCS de corta duración, de acuerdo con información proporcionada por el SMN. Los umbrales analizados fueron los siguientes:

- ZM del valle de México: 15, 20 y 25 mm
- ZM de Guadalajara: 10 y 15 mm
- ZM de Monterrey: 15 y 25 mm

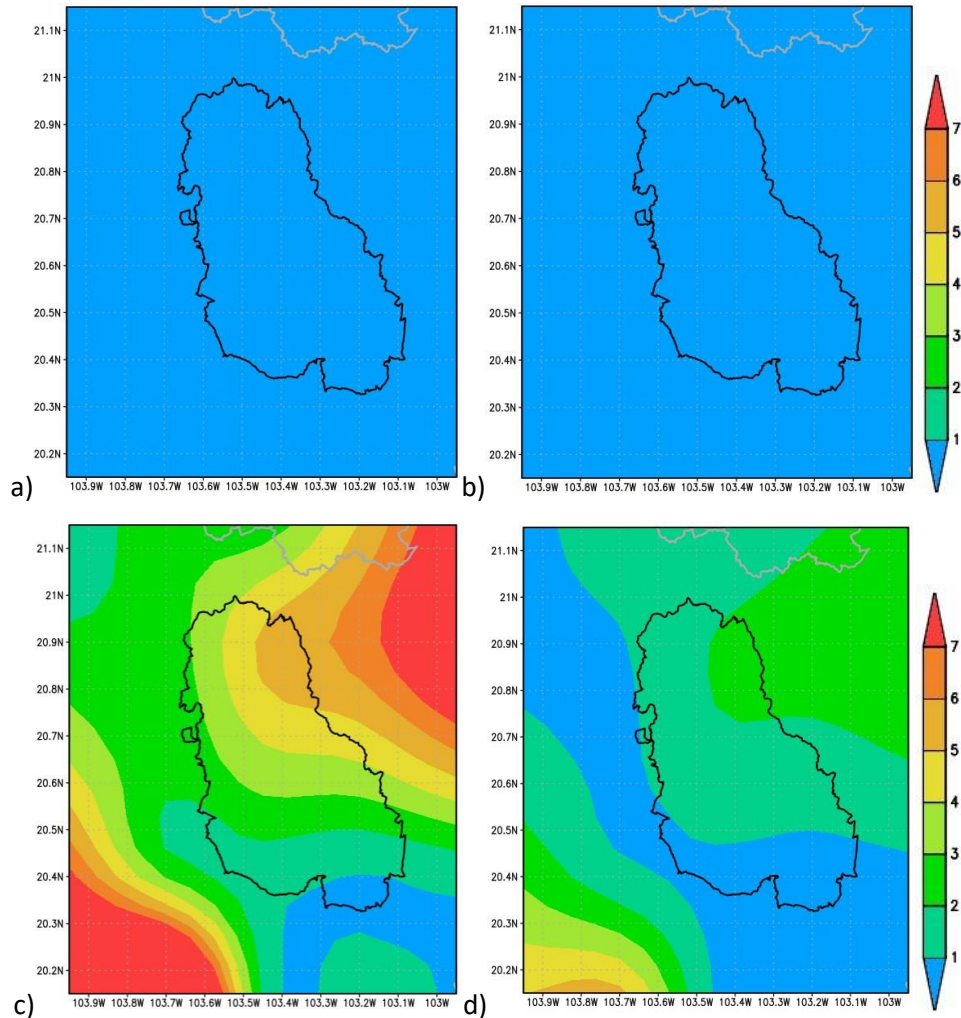
Finalmente se identificaron diariamente los eventos que cumplieron con estas características, conformando así promedios mensuales (Anexos 1.1, 1.2 y 1.3) y estacionales (figuras 1.1, 1.2 y 1.3) para visualizar espacial y temporalmente la actividad de TCS de corta duración en cada una de las zonas de estudio.



**Figura 1.1** Promedio estacional del número de eventos de precipitación que superaron los 15mm/4hrs en el valle de México; a) DEF, b) MAM, c) JJA y d) SON (1989-2018, ERA-5).

En la Figura 1.1 se observa que para la ZM del Valle de México la mayor actividad de TCS de corta duración se presenta durante los meses de verano y otoño, con un número promedio estacional de entre 3 y 7 eventos, con máximos localizados sobre porciones elevadas del sur y sureste del dominio, así como al oriente de la Ciudad de México principalmente. En el Anexo 1.1 se muestran los valores mensuales considerando el umbral de 15mm/4hr, y el resto de resultados para los demás umbrales, se anexan a la documentación general del proyecto.

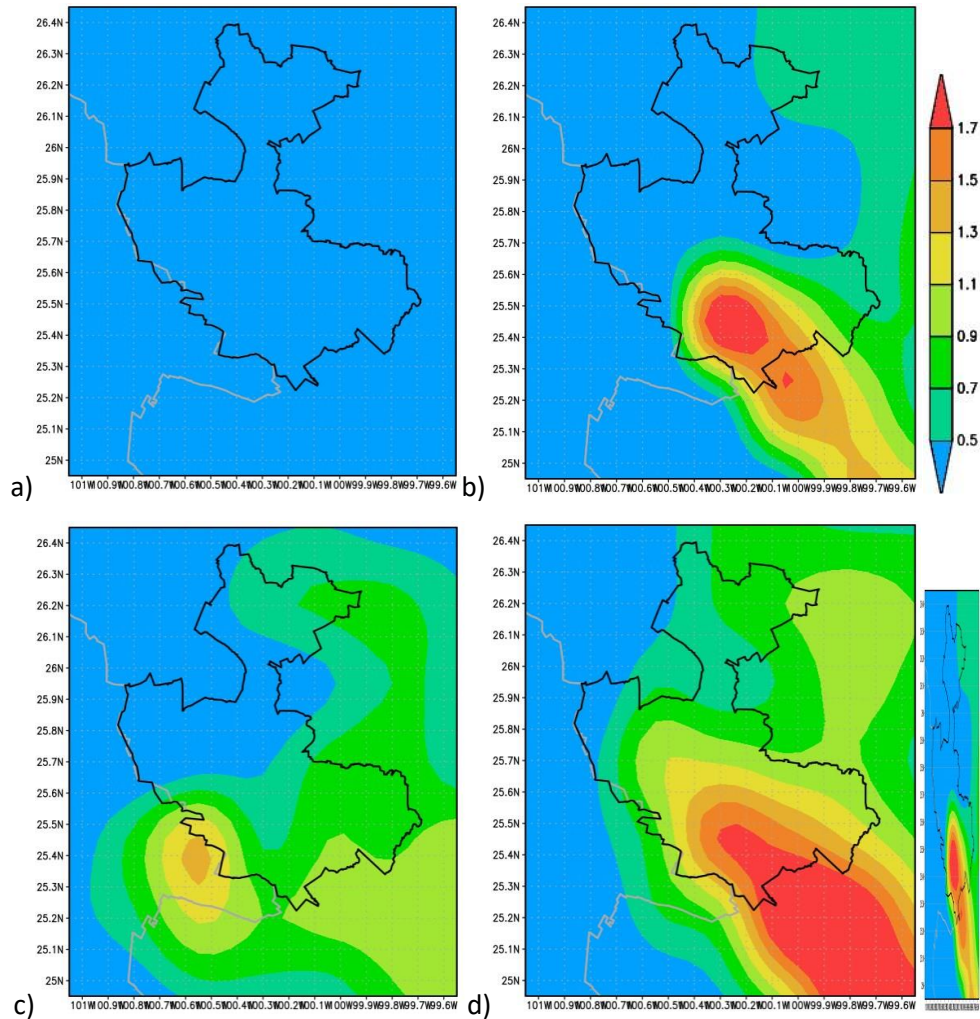




**Figura 1.2.** Promedio estacional del número de eventos de precipitación que superaron los 10mm/4hrs en la ZM de Guadalajara; a) DEF, b) MAM, c) JJA y d) SON (1989-2018, ERA-5).

En lo que se refiere a la ZM de Guadalajara, al ver reflejado una menor lámina de precipitación en el análisis de la climatología de TCS con respecto al Valle de México, se construyeron mapas de TCS de corta duración con láminas de 10mm en 4 horas o menos (Figura 2), lo que señala un número promedio de entre 1 y 5 eventos durante los meses de mayor actividad, correspondiente al verano y otoño, al noreste y centro de este dominio. En el Anexo 1.2 se muestran los valores mensuales para el umbral de 10mm/4hr, y el resto de resultados (resto de umbrales) se anexan a la documentación general del proyecto.





**Figura 1.3.** Promedio estacional del número de eventos de precipitación que superaron los 15mm/4hrs en la ZM de Monterrey; a) DEF, b) MAM, c) JJA y d) SON (1989-2018, ERA-5).

Al igual que Guadalajara, la ZM de Monterrey muestra en su climatología de TCS una menor lámina de precipitación en comparación con el Valle de México, sin embargo, el umbral de 15mm/4hrs es suficiente para identificar TCS de corta duración que se presentan de 1 a 2 veces en promedio durante los meses de mayor actividad, correspondientes en este caso a primavera y otoño, principalmente sobre las porciones oriente y sureste de este dominio. En el Anexo 1.3 se muestran los valores mensuales para el umbral de 15mm/4hr, y el resto de resultados (resto de umbrales) se anexan a la documentación general del proyecto.

## 1.2 Climatología de TCS de corta duración a partir de Observaciones

Para conformar el registro de observaciones de precipitación se consultaron distintas fuentes de información utilizando un total de 24 estaciones, once de ellas correspondientes a Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMA), de las cuales provienen 8 de Sistema de Información Hidrológica (SIH) de la CONAGUA con intervalos de tiempo de una hora, y tres más se obtuvieron de un sitio FTP proporcionada por el SMN denominadas como HLY, que presentaron un intervalo temporal de tres horas. Los datos de las trece estaciones restantes, se accedieron a través del Programa de Estaciones Meteorológicas del Bachillerato Universitario (PEMBU) de la Ciudad de México; dicho programa está a cargo del Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático de la Universidad Nacional Autónoma de México, los cuales utilizan intervalos de 30 minutos, y se encuentran disponibles para la comunidad científica y el público en general a través de su sitio web: [https://www.ruoa.unam.mx/pembu/index.php?page=creditos\\_pembu](https://www.ruoa.unam.mx/pembu/index.php?page=creditos_pembu)

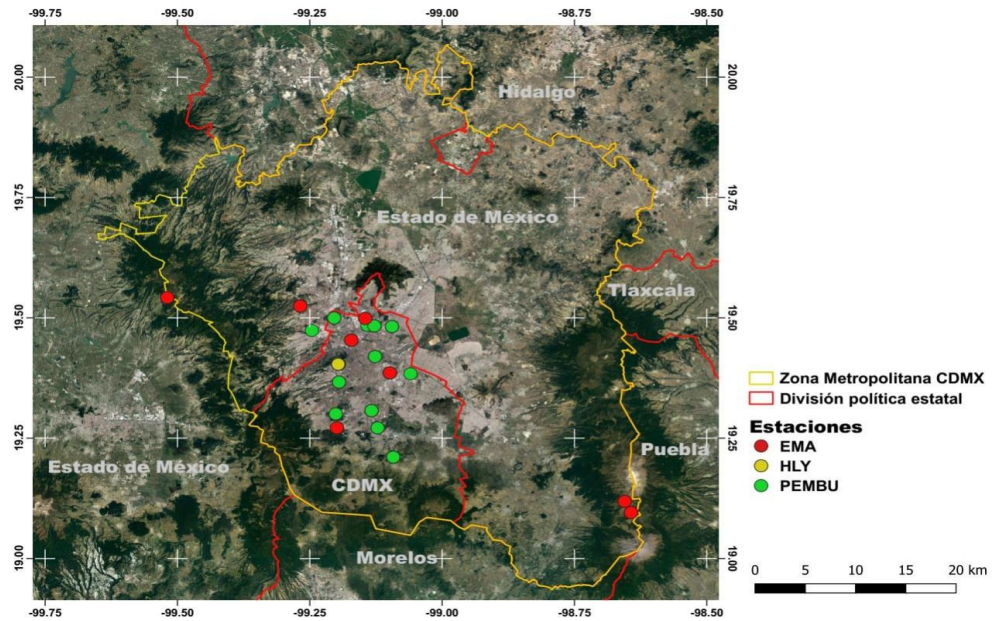
En la Tabla 1.1 se muestra el tipo de estación, nombre, coordenadas geográficas y el periodo disponible de información capturada; para la ZM del Valle de México se tienen registros de 22 estaciones, distribuidas en su mayoría en la zona urbana y solo tres en zonas montañosas (Figura 4), mientras que en el resto de dominios solo se contó con una estación por ZM (Figuras 5 y 6). La falta de disponibilidad de información meteorológica horaria en las zonas de estudio limitó la viabilidad de llevar a cabo un análisis de la distribución espacial de las TCS de corta duración, por lo que el análisis se enfocó en la identificación temporal de su actividad.

Tipo	Nombre	Longitud	Latitud	Periodo
PEMBU	CCH A-UNAM	-99.2041	19.4997	2003-2020
PEMBU	CCH N-UNAM	-99.2461	19.4738	1996-2020
PEMBU	CCH O-UNAM	-99.0598	19.3838	2002-2020
PEMBU	CCH S-UNAM	-99.2011	19.3004	1998-2022
PEMBU	CCH V-UNAM	-99.1413	19.4843	2004-2020
PEMBU	ENP1-UNAM	-99.122	19.2714	1996-2020
PEMBU	ENP3-UNAM	-99.0948	19.4818	1996-2020
PEMBU	ENP4-UNAM	-99.1949	19.4037	2002-2020

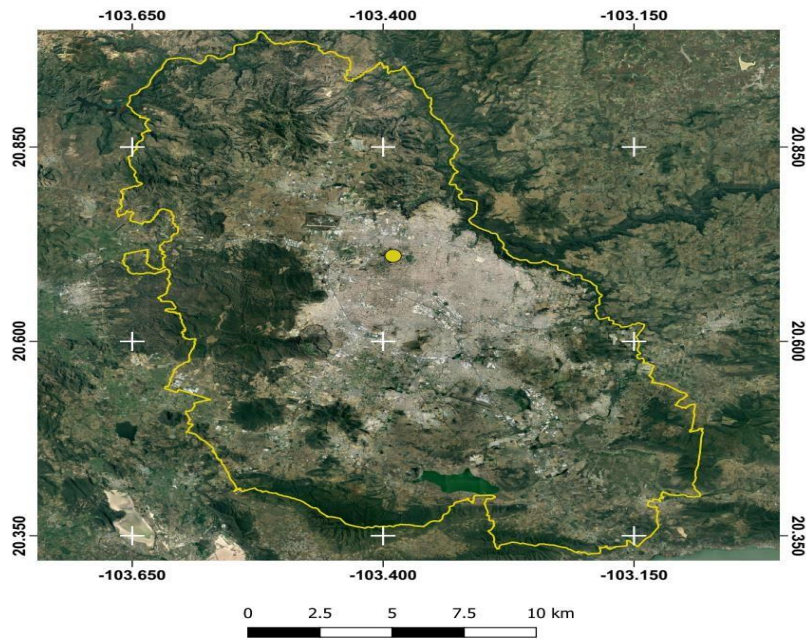
PEMBU	ENP5-UNAM	-99.1334	19.3073	2009-2010
PEMBU	ENP6-UNAM	-99.0924	19.2107	2012-2021
PEMBU	ENP7-UNAM	-99.1268	19.4196	2001-2020
PEMBU	ENP8-UNAM	-99.1949	19.3665	1999-2021
PEMBU	ENP9-UNAM	-99.1281	19.4833	2002-2021
EMA	Altzomoni	-98.6552	19.11881	2012-2015
EMA	CCatedral	-99.5192	19.54194	1999-2015
EMA	Ecoguardas	-99.1989	19.27154	2008-2015
EMA	Ixtapopo	-98.6432	19.09567	2008-2015
EMA	Tezontle	-99.0989	19.38556	2000-2015
EMA	Presamadin	-99.2681	19.52444	2000-2015
EMA	CBIDF	-99.1717	19.45333	1999-2015
EMA	CBIIDF	-99.1453	19.49861	2008-2015
HLY	Tacubaya Central (Obs)	-99.1964	19.40361	1989-2018
HLY	Monterrey (Obs)	-100.305	25.73361	1989-2018
HLY	Guadalajara (Obs)	-103.39	20.71	1989-2018

**Tabla 1.1.** Estaciones meteorológicas con datos de resolución temporal horaria o subhoraria, empleadas para la obtención de información de precipitación.

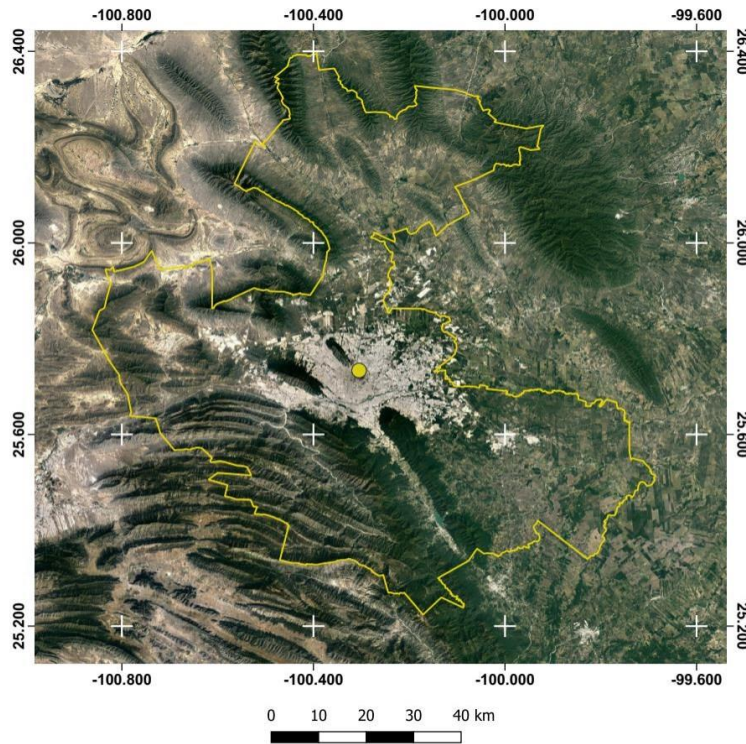




**Figura 1.4.** Localización de las estaciones meteorológicas empleadas con datos horarios o subhorarios en la ZM del valle de México.



**Figura 1.5.** Localización de las estaciones meteorológicas empleadas con datos horarios o subhorarios en la ZM de Guadalajara.



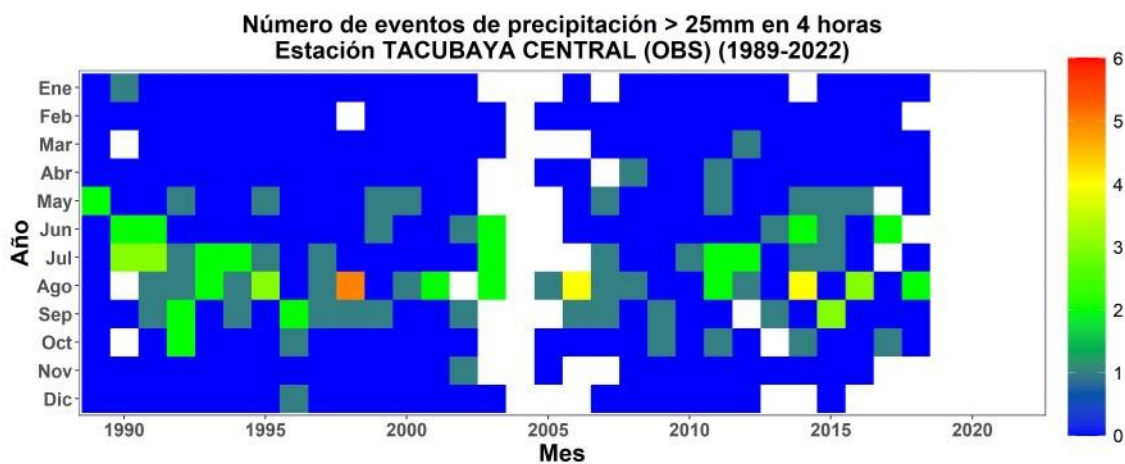
**Figura 1.6.** Localización de las estaciones meteorológicas empleadas con datos horarios o subhorarios en la ZM de Monterrey.

Para la identificación mensual de eventos de precipitación severa de corta duración se generaron vectores de datos por cada estación, en el que por cada día se identificó el valor máximo de precipitación diaria en intervalos de 4 horas para el caso del valle de México, y de 6 horas para las estaciones de Guadalajara y Monterrey; esta consideración fue tomada debido a las diferentes proporciones de láminas de precipitación que se presentan en el Valle de México con respecto a Guadalajara y Monterrey. En el proceso empleado, si la precipitación en esos pasos de tiempo superó los 25 mm, fue clasificada como una TCS de corta duración.

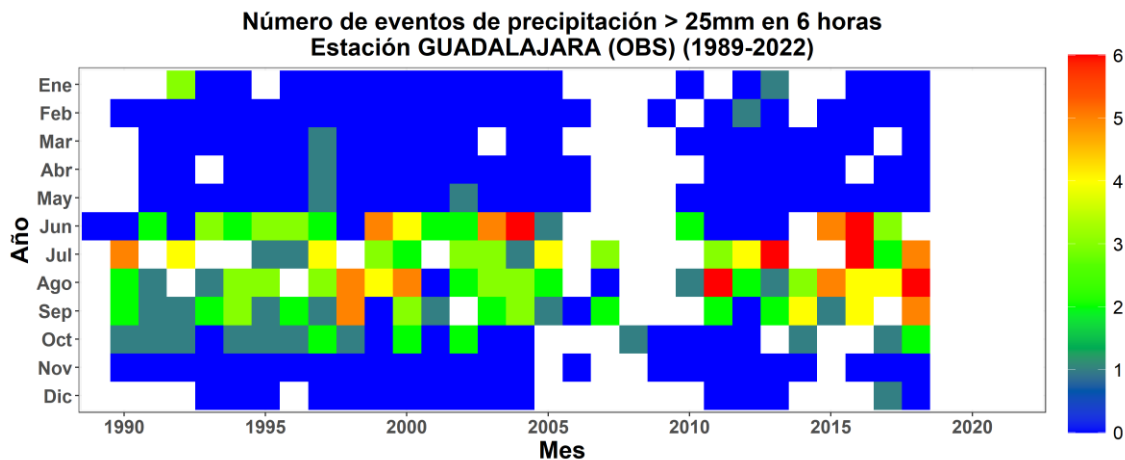
Para la visualización gráfica de los resultados se construyeron diagramas de tipo Hovmöller, en el que se representa a través de pixeles, el número de eventos ocurridos por cada mes, integrando en el eje "x" el año, mientras que en el eje "y" se establecen los meses.

Con base en este análisis, se pudo identificar que, de manera general para las tres zonas metropolitanas, los eventos de tormenta de corta duración se presentan con más frecuencia entre los meses de mayo a septiembre, con valores que van de los 2 a los 5

eventos por mes, e incluso más, en algunos meses particulares durante el periodo de estudio. También es importante hacer notar que hay periodos de años en los cuales disminuye considerablemente la actividad de este tipo de sistemas principalmente en el valle de México, y que puede estar asociado con procesos atmosféricos de baja frecuencia. En los resultados mostrados en las figuras 1.7 a 1.11 los espacios en color blanco reflejan la ausencia de datos, observando que ninguna estación se encuentra completa dentro del periodo de 1989-2018, omitiendo igualmente las estaciones que cuentan con menos de 5 años de datos. Las tablas, gráficos y el resto de resultados de la climatología de TCS de corta duración a partir de observaciones se anexan a la documentación general del proyecto.

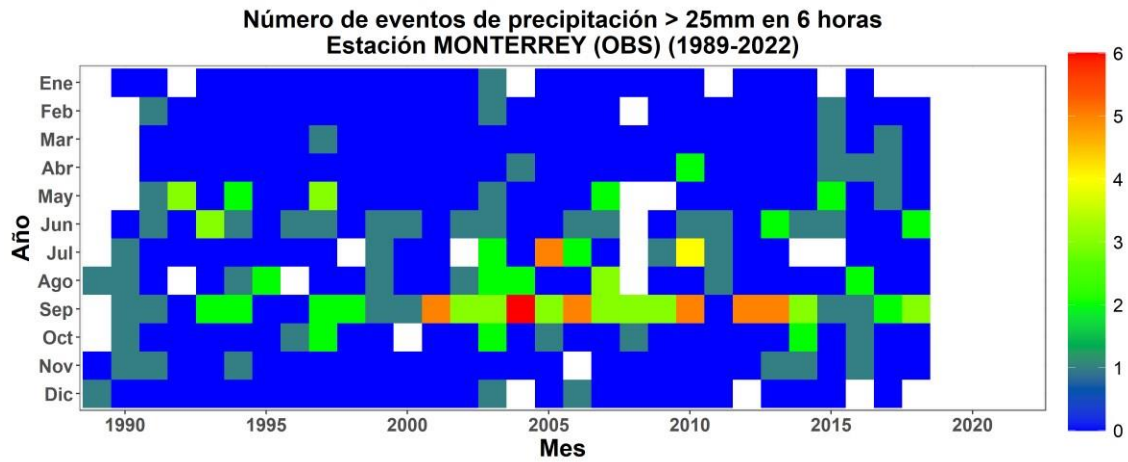


**Figura 1.7** Número de eventos de precipitación superior a 25 mm en 4 horas en la Estación Tacubaya Central.

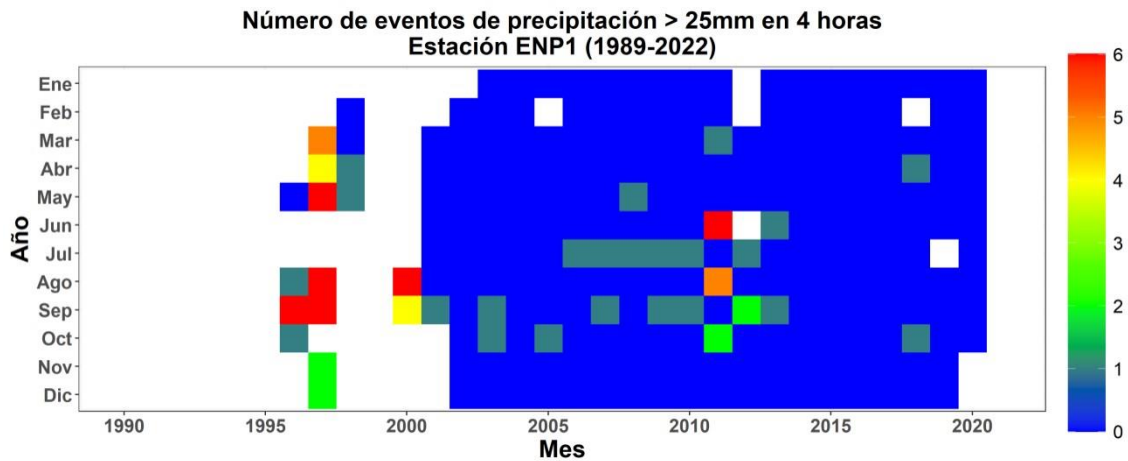


**Figura 1.8.** Número de eventos de precipitación superior a 25 mm en 6 horas en la Estación Guadalajara.



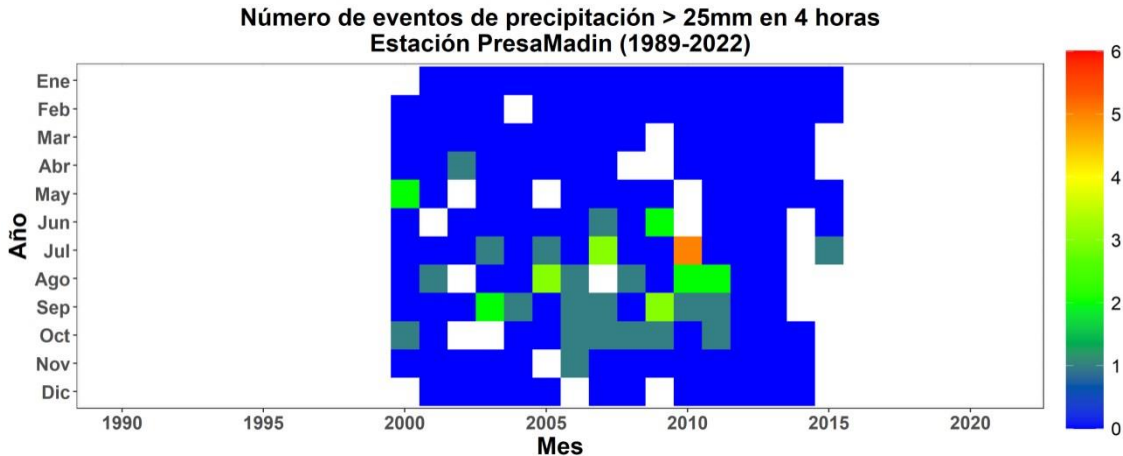


**Figura 1.9.** Número de eventos de precipitación superior a 25 mm en 6 horas en la Estación Monterrey.



**Figura 1.10** Número de eventos de precipitación superior a 25 mm en 4 horas en la Estación ENP1 (PEMBU).





**Figura 1.11.** Número de eventos de precipitación superior a 25 mm en 4 horas en la Estación Presa Madín (EMA)

## 2. Pronóstico meteorológico numérico a corto plazo (24 horas) con el modelo WRF en alta resolución considerando mejoras en la capa de terreno para hacer más representativa la condición terrestre en la zona urbana (2ª Parte)

### 2.1 Antecedentes

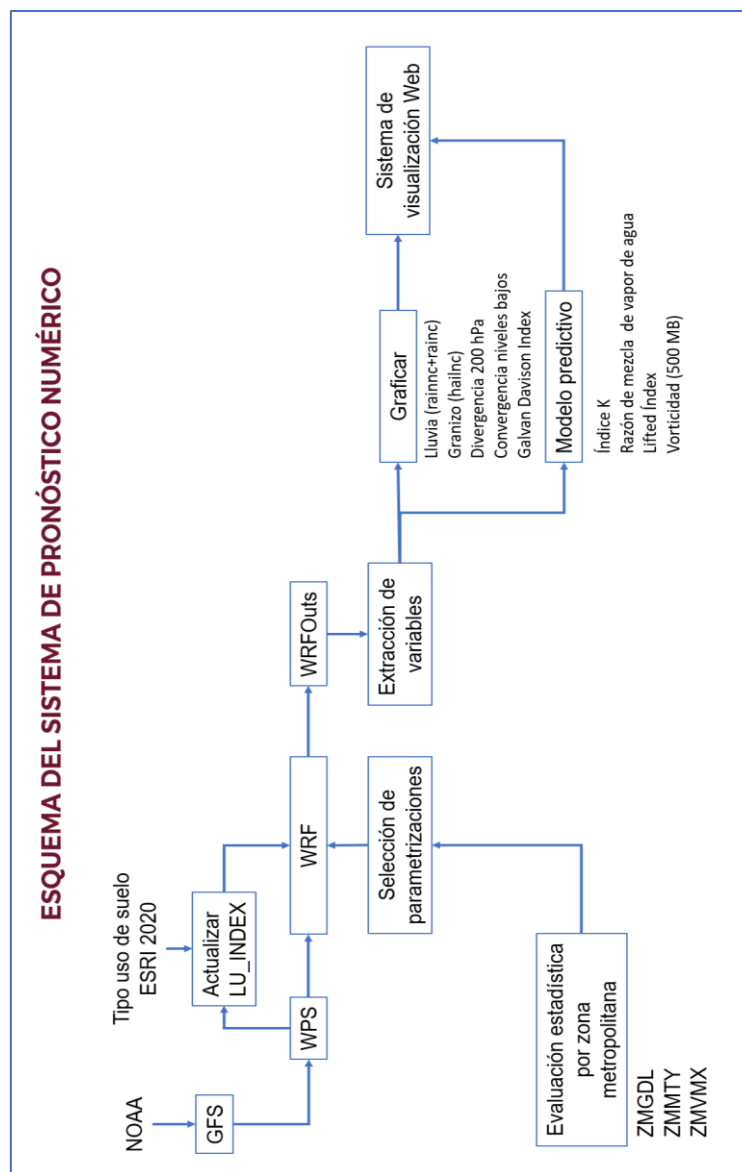
El entregable correspondiente a “Pronóstico meteorológico numérico a corto plazo (24 horas) con el modelo WRF en alta resolución considerando mejoras en la capa de terreno para hacer más representativa la condición terrestre en la zona urbana” fue concluido en la Etapa I como consta en el informe correspondiente. Sin embargo, dado que el sistema interacciona con los entregables “III. Desarrollo de un esquema de probabilidad de convección severa que, a partir de los resultados numéricos del modelo, indique el posible desarrollo de sistemas atmosféricos asociados a lluvia severa y/o granizadas” y “V. Sistema de visualización y consulta que integre los resultados de las salidas numéricas del modelo WRF, probabilidad de convección severa, y productos de satélite GOES-16” durante esta segunda etapa del proyecto se realizaron adecuaciones al sistema y codificación de nuevos programas para la interacción entre los diferentes componentes del sistema.

Entre los cambios al sistema se pueden mencionar la actualización del modelo WRF a la versión 4.4.3; la escritura de resultados en intervalos horarios (en lugar de cada 10 minutos), con esto se logra una reducción del tamaño de los archivos de salida y disminución en el tiempo de ejecución; incorporación del módulo graficar; incorporación del módulo para la extracción y cálculo de las variables requeridas por el modelo predictivo de probabilidad de convección severa (Índice K, Lifted Index, Razón de mezcla de vapor de agua y Vorticidad a 500 Mb); y finalmente, la integración con el sistema de visualización Web.

El sistema se ha instalado en el servidor de pruebas dedicado al proyecto, el cual se mantendrá en funcionamiento en las instalaciones del IMTA en calidad de servidor espejo, lo cual permitirá contar con la información en caso de una falla en el servidor principal. La instalación en el servidor principal que se enviará a la Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional se realizará durante el mes cinco de la Etapa II del proyecto.

## 2.2 Esquema general del sistema

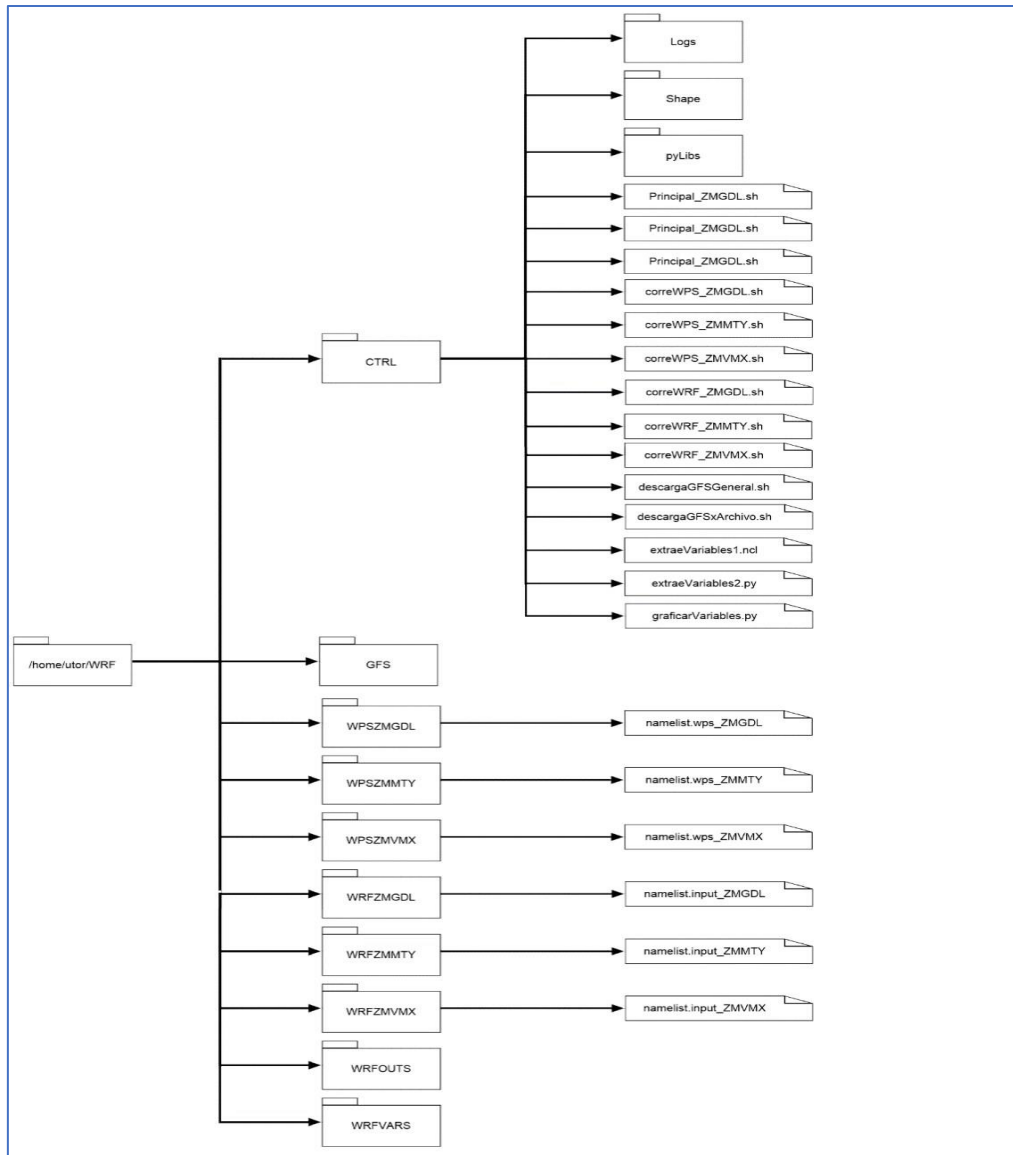
En la Figura 2.1 se presenta el esquema general del sistema de pronóstico numérico a corto plazo con el modelo WRF en alta resolución.



**Figura 2.1** Esquema general del sistema de pronóstico numérico a corto plazo con el modelo WRF.

### 2.3. Estructura de archivos y directorios

En la Figura 2.2 se presenta la estructura de archivos y directorios del sistema de pronóstico numérico a corto plazo con el modelo WRF. Se omiten aquellos que forman parte de la estructura propia de los módulos WPS y WRF, es decir, solo se incluyen los que fueron agregados y modificados para la operación del sistema.



**Figura 2.2** Estructura de archivos y directorios del sistema de pronóstico numérico a corto plazo con el modelo WRF.



La estructura de archivos y directorios se pueden consultar directamente en el servidor de pruebas. También se anexa en un CD la estructura de archivos y directorios. A continuación, se describe de forma general los archivos y directorios específicos del sistema de pronóstico meteorológico numérico a corto plazo con el modelo WRF en alta resolución.

### **Directorio /home/utor/WRF**

Directorio principal de trabajo, a partir de este se desprende el conjunto de archivos y directorios del sistema de pronóstico numérico a corto plazo con el modelo WRF.

### **Directorio CTRL**

Directorio de control que contiene el conjunto de scripts para la ejecución del sistema de forma automatizada.

### **Directorio CTRL/Logs**

Directorio que alberga archivos de registro de la ejecución de los diferentes programas del sistema. Por ejemplo, cuando se ejecuta el programa “descargaGFSGeneral.sh” para los archivos del modelo GFS a las 00 horas, se genera el archivo descarga00.txt que contiene la bitácora de los archivos descargados para ese tiempo. En general, todos los archivos logs tienen como parte del nombre la hora de ejecución de la corrida (00, 06, 12 y 18) y se sobrescriben diariamente.

### **Directorio CTRL/Shape**

Directorio que contiene los archivos en formato *shape* con las divisiones políticas de los estados y zonas metropolitanas.

### **Directorio CTRL/pyLibs**

Directorio que contiene archivos con funciones en el lenguaje de programación Python para la ejecución de los programas del sistema.

### **Archivo CTRL/Principal\_ZMGDL.sh**

Programa en lenguaje *bash* para la ejecución de la simulación numérica para la Zona Metropolitana de Guadalajara. Este a su vez invoca los programas “crea\_sed.input.php”, “correWPS\_ZMGDL.sh”, “correWRF\_ZMGDL.sh”, “extraeVariables1.ncl”, “extraeVariables2.py” y “graficaVariables.py”. Este script se invoca desde el cron del sistema.



### **Archivo CTRL/Principal\_ZMMTY.sh**

Programa en lenguaje *bash* para la ejecución de la simulación numérica para la Zona Metropolitana de Monterrey. Este a su vez invoca los programas “crea\_sed.input.php”, “correWPS\_ZMMTY.sh”, “correWRF\_ZMMTY.sh”, “extraeVariables1.ncl”, “extraeVariables2.py” y “graficaVariables.py”. Este script se invoca desde el cron del sistema.

### **Archivo CTRL/Principal\_ZMVMX.sh**

Programa en lenguaje *bash* para la ejecución de la simulación numérica para la Zona Metropolitana del Valle de México. Este a su vez invoca los programas “crea\_sed.input.php”, “correWPS\_ZMVMX.sh”, “correWRF\_ZMVMX.sh”, “extraeVariables1.ncl”, “extraeVariables2.py” y “graficaVariables.py”. Este script se invoca desde el cron del sistema.

### **Archivo CTRL/correWPS\_ZMGDL.sh**

Programa en lenguaje *bash* que se cambia al directorio “../WPSZMGDL” y ejecuta los programas “link\_grib.csh”, “ungrib.exe” y “metgrid.exe”. Este programa lee como archivo de configuración “namelist.wps\_ZMGDL”. El resultado final de la ejecución de estos programas corresponde a los archivos “met\_em.d0\*” y “met\_em.d02” que contienen las condiciones meteorológicas recortadas para los dominios de simulación y datos interpolados (en la horizontal y vertical) para el periodo de simulación. También envía los archivos al directorio “../WRFZMGDL”.

### **Archivo CTRL/correWPS\_ZMMTY.sh**

Programa en lenguaje *bash* que se cambia al directorio “../WPSZMMTY” y ejecuta los programas “link\_grib.csh”, “ungrib.exe” y “metgrid.exe”. Este programa lee como archivo de configuración “namelist.wps\_ZMMTY”. El resultado final de la ejecución de estos programas corresponde a los archivos “met\_em.d0\*” y “met\_em.d02” que contienen las condiciones meteorológicas recortadas para los dominios de simulación y datos interpolados (en la horizontal y vertical) para el periodo de simulación. También envía los archivos al directorio “../WRFZMMTY”.

### **Archivo CTRL/correWPS\_ZMVMX.sh**

Programa en lenguaje *bash* que se cambia al directorio “../WPSZMVMX” y ejecuta los programas “link\_grib.csh”, “ungrib.exe” y “metgrid.exe”. Este programa lee como archivo de configuración “namelist.wps\_ZMVMX”. El resultado final de la ejecución de estos



programas corresponde a los archivos “met\_em.d0\*” y “met\_em.d02” que contienen las condiciones meteorológicas recortadas para los dominios de simulación y datos interpolados (en la horizontal y vertical) para el periodo de simulación. También envía los archivos al directorio “../WRFZVMX”.

### **Archivo CTRL/descargaGFSGeneral.sh**

Programa en lenguaje *bash* que descarga los archivos del modelo GFS. En esencia genera los nombres de los archivos a descargar e invoca el programa auxiliar “descargaGFSxArchivo.sh”. Este script se ejecuta directamente desde el cron del sistema

### **Archivo CTRL/descargaGFSxArchivo.sh**

Programa en lenguaje *bash* para la descarga específica (por fecha y hora) de un archivo del modelo GFS de forma específica.

### **Archivo CTRL/extraeVariables1.ncl**

Programa en lenguaje NCL que lee el archivo original generado en las simulaciones numéricas con el modelo WRF, extrae variables específicas (time, pressure\_levels, lat, lon, u, v, rainc, rainnc, hailnc), calcula variables nuevas (div, con, gdi, vort, wvmr e indk) y genera archivos simplificados (solo con las variables antes mencionadas) en el directorio “WRFVARS” por zona metropolitana y fecha de simulación.

### **Archivo CTRL/extraeVariables2.py**

Programa en lenguaje Python, es complementario al programa “extraeVariables1.ncl”. Lee los archivos simplificados (con variables específicas) almacenados en el directorio “WRFVARS” para agregar la variable Lifted Índice (lifi). Los datos son actualizados sobre el archivo original.

### **Archivo CTRL/graficaVariables.py**

Programa en lenguaje Python encargado de generar las gráficas correspondientes a las variables de precipitación, granizo, Índice Galvez-Davison, convergencia y divergencia.

### **Directorio GFS**

Directorio que alberga los archivos del modelo GFS organizados por fecha de descarga.

### **Directorio WPSZMGDL**



Directorio con la estructura del módulo de preprocesamiento del modelo WRF configurados para la Zona Metropolitana de Guadalajara.

**Archivo WPSZMGDL/namelist.wps\_ZMGDL**

Archivo de configuración del módulo WPS con los parámetros de configuración de la Zona Metropolitana de Guadalajara.

**Directorio WPSZMMTY**

Directorio con la estructura del módulo de preprocesamiento del modelo WRF configurados para la Zona Metropolitana de Monterrey.

**Archivo WPSZMMTY/namelist.wps\_ZMMTY**

Archivo de configuración del módulo WPS con los parámetros de configuración de la Zona Metropolitana de Monterrey.

**Directorio WPSZVMX**

Directorio con la estructura del módulo de preprocesamiento del modelo WRF configurados para la Zona Metropolitana del Valle de México.

**Archivo WPSZVMX/namelist.wps\_ZVMX**

Archivo de configuración del módulo WPS con los parámetros de configuración de la Zona Metropolitana del Valle de México.

**Directorio WRFZMGDL**

Directorio con la estructura del módulo WRF configurados para la Zona Metropolitana de Guadalajara.

**Archivo WRFZMGDL/namelist.namelist\_ZMGDL**

Archivo de configuración del módulo WRF con los parámetros de configuración de la Zona Metropolitana de Guadalajara.

**Directorio WRFZMMTY**



Directorio con la estructura del módulo WRF configurados para la Zona Metropolitana de Monterrey.

#### **Archivo WRFZMMTY/namelist.namelist\_ZMMTY**

Archivo de configuración del módulo WRF con los parámetros de configuración de la Zona Metropolitana de Monterrey.

#### **Directorio WRFZVMX**

Directorio con la estructura del módulo WRF configurados para la Zona Metropolitana del Valle de México.

#### **Archivo WRFZVMX/namelist.namelist\_ZVMX**

Archivo de configuración del módulo WRF con los parámetros de configuración de la Zona Metropolitana del Valle de México.

#### **Directorio WRFOUTS**

Directorio que alberga los archivos con las simulaciones numéricas originales organizadas por fecha y zona metropolitana.

#### **Directorio WRFVARS**

Directorio que alberga los archivos con las simulaciones numéricas simplificadas, es decir, solo variables específicas (time, pressure\_levels, lat, lon, u, v, rainc, rainnc, hailnc, div, con, gdi, vort, wvmr, lifi e indk) organizadas por fecha y zona metropolitana.

## **2.4 Ejecución automática del sistema**

La ejecución automática del sistema de pronóstico numérico a corto plazo con el modelo WRF se lleva a cabo por medio del servicio cron del sistema operativo Linux. En la Figura 2.3 se presenta el listado del servicio cron.

```

utor@tormenta:~/WRF/CTRL$ crontab -l
# Definición de variables con directorios de control y logs
SHELL=/bin/bash
HOME=/home/utor
PATH=./:/opt/mpich-3.4.3/bin:/opt/miniconda3/bin:/opt/gnuLibs/bin:/usr/bin:/bin
LD_LIBRARY_PATH=/opt/gnuLibs/lib:$LD_LIBRARY_PATH
DIRCTRL=/home/utor/WRF/CTRL
DIRLOGS=/home/utor/WRF/CTRL/Logs

# Descarga de datos GFS
10 0 * * * $DIRCTRL/descargaGFSGeneral.sh 00 >& $DIRLOGS/descarga00.txt
30 0 * * * $DIRCTRL/descargaGFSGeneral.sh 00 >& $DIRLOGS/descarga00.txt
10 6 * * * $DIRCTRL/descargaGFSGeneral.sh 06 >& $DIRLOGS/descarga06.txt
30 6 * * * $DIRCTRL/descargaGFSGeneral.sh 06 >& $DIRLOGS/descarga06.txt
10 12 * * * $DIRCTRL/descargaGFSGeneral.sh 12 >& $DIRLOGS/descarga12.txt
30 12 * * * $DIRCTRL/descargaGFSGeneral.sh 12 >& $DIRLOGS/descarga12.txt
10 18 * * * $DIRCTRL/descargaGFSGeneral.sh 18 >& $DIRLOGS/descarga18.txt
30 18 * * * $DIRCTRL/descargaGFSGeneral.sh 18 >& $DIRLOGS/descarga18.txt

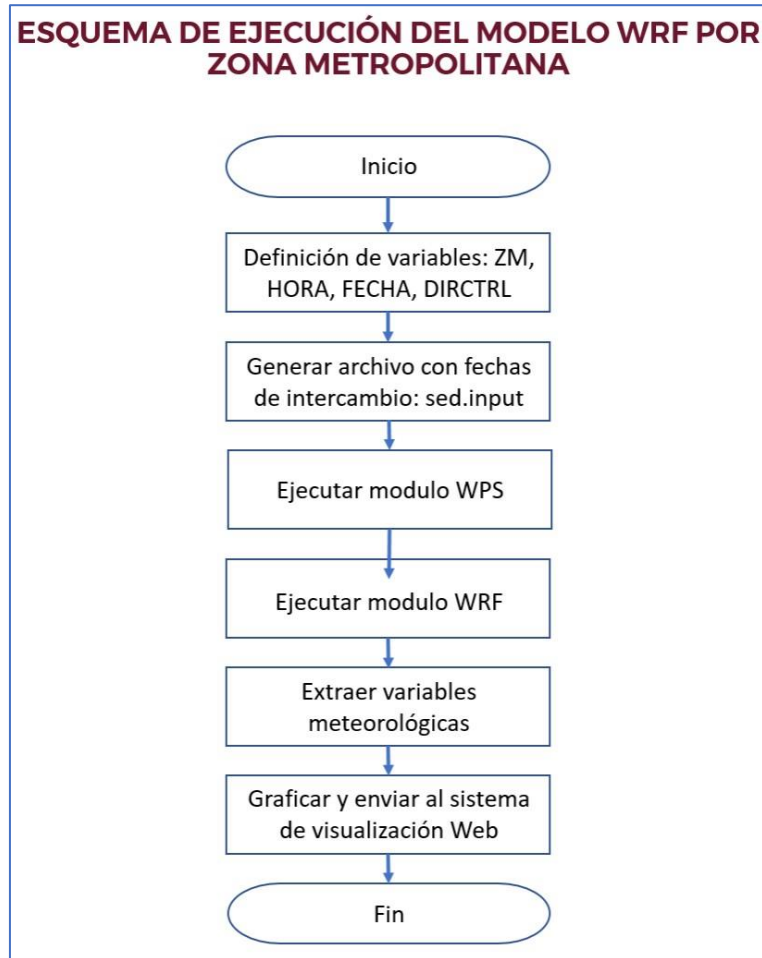
# Ejecución WRF
55 00 * * * $DIRCTRL/Principal_ZMGDL.sh 00 >& $DIRLOGS/WRF_ZMGDL00.txt
55 00 * * * $DIRCTRL/Principal_ZMMTY.sh 00 >& $DIRLOGS/WRF_ZMMTY00.txt
55 00 * * * $DIRCTRL/Principal_ZMVMX.sh 00 >& $DIRLOGS/WRF_ZMVMX00.txt
55 06 * * * $DIRCTRL/Principal_ZMGDL.sh 06 >& $DIRLOGS/WRF_ZMGDL06.txt
55 06 * * * $DIRCTRL/Principal_ZMMTY.sh 06 >& $DIRLOGS/WRF_ZMMTY06.txt
55 06 * * * $DIRCTRL/Principal_ZMVMX.sh 06 >& $DIRLOGS/WRF_ZMVMX06.txt
55 12 * * * $DIRCTRL/Principal_ZMGDL.sh 12 >& $DIRLOGS/WRF_ZMGDL12.txt
55 12 * * * $DIRCTRL/Principal_ZMMTY.sh 12 >& $DIRLOGS/WRF_ZMMTY12.txt
55 12 * * * $DIRCTRL/Principal_ZMVMX.sh 12 >& $DIRLOGS/WRF_ZMVMX12.txt
55 18 * * * $DIRCTRL/Principal_ZMGDL.sh 18 >& $DIRLOGS/WRF_ZMGDL18.txt
55 18 * * * $DIRCTRL/Principal_ZMMTY.sh 18 >& $DIRLOGS/WRF_ZMMTY18.txt
55 18 * * * $DIRCTRL/Principal_ZMVMX.sh 18 >& $DIRLOGS/WRF_ZMVMX18.txt

utor@tormenta:~/WRF/CTRL$ █
    
```

**Figura 2.3** Listado del servicio cron del sistema.

Los procesos de descarga de los datos del modelo GFS se ejecutan dos veces con una diferencia de tiempo de 20 minutos. Por lo regular, es suficiente con una sola ejecución del script, pero durante el periodo de pruebas se observó que en ocasiones se llegan a presentar retrasos en la publicación de los archivos en el servidor de la NOAA. Es preciso señalar que, el script solo descarga los archivos faltantes por lo que no hay duplicidad de archivos. La descarga se realiza en los minutos 10 y 30 para las simulaciones de las horas 00, 06, 12 y 18.

Por su parte, el proceso principal que ejecuta el preprocesamiento, simulación, extracción y generación de productos gráficos, así como su envío al sistema de visualización, se ejecuta en el minuto 55 para las simulaciones de las horas 00, 06, 12 y 18 horas. En la Figura 2.4 se presenta un esquema de la operación del programa principal por zona metropolitana.



**Figura 2.4.** Esquema de la operación del programa principal por zona metropolitana.

## 2.5 Validación del modelo WRF para 15 eventos de granizo (2019-2021) en la Zona Metropolitana del Valle de México

Para la segunda etapa del proyecto se realizó la validación del modelo WRF para 15 eventos de granizo identificados durante el periodo 2019 a 2021 en la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), para determinar en qué medida los resultados obtenidos con el modelo pueden ser de utilidad para el trabajo operativo.

Los eventos fueron definidos por personal del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) de acuerdo con la información meteorológica y registros de granizo disponible. Para complementar los detalles de los eventos, se consideró información en internet de redes sociales y notas periodísticas. Además, para cada evento se realizó la simulación numérica correspondiente con el modelo WRF. Finalmente, se realizó un análisis de frecuencias

absolutas agrupadas en una tabla de contingencia entre los eventos simulados y los identificados.

### 2.5.1 Selección de eventos de granizo

Los 15 eventos (Tabla 2.1) fueron proporcionados por el Met. Francisco Javier Rodríguez González del SMN. El documento consistió en la bitácora de fenómenos meteorológicos que incluye los campos siguientes: fecha, estado, principales sistemas meteorológicos sobre México, lluvia máxima, temperatura máxima y fenómenos reportados, en esta última se mencionan las delegaciones y municipios con eventos de granizo (Figura 2.1). Es importante mencionar que no existe una red de monitoreo de granizo por parte del SMN, y que mediante comunicación directa con el Met. Rodríguez González se nos informó que los eventos registrados corresponden a reportes de la ciudadanía.

**Tabla 2.1** Fechas de eventos de granizo seleccionados.

No	Fecha del evento del granizo
1	5 de febrero de 2019
2	15 de mayo de 2019
3	23 de mayo de 2019
4	6 de junio de 2019
5	20 de junio de 2019
6	8 de julio de 2019
7	20 de julio de 2019
8	15 de marzo de 2020
9	3 de abril de 2020
10	8 de junio de 2020
11	9 de abril de 2021
12	28 de abril de 2021
13	18 de mayo de 2021
14	24 de mayo de 2021
15	8 de junio de 2021

CONAGUA		Servicio Meteorológico Nacional Subgerencia de Pronóstico Meteorológico Centro Nacional de Previsión del Tiempo			
Bitácora de Fenómenos Meteorológicos					
Bitácora Meteorológica			Fecha de actualización: 15/07/2022		
Granizo registrado en la CDMX en los años 2019, 2020 y 2021					
Fecha	Estado	Principales Sistemas Meteorológicos sobre México	Lluvia máxima (mm)	Temperatura máxima (°C)	Fenómenos reportados
05/febrero/2019	CDMX	-Frente frío No. 41 y su masa de aire polar cubrirán el noreste, centro y oriente de la República Mexicana.	141.4 en Sayula Ostuacán, Chis.	42.0 en Andrés Figueroa, Gro. y en Caimanera, Mich.	<b>Aguanieve:</b> Parque Ecológico Chipinque y en el Cerro de Chupón, Nuevo León. <b>Granizo:</b> alcaldías Benito Juárez e Iztapalapa, CDMX. <b>Tolvaneras:</b> Querétaro, Qro.
15/mayo/2019	CDMX	-Vaguada se extenderá desde el noreste hasta el oriente del país, aunado a la abundante entrada de humedad del Golfo de México. -Segunda vaguada se extenderá sobre el sur del Golfo de México y sureste del territorio.	127.0 en Miguel Alemán 5-3-12, Tamps.	44.0 en Caimanera, Mich.	<b>Granizo:</b> Ocoyoacac y Tlalnepantla, Edo. Méx., y en las Alcaldías de Cuajimalpa y Venustiano Carranza, CDMX.
23/mayo/2019	CDMX	-Canal de baja presión a lo largo del interior del territorio nacional, un segundo canal de baja presión sobre el sureste de México e interactuarán con la entrada de humedad proveniente de ambos océanos.	103.0 en Finca Argovia Tapachula-SGT, Chis.	44.0 en Jesús María, Nay.	<b>Tolvaneras:</b> Matamoros y Reynosa, Tamps., y en Ciudad Juárez, Chih. <b>Granizo:</b> Alcaldías de Xochimilco y Tláhuac en la Ciudad de México.
06/junio/2019	CDMX	-Entrada de humedad proveniente de ambos litorales e inestabilidad en altura.	97.5 en Santa María Jacatepec, Oax.	44.0 en San Felipe Usila, Oax.	<b>Granizo:</b> Benito Juárez e Iztacalco, CDMX.
08/julio/2019	CDMX	-Onda tropical No. 14 al sur de la Península de Yucatán en interacción con un canal de baja presión en el suroeste del Golfo de México. -Canal de baja presión sobre el noroeste y occidente del país, se combinará con el ingreso de humedad del Océano Pacífico.	88.0 en Despoblado Villa Comaltitlán, Chis.	44.5 en Chinipas, Chih.	<b>Granizo:</b> Guadalajara y Zapopan, Jal., y en las Alcaldías de Cuauhtémoc y Miguel Hidalgo, CDMX.
20/junio/2019	CDMX	-Onda tropical No. 4 se localizará al sur de las costas de Guerrero. -Canal de baja presión se extenderá sobre el interior del país y un segundo lo hará sobre el sureste de México.	74.8 en Aeropuerto Oaxaca San Agustín de las Juntas Obs., Oax.	47.0 en Huiter (Hidrométrica), Sin.	<b>Granizo:</b> Iztapalapa, V. Carranza, G. A. Madero, CDMX, y en Ecatepec, Edo. Méx.
20/julio/2019	CDMX	-Canal de baja presión extendido sobre el noreste, occidente y centro del país. -Onda tropical No. 16 que recorrerá el sur del territorio nacional.	69.5 - El Chique Tabasco, Zac.	46.5 - Ejido Nuevo León Obs., B.C.	<b>Granizo:</b> Ocoyoacac y Tlalnepantla, Edo. Méx., y en las Alcaldías de Cuajimalpa y Venustiano Carranza, CDMX.
15/marzo/2020	CDMX	-Canal de baja presión se extenderá interaccionará con divergencia en altura y con la entrada de humedad proveniente del Golfo de México y del Océano Pacífico.	47.0 en El Centenario, Coah.	42.0 en: -Chila de la Sal Xicotlán, Pue. -Xicatlacotla, Mor.	<b>Temperaturas menores a 0° C:</b> Baja California, Chihuahua y Durango. <b>Granizo:</b> Nezahualcóyotl, Edo. Méx. y en las Alcaldías de Tlalpan e Iztapalapa, CDMX, Iquala, Gro. <b>Tolvaneras:</b> Matamoros, Tamps.
03/abril/2020	CDMX	-Frente No. 47 se extenderá como estacionario sobre el Mar Caribe y el Golfo de México. -Canales de baja presión con efectos en el centro y sureste del territorio nacional, incluido el Valle de México.	73.9 en Tlaxcala Obs., Tlax.	42.6 en Talismán Tuxtla Chico-SGT, Chis.	<b>Temperaturas menores a 0° C:</b> Baja California, Chihuahua y Durango. <b>Granizo:</b> Ecatepec, Edo. de México; en Puebla y Acajete, Pue; en las Alcaldías de Iztacalco, Coyoacán, Iztapalapa y Venustiano Carranza, CDMX, y en Tlaxcala Obs., Tlax.
08/junio/2020	CDMX	-Canal de baja presión en el interior del territorio nacional y el ingreso de humedad del Océano Pacífico en regiones del occidente, centro, oriente, sur y sureste del país. -Línea seca sobre el norte de Coahuila y un nuevo frente frío extendido sobre el noroeste de México.	96.5 - La Quemada San Felipe, Gto.	44.6 - Monclova Obs., SMN, Camp.	<b>Tolvaneras:</b> Ciudad Juárez, Chih. <b>Granizo:</b> las Alcaldías de Gustavo A. Madero, Benito Juárez, Cuauhtémoc, Iztacalco, Coyoacán y en Magdalena Contreras en la Ciudad de México y en Cuautitlán Izcalli, Edo. Méx.
09/abril/2021	CDMX	-Línea seca sobre el noreste de la República Mexicana, interactúa con la corriente en chorro subtropical, sobre el norte y noreste del país. -Canal de baja presión se extiende desde el noreste hasta el sureste del país.	15.7 en Finca Chayabé, Chis.	45.7 en Gallinas, S.L.P.	<b>Caída de granizo:</b> San Francisco Telixtlahuaca, Oax., alcaldías Magdalena Contreras, Benito Juárez, Iztacalco y Tlalpan, CDMX. <b>Tolvaneras:</b> Matamoros y Reynosa, Tamps.
28/abril/2021	CDMX	-Frente frío No. 54 y un canal de baja presión en el noreste de la República Mexicana interaccionan con la entrada de humedad del Golfo de México. -Canales de baja presión sobre el centro y sureste del territorio nacional.	49.0 - Dresa Internacional La Amistad, Coah.	46.0 - Huejutla, Hgo.	<b>Granizo:</b> Acuña y Piedras Negras, Coah; Benito Juárez, Iztacalco, Gustavo A. Madero, Cuauhtémoc, Coyoacán, Miguel Hidalgo, Venustiano Carranza, CDMX; Coacalco, Tultepec, Tlaxiaco, Ecatepec, Edo. Méx. y en Huamantla, Tlax. <b>Tolvanera:</b> Zacatecas, Zac; Cd. Obregón, Son.; Reynosa, Tamps. y Torreón, Coah. <b>Tornado:</b> Ciudad Acuña, Coah. (2) y Huamantla, Tlax.
18/mayo/2021	CDMX	-Línea seca interacciona con un canal de baja presión sobre el noreste, oriente y centro del territorio nacional. -Inestabilidad en niveles altos de la atmósfera genera ingreso de humedad de ambos océanos.	111.0 en Finca Hamburgos, Chis.	45.0 en Huejutla, Hgo.	<b>Granizo:</b> Naulcapán, Méx.; Cuajimalpa; Álvaro Obregón, Magdalena Contreras, CDMX; Cuernavaca, Mor.; Coscomatepec, Ver.
24/mayo/2021	CDMX	-Frente Núm. 57 se extiende sobre el norte de México en interacción con la corriente en chorro y con una línea seca sobre Coahuila -Canal de baja presión en el sureste del país y el ingreso de humedad del Golfo de México afectan el oriente y sureste del territorio nacional, incluida la Península de Yucatán.	74.0 - Sabinas, Tamps.	44.5 - Álvaro Obregón, Son.	<b>Tolvaneras:</b> Torreón, Coah. <b>Granizo:</b> Cuauhtémoc, municipio Cuernavaca, Dgo. y en las Alcaldías Álvaro Obregón y Tlalpan de la Cd. Méx.
08/junio/2021	CDMX	-Onda tropical Núm. 1, se desliza sobre el sur y sureste de México. -Canales de baja presión en el norte y sureste del país e inestabilidad atmosférica superior, afectan el occidente, centro y oriente del país, así como la Península de Yucatán.	68.8 en San Marcos, Gro.	48.0 en Huiter hidrométrica, Sin.	<b>Granizo:</b> Coyoacán, Gustavo A. Madero, Cuauhtémoc, Iztacalco, V. Carranza y B. Juárez, CDMX; La Quebrada, Cuautitlán Izcalli, Coacalco de Berriozábal y Atizapán de Zaragoza, Edo. Méx.; Puebla, Pue.

Elaboró: Fco. Javier Rodríguez González

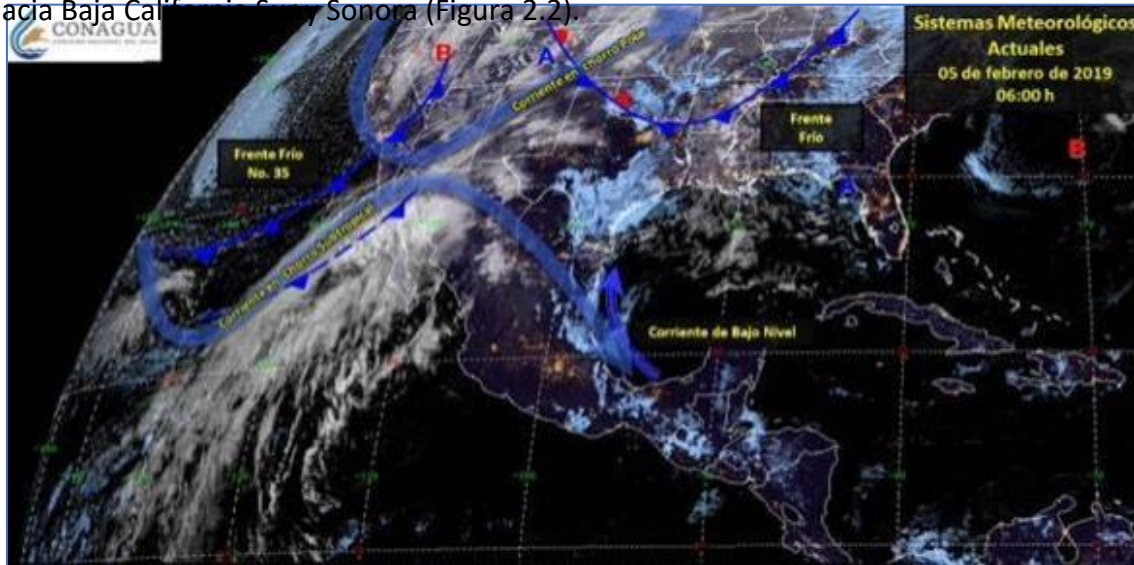
Figura 2.1 Bitácora de fenómenos meteorológicos proporcionada por el SMN



### 2.5.1.1 Evento del 5 de febrero 2019

#### Sinopsis

El frente frío No. 35 al norte de Baja California en interacción con una vaguada origino lluvias y chubascos sobre la región, así como caída de nieve y/o aguanieve sobre sierras de Baja California. En tanto que la corriente de chorro subtropical origina ingreso de aire húmedo hacia Baja California Sur y Sonora (Figura 2.2).



**Figura 2.2** Condiciones meteorológicas del 05 de febrero de 2019.

#### Evidencias del evento en redes sociales y notas periodísticas

Para este evento no se encontraron evidencias en redes sociales y/o notas periodísticas.

Delegaciones/municipios afectados por granizo

**Tabla 2.2** Delegaciones/Municipios con reporte de granizo para el evento del 5 de febrero de 2019

Entidad Federativa	Delegación/Municipio	Fuente
Ciudad de México	Benito Juárez	Reporte SMN
Ciudad de México	Iztapalapa	Reporte SMN

### 2.5.1.2 Evento del 15 mayo 2019

#### Sinopsis

Una vaguada se extenderá desde el noreste hasta el oriente del país, aunado a la abundante entrada de humedad del Golfo de México, mantendrá potencial de tormentas puntuales muy fuertes en San Luis Potosí, Hidalgo, Puebla y Veracruz, así como fuertes en entidades del noreste, oriente y centro del territorio nacional, las lluvias se acompañarán de actividad eléctrica y posibles granizadas. Una segunda vaguada se extenderá sobre el sur del Golfo de México y sureste del territorio, mantendrán potencial de tormentas acompañadas de actividad eléctrica y granizo en Chiapas, fuertes en Oaxaca y Tabasco, además de chubascos en la Península de Yucatán. Se mantendrá un ambiente muy caluroso en gran parte de la República Mexicana con temperaturas extremadamente calurosas en los estados de la vertiente del Pacífico, litoral del Golfo de México y la Península de Yucatán (Figura 2.3).



Figura 2.3 Condiciones meteorológicas del 15 de mayo de 2019.

#### Evidencias del evento en redes sociales y notas periodísticas

##### *Intensa lluvia con granizo inundó la CDMX en plena contingencia ambiental*

Uno de los días más extraños que se han vivido últimamente, ocurrió hoy en la Ciudad de México, que pasó de un calor intenso a una lluvia fuerte con granizos que produjeron



encharcamientos. A pesar de la lluvia que caía en algunas demarcaciones capitalinas, la contaminación por partículas suspendidas continuó en el Valle de México, con un máximo de 146 puntos de PM2.5 en la zona noreste, donde la calidad del aire era mala. La fuerte lluvia con granizo se registró en al menos dos alcaldías, así como precipitaciones de fuertes a ligeras en el resto de las demarcaciones, lo que ocasionó encharcamientos en diversas zonas de la capital, informó el Centro de Comando, Control, Cómputo, Comunicaciones y Contacto Ciudadano de la Ciudad de México (C5). Detalló que granizó en las alcaldías Álvaro Obregón y Benito Juárez, mientras que en Coyoacán, Miguel Hidalgo, Iztacalco, Venustiano Carranza, Azcapotzalco, Gustavo A. Madero, Magdalena Contreras, Cuajimalpa, Iztapalapa, Tlalpan, Tláhuac y Xochimilco se registraron lluvias de fuertes a moderadas.

En su cuenta de Twitter @C5\_CDMX destacó que esta noche continuaba la lluvia en varias zonas de la Ciudad de México, lo que provocó encharcamientos, entre ellos, en el segundo piso de Anillo Periférico, dirección norte, y Jardín, colonia Tlacopac, en la alcaldía Álvaro Obregón.

Así como sobre Avenida de los Insurgentes y en el Camino Desierto de los Leones, colonia Guadalupe Inn, alcaldía Álvaro Obregón, entre otros, por lo que recomendó a los automovilistas conducir con precaución.

Por su parte, el Sistema de Transporte Colectivo (STC) Metro recomendó a los usuarios anticipar su salida, debido a que la lluvia provoca la marcha de los trenes es lenta en las líneas 1, 2, 3, 5, 8, 9, A y B.

Pero las lluvias parecen haber llegado para quedarse, pues el gobierno de México pronosticó el impacto en su territorio de cuatro a cinco ciclones del total de 33 que se espera lleguen a formarse en los Océanos Pacífico (19) y Atlántico (14).

"El pronóstico indica que se presentarán 33 sistemas, 6 por arriba del promedio histórico", afirmó la titular de la Comisión Nacional del Agua (Conagua), Blanca Jiménez Cisneros, en Ixtapa Zihuatanejo, en la costa del estado mexicano de Guerrero "Es muy probable, que, de estos ciclones tropicales, de 4 a 6 impacten a nuestro país", indicó la funcionaria mexicana.

Explicó que de los 19 ciclones que se esperan en el Pacífico, ocho pueden llegar a tormentas tropicales y otros once pueden llegar a huracán, seis de ellos en la categoría 3 de 5 que tiene la escala Saffir Simpson. En México, la temporada de lluvias y ciclones iniciará este 15 de mayo y terminará el 30 de noviembre (INFOBAE, 6 de diciembre de 2019).

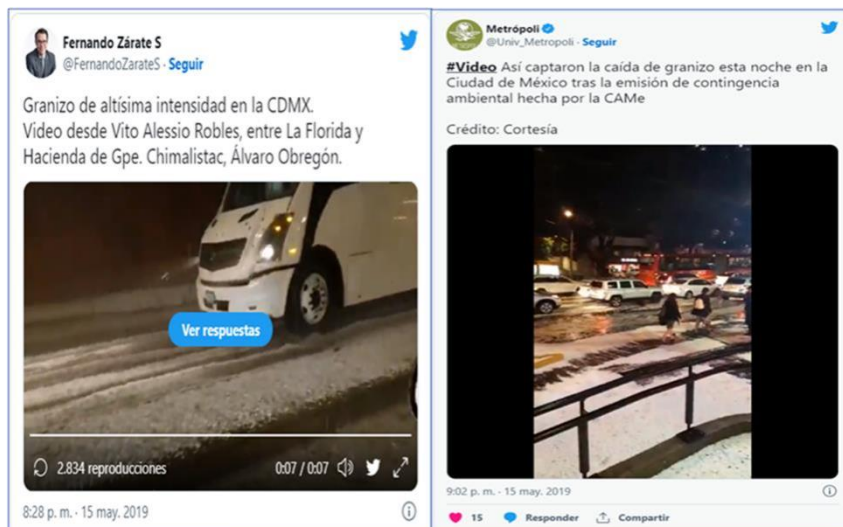


Figura 4. Evidencias en redes sociales del evento de granizo del 15 de mayo de 2019.

Delegaciones/Municipios afectadas por granizo

**Tabla 2.3** Delegaciones/Municipios con reporte de granizo para el evento del 15 de mayo de 2019

Entidad Federativa	Delegación/Municipio	Fuente
Ciudad de México	Álvaro Obregón	Nota periodística/Twitter
Ciudad de México	Benito Juárez	Nota periodística
Ciudad de México	Cuajimalpa	Reporte SMN
Ciudad de México	Venustiano Carranza	Reporte SMN
Estado de México	Ocoyoacac	Reporte SMN
Estado de México	Tlalnepantla	Reporte SMN

### 2.5.1.3 Evento del 23 mayo 2019

#### Sinopsis

El frente frío No. 59 se desplazará sobre los estados fronterizos del noroeste y norte de México, aunado a una línea seca extendida sobre el norte de Coahuila, provocarán intervalos de chubascos en el noreste del país y vientos con rachas superiores a 60 km/hr en Chihuahua, Durango, Coahuila, Nuevo León y Tamaulipas.

Un canal de baja presión se extenderá a lo largo del interior del territorio nacional, mientras que un segundo canal de baja presión lo hará sobre el sureste de México interactuarán con la entrada de humedad proveniente de ambos océanos, manteniendo la probabilidad de tormentas puntuales fuertes a muy fuertes en Chiapas y Oaxaca, además de intervalos de chubascos en zonas del oriente y centro de México, las cuales estarán acompañadas de actividad eléctrica y posibles granizadas.

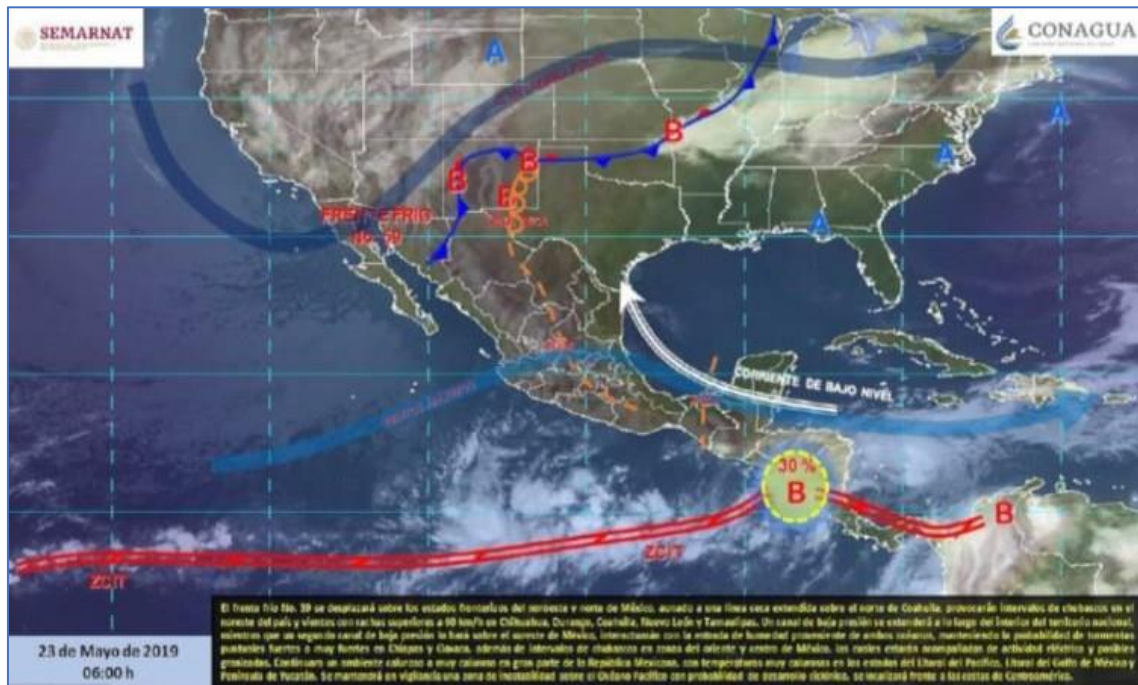


Figura 2.5 Condiciones meteorológicas del 23 de mayo de 2019.

#### Evidencias del evento en redes sociales y notas periodísticas

##### *Reportan caída de granizo en dos alcaldías de CDMX*

Reportan caída de granizo en dos alcaldías de CDMX. El C5 indicó que las precipitaciones con granizo se presentaron en Tláhuac y Xochimilco CDMX. El Centro de Comando, Control, Cómputo, Comunicaciones y Contacto Ciudadano de la Ciudad de México (C5)

informó que se registra lluvia fuerte con granizo en dos alcaldías, así como lluvia moderada en otra.

A través de redes sociales, el C5 indicó que las precipitaciones con granizo se presentaron en *Tláhuac* y *Xochimilco*. La lluvia moderada se registró en Iztapalapa.

Ante esto, el Centro sugirió a los ciudadanos reportar cualquier emergencia en el número 911 (El UNIVERSAL, 23 de mayo de 2019).



Figura 2.6 Evidencias en redes sociales del evento de granizo del 23 de mayo de 2019.

#### Delegaciones/Municipios afectadas por granizo

Tabla 2.4 Delegaciones/Municipios con reporte de granizo para el evento del 23 de mayo de 2019.

Entidad Federativa	Delegación/Municipio	Fuente
Ciudad de México	Tláhuac	Reporte SMN/Twitter
Ciudad de México	Xochimilco	Reporte SMN/Twitter



### 2.5.1.4 Evento del 06 junio 2019

#### Sinopsis

Se mantiene la humedad proveniente de ambos litorales e inestabilidad en altura, además de un canal de baja presión sobre el occidente y centro de México originando lluvias muy fuertes con actividad eléctrica y probabilidad de granizo en áreas de Michoacán, San Luis Potosí, Puebla, Veracruz y Oaxaca; fuertes en Nuevo León, Tamaulipas, Hidalgo, Tlaxcala, Estado de México, Ciudad de México, Morelos, Jalisco, Guerrero y Chiapas, y chubascos en Coahuila.

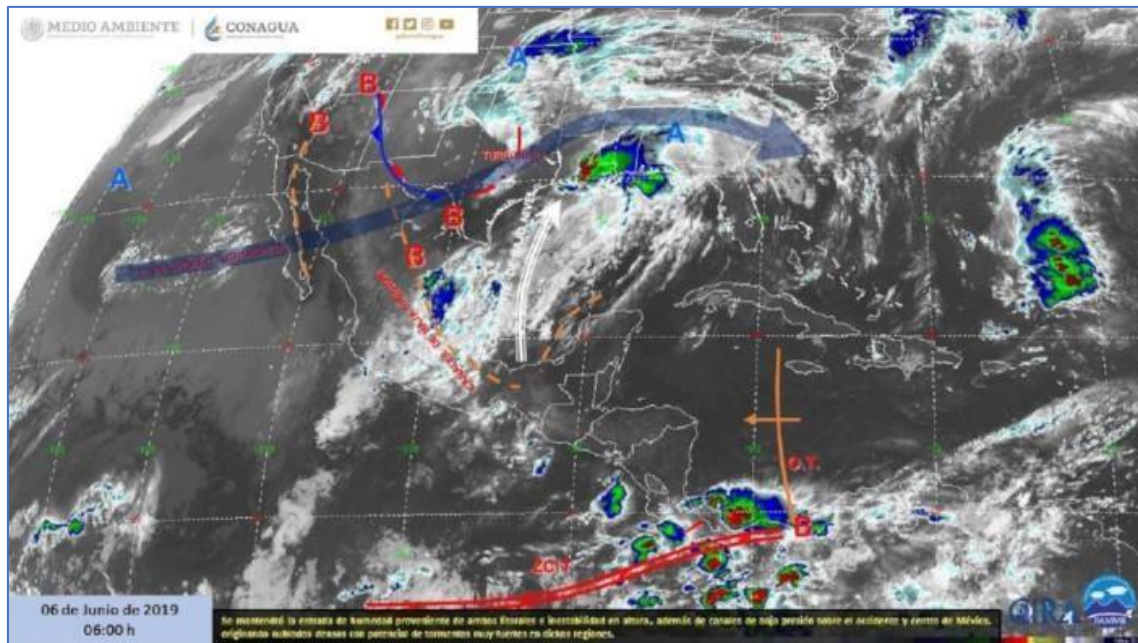


Figura 2.7 Condiciones meteorológicas del 06 de junio de 2019.

#### Evidencias del evento en redes sociales y notas periodísticas

##### *Lluvia provoca inundaciones, encharcamientos y hasta bandera nacional rota*

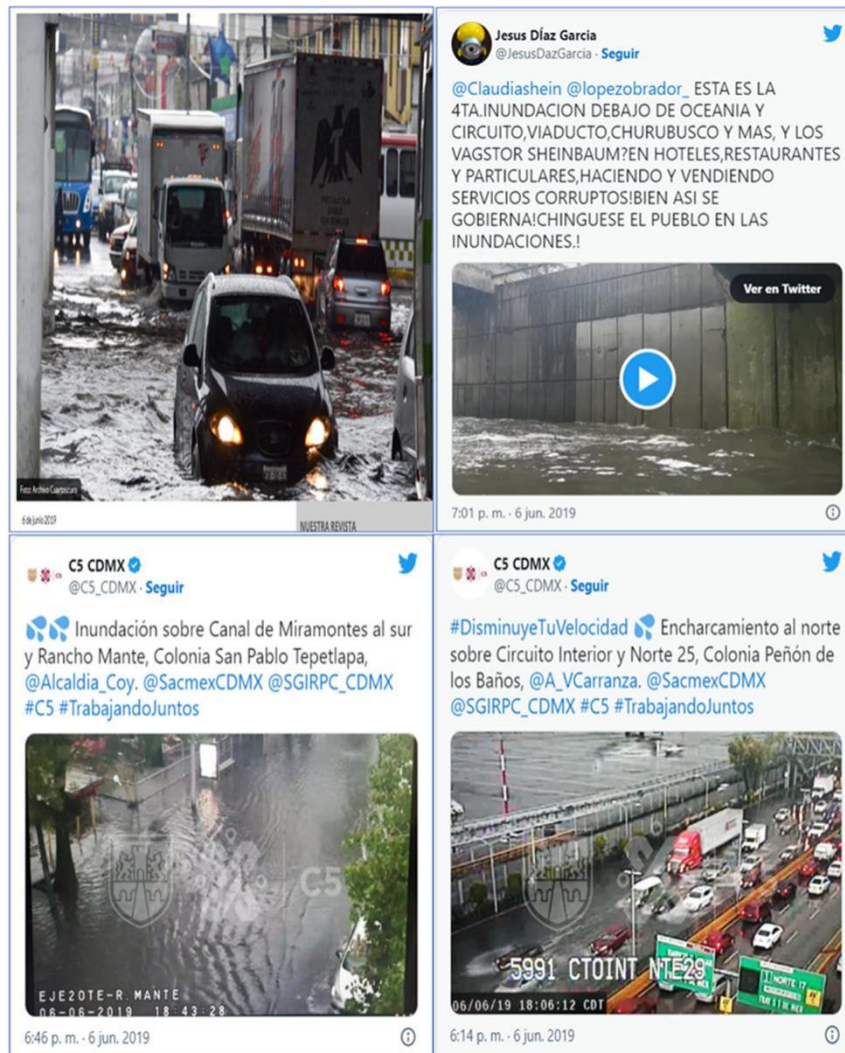
Las lluvias siguen en la capital y este jueves 6 de junio se registraron inundaciones y encharcamientos en las alcaldías de la CDMX.

La Secretaría de Gestión Integral de Riesgos y Protección Civil capitalina (SGIRPC), emitió la Alerta Naranja hasta las 22:00 horas, debido a la persistencia de tormenta en las alcaldías de Iztacalco, Iztapalapa y Venustiano Carranza.

La dependencia capitalina informó que la cantidad de lluvia puede alcanzar hasta los 49 milímetros, acompañada de caída de granizo.

En tanto, el Centro de Comando, Control, Cómputo, Comunicaciones y Contacto Ciudadano de la capital del país dio a conocer que se registra precipitación pluvial en las demarcaciones Cuauhtémoc, Azcapotzalco, Gustavo A Madero, Tláhuac, Álvaro Obregón, Magdalena Contreras, Cuajimalpa, Milpa Alta, Xochimilco, Coyoacán, Benito Juárez, y Tlalpan, alcaldías donde se mantiene alerta amarilla.

Entre las inundaciones reportadas se encuentran las de Canal de Miramontes al sur y Rancho Mante, en la colonia San Pablo Tepetlapa, Coyoacán; sobre Chilpancingo Sur y Juan Pablo Ayala, Colonia Conjunto Urbano Ermita Zaragoza; en los andenes 2 y F, Colonia Central de Abasto (Chilango, 6 de junio de 2019).



**Figura 2.8** Evidencias en redes sociales del evento de granizo del 6 de junio de 2019.



Delegaciones/municipios afectados por granizo

**Tabla 2.5.** delegaciones/municipios con reporte de granizo para el evento del 6 de junio de 2019.

Entidad Federativa	Delegación/Municipio	Fuente
Ciudad de México	Benito Juárez	Reporte SMN
Ciudad de México	Iztacalco	Reporte SMN

### 2.5.1.5 Evento del 20 junio 2019

#### Sinopsis

Para hoy, la onda tropical No. 4 se localizará al sur de las costas de Guerrero, mientras que la onda tropical No. 5, continuará desplazándose hacia el oeste, localizándose al sur de Chiapas por la tarde. Por otro lado, un canal de baja presión se extenderá sobre el occidente del país y un segundo lo hará sobre el sureste de México, además, una línea seca se extenderá sobre Coahuila. Los sistemas anteriormente mencionados, en combinación con el ingreso de humedad proveniente de ambos océanos, ocasionarán lluvias vespertinas acompañadas de actividad eléctrica y posibles granizadas en gran parte de la República Mexicana.



**Figura 2.9** Condiciones meteorológicas del 20 de junio de 2019.

## Evidencias del evento en redes sociales y notas periodísticas

### *Lluvia provoca inundaciones en la GAM y caos en el Metro*

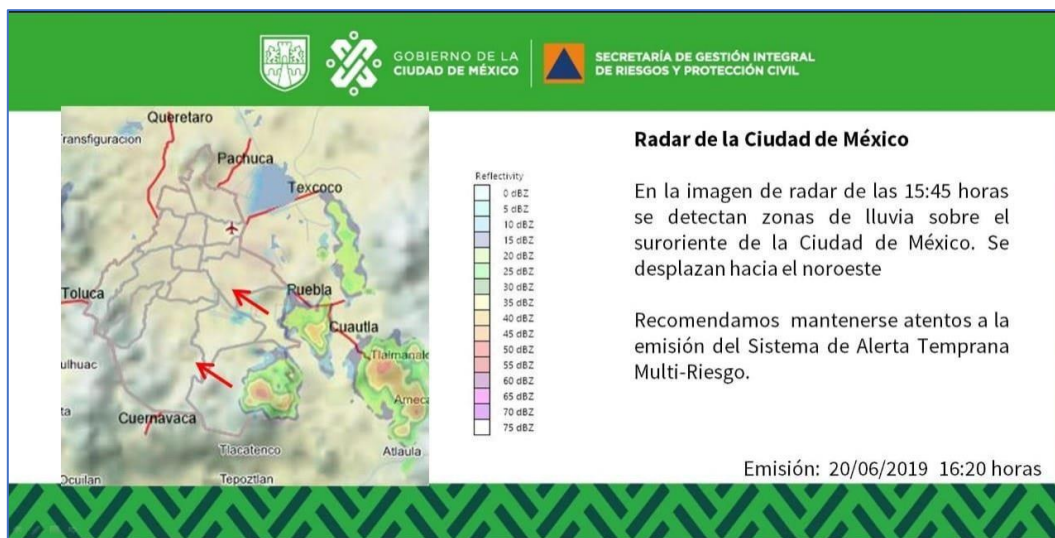
Tláloc está implacable este jueves 20 de junio, pues ya ha provocado caída de granizo, fuertes lluvias e inundaciones en la GAM y otras partes de la CDMX. Así que, si vas para el norte de la capital, es importante que tomes en cuenta que hay encharcamientos en avenida Centenario y Morelos; Hidalgo y Veracruz, colonia San Felipe de Jesús y en Cardo y Avenida Popocatepetl; así como una inundación en Adolfo López Mateos y Estado de México, colonia Chalma de Guadalupe. De acuerdo con información del C5, servicios de emergencia ya se encuentran en la zona. En Iztapalapa también encontrarás encharcamientos, especialmente en avenida Guelatao y Filomeno Mata.

En el Estado de México no les fue mejor. Debido a las fuertes lluvias se decidió suspender el servicio en la Línea 4 del Mexibús.

Se espera que entre las 19:30 y las 22 horas haya fuertes lluvias, así como posible caída de granizo. Por ello, la Secretaría de Gestión Integral de Riesgos y Protección Civil activó alerta amarilla en Azcapotzalco, Cuauhtémoc, Gustavo A. Madero, Coyoacán, Iztacalco, Iztapalapa, Milpa Alta, Tláhuac, Tlalpan, Xochimilco y Venustiano Carranza.

En el reporte de las 20:30, se mencionó que hay gran afluencia de pasajeros en 10 líneas del Metro. Algunos usuarios reportaron que se han demorado hasta 15 minutos parados en cada estación de la Línea 3.

En tanto la Línea 2, 9 y B reportaron gran afluencia de pasajeros (Chilango, 20 de junio de 2019).



**Figura 2.10.** Radar de la ciudad de México para el día 8 de julio de 2019 a las 14:55 horas. Fuente <https://www.facebook.com/SGIRPCCDMX/photos/a.133218440926763/198844011030872/>



**Figura 2.11** Evidencias en redes sociales del evento de granizo del 20 de junio de 2019.

Delegaciones/municipios afectados por granizo

**Tabla 2.6** Delegaciones/Municipios con reporte de granizo para el evento del 20 de junio de 2019.

Entidad Federativa	Delegación/Municipio	Fuente
Ciudad de México	Iztapalapa	Reporte SMN
Ciudad de México	Gustavo A. Madero	Reporte SMN
Ciudad de México	Venustiano Carranza	Reporte SMN
Estado de México	Ecatepec	Reporte SMN



### 2.5.1.6 Evento del 08 julio 2019

#### Sinopsis

La **onda tropical No. 14** se ubicará al sur de la Península de Yucatán y en interacción con un **canal de baja presión** en el suroeste del Golfo de México, favorecerán potencial de lluvias puntuales intensas en Chiapas. Otro **canal de baja presión** se extenderá sobre el noroeste y occidente del país, se combinará con el ingreso de humedad del Océano Pacífico, originando probabilidad de lluvias puntuales fuertes a muy fuertes, además de chubascos con descargas eléctricas y posibles granizadas en el noroeste, norte, occidente, centro y sur del territorio nacional.

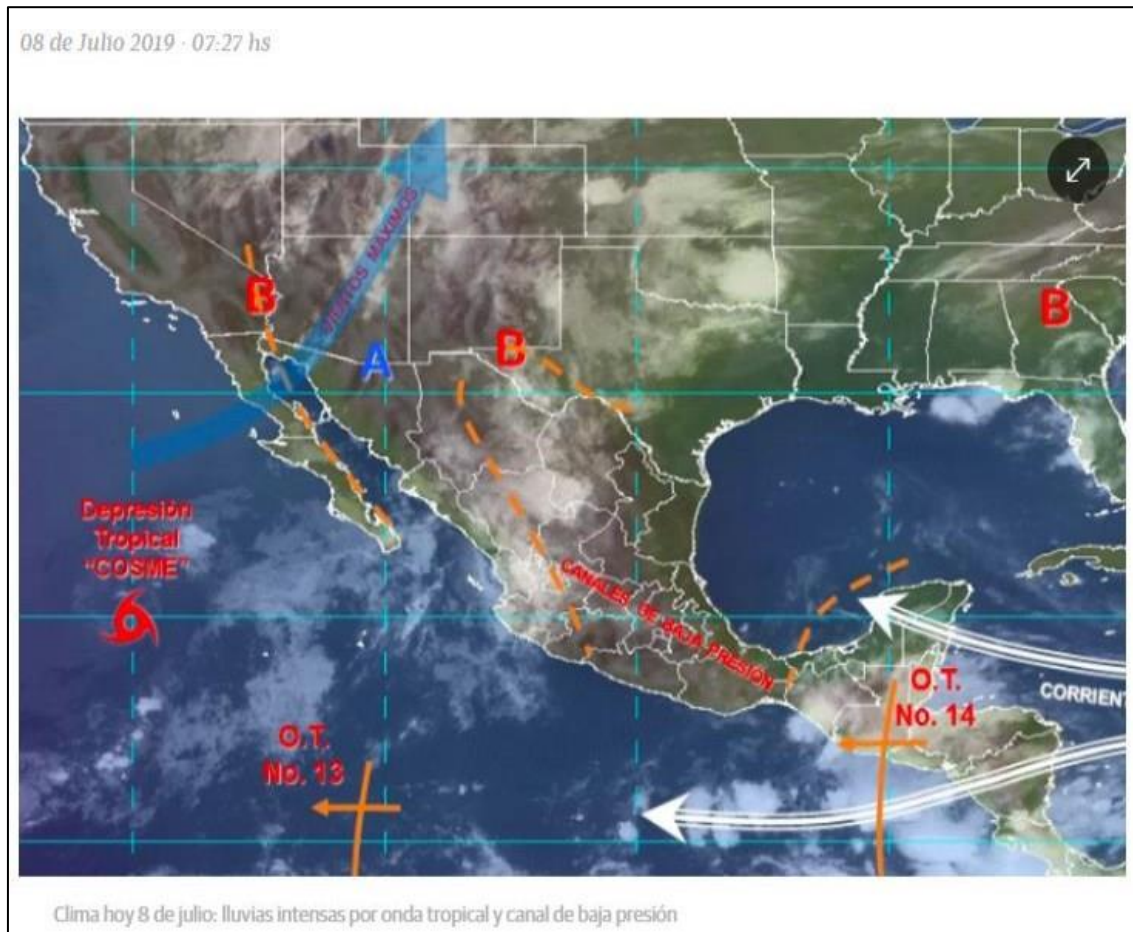


Figura 2.12 Condiciones meteorológicas del 08 de julio de 2019.

## Evidencias del evento en redes sociales y notas periodísticas

*#Fotos: llueve en 13 alcaldías; estas son las zonas con encharcamientos*

Saca los remos si tienes que pasar por la calzada Ignacio Zaragoza porque la lluvia de este lunes 8 de julio ya ocasionó encharcamientos e inundaciones.

El clima ya se puso rudo y la lluvia de este lunes 8 de julio afecta a 13 de las 16 alcaldías de la Ciudad de México, de acuerdo con el reporte de las 17:00 horas del Centro de Comando, Control, Cómputo, Comunicaciones y Contacto Ciudadano de la Ciudad de México (C5).

La lluvia es moderada en las alcaldías Miguel Hidalgo, Cuauhtémoc, Benito Juárez, Iztacalco, Iztapalapa, Venustiano Carranza y Gustavo A. Madero, mientras que en Coyoacán, Cuajimalpa, Magdalena Contreras, Álvaro Obregón, Azcapotzalco y Tlalpan se registran precipitaciones moderadas.

Sin embargo, la lluvia de este lunes 8 de julio ya provocó inundaciones y encharcamientos en diferentes puntos de la CDMX.

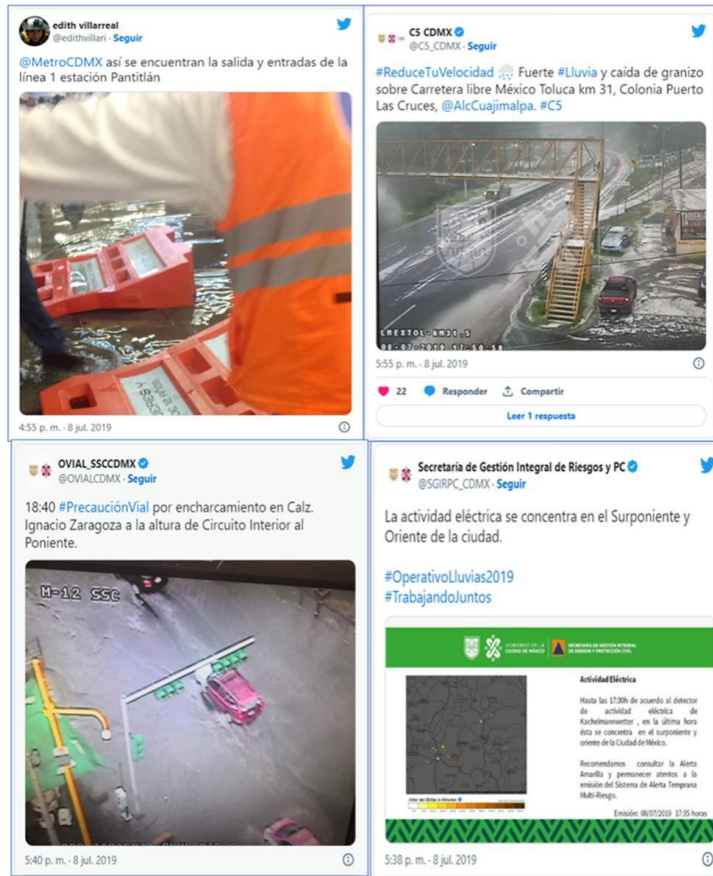
A través de su perfil en Twitter, el C5 informó sobre encharcamientos en:

- Santo Tomás y San Pablo, en la colonia Centro.
- Carriles centrales de Calzada Ignacio Zaragoza con dirección al poniente y Cirilo Arenas, en la colonia Santa Martha.
- En Ignacio Zaragoza, a la altura de la calle 47, en la colonia Zaragoza.
- En Zaragoza y Periférico.
- En Fray Servando Teresa de Mier y Circuito Interior, en la colonia Ignacio Zaragoza.

Además, usuarios de redes sociales dieron a conocer sobre una inundación que afectó a la Línea 1 del Metro, en la estación Pantitlán (Chilango, 8 de julio de 2019).



**Figura 2.13.** Radar de la ciudad de México para el día 8 de julio de 2019 a las 14:55 horas. Fuente <https://www.facebook.com/SGIRPCCDMX/photos/a.133218440926763/207086680206605>



**Figura 2.14** Evidencias en redes sociales del evento de granizo del 8 de julio de 2019.

Delegaciones/municipios afectados por granizo

**Tabla 2.7** Delegaciones/Municipios con reporte de granizo para el evento del 8 de julio de 2019.

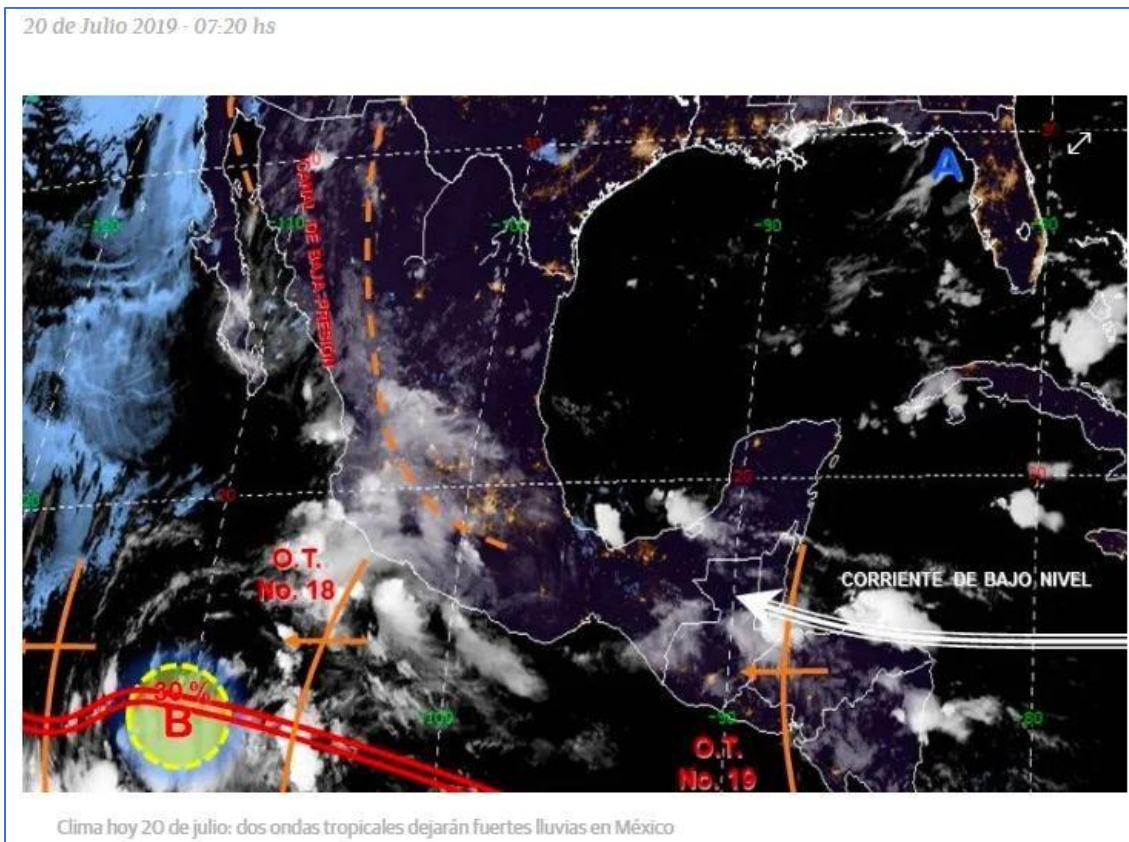
Entidad Federativa	Delegación/Municipio	Fuente
Ciudad de México	Cuajimalpa	Twitter
Ciudad de México	Cauhtémoc	Reporte SMN
Ciudad de México	Miguel Hidalgo	Reporte SMN



### 2.5.1.7 Evento del 20 julio 2019

#### Sinopsis

La onda tropical número 18 se extenderá al sur de las costas de **Jalisco** y en combinación con un canal de baja presión sobre el noroeste, occidente y centro del país y con inestabilidad en la atmósfera superior, propiciarán el desarrollo de nubosidad con potencial de **lluvias fuertes a intensas** en dichas regiones.



**Figura 2.15** Condiciones meteorológicas del 20 de julio de 2019.

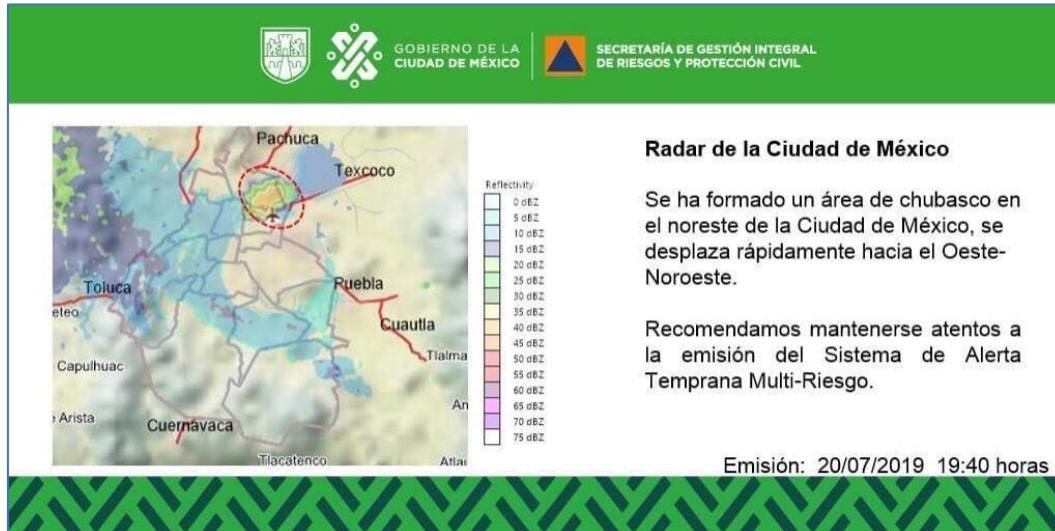
#### Evidencias del evento en redes sociales y notas periodísticas

*La lluvia acompañada de granizo provocó 17 inundaciones en las Alcaldías de Tlalpan y Coyoacán*

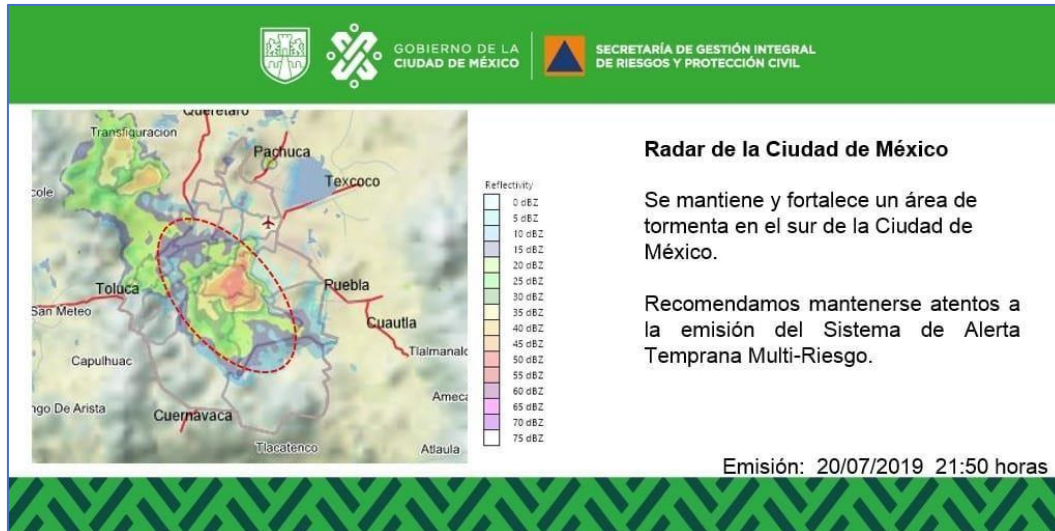
Se registraron inundaciones en Calzada de Tlalpan y Hermenegildo Galeana, así como sobre Anillo Periférico y México 1968. En Coyoacán, se anegaron la Avenida del Imán y Circuito Estadio Azteca, así como Canal de Miramontes.

División del Norte en la Colonia Belisario Domínguez, también se vio afectada.

Aunque no hay presencia de granizo en el resto de las alcaldías, se registra lluvia intensa, principalmente en la Magdalena Contreras, según informó el C5 (REFORMA, 20 julio 2019).



**Figura 2.16** Radar de la ciudad de México para el día 20 de julio de 2019 a las 19:40 horas. Fuente <https://www.facebook.com/SGIRPCCDMX/photos/a.133218440926763/207086680206605/>



**Figura 2.17.** Radar de la ciudad de México para el día 20 de julio de 2019 a las 21:50 horas. Fuente <https://www.facebook.com/SGIRPCCDMX/photos/a.133218440926763/207086680206605/>



Figura 2.18. Evidencias en redes sociales del evento de granizo del 20 de julio de 2019.

Delegaciones afectadas por granizo

**Tabla 2.8** Delegaciones/Municipios con reporte de granizo para el evento del 20 de julio de 2019.

Entidad Federativa	Delegación/Municipio	Fuente
Ciudad de México	Cuajimalpa	Reporte SMN
Ciudad de México	Venustiano Carranza	Reporte SMN
Estado de México	Ocoyoacac	Reporte SMN
Estado de México	Tlalnepantla	Reporte SMN

### 2.5.1.8 Evento del 15 marzo de 2020

#### Sinopsis

Canal de baja presión se extenderá desde el norte hasta el centro del país interaccionará con divergencia en altura y la entrada de humedad proveniente del Golfo de México y del Océano Pacífico.





Figura 2.19 Condiciones meteorológicas del 15 de marzo de 2020.

### Evidencias del evento en redes sociales y notas periodísticas

#### *Pega lluvia y granizo en CDMX*

Calzada Ignacio Zaragoza es la más afectada por inundaciones y encharcamientos

La lluvia y granizo de la tarde de este domingo provocó afectaciones e inundaciones en Calzada Ignacio Zaragoza, en la alcaldía Iztapalapa.

A través de su cuenta de Twitter, el Centro de Comando, Control, Cómputo, Comunicaciones y contacto (C5) precisó que dicha avenida, al oriente y poniente de la Ciudad de México es la más afectada por la lluvia.

Como alternativas el Centro de Información Vial recomendó tomar avenida Texcoco y Ermita Iztapalapa.

Las alcaldías con presencia de lluvia y tormentas eléctricas fueron: Azcapotzalco, Cuauhtémoc, Coyoacán, Miguel Hidalgo, Iztacalco e Iztapalapa (Noticias en la Mira, 15 marzo 2020).



Figura 2.20 Evidencias en redes sociales del evento de granizo del 15 de marzo de 2020.

Delegaciones/municipios afectados por granizo

**Tabla 2.9** Delegaciones/Municipios con reporte de granizo para el evento del 15 de marzo de 2020.

Entidad Federativa	Delegación/Municipio	Fuente
Ciudad de México	Iztapalapa	Reporte SMN/Twitter
Ciudad de México	Tlalpan	Reporte SMN
Estado de México	Nezahualcóyotl	Reporte SMN



### 2.5.1.9 Evento del 03 abril 2020

#### Sinopsis

El frente frío No.47 se extiende como estacionario sobre el Mar Caribe. Para la tarde, un nuevo frente frío se aproximará al norte de México e interacciona con una línea seca en Coahuila, lo que ocasionará lluvias puntuales muy fuertes acompañadas de descargas eléctricas y granizadas en dicho estado; además de originar rachas de viento de 50 a 60 km/hr con posible formación de torbellinos en el norte de Coahuila, Nuevo León y Tamaulipas. Canales de baja presión incrementaran la probabilidad de lluvias con descargas eléctricas y granizadas en el centro y sureste del territorio nacional, incluido el Valle de México. Así mismo, se prevén temperaturas superiores a 35°C en 21 estados de la Nación.



Figura 2.21 Condiciones meteorológicas del 03 de abril de 2020.

#### Evidencias del evento en redes sociales y notas periodísticas

*¡Abril, sorpréndeme!: viernes de granizo y tormenta eléctrica*

Como si estuviera recordándonos que no debemos abandonar la casa por el COVID-19, Tláloc nos mandó una granizada este 3 de abril por la noche.

Usuarios de redes sociales reportaron la caída de granizo en diversas zonas de la ciudad, así como fuertes lluvias y tormentas eléctricas. Por su parte el Centro de Información Vial de la Secretaría de Seguridad Ciudadana de la Ciudad de México (OVIAL\_SSCDMX) activó la Alerta Amarilla ante las precipitaciones en 11 alcaldías y llamó a extremar precauciones a los automovilistas.

Al sur de la CDMX, en la colonia Campestre Churubusco también tuvieron la visita de Tláloc. La alcaldía Iztapalapa fue una de las 11 afectas por la granizada este 3 de abril.

En la colonia Agrícola oriental también se registró caída de granizo (Chilango, 3 abril 2020).



**Figura 2.22.** Radar de la ciudad de México para el día 3 de abril de 2020 a las 20:55 horas. Fuente <https://www.facebook.com/SGIRPCDMX/photos/a.133218440926763/359778848270720/>



**Figura 2.23** Evidencias en redes sociales del evento de granizo del 3 de abril de 2020.

## Delegaciones/municipios afectados por granizo

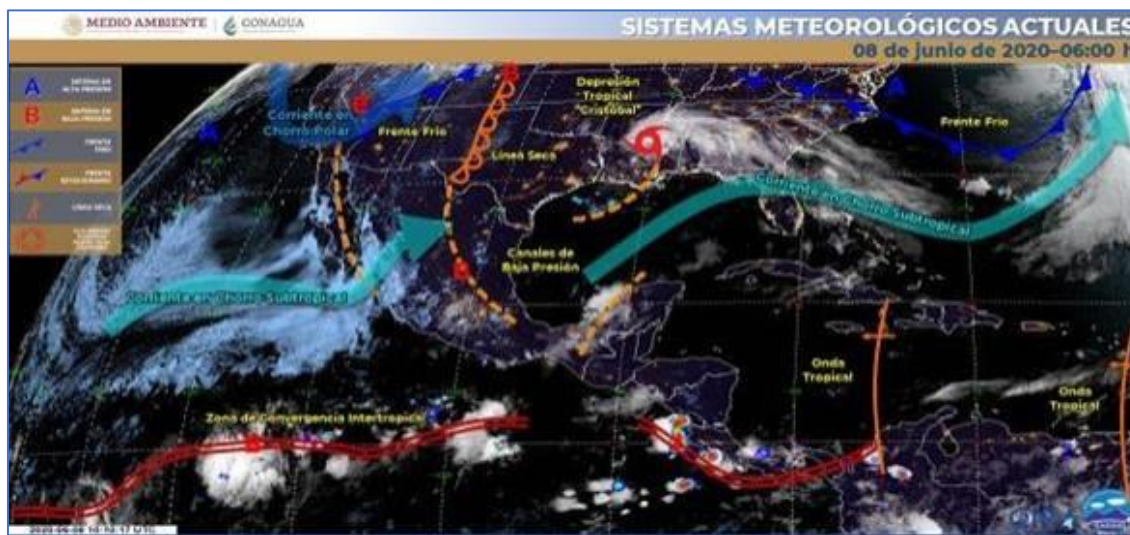
**Tabla 2.10** Delegaciones/Municipios con reporte de granizo para el evento del 3 de abril de 2020.

Entidad Federativa	Delegación/Municipio	Fuente
Ciudad de México	Coyoacán	Reporte SMN
Ciudad de México	Iztacalco	Reporte SMN
Ciudad de México	Iztapalapa	Reporte SMN/TWITTER
Ciudad de México	Venustiano Carranza	Reporte SMN
Estado de México	Ecatepec	Reporte SMN

### 2.5.1.10 Evento del 08 junio de 2020

#### Sinopsis

Un canal de baja presión y el ingreso de humedad del Océano Pacífico, originan chubascos y lluvias fuertes acompañadas de descargas eléctricas, rachas de viento al paso de las tormentas y posibles granizadas en el occidente, centro, oriente y sureste del país, incluido el Valle de México. Una línea de seca y un nuevo frente frío, originarán rachas de viento de 50 a 60 km/hr en Baja California, Sonora, Chihuahua y Coahuila. Así mismo, una circulación de alta presión en niveles medios de la atmosfera mantendrá temperaturas máximas superiores a 40°C en 13 entidades de la Republica.



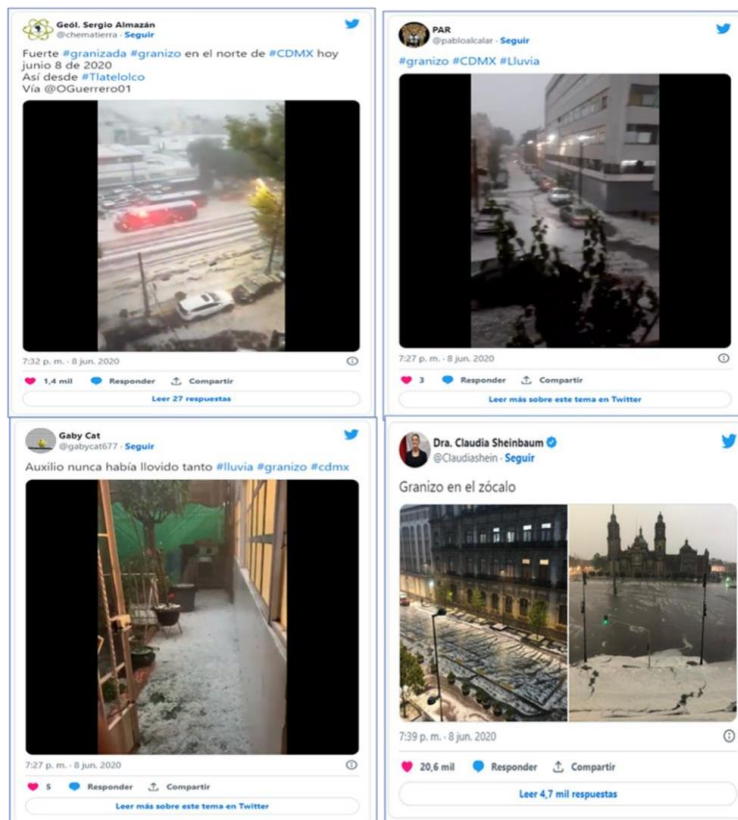
**Figura 2.24** Condiciones meteorológicas del 08 de junio de 2020.



## Evidencias del evento en redes sociales y notas periodísticas

### *Tláloc volvió: graniza en 7 alcaldías de la CDMX (videos)*

Tláloc volvió a la capital. La lluvia del 8 de junio dejó granizo, encharcamientos y una inundación en la Ciudad de México. Se activó alerta roja en Azcapotzalco, Cuauhtémoc y Gustavo A. Madero, donde se esperan fuertes lluvias, granizo y fuertes rachas de viento entre las 20:00 y las 22:00 horas. En la Venustiano Carranza hay alerta naranja, pues se espera que haya lluvias fuertes hasta las 21:30 horas. Por último, hay alerta amarilla en Álvaro Obregón, Benito Juárez, Cuajimalpa, Coyoacán, Iztacalco, Iztapalapa, Magdalena Contreras, Miguel Hidalgo, Tláhuac y Tlalpan. En estas demarcaciones se espera que continúe lloviendo hasta las 22:00 horas. Se recomendó a la población tomar precauciones, pues es posible que se generen corrientes de agua sobre las calles o avenidas, así como encharcamientos. Además, las fuertes rachas de viento podrían provocar la caída de ramas, árboles y lonas. La lluvia de este lunes trajo mucho granizo en siete alcaldías: Azcapotzalco, Gustavo A. Madero, Venustiano Carranza, Cuauhtémoc, Iztapalapa, Benito Juárez y Coyoacán. Hasta el momento la alcaldía que ha tenido más lluvia es la Gustavo A. Madero. El C5 reportó una inundación en Insurgentes Norte y Calzada Ticomán, colonia Tepeyac. Así como encharcamientos sobre La Rioja y San Juan de Puerto Rico, colonia Residencial Zacatenco. También hay un encharcamiento sobre Viaducto al cruce con Tlalpan, colonia Algarín, colonia Cuauhtémoc. (8 junio 2020).



**Figura 2.25** Evidencias en redes sociales del evento de granizo del 8 de junio de 2020.

Delegaciones/Municipios afectadas por granizo

**Tabla 2.11** Delegaciones/Municipios con reporte de granizo para el evento del 8 de junio de 2020.

Entidad Federativa	Delegación/Municipio	Fuente
Ciudad de México	Benito Juárez	Reporte SMN
Ciudad de México	Coyoacán	Reporte SMN
Ciudad de México	Cuauhtémoc	Reporte SMN
Ciudad de México	Gustavo A. Madero	Reporte SMN
Ciudad de México	Iztacalco	Reporte SMN

### 2.5.1.11 Evento del 09 abril de 2021

#### Sinopsis

Una línea de seca interactúa con la corriente en chorro subtropical, ocasionando fuertes rachas de viento en el norte y noreste del país, además de lluvias y chubascos acompañados de actividad eléctrica en Nuevo León y Tamaulipas. Canal de baja presión, ocasionará lluvias y chubascos en el centro, oriente y sureste de México, con lluvias puntuales fuertes y posibles granizadas en la zona montañosa central de Veracruz, Puebla (Sierra) y Oaxaca (norte). Onda de calor originará temperaturas máximas de 40 a 45 °C en Coahuila, Nuevo León, Tamaulipas, San Luis Potosí, Hidalgo (norte), Veracruz, Michoacán, Guerrero, Oaxaca, Chiapas, Tabasco, Campeche y Yucatán.

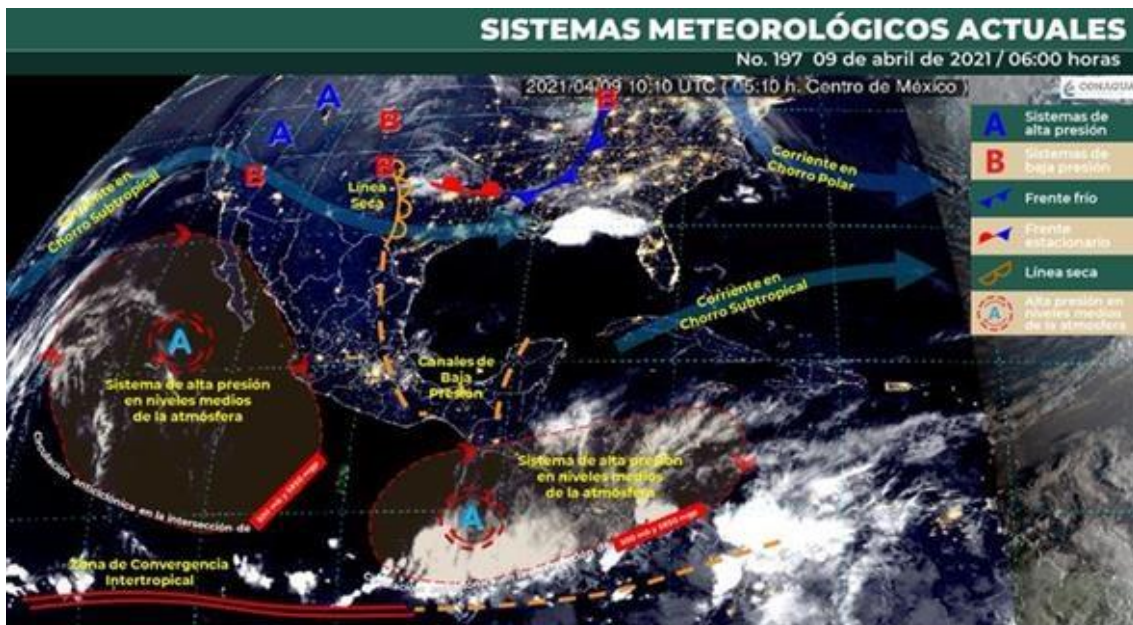


Figura 2.26 Condiciones meteorológicas del 09 de abril de 2021.



## Evidencias del evento en redes sociales y notas periodísticas

### Reportan lluvia fuerte y granizo en varias alcaldías de la CDMX

La cuenta de Twitter del Centro de Comando, Control, Cómputo, Comunicaciones y Contacto Ciudadano de la CDMX (C5) informó que hay lluvia ligera en cinco alcaldías de la CDMX y granizo en una demarcación y posteriormente se dispersó hacia la zona oriente de la ciudad. De acuerdo a lo mencionado a través de un tuit, las alcaldías Iztapalapa, Álvaro Obregón, Tlalpan, Magdalena Contreras y Cuajimalpa, tienen lluvia ligera.

Por su parte, la alcaldía Tlalpan presenta lluvia fuerte con granizo (Adn 40, 9 abril 2021).



**Figura 2.27** Evidencias en redes sociales del evento de granizo del 9 de abril de 2021.

### 2.5.1.12 Evento del 28 abril 2021

#### Sinopsis

El frente frío No. 54, un canal de baja presión y la entrada de humedad del Golfo de México, originarán lluvias puntuales fuertes, descargas eléctricas, caída de granizo y posible formación de torbellinos o tornados en regiones de Coahuila, Nuevo León y Tamaulipas. La décimo cuarta tormenta invernal asociada con la corriente en chorro polar, generarán un marcado descenso de temperatura en el noroeste del país, vientos intensos en la mesa del norte, así como posible caída de aguanieve o nieve en zonas serranas de Sonora y Chihuahua. Canales de baja presión, el calentamiento diurno y la humedad en el ambiente, originarán lluvias fuertes en Hidalgo, Puebla, Tlaxcala y Chiapas. Se registrarán temperaturas de 40 a 45 °C en zonas de Nuevo León, Tamaulipas, San Luis Potosí, Veracruz, Puebla, Nayarit, Jalisco, Michoacán, Guerrero, Oaxaca, Chiapas, Tabasco y Campeche.

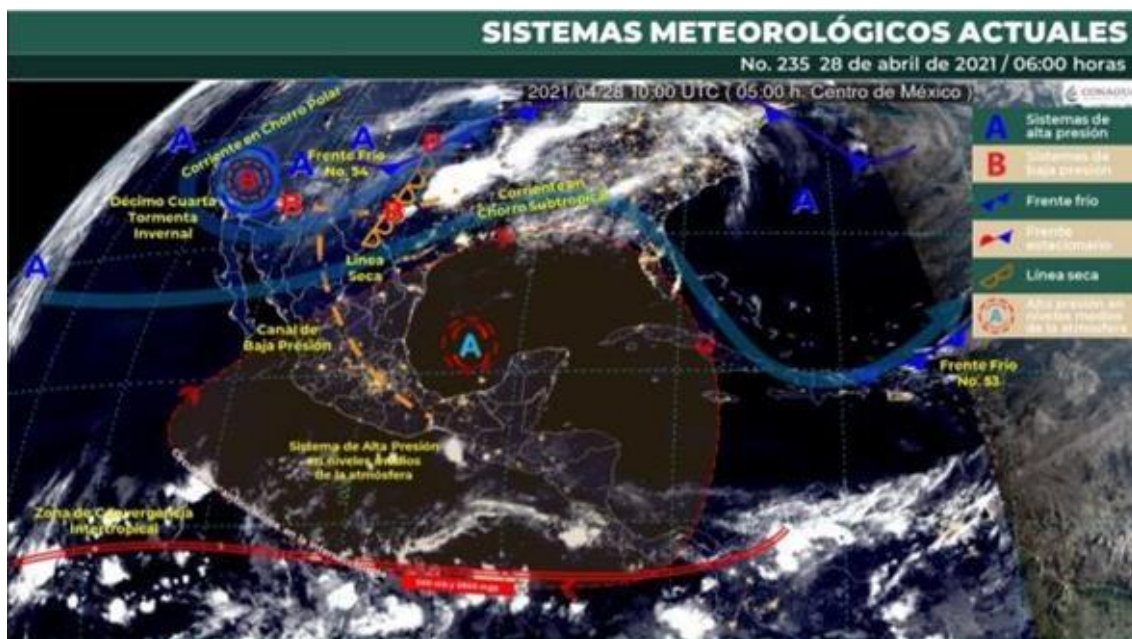


Figura 2.28 Condiciones meteorológicas del 28 de abril de 2021.

#### Evidencias del evento en redes sociales y notas periodísticas

##### *Fotos y videos de la fuerte granizada en el Centro de CDMX*

Toma precauciones, la fuerte granizada en el Centro comenzó alrededor de las 20:00 horas de este miércoles 28 de abril, reportaron autoridades.

Llegó la temporada de salir con el paraguas. La calurosa tarde de este miércoles 28 de abril acabó con una fuerte granizada en el Centro de la CDMX. A través de redes sociales, autoridades de CDMX informaron que el granizó afecto a tres alcaldías chilangas.

Las alcaldías más afectadas son: Cuauhtémoc, Venustiano Carranza y Azcapotzalco. Además del granizo, las autoridades reportaron lluvia fuerte en la alcaldía Gustavo A. Madero y en la Miguel Hidalgo, mientras que una lluvia de menor intensidad ocurrió en las alcaldías Iztapalapa, Iztacalco y Benito Juárez.

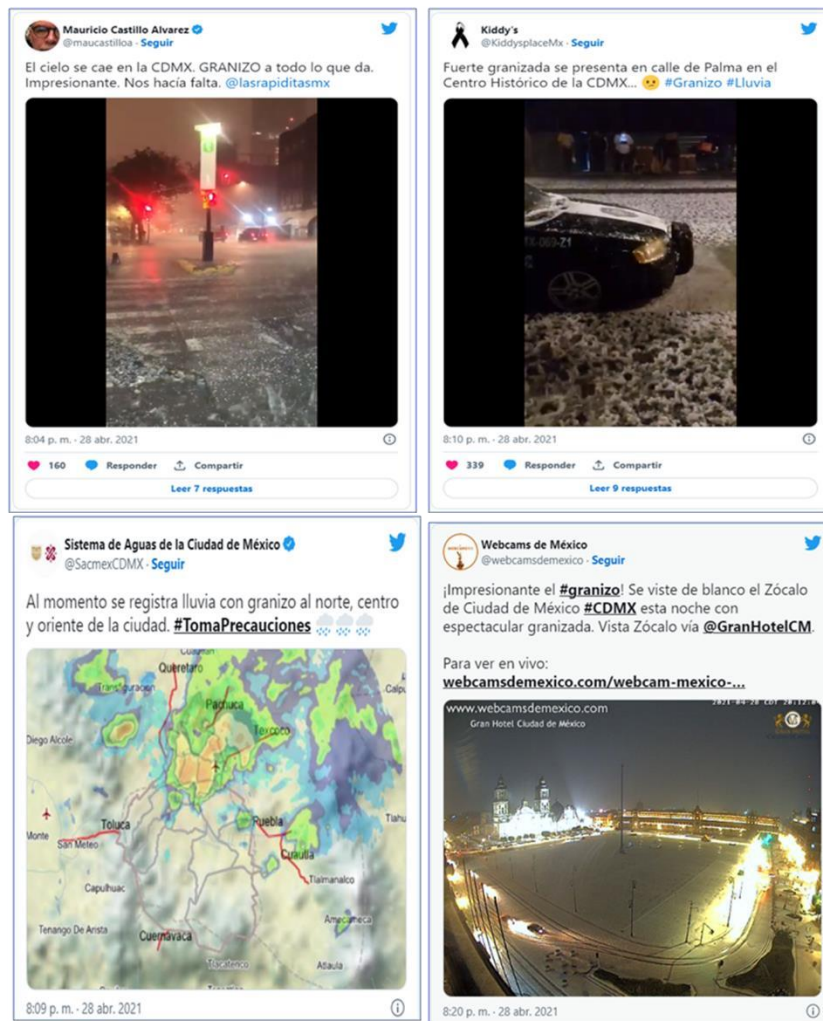
La fuerte granizada en el Centro cubrió calles de las colonias Centro, Tabacalera y zonas aledañas.

A pesar de que las autoridades indicaron que el granizo solo afectó la zona centro de CDMX, habitantes de la colonia Narvarte, en Benito Juárez, compartieron fotos de las calles llenas de granizo. Debido a la fuerte granizada en el Centro y a la lluvia en CDMX, el Metro activó la marcha de seguridad en nueve de sus Líneas (Chilango, 28 abril 2021).



Figura 2.29 Evidencias en redes sociales del evento de granizo del 28 de abril de 2021 (1 de 2). Fuente: Rafael Amed y Édgar Duran.





**Figura 2.30** Evidencias en redes sociales del evento de granizo del 28 de abril de 2021 (2 de 2).

Delegaciones/Municipios afectadas por granizo

**Tabla 2.13** Delegaciones/Municipios con reporte de granizo para el evento del 28 de abril de 2021.

Entidad Federativa	Delegación/Municipio	Fuente
Ciudad de México	Benito Juárez	Reporte SMN
Ciudad de México	Coyoacán	Reporte SMN
Ciudad de México	Cauhtémoc	Reporte SMN/TWITTER
Ciudad de México	Gustavo A. Madero	Reporte SMN
Ciudad de México	Iztacalco	Reporte SMN
Ciudad de México	Miguel Hidalgo	Reporte SMN
Ciudad de México	Venustiano Carranza	Reporte SMN
Estado de México	Coacalco	Reporte SMN

Estado de México  
Estado de México  
Estado de México

Ecatepec  
Tultepec  
Tultitlán

Reporte SMN  
Reporte SMN  
Reporte SMN

### 2.5.1.13 Evento del 18 mayo de 2021

#### Sinopsis

Una **línea seca** interactuó con un **canal de baja presión** sobre el noreste, oriente y centro del territorio junto con **inestabilidad en niveles altos de la atmósfera**; condiciones que, aunadas al ingreso de humedad de ambos océanos, provocarán lluvias puntuales fuertes, descargas eléctricas, vientos fuertes, posible caída de granizo en San Luis Potosí, Querétaro, Puebla y Tlaxcala, con posible **formación de torbellinos y/o tornados** en Coahuila, Nuevo León y Tamaulipas. Por otro lado, otro **canal de baja presión** incrementará la probabilidad de lluvias en el sureste del país y la Península de Yucatán, con lluvias puntuales muy fuertes en Chiapas y Campeche. Finalmente, continuará ambiente vespertino cálido a caluroso con temperaturas máximas de 40 a 45°C en zonas de Tamaulipas, San Luis Potosí, Veracruz, Tabasco, Chiapas, Campeche y Yucatán.

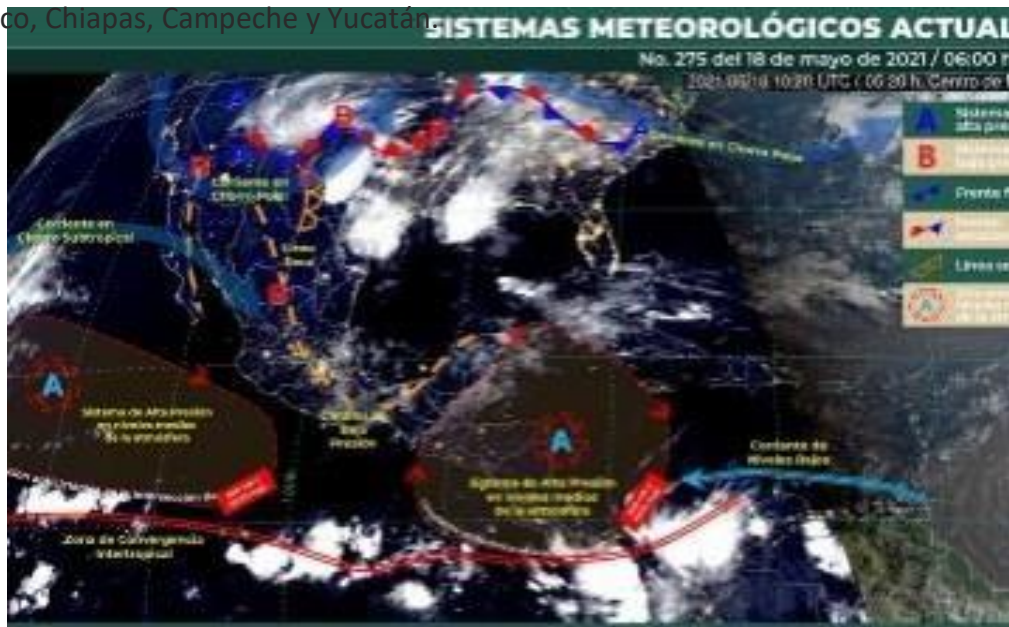


Figura 2.31 Condiciones meteorológicas del 18 de mayo de 2021.



**Evidencias del evento en redes sociales y notas periodísticas**



**Figura 2.32.** Radar de la ciudad de México para el día 18 de mayo de 2021 a las 18:15 horas. Fuente <https://www.facebook.com/photo/?fbid=632589740989628&set=a.133218440926763>



**Figura 2.33.** Evidencias en redes sociales del evento de granizo del 18 de mayo de 2021.

**Delegaciones/Municipios afectados por granizo**

**Tabla 2.14** Delegaciones/Municipios con reporte de granizo para el evento del 18 de mayo de 2021.

Entidad Federativa	Delegación/Municipio	Fuente
Ciudad de México	Álvaro Obregón	Reporte SMN/Facebook
Ciudad de México	Cuajimalpa	Reporte SMN
Ciudad de México	Magdalena Contreras	Reporte SMN
Estado de México	Naucalpan	Reporte SMN

### 2..1.1. Evento del 24 mayo de 2021

#### Sinopsis

El frente frío No. 57 interactuará con una línea de seca y con divergencia en altura, provocando rachas fuertes de viento con tolváneras en el norte y noreste de la República Mexicana y lluvias puntuales fuertes acompañadas de actividad eléctrica y posibles granizadas sobre entidades de la Mesa del Norte, así como probabilidad para la formación de torbellinos o tornados en Chihuahua y Coahuila. Canales de baja presión en interacción con divergencia en altura sobre la mesa central y con el ingreso de humedad de ambos litorales ocasionarán tormentas puntuales intensas en Oaxaca y Chiapas y lluvias fuertes a muy fuertes acompañadas de descargas eléctricas y posibles granizadas en el centro, oriente, sur y sureste del país. Circulación anticiclónica generará ambiente verperfino caluroso a muy caluroso sobre gran parte del territorio nacional, con temperaturas máximas de 40 a 45 °C en zonas de Michoacán y Guerrero.



Figura 2.34 Condiciones meteorológicas del 24 de mayo de 2021.

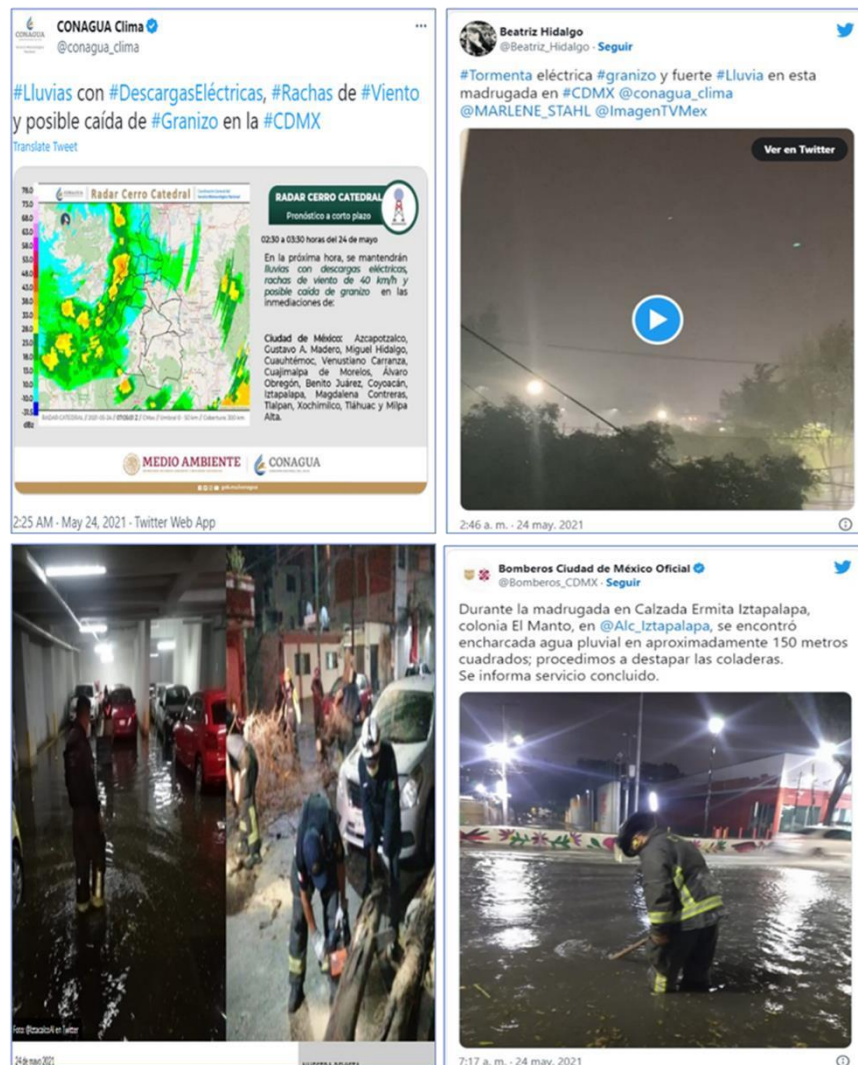
#### Evidencias del evento en redes sociales y notas periodísticas

*#CálmateTláloc: fotos y videos de la tormenta de anoche*

Aparte de que no nos dejó dormir, Tláloc dejó encharcamientos y derribó árboles en CDMX. Afectaciones de la tormenta del 24 de mayo. Justo cuando estábamos durmiendo para empezar la semana con tocho (como dice la chaviza) Tláloc trajo lluvias

muy fuertes, rayos y granizo a la CDMX. Estas son las afectaciones por la tormenta del 24 de mayo. Cerca de las 2:00 horas de este lunes 24 de mayo comenzó una tormenta en la CDMX, la cual estuvo acompañada de actividad eléctrica y granizo. De acuerdo con la Secretaría de Gestión Integral de Riesgos y Protección Civil se reportó lluvia fuerte en las alcaldías Álvaro Obregón, Coyoacán, Cuauhtémoc, Iztacalco e Iztapalapa, así como moderada en Benito Juárez, Tlalpan, Xochimilco y Venustiano Carranza.

La tormenta provocó la caída de 26 árboles, incluyendo uno de 20 metros de longitud en avenida Río Churubusco, colonia Aculco en Iztapalapa; así como diversos encharcamientos. Iztapalapa fue la alcaldía más afectada al reportar 14 encharcamientos en su territorio. En Calzada Ermita se reportó un encharcamiento de 150 metros cuadrados. Bomberos acudieron al punto para destapar las coladeras. (Chilango, 24 mayo 2021).



**Figura 2.35** Evidencias en redes sociales del evento de granizo del 24 de mayo de 2021.



### 2.5.1.15 Evento del 08 junio de 2021

#### Sinopsis

**Onda tropical Núm. 1**, se desplazará sobre el sur del territorio nacional originando lluvias fuertes a muy fuertes acompañadas de descargas eléctricas y fuertes rachas de viento en el sur y sureste de México. **Canales de baja presión** en interacción con **inestabilidad atmosférica superior**, continuarán ocasionando chubascos y lluvias fuertes acompañadas de descargas eléctricas y posibles granizadas sobre entidades del norte, occidente, centro y oriente del país, así como en la Península de Yucatán. **Una línea seca** sobre el noreste del país generará lluvias con descargas eléctricas y fuertes rachas de viento en la región. Finalmente, continuará el ambiente vespertino caluroso a muy caluroso sobre la mayor parte de la República Mexicana, con temperaturas máximas de 40 a 45°C.

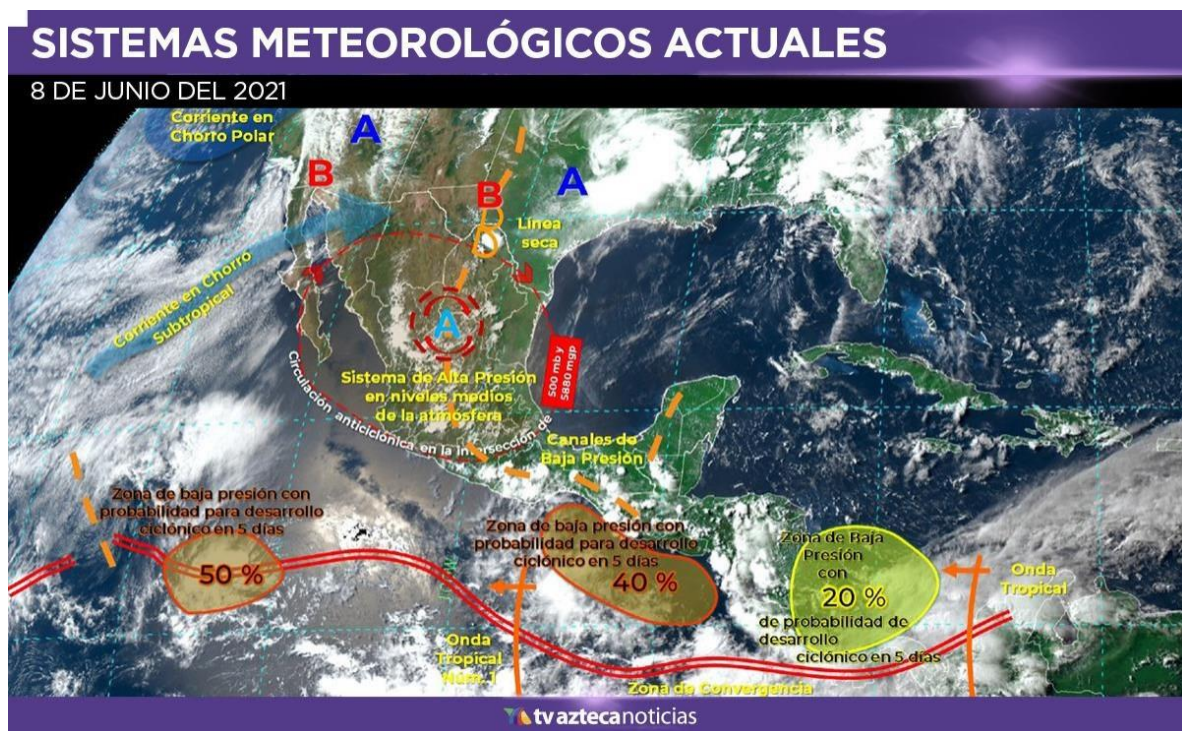


Figura 2.36 Condiciones meteorológicas del 08 de junio de 2021.

**Evidencias del evento en redes sociales y notas periodísticas**



**Figura 237.** Evidencias en redes sociales del evento de granizo del 8 de junio de 2021.

Delegaciones/Municipios afectadas por granizo

Tabla 2.16. Delegaciones/Municipios con reporte de granizo para el evento del 24 de mayo de 2021

Entidad Federativa	Delegación/Municipio	Fuente
Ciudad de México	Coyoacán	Reporte SMN
Ciudad de México	Gustavo A. Madero	Reporte SMN
Ciudad de México	Cuauhtémoc	Reporte SMN
Ciudad de México	Iztacalco	Reporte SMN
Ciudad de México	Venustiano Carranza	Reporte SMN



Ciudad de México	Benito Juárez	Reporte SMN
Estado de México	La Quebrada	Reporte SMN
Estado de México	Atizapán de Zaragoza	Reporte SMN
Estado de México	Coacalco de Berriozábal	Reporte SMN
Estado de México	Cuautitlán Izcalli	Reporte SMN

## 2.6 Simulaciones con el modelo WRF

Para este estudio se utilizó el núcleo ARW (Advanced Research WRF) en su versión 4.3.3. Se configuró el modelo para los dominios d01 y d02 con 5 y 1 km de resolución respectivamente. En la Tabla XVII se presentan los parámetros principales de configuración de los dominios y en la Tabla 2.17 se presentan los esquemas de parametrización seleccionados. Se realizó una simulación numérica por evento. De cada simulación se obtiene la variable de superficie HAILNC (granizo en mm) acumulado en 24 horas de las 12 UTC del día del evento a las 12 UTC del día siguiente. Las simulaciones se realizaron con un calentamiento de 36 horas, es decir, se inicializó a las 00 UTC del día anterior con la finalidad de permitir que el modelo se estabilizara.

**Tabla 2.17** Parámetros de configuración de los dominios del modelo WRF.

Parámetro	Dominio padre (d01)	Dominio anidado (d02)
i_parent_start	1	27
j_parent_start	1	27
e_we	51	86
e_sn	51	86
dx/dy	5000	1000
lat central	20.6870	-
lon central	-103.3480	-

**Tabla 2.18.** Esquemas de parametrización seleccionados.

Proceso	Esquema de parametrizaciones (para ambos dominios)
Microfísica	Opción 9: Milbrandt–Yau Double Moment Scheme (Milbrandt et al., 2005a; Milbrandt et al., 2005b).
Convección	Opción 3: Grell–Freitas Ensemble Scheme (Grell y Freitas, 2014).
Capa límite planetaria	Opción 5: Mellor–Yamada Nakanishi Niino Level 2.5/3 Schemes (Nakanishi y Niino, 2006; Nakanishi y Niino, 2009; Olson et al., 2019).

Opciones de capa de superficie	Opción 1: Revised MM5 Scheme (Jiménez et al., 2012).
Opciones de superficie terrestre	Opción 1: 5-layer Thermal Diffusion Scheme (Dudhia, 1996).
Radiación de onda larga	Opción 4: RRTMG Longwave Scheme (Iacono, 2008).
Radiación de onda corta	Opción 4: RRTMG Shortwave Scheme (Iacono, 2008).
Opciones de superficie urbana	Opción 1: Single Layer Urban Canopy Model (Chen et al., 2011).

Para generar las condiciones iniciales y de frontera requeridas por el modelo WRF se utilizaron los datos del Sistema de Análisis Troposférico Global del modelo operativo FNL (Final) del NCEP, el cual opera a partir del mes de julio de 1999 (NCEP, 2022). Estos datos están en formato GRIB con una resolución temporal de 3 horas y espacial de 27 km.

La Figura 2.38 presenta la simulación de granizo con el modelo WRF para los 15 eventos seleccionados.

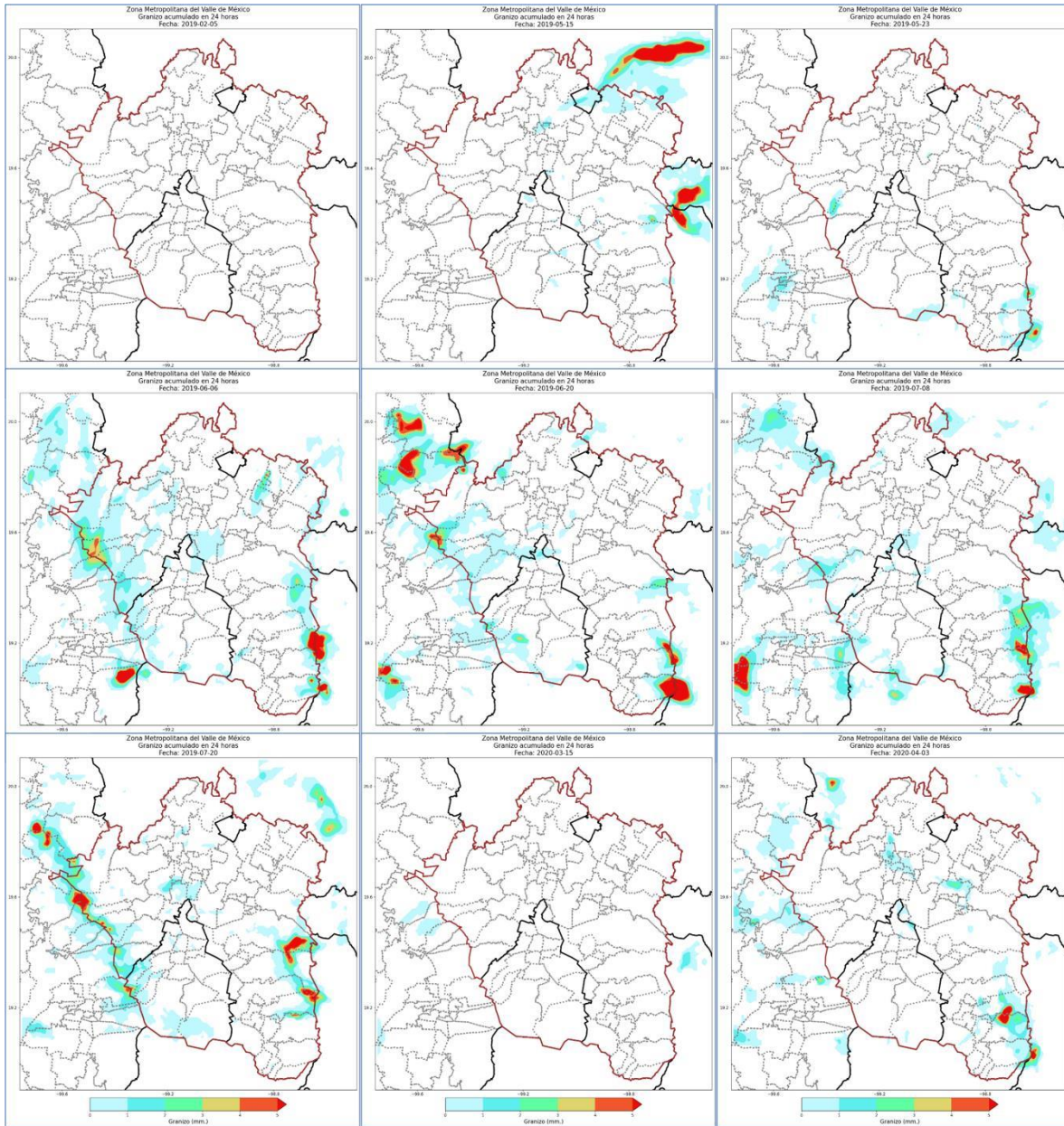


Figura 38. Simulación de granizo acumulado en 24 horas (continúa).



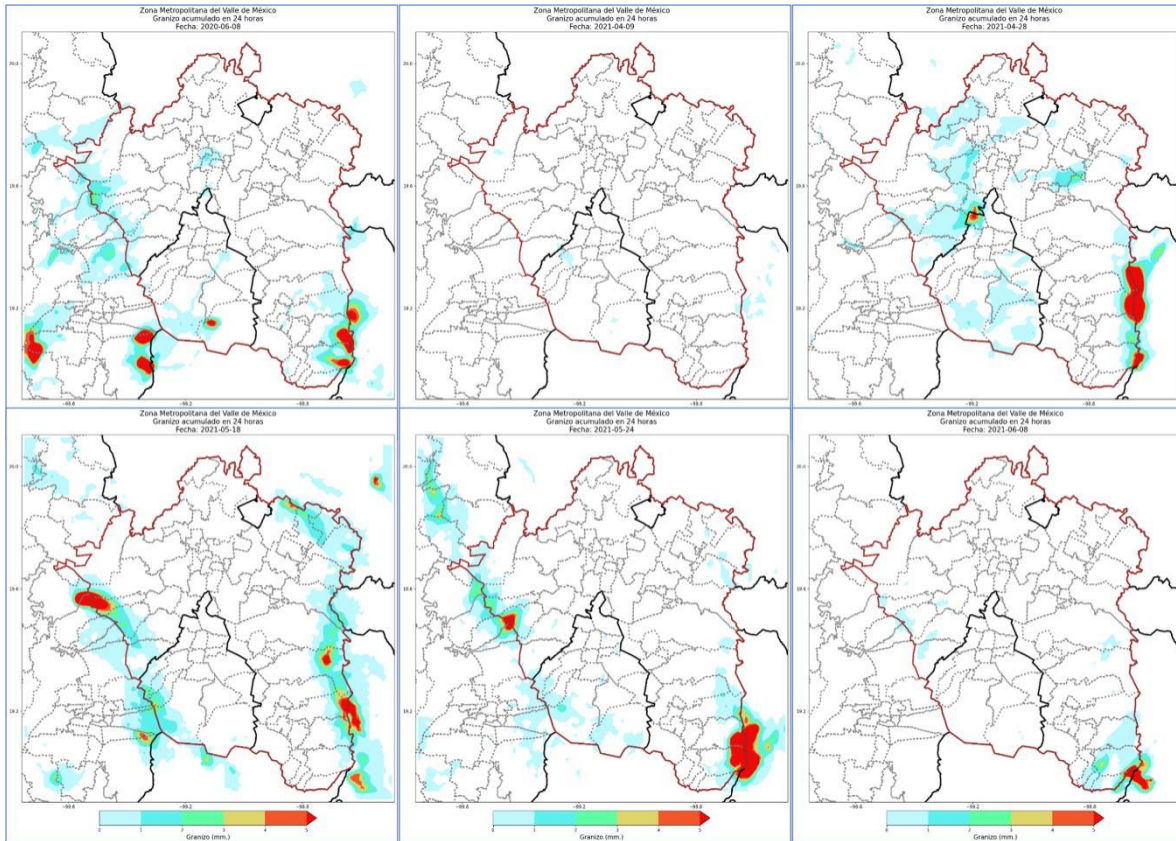


Figura 38. Simulación de granizo acumulado en 24 horas.

## 2.7 Tablas de contingencia e índices de calidad

Las tablas de contingencia son utilizadas principalmente para resumir datos categóricos, dentro de ellas se van a encontrar las frecuencias observadas entre dos variables de interés. El interés de estudio de las tablas de contingencia se centra en saber si existe correspondencia entre la ocurrencia de dos variables.

Sean X e Y dos variables categóricas con K y P categorías respectivamente. Un sujeto puede venir clasificado en una de las K x P categorías, que es el número posible de categorías existentes.

Para este estudio se determinó utilizar una tabla de contingencia con las variables categóricas “Evento reportado” y “Evento simulado”. Como categorías se consideran las categorías “Si” y “No”. En la Tabla 2.19 se presenta la estructura de la tabla de contingencia para la verificación de los 15 eventos de granizo seleccionados.



Tabla 2.19. Estructura de tabla de contingencia para la verificación de los 15 eventos de granizo.

		Observado		Total
		Si	No	
Simulado	Si	a	b	a+b
	No	c	d	c+d
	Total	a+c	b+d	n=a+b+c+d

En donde:

- a** es un evento observado y pronosticado.
- b** es un evento no observado y no pronosticado.
- c** es un evento observado pero no pronosticado.
- d** es un evento no observado y no pronosticado.

Para generar las tablas de contingencia de los eventos de granizo, se generaron tablas previas con las delegaciones y municipios que reportaron afectaciones por granizo. Posteriormente, se buscó en las salidas del modelo WRF la existencia de granizo en las mismas localidades, considerando como evento simulado aquellos con valores superiores a 0.1 mm acumulado en 24 horas. Es preciso señalar que solo se consideraron 26 delegaciones/municipios de la ZMVMX, cuyo criterio de selección se basó en que al menos existiera un reporte de granizo y/o presentara eventos simulados recurrentes.

En las Tablas 2.20 se presentan los valores de evento reportado y evento simulado en las 15 fechas seleccionadas. Por otra parte, en la Tabla 2.19 se presenta la Tabla de contingencia correspondiente.



**Tabla 2.20** Delegaciones/Municipios con reporte de granizo por evento (parte 1 de 3)

Fecha		05/02/2019		15/05/2019		23/05/2019		06/06/2019		20/06/2019	
Entidad Federativa	Delegación/ Municipio	Reportado	Simulado	Reportado	Simulado	Reportado	Simulado	Reportado	Simulado	Reportado	Simulado
CDMX	Álvaro Obregón	No	No	Si	No	No	No	No	Si	No	Si
CDMX	Azcapotzalco	No	No	No	No	No	No	No	Si	No	Si
CDMX	Benito Juárez	Si	No	Si	No	No	No	Si	No	No	No
CDMX	Coyoacán	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No
CDMX	Cuajimalpa	No	No	Si	No	No	No	No	Si	No	Si
CDMX	Cuauhtémoc	No	No	No	No	No	No	No	Si	No	Si
CDMX	Gustavo A. Madero	No	No	No	No	No	No	No	Si	Si	Si
CDMX	Iztacalco	No	No	No	Si	No	No	Si	No	No	No
CDMX	Iztapalapa	Si	No	No	Si	No	No	No	No	Si	No
CDMX	Magdalena Contreras	No	No	No	No	No	No	No	Si	No	Si
CDMX	Miguel Hidalgo	No	No	No	No	No	No	No	No	No	Si
CDMX	Milpa Alta	No	No	No	Si	No	Si	No	Si	No	Si
CDMX	Tláhuac	No	No	No	Si	Si	No	No	No	No	No
CDMX	Tlalpan	No	No	No	Si	No	No	No	Si	No	Si
CDMX	Venustiano Carranza	No	No	Si	Si	No	No	No	No	Si	No
CDMX	Xochimilco	No	No	No	Si	Si	No	No	Si	No	No
Edo. de México	Atizapán de Zaragoza	No	No	No	No	No	Si	No	Si	No	Si
Edo. de México	Coacalco de Berriozábal	No	No	No	No	No	No	No	Si	No	Si
Edo. de México	Cuautitlán Izcalli	No	No	No	No	No	No	No	Si	No	Si
Edo. de México	Ecatepec	No	No	No	Si	No	Si	No	Si	Si	Si
Edo. de México	Naucalpan	No	No	No	No	No	Si	No	Si	No	Si
Edo. de México	Nezahualcóyotl	No	No	No	Si	No	No	No	No	No	Si
Edo. de México	Ocoyoacac	No	No	No	No	No	No	No	Si	No	Si
Edo. de México	Tlalnepantla	No	No	Si	No	No	No	No	No	No	Si



Fecha		05/02/2019		15/05/2019		23/05/2019		06/06/2019		20/06/2019	
Entidad Federativa	Delegación/ Municipio	Reportado	Simulado	Reportado	Simulado	Reportado	Simulado	Reportado	Simulado	Reportado	Simulado
Edo. de México	Tultepec	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No
Edo. de México	Tultitlán	No	No	No	No	No	No	No	No	No	Si

**Tabla 2.20.** Delegaciones/Municipios con reporte de granizo por evento (parte 2 de 3)

Fecha		08/07/2019		20/07/2019		15/03/2020		03/04/2020		08/06/2020	
Entidad Federativa	Delegación/ Municipio	Reportado	Simulado	Reportado	Simulado	Reportado	Simulado	Reportado	Simulado	Reportado	Simulado
CDMX	Álvaro Obregón	No	Si	No	Si	No	No	No	No	No	Si
CDMX	Azcapotzalco	No	Si	No	Si	No	No	No	No	No	No
CDMX	Benito Juárez	No	No	No	No	No	No	No	No	Si	No
CDMX	Coyoacán	No	No	No	No	No	No	Si	No	Si	Si
CDMX	Cuajimalpa	Si	Si	Si	Si	No	No	No	No	No	Si
CDMX	Cuauhtémoc	Si	Si	No	Si	No	No	No	Si	Si	No
CDMX	Gustavo A. Madero	No	Si	No	No	No	No	No	Si	Si	Si
CDMX	Iztacalco	No	Si	No	No	No	No	Si	No	Si	Si
CDMX	Iztapalapa	No	No	No	No	Si	No	Si	No	No	Si
CDMX	Magdalena Contreras	No	Si	No	Si	No	No	No	No	Si	No
CDMX	Miguel Hidalgo	Si	Si	No	Si	No	No	No	No	No	No
CDMX	Milpa Alta	No	Si	No	Si	No	No	No	Si	No	Si
CDMX	Tláhuac	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No
CDMX	Tlalpan	No	Si	No	Si	Si	No	No	Si	No	Si
CDMX	Venustiano Carranza	No	Si	Si	Si	No	No	Si	Si	No	No
CDMX	Xochimilco	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No
Edo. de México	Atizapán de Zaragoza	No	Si	No	No	No	No	No	No	No	No
Edo. de México	Coacalco de Berriozábal	No	Si	No	Si	No	No	No	No	No	No
Edo. de México	Cuautitlán Izcalli	No	No	No	No	No	No	No	No	Si	No
Edo. de México	Ecatepec	No	Si	No	Si	No	No	Si	Si	No	No



Fecha		08/07/2019		20/07/2019		15/03/2020		03/04/2020		08/06/2020	
Entidad Federativa	Delegación/ Municipio	Reportado	Simulado	Reportado	Simulado	Reportado	Simulado	Reportado	Simulado	Reportado	Simulado
Edo. de México	Naucalpan	No	Si	No	Si	No	No	No	No	No	No
Edo. de México	Nezahualcóyotl	No	Si	No	No	Si	No	No	No	No	No
Edo. de México	Ocoyoacac	No	Si	Si	Si	No	No	No	Si	No	No
Edo. de México	Tlalnepantla	No	No	Si	Si	No	No	No	Si	No	No
Edo. de México	Tultepec	No	No	No	Si	No	No	No	Si	No	No
Edo. de México	Tultitlán	No	Si	No	Si	No	No	No	No	No	No

**Tabla 2.20** Delegaciones/Municipios con reporte de granizo por evento (parte 3 de 3)

Fecha		09/04/2021		28/04/2021		18/05/2021		24/05/2021		08/06/2021	
Entidad Federativa	Delegación/ Municipio	Reportado	Simulado	Reportado	Simulado	Reportado	Simulado	Reportado	Simulado	Reportado	Simulado
CDMX	Álvaro Obregón	No	Si	No	No	Si	Si	No	Si	No	No
CDMX	Azcapotzalco	No	No	No	Si	No	No	No	No	No	No
CDMX	Benito Juárez	Si	No	Si	No	No	No	Si	No	Si	No
CDMX	Coyoacán	No	No	Si	Si	No	No	Si	Si	Si	No
CDMX	Cuajimalpa	No	Si	No	Si	Si	Si	No	Si	No	No
CDMX	Cuauhtémoc	No	No	Si	Si	No	No	Si	No	Si	No
CDMX	Gustavo A. Madero	No	No	Si	Si	No	No	Si	No	Si	No
CDMX	Iztacalco	Si	No	Si	Si	No	No	Si	Si	Si	No
CDMX	Iztapalapa	No	No	No	Si	No	No	No	No	No	No
CDMX	Magdalena Contreras	Si	Si	No	Si	Si	Si	No	Si	No	No
CDMX	Miguel Hidalgo	No	No	Si	Si	No	No	No	No	No	No
CDMX	Milpa Alta	No	Si	No	Si	No	Si	No	Si	No	Si
CDMX	Tláhuac	No	No	No	Si	No	No	No	No	No	No
CDMX	Tlalpan	Si	No	No	Si	No	Si	No	Si	No	No
CDMX	Venustiano Carranza	No	No	Si	No	No	No	Si	Si	Si	No
CDMX	Xochimilco	No	No	No	Si	No	No	No	No	No	No





Fecha		09/04/2021		28/04/2021		18/05/2021		24/05/2021		08/06/2021	
Entidad Federativa	Delegación/ Municipio	Reportado	Simulado	Reportado	Simulado	Reportado	Simulado	Reportado	Simulado	Reportado	Simulado
Edo. de México	Atizapán de Zaragoza	No	No	No	Si	No	No	Si	No	Si	No
Edo. de México	Coacalco de Berriozábal	No	No	Si	Si	No	No	Si	No	Si	No
Edo. de México	Cuautitlán Izcalli	No	No	No	Si	No	No	Si	No	Si	Si
Edo. de México	Ecatepec	No	No	Si	Si	No	No	No	No	No	No
Edo. de México	Naucalpan	No	No	No	Si	Si	Si	No	Si	No	Si
Edo. de México	Nezahualcóyotl	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No
Edo. de México	Ocoyoacac	No	No	No	No	No	Si	No	Si	No	No
Edo. de México	Tlalnepantla	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No
Edo. de México	Tultepec	No	No	Si	Si	No	No	No	No	No	No
Edo. de México	Tultitlán	No	No	Si	Si	No	No	No	No	No	No

Tabla 2.21 Tabla de contingencia resultante

		Observado		Total
		Si	No	
Simulado	Si	33	107	140
	No	39	237	276
	Total	72	344	416

A partir de los valores a, b, c y d obtenidos en la tabla de contingencia resultante, para analizar la calidad de los pronósticos categóricos se aplicaron los índices Porcentaje Correcto, Tasa de Aciertos, Falsas Alarmas y Sesgo.

El índice de Porcentaje Correcto (PC) corresponde al porcentaje de pronósticos que fueron correctos, es decir, la suma de aciertos (a) y negativos correctos (d) con respecto a todos los pronósticos emitidos (Ec. 1). Este índice varía entre 0 y 1. Cuando el valor del índice es igual a 1, la probabilidad de detección de los eventos de interés es igual al 100%. Mientras que un índice igual a 0 señala nula probabilidad de detección.

$$PC = \left( \frac{a + d}{n} \right) \quad (1)$$

El índice de Tasa de Aciertos (TA) es la probabilidad de detección de los eventos de interés (Ec. 2). La escala de variación de este índice es de 0 a 1. Cuando el índice es igual a 1 la capacidad de detección de los eventos de interés es igual al 100%. Mientras que un índice igual a 0 señala nula capacidad de detección.

$$TA = \left( \frac{a}{a + c} \right) \quad (2)$$

El índice de proporción de falsa alarma (FA) corresponde a la fracción de eventos pronosticados, pero no observados (Ec. 3). Este oscila entre 0 y 1, en donde el valor igual a 0 muestra que el evento no ocurrió y que el modelo no generó un pronóstico, es decir, una situación perfecta. Cuando el valor es igual a 1, se da un 100% de pronósticos erróneos o falsas alarmas, es decir, cuando se pronostica que ocurrirá un evento, pero no se registra ni un evento observado. Mientras más pequeño es el índice FA, es menor el número de pronósticos erróneos emitidos.

$$FA = \left(\frac{b}{a + b}\right) \quad (3)$$

El índice Sesgo o BIAS compara el número de veces o frecuencia de un evento que fue pronosticado con el número de veces o frecuencia del evento que realmente se observó. Es decir, este indicador nos proporciona información sobre la tendencia del modelo a sobreestimar o subestimar la variable de interés (Ec. 4). Un valor de BIAS igual a 1 significa que el número de eventos pronosticados es igual al número de eventos observados. Valores iguales a 0 señalan que no se observaron eventos de interés cuando estos fueron pronosticados (sobre pronosticación). Valores mayores a 1 significan que el número de eventos pronosticados es por arriba de eventos observados. Un valor de BIAS menor a 1 significa que los eventos pronosticados fueron menores de los observados (sub pronosticación).

$$BIAS = \left(\frac{a + b}{a + c}\right) \quad (4)$$

Los resultados de los cuatro índices se resumen en la Tabla 2.22.

**Tabla 2.22.** Resultados de los índices de calidad para datos categóricos.

Índice	Resultado
PC	0.65
TA	0.64
FA	0.76
BIAS	1.94



### **3. Esquema de probabilidad de convección severa**

#### **3.1 Objetivo**

Desarrollo de un esquema de probabilidad de convección severa que, a partir de los resultados numéricos del modelo, indique el posible desarrollo de sistemas atmosféricos asociados a lluvia severa.

#### **3.2 Introducción**

El modelo numérico de la atmósfera WRF, permite predecir operativamente un gran conjunto de variables atmosféricas. Sin embargo, para que ellas tengan un significado práctico, muchas veces es necesario reinterpretarlas para manifestar efectos claramente perceptibles por el ser humano común y corriente. Las tormentas convectivas severas son uno de esos efectos que, además entraña asuntos de seguridad en el ámbito de la sociedad en general. El componente del proyecto que se presenta aquí, va encaminado a la transformación de algunas de las variables predichas por el modelador WRF hacia la probabilidad de desarrollo de tormentas convectivas severas en las regiones de México, objeto del presente trabajo.

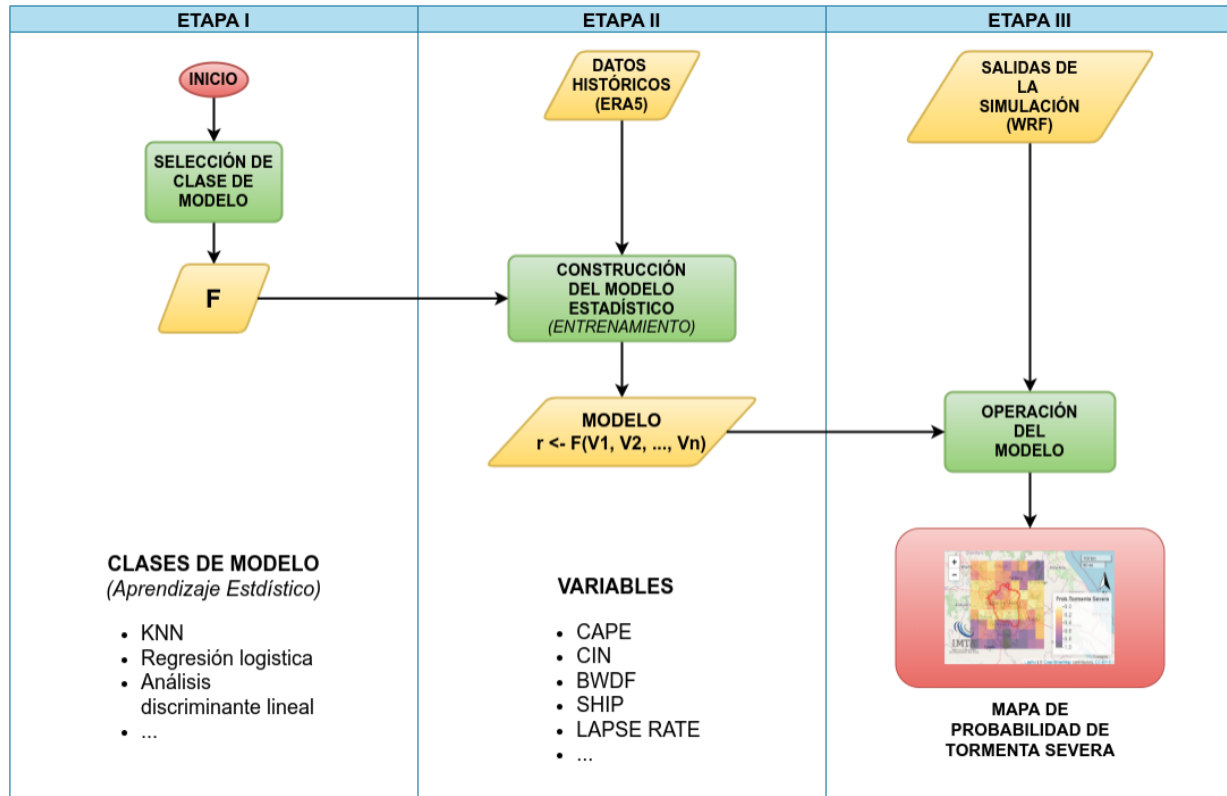
#### **3.3 Metodología**

Recientemente se ha desarrollado un conjunto de procedimientos computacionales que permiten relacionar estadísticamente un conjunto de variables (predictoras, variables independientes, o covariantes), con una variable de salida, numérica o categórica, (respuesta). Estos procedimientos se agrupan en un área conocida como Aprendizaje Estadístico, que a su vez está contenido dentro del área de la Inteligencia Artificial, conocida como Aprendizaje Automático (*Machine Learning*).

Para el presente trabajo, se ha decidido utilizar alguno de los métodos del Aprendizaje Estadístico con el fin de obtener la probabilidad de ocurrencia de tormentas convectivas severas.

Adicionalmente, el método de aprendizaje estadístico, o modelo estadístico seleccionado, estará inmerso en la estructura de un sistema que tomará las salidas del simulador WRF y adecuará sus respuestas para su presentación al usuario final. En la Figura 3.1 se encuentra la arquitectura de dicho sistema. Con referencia dicha figura, el sistema y su desarrollo se ha dividido en las etapas que se describen a continuación:





**Figura 3.1** Arquitectura del esquema de probabilidad de tormenta severa

- **ETAPA I. SELECCIÓN DE LA CLASE DE MODELO.** La variable de respuesta para el modelo estadístico es de tipo categórico, con dos posibles respuestas: hay o no hay tormenta convectiva severa. Para este tipo de respuesta según James, G. *et al.* (2013), hay varios métodos, entre los cuáles se consideraron la regresión logística, el análisis discriminante lineal, el análisis discriminante cuadrático y los KN vecinos más cercanos.
- **ETAPA II. CONSTRUCCIÓN DEL MODELO.** Una vez elegida la clase de modelo estadístico, representado en la Figura 7.1 con la función **F**, se procede a la construcción del modelo. Para ello se requiere de una gran cantidad de observaciones, que deben incluir tanto los valores de las variables predictoras con los de la variable de respuesta, para un período considerable de tiempo. Estos valores entran en un proceso al que se denomina entrenamiento del modelo y que tiene como salida los valores de los distintos coeficientes que conforman la función, **F**, del modelo. En esta etapa, también, se determina el conjunto de variables que se considerarán parte de la función; esto es, las variables predictoras. Esta selección se hace por medio de la evaluación de la influencia que tiene cada variable en los resultados del modelo estadístico.

En el presente caso se han considerado variables de salida tales como: CAPE (*Convective Available Potential Energy*), CIN (*Convective Inhibition*), BWDF (*Bulk Wind Difference 0-6km*), WVMR (*Water Vapor Mixing Ratio*), LPRT (*Vertical Temperature Lapse rate, 700-500mb*) y la Vorticidad, entre otras.

- **ETAPA III. CICLO DE OPERACIÓN DEL MODELO.** La operación del modelo se muestra como la etapa III en el diagrama de arquitectura mostrado en la Figura 7.1. Sin embargo, para que esta operación se integre al sistema de visualización final es necesario establecer un ciclo repetitivo que consuma las salidas del simulador WRF en *tiempo real*. Este ciclo se muestra en la Figura 7.2 y consiste en tomar los resultados del simulador WRF y aplicar la función del modelo estadístico para cada uno de los tiempos contenidos en la salida y cada uno de los puntos de la región de estudio, con el fin de obtener, en cada uno de esos puntos, el valor de la variable de respuesta: la probabilidad de ocurrencia de tormenta convectiva severa. Esos valores de respuesta se vierten en un mapa que contiene la región de estudio y que muestra por medio de una escala de colores dicha probabilidad, tal como se puede apreciar en la Figura 7.3. Esta operación se repite indefinidamente cada vez que el simulador WRF arroja nuevos resultados.

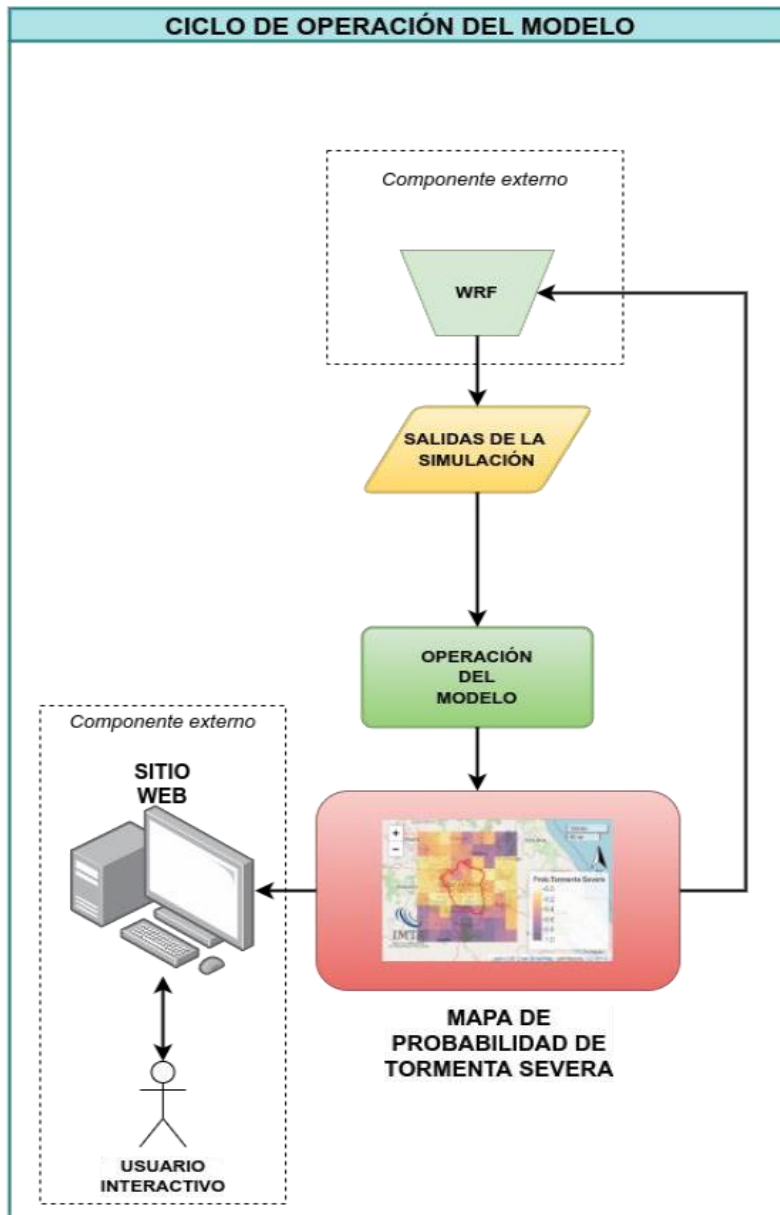


Figura 3.2 El ciclo de operación del modelo

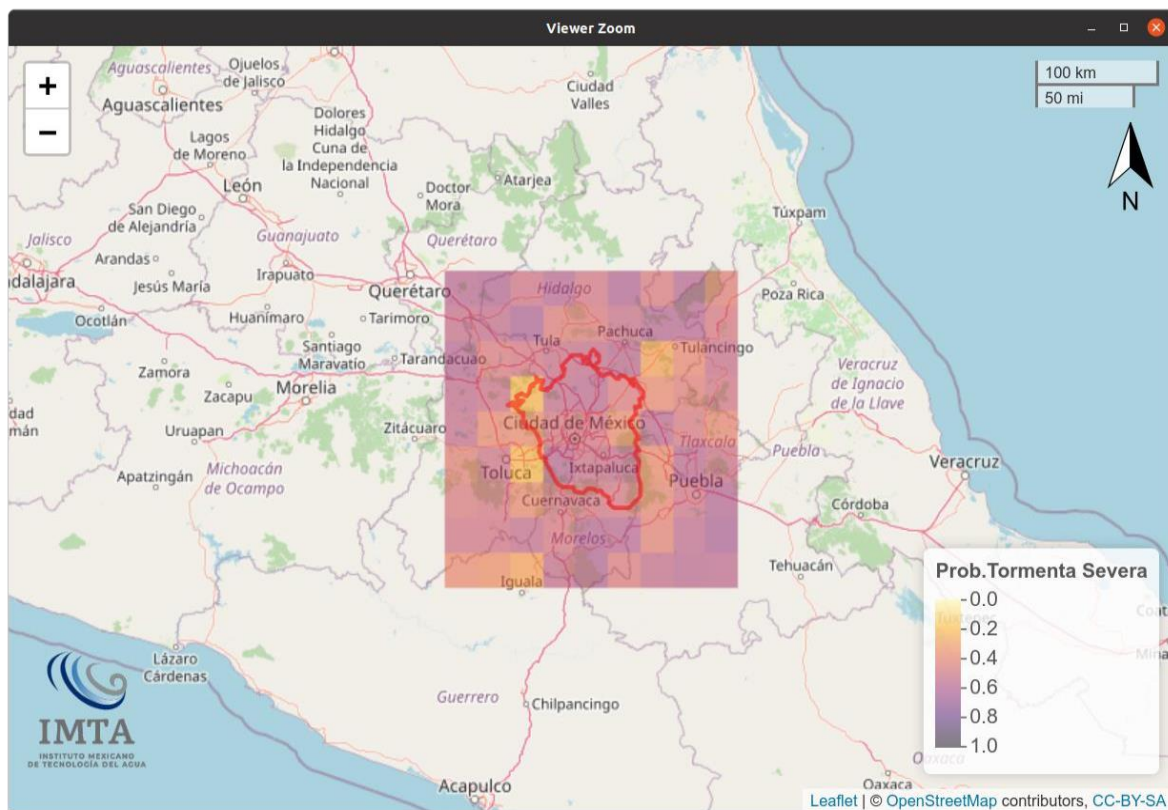


Figura 3.3 Ejemplo de salida del esquema de probabilidad de tormenta severa para el Valle de México

### 3.4 Selección de la Clase de Modelo.

Los métodos del aprendizaje automático y, más específicamente, los del aprendizaje estadístico son diversos y se adaptan a la solución de una gran variedad de problemas. Por ello es necesario conocer de manera general los tipos de métodos cubiertos por estas disciplinas, que se dividen principalmente como sigue:

1. **Aprendizaje supervisado.** Es el que se aplica sobre un conjunto de patrones utilizados sobre un universo de datos de entrenamiento, para clasificar, de acuerdo con categorías preestablecidas, las agrupaciones de patrones con un error mínimo. Este tipo de aprendizaje a su vez se divide en el aprendizaje por corrección de error, el cual ajusta los pesos con distintos patrones de asociación entre los valores; y el aprendizaje estocástico que consiste en la aplicación de ajustes de los estados de un modelo en particular basado en una función de distribución de probabilidad. Como ejemplos técnicos del aprendizaje automático supervisado se pueden mencionar: la regresión logística, el análisis discriminante lineal, los KN vecinos más cercanos, los árboles de decisión, máxima entropía, naive bayes, máquinas de soporte vectorial, etc., (Godoy-Viera, 2017; James, G. *et al.*, 2013).





2. **Aprendizaje no supervisado.** Éste se enfoca en encontrar la organización de los datos de alguna forma y no en determinar una variable sobre el conjunto de muestreo que se está utilizando para implementar el modelo. Se divide en dos tipos competitivo/cooperativo y hebbiano. Estas técnicas se caracterizan por no requerir la intervención humana para encontrar patrones considerando la distribución y composición de los datos. Entre los principales métodos de este tipo se encuentran las técnicas de conglomerados (*clustering*) y los métodos basados en el análisis de componentes principales (Godoy-Viera, 2017; James, G. *et al.*, 2013).

3. **Aprendizaje por refuerzo.** Éste se limita a indicar si la salida que se obtiene de la implementación se ajusta al resultado deseado. Aquí cada acción generada por el medio ambiente provee mayor información para alimentar el algoritmo (Flórez López, R. & Fernández Fernández, J.M. 2008).

El problema que se aborda en el presente trabajo es la determinación de la posibilidad del desarrollo de una tormenta severa de acuerdo con las condiciones atmosféricas, señaladas por un conjunto de variables e índices, en algún tiempo y localidad geográfica determinadas. Es decir, una combinación de valores de las variables e índices, debería arrojar como resultado, si se presentará o no la tormenta severa. Así pues, la salida del procedimiento, cualquiera que éste sea, es una variable con dos categorías, a saber: *sí-se-presenta-tormenta-severa* y *no-se-presenta-tormenta-severa*. Esta situación, lleva a elegir métodos que se encuentren dentro del tipo de *aprendizaje supervisado*, dado que en ninguno de los otros dos tipos se tiene como salida el valor de una variable categórica o numérica.

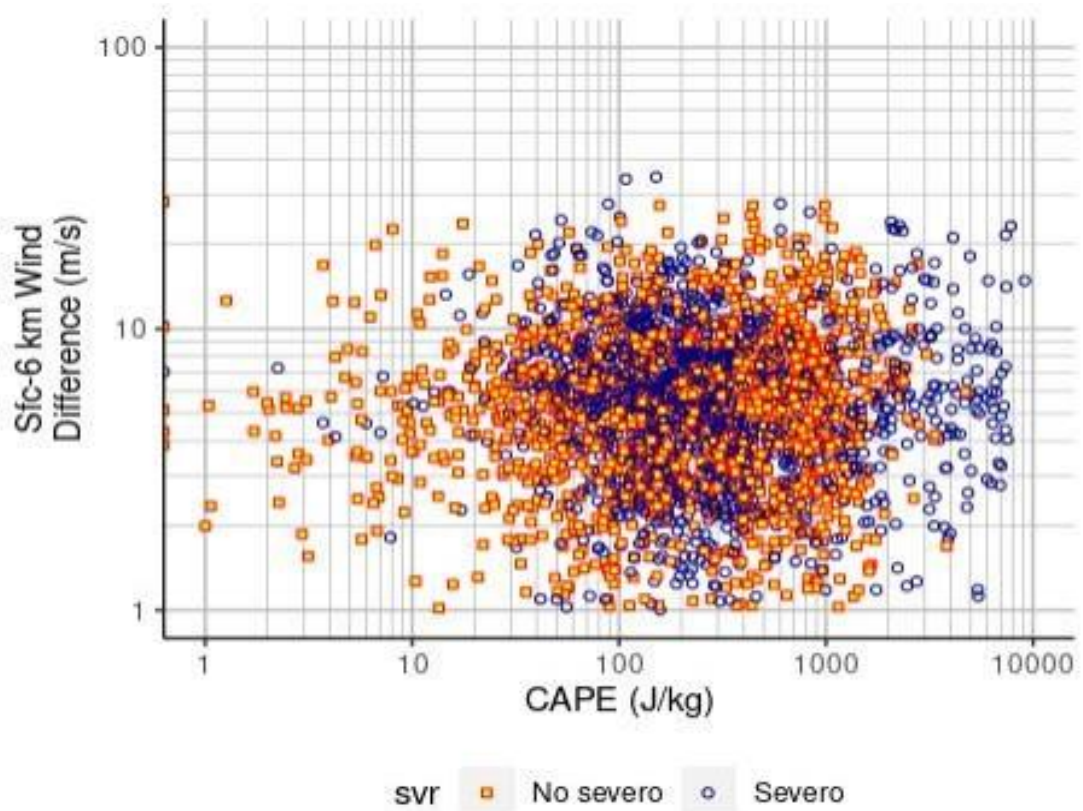
Dentro del aprendizaje supervisado, hay modelos que tratan con variables de salida numéricas, continuas o discretas, y hay modelos cuyas variables de salida son categóricas, que es el caso del presente trabajo, y que derivan en lo que se conoce como *problemas de clasificación*. Ejemplo de métodos que se utilizan para resolver este tipo de problemas son: K-vecinos más cercanos, regresión logística, análisis discriminante lineal, análisis discriminante cuadrático, Bayes ingenuo (*Naive Bayes*), etc. (James, G. *et al.*, 2013). En el presente trabajo, se probaron dos métodos, a saber: el análisis discriminante lineal y la regresión logística (James, G. *et al.*, 2013; Wilks, D.S., 2011). La selección del primero de estos métodos obedeció a los buenos resultados obtenidos con su uso en la determinación de tormentas eléctricas y tornados en Europa por Brooks, H.E., *et al.* (2003). La regresión logística se probó como un método alternativo para comparar resultados y debido a que arroja de manera más directa la probabilidad de alguna variable categórica de salida a partir de un conjunto de variables *predictoras* (James, G. *et al.*, 2013; Wilks, D.S., 2011).

Cualquiera que sea el modelo elegido, éste se alimenta de un conjunto de variables *predictoras*. Inicialmente, para el presente estudio se consideraron como posibles variables predictoras las siguientes:

1. **CAPE.** *Convective Available Potential Energy*
2. **BWDF.** *Bulk Wind Difference 0-6 km*
3. **WVMR.** *Water Vapor Mixing Ratio*
4. **CIN.** *Convective Inhibition*
5. **LIFI.** *Lifted index*
6. **VORT.** *Vorticidad*
7. **Índice K.**

Una descripción más detallada de estas variables se ha dado previamente en el componente de “Climatología de Tormentas” del presente trabajo.

Las variables predictoras consideradas en el modelo desarrollado por Brooks, H.E., *et al.* (2003), fueron el CAPE y BWDF. Así que, como punto de partida se consideraron también esas variables y con ellas se procedió a construir un modelo de análisis discriminante lineal, siguiendo la idea del trabajo citado. Sin embargo, como se puede apreciar en la Figura 7.4, las agrupaciones de puntos que definen tormentas severas y las que definen tormentas no severas, casi ocurren dentro del mismo dominio definido dentro del espacio dado por las variables predictoras. De ahí que no se pueda definir fácilmente una *línea* o *curva* que permita discriminar un conjunto de puntos del otro.



**Figura 3.4** Gráfico para el análisis de la discriminación de Tormentas Severas a partir de las variables CAPE y BWDF

Con el fin de comparar, se probó el método alternativo, regresión logística, para el mismo conjunto de variables y se obtuvo el modelo que se muestra en la Ecuación 3.1.

$$p(Ts) = \frac{e^{f_0}}{1 + e^{f_0}} \tag{3.1}$$

donde,

- $p(Ts)$ : probabilidad de tormenta severa,
- $f_0 = 0.151 \cdot \log(CAPE) - 0.104 \cdot \log(BWDF) - 0.852$ ,
- *CAPE*: *Convective Available Potential Energy*,
- *BWDF*: *Bulk Wind Difference 0-6 km*.

Al probar el modelo representado por la Ecuación 3.1, los resultados confirmaron lo observado en el modelo anterior, como se puede ver en la Tabla 3.1: las variables elegidas no son adecuadas para predecir la variable de salida, dado que la matriz de *confusión* presentada en dicha tabla, indica que el modelo acertó en 724+782=1506 casos del total, que es 2936 casos. Esto es, el modelo tiene una eficiencia de apenas el 51.3%; casi lo mismo que *tirar un volado* para hacer la predicción. Estos resultados, señalaron dos situaciones: que se debe escoger otro conjunto de variables como predictoras y que el tipo de modelo de *regresión logística* es tan adecuado como el *análisis determinate lineal*, con la ventaja de que el primero brinda de manera más directa la probabilidad de ocurrencia de la variable de salida; esto es, la probabilidad de ocurrencia de tormenta severa. Así que finalmente, para el presente trabajo se decidió utilizar la regresión logística.

**Tabla 3.1.** Matriz de *confusión* para el modelo presentado en la Ecuación 3.1.

	No severo	Severo
No severo	724	686
Severo	744	782

### 3.5 Construcción del Modelo

Una vez que se ha definido que el tipo de modelo a utilizar en el presente trabajo es la regresión logística, se procederá a su construcción que involucra dos etapas que en algunos puntos se desarrollarán en paralelo, a saber:

- a) Determinación de las variables predictoras.
- b) Entrenamiento del modelo.

En seguida se procede a detallar estas etapas.

#### 3.5.1 Determinación de las variables predictoras

En general los modelos de aprendizaje estadístico particularmente, en el aprendizaje supervisado se pueden representar mediante la fórmula dada en la Ecuación (3.2).

$$\hat{Y} = \hat{f}(X)$$

donde,

- $\hat{Y}$ : variable de salida predicha,
- $\hat{f}$ : función estimada de predicción; esto es, el modelo estadístico propiamente,
- $X$ : conjunto de variables de entrada o predictoras.

(3.2)

Aunque hay una idea de lo que es la variable de salida, ella es lo primero que se tiene que definir. Inicialmente se ha dicho que se trata de una variable que dice si hay o no *tormenta severa*. De este modo el punto de partida será la consideración que hace el Servicio Meteorológico Nacional de los tipos de tormenta, que son como sigue:

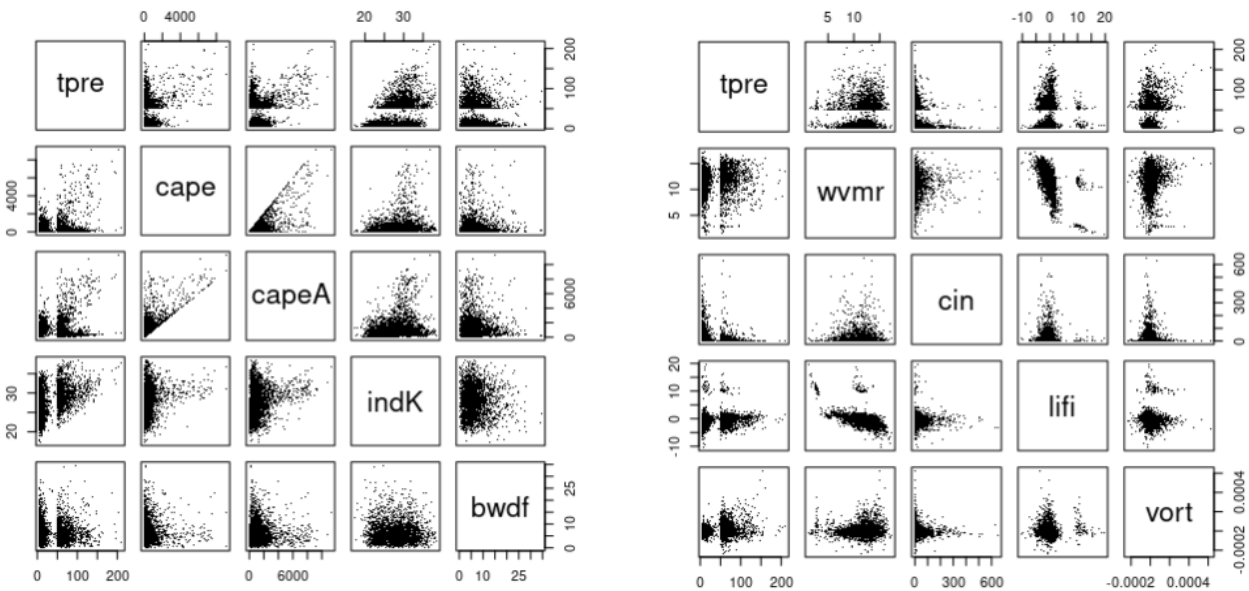
**Tabla 3.2.** Clasificación de precipitación acumulada en 24 horas por el SMN.

Nivel	Lluvia acumulada en 24 hrs	Categoría
0	0.1 a 25.0 mm	Lluvia
1	25.1 a 50.0 mm	Lluvia fuerte
2	50.1 a 75.0 mm	Lluvia muy fuerte
3	75.1 a 150.0 mm	Lluvia intensa
4	150.1 a 250.0 mm	Lluvia torrencial
5	Mayor a 250.1	Lluvia extraordinaria

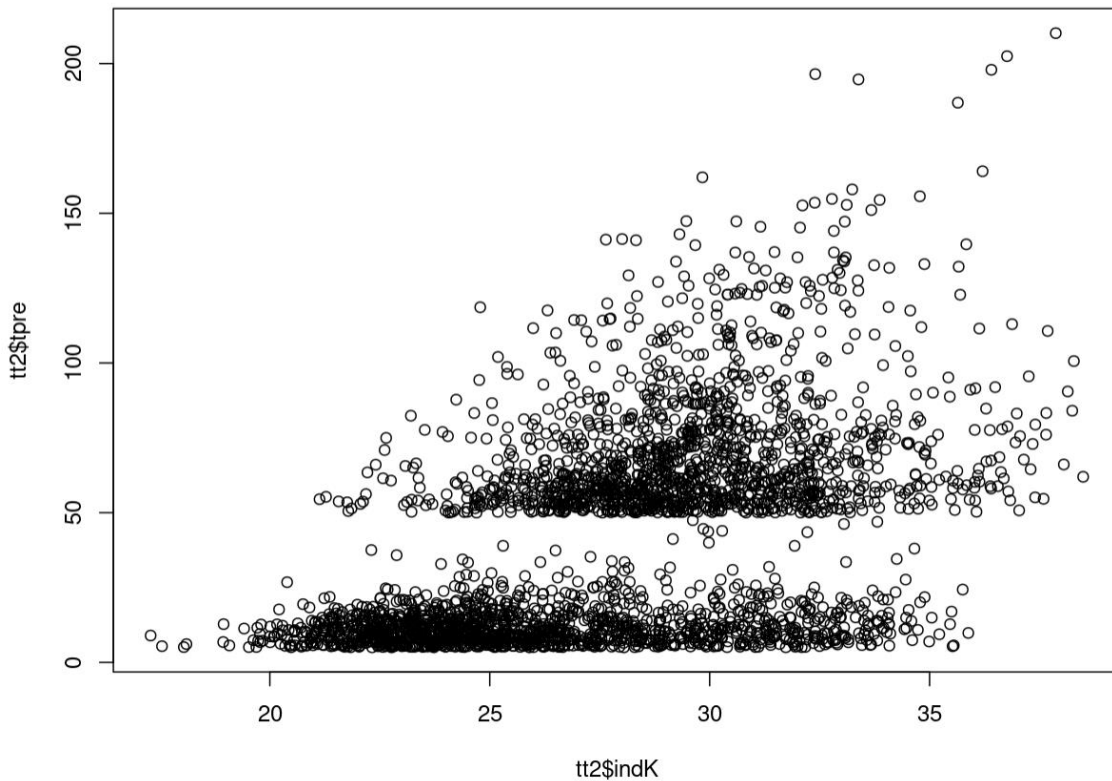


En este trabajo entonces, se decidió clasificar como tormenta severa a partir de lo indicado en la Tabla 3.2 como “Lluvia muy fuerte”, es decir, el umbral para esta clasificación serían los 50 mm de lluvia acumulada por día.

Para determinar el conjunto de variables predictoras se procedió a desarrollar gráficos de dispersión de todas las variables contra todas, tal como se muestra en la Figura 3.5, donde se muestran dos matrices de gráficos de esta naturaleza. De los gráficos mostrados ahí, son de particular importancia los mostrados en el primer renglón de las dos matrices, porque muestran los gráficos de todas las variables contra la precipitación (tpre), donde cabe señalar además que los valores están separados en dos grupos, a saber, los que están por abajo del umbral de los 50 mm de lluvia por día, y los que están por arriba. De todas las variables consideradas, se observó que el índice K, es la variable que más permite diferenciar en dos grupos de valores distintos: los que corresponden a tormenta severa (por encima de los 50 mm) y los que corresponden a tormenta no severa (por debajo de los 50mm), tal como se puede apreciar con más detalle en la Figura 3.6, que es una ampliación del diagrama de dispersión para el caso de la variable *índice K* contra la precipitación.

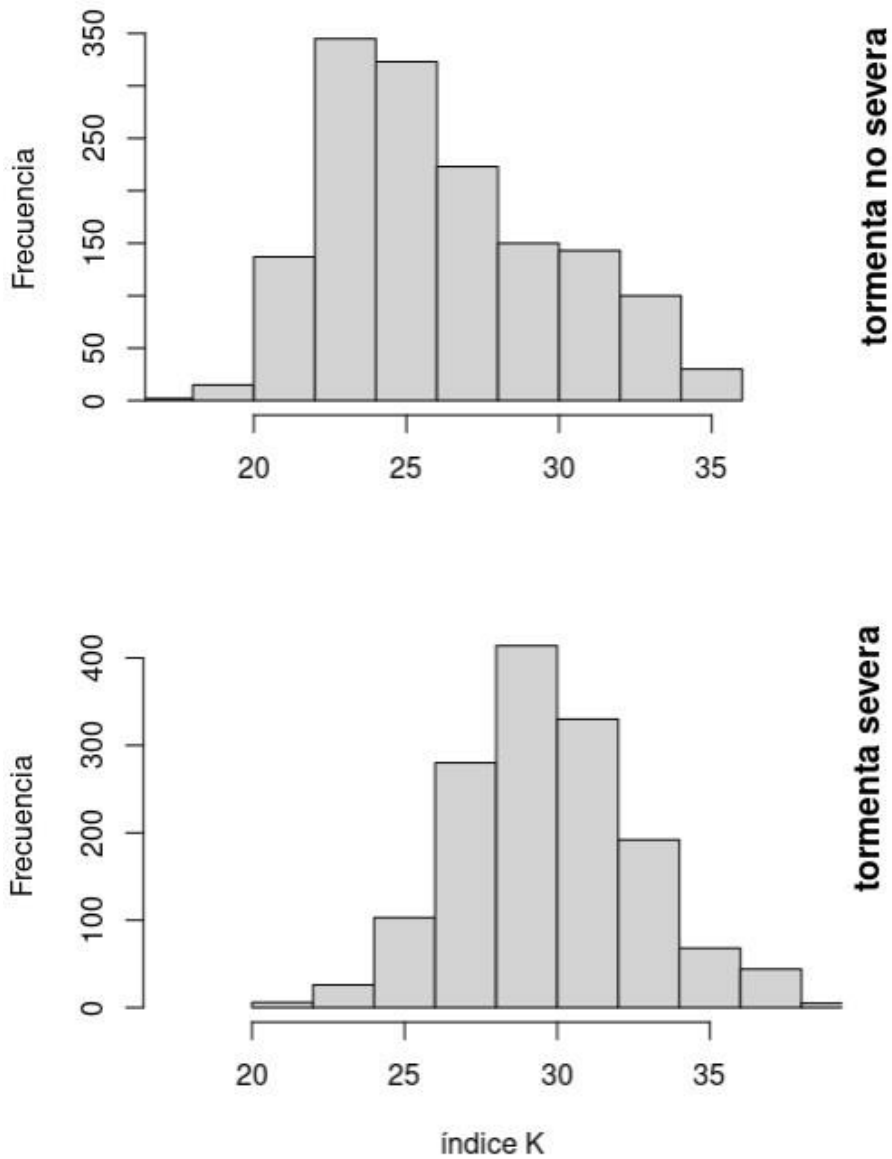


**Figura 3.5** Diagramas de dispersión de las variables consideradas



**Figura 3.6** Gráfico de dispersión de la variable índice K (indK), contra la precipitación (tpre)

Otra forma de ver lo expresado en el gráfico mostrado en la Figura 3.6 es mediante los histogramas alineados correspondientes a la partición de los valores del índice K en dos clases: los correspondientes a tormenta no severa y los correspondientes a tormenta severa, que se muestran en la Figura 3.7. Se puede ver que la media para los dos casos es notablemente diferente. Ninguna de las otras variables presenta una diferencia tan marcada. Por lo tanto, la variable predictora de partida a considerar en el modelo es el índice K.



**Figura 3.7** Histogramas de datos del índice K particionados por tipo de tormenta: no severa o severa.

A partir de lo anterior, se construyó a partir de los datos observados un modelo inicial que considera como única variable predictora el índice K. Este modelo se presenta en la Ecuación 3.3 a continuación.

$$p(Ts) = \frac{e^{f_0}}{1 + e^{f_0}}$$

donde,

(3.3)

- $p(Ts)$ : probabilidad de tormenta severa,
- $f_0 = 8.83 \cdot \log(indK) - 29.32$ ,
- $indK$ : índice K.

Al aplicar este modelo a los casos de prueba se obtuvieron los resultados que se muestran en la Tabla 3.3. Los aciertos del modelo indican que éste tiene una eficiencia del 72.17 %; esto es, el modelo acertó en 72.17 % de los casos de prueba a los que se le sometió.

**Tabla 3.3.** Matriz de *confusión* para el modelo presentado en la Ecuación 7.3.

	No severo	Severo
No severo	1015	364
Severo	453	1104

Finalmente, en la búsqueda de una mayor eficiencia del modelo se fue probando incluir otras variables en el conjunto de variables predictoras y se así se llegó a la decisión del siguiente conjunto final de variables predictoras:

1. **WVMR.** *Water Vapor Mixing Ratio*
2. **LIFI.** *Lifted index*
3. **VORT.** *Vorticidad*
4. **Índice K.**

En la siguiente sección se presenta la manera cómo estas variables incrementan la eficiencia del modelo final.

### 3.5.2 Entrenamiento del modelo

Para el presente estudio se emplearon los datos horarios de reanálisis ERA-5, entre el 31 de diciembre de 1988 y el 31 de diciembre de 2018, cuya descripción se ha dado de manera amplia en la Componente



de Climatología del presente trabajo. La cantidad de información entre esas fechas es enorme y se tuvieron que aplicar diversos filtros para finalmente tener un dato por día y por coordenada geográfica en las regiones de análisis. El principal filtro es el que considera solamente las fechas dentro de la temporada anual de lluvias, que es donde el fenómeno de *tormentas severas* se presentará. Ilustrativamente, la Figura 7.8 muestra el arreglo típico de los datos que se usarán en principio para el *entrenamiento* del modelo. Como se puede ver en el pie de la tabla mostrada, el texto subrayado en rojo manifiesta que ella se extiende a los 447,120 renglones. De estos renglones, 1468 están marcados, en la columna **svr**, como “Severo”. Para evitar un sesgo en el modelo, se decidió, además de esos renglones, seleccionar de manera aleatoria — con distribución uniforme — un igual número de renglones o casos, pero etiquetados en su columna **svr**, como “No severo”. De este modo la tabla final de datos se redujo a una con 2936 renglones, o casos. Es este conjunto de datos el que fue utilizado para generar los gráficos presentados antes en las Figuras 3.4 a la 3.7.

ilon	ilat	idia	tpre	svr	cape	capeA	bwdf	wvmr	indK	cin	lifi	vort	
1	1	1	1	0.8636742	No severo	106.7145386	1183.8572	3.5429142	6.78785	22.23272	401.85504150	0.5125728250	-0.0000514623389
2	2	1	1	1.9120178	No severo	64.0519714	1371.1307	9.6161537	7.19456	22.01115	NA	-1.1827307940	0.0000163175500
3	3	1	1	2.8198291	No severo	149.4933472	1405.7722	8.5075197	6.70343	23.43807	NA	-0.3397823274	0.0000020662460
4	4	1	1	2.4257734	No severo	385.7068176	1516.0905	7.7991648	6.76675	24.65761	33.59981918	-0.6791155934	-0.0000306791881
5	5	1	1	1.8403393	No severo	796.8716431	1213.9651	2.8505550	7.31547	24.68597	64.17839813	0.4932536483	-0.0000000000000
6	6	1	1	2.3826956	No severo	1212.1051025	1177.0000	3.896410	6.25203	24.73560	48.95014572	1.0000000000000	-0.0000000000018
7	7	1	1	2.9550651	No severo	1000.0000	1177.0000	4.9822268	6.20013	24.18787	NA	0.0000000000000	0.00000201389666
8	8	1	1	4.2449250	No severo	1204.08410	1177.0000	9.6898470	6.70000	24.00000	121.58190155	0.5746667385	0.0000349649199
9	9	1	1	4.7127798	No severo	1204.08410	1177.0000	11.00000	6.70000	22.91694	121.58190155	-1.2902870178	0.0000330877301
10	10	1	1	3.0619644	No severo	127.570000	1177.0000	7.49494	22.91694	322.55520630	-0.1793708205	-0.0000538183995	-0.0000000000000
11	11	2	1	4.7127798	No severo	17.000000	1177.0000	7.6283350	7.31450	22.89389	3.72314167	-2.7967875004	-0.0000157478826
12	12	3	2	3.0306278	No severo	100.7748413	998.4435	8.6981573	6.74304	23.83336	NA	-0.5949631333	-0.0000229309990
13	13	4	2	1.8120916	No severo	284.2233582	1067.3779	8.1873646	6.48725	25.74952	23.17807770	0.0670133531	-0.0000221839546
14	14	5	2	1.2287760	No severo	202.9668732	739.9107	0.5824089	5.46344	25.62366	84.79299927	1.0418034792	-0.0000491254323
15	15	6	2	3.3586545	No severo	856.5062256	1258.4875	3.5734951	5.40515	23.52316	50.14032745	1.3760854006	-0.0000176538033

Showing 1 to 15 of 447,120 entries, 13 total columns

**Figura 3.8** Arreglo típico de los datos usados para el entrenamiento del modelo

Después de probar el modelo básico, presentado en la Ecuación 3.3, se procedió a ir agregando y eliminando algunas variables de las disponibles para fungir como variables predictoras e ir observando el comportamiento de la eficiencia de cada nuevo modelo. De este modo se llegó al modelo que se presenta en la Ecuación 3.4, cuya matriz de confusión se presenta en la Tabla 3.4. La matriz presentada manifiesta que el modelo tiene una eficiencia global del 74.25%, que es el porcentaje de aciertos del modelo en los casos de prueba.

$$p(Ts) = \frac{e^{f_0}}{1 + e^{f_0}}$$

donde,

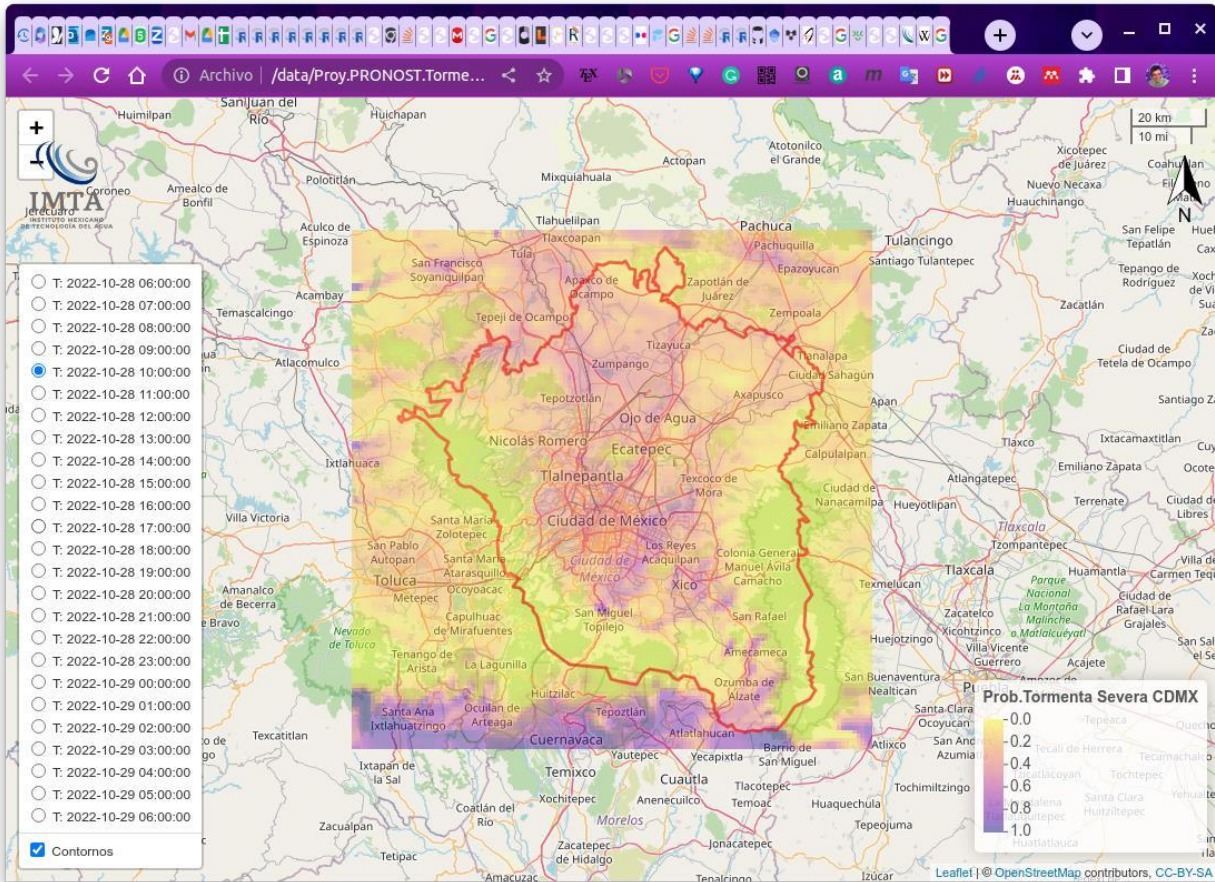
- $p(Ts)$ : probabilidad de tormenta severa, (3.4)
- $f_0 = 9.73 \cdot \log(indK) + 0.0456 \cdot wvmr + 0.155 \cdot lifi + 7467 \cdot vort - 32.87$ ,
- $indK$ : índice K,
- $lifi$ : *lifted index*,
- $wvmr$ : *water vapor mixing ratio*,
- $vort$ : vorticidad.

**Tabla 3.4.** Matriz de *confusión* para el modelo presentado en la Ecuación 3.4.

	No severo	Severo
No severo	1055	343
Severo	413	1125

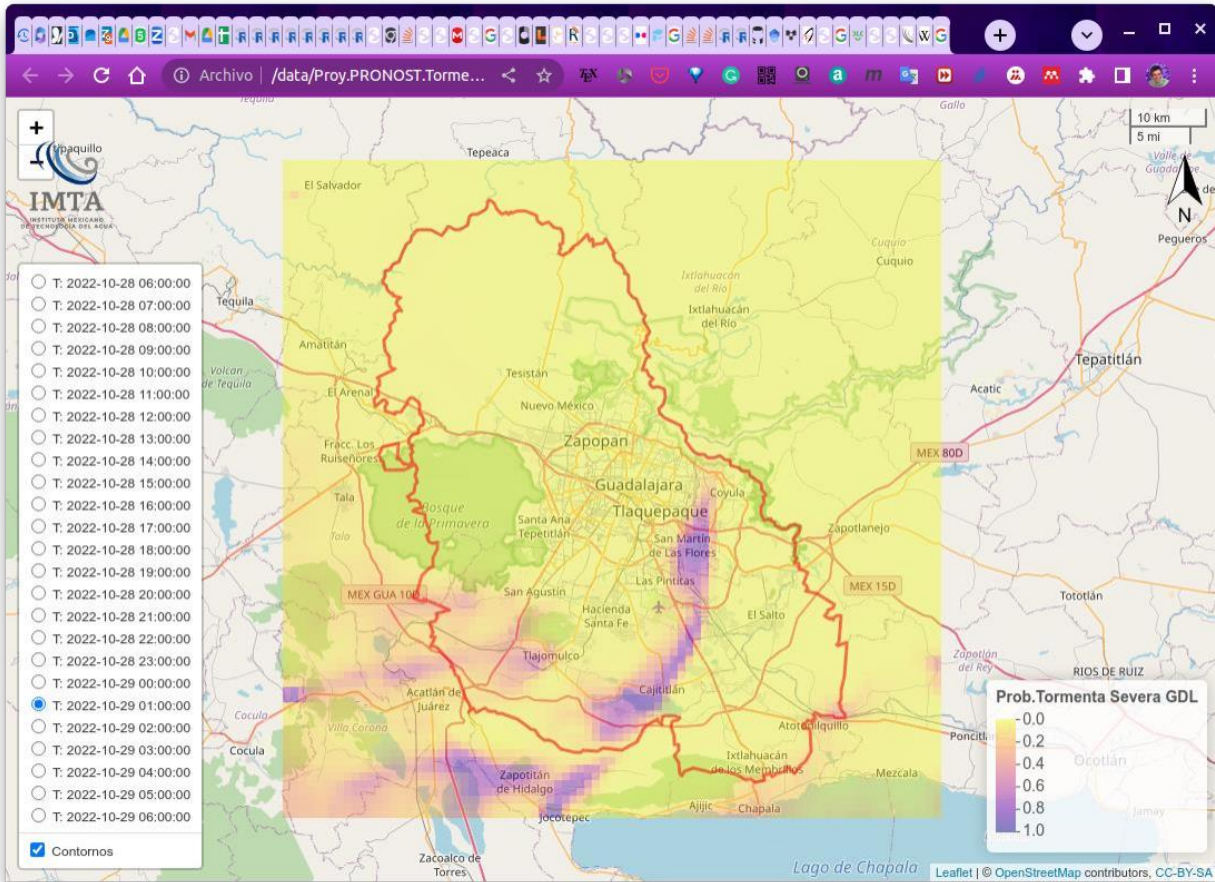
### 3.6 Ciclo de Operación del Modelo.

Finalmente se procede a aplicar el modelo presentado en la Ecuación 3.4, a cada uno de los puntos coordenados y tiempos de las salidas de pronóstico del modelador numérico WRF, que ha sido presentado como el Componente de Modelación del presente trabajo. La parte del sistema que se encarga de dicho trabajo no solamente hace el trabajo de calcular los valores de la probabilidad de tormenta severa para cada uno de los puntos y tiempos mencionados, sino que genera de manera automática una página Web interactiva (en formato HTML) que permite navegar en el mapa, hacer zoom y elegir la hora del día en que se desea conocer la variable en cuestión mediante una escala de colores. Los resultados de este procedimiento se pueden apreciar, para cada una de las zonas del estudio, en las Figuras 3.9, 3.10 y 3.11.



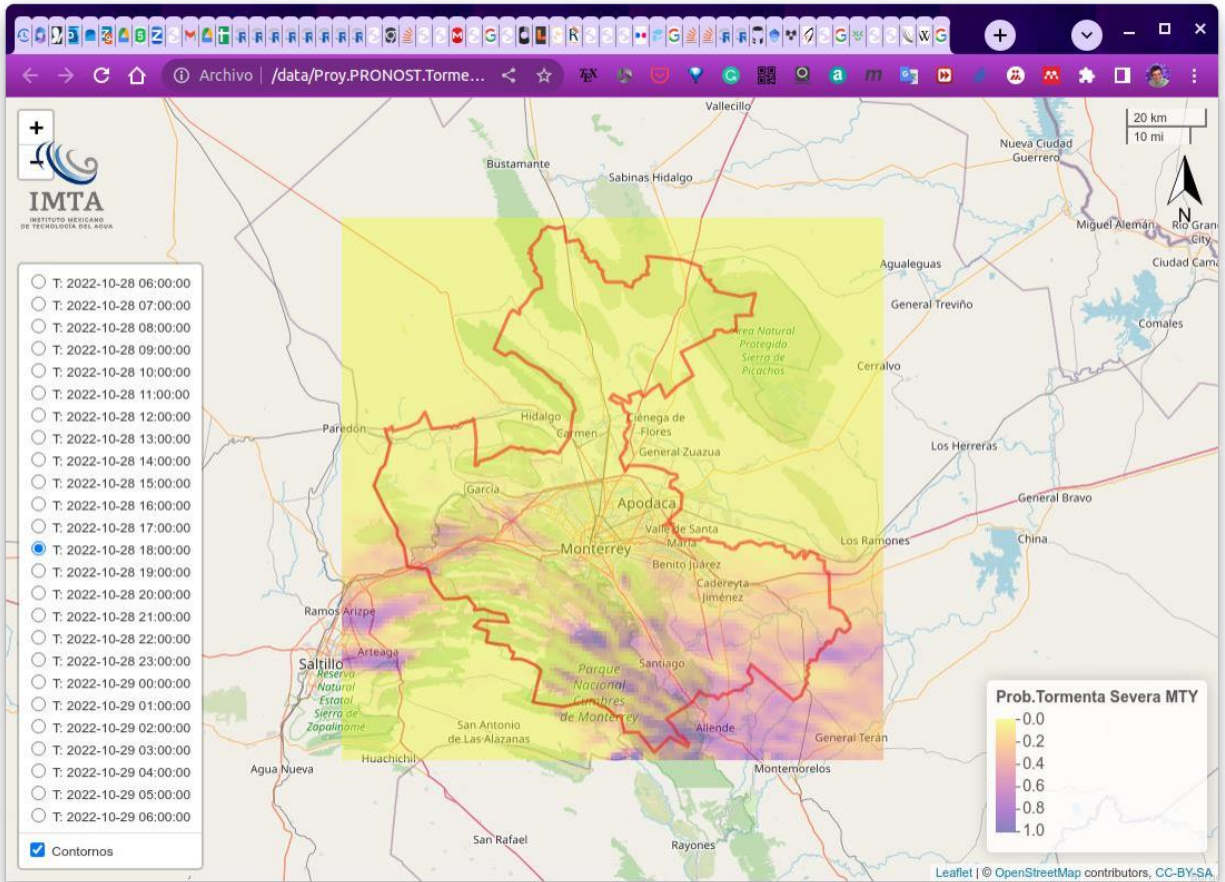
**Figura 3.9** La operación del modelo estadístico sobre las salidas pronosticadas del WRF, un caso para la región del Valle de México





**Figura 3.10** La operación del modelo estadístico sobre las salidas pronosticadas del WRF, un caso para la región metropolitana de Guadalajara





**Figura 3.11** La operación del modelo estadístico sobre las salidas pronosticadas del WRF, un caso para la región metropolitana de Monterrey

## 4. Detección de convección profunda y rayos con imágenes de satélite.

### 4.1 Introducción

Los sistemas convectivos se pueden desarrollar en una atmósfera termodinámicamente inestable y pueden alcanzar grandes altitudes y causar tormentas severas. Por lo tanto, los meteorólogos están especialmente interesados en identificar dichas tormentas potenciales cuando el sistema se encuentra todavía en un estado pre convectivo. Se han definido índices para describir dichas situaciones, tradicionalmente estos son desarrollados a partir de mediciones de temperatura y humedad en radiosondeos. Sin embargo, ya que los radiosondeos representan solo una resolución temporal y espacial limitada, el uso de imágenes satelitales ha cobrado vital importancia para el desarrollo de estos índices.

Un indicador de inestabilidad atmosférica es la presencia de cimbras en la nube convectiva (over shooting convective cloud tops, OTs), de aquí en adelante denominada OTs, las cuales indican la presencia de una tormenta convectiva profunda capaz de producir condiciones climáticas peligrosas tales como turbulencias con impacto en la aviación, relámpagos frecuentes, lluvias intensas, granizo, vientos dañinos y tornados (Bedka et al., 2010; Mikus y Strelec, 2012). Varios estudios se han realizado para relacionar ciertas medidas de inestabilidad tomadas desde radiosondeos e imágenes de satélite con la presencia de clima severo, algunas de ellas basadas en la detección de OTs a partir de imágenes de satélite, redes neuronales, aprendizaje automático, entre otros (Lee et al., 2021; Wang et al., 2021; Ai et al., 2016; Pinto Da Silva et al., 2016; Bedka et al., 2010).

Como parte de los objetivos del presente proyecto está desarrollar una técnica de detección de indicadores de inestabilidad atmosférica basada en el uso de imágenes del satélite GOES-16, con la finalidad de detectar tormentas convectivas profundas. Como producto de esta actividad se producirán mapas en tiempo real indicando aquellas zonas de inestabilidad para las zonas metropolitanas de Guadalajara, Monterrey y el Valle de México. Estas zonas de inestabilidad serán además presentadas en conjunción con la ocurrencia de rayos en las tres zonas metropolitanas a partir de GLM (Geostationary Lightning Mapper).

### 4.2 Antecedentes y metodología

Como ya se mencionó, un indicador de inestabilidad atmosférica es la presencia de cimbras en la nube convectiva (over shooting convective cloud tops, OTs). La cimbra de nube convectiva (OT) se define por la Sociedad Meteorológica Americana (AMS por sus siglas en inglés) como una protuberancia en forma de domo sobre un yunque de cumulonimbus, que representa la intrusión de una corriente ascendente a través de su nivel de equilibrio" (Glickman 2000). Las OTs indican la presencia de una tormenta convectiva profunda con una corriente ascendente de fuerza suficiente para penetrar a través de la tropopausa y en la estratosfera inferior (Bedka et al., 2010). Las tormentas con OT con frecuencia

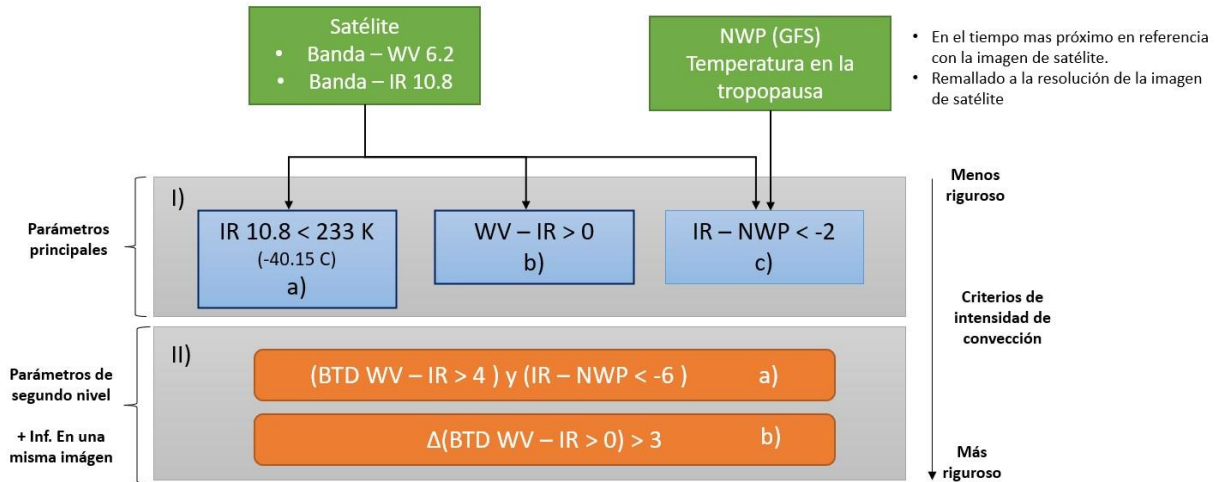


producen lluvias intensas, vientos dañinos, granizo grande y tornados, por lo que su detección es importante y un importante indicador de inestabilidad atmosférica.

Bedka et al. (2010), propuso un método de detección de OTs durante el día y la noche, llamado Infrared window (IRW)-texture que utiliza una combinación de 1) gradientes de temperatura de brillantes en una ventana de canal infrarrojo, 2) pronósticos de temperatura de la tropopausa a partir de un modelo numérico de la atmosfera y 3) criterios de definición del tamaño del OT y temperatura de brillantes a partir del análisis de 450 tormentas. Para esto, utilizaron imágenes del satélite GOES-12 y pronósticos del modelo GFS (Global Forecasting System) obteniendo resultados satisfactorios en la detección de OTs.

El trabajo de Bedka et al., (2010) ha sido utilizado como referencia y método de detección en múltiples estudios. Mikus y Strelec, (2012) realizaron una detección automática de OTs y de su conexión con clima severo en tierra basada en imágenes del satélite Meteosat Second Generation (MSG) Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager (SEVIRI). En su estudio compararon 4 métodos de detección basados en la información de vapor de agua (canal de 6.2  $\mu\text{m}$ ), ozono (canal de 9.7  $\mu\text{m}$ ) y dióxido de carbono (canal de 13.4  $\mu\text{m}$ ) en la forma de diferencias en la temperatura de brillantes. La validación se realizó utilizando imágenes de satélite de alta resolución. De los cuatro métodos probados, el mejor rendimiento lo encontraron en combinación de diferencias de temperatura de brillantes de 6.2 a 10.8 y de 9.7 a 10.8  $\mu\text{m}$ , que se correlacionan con las imágenes de HRV en el 80% de los casos. Otros métodos para detección de OTs han sido desarrollados con base en aprendizaje automático (Lee et al., 2021; Wang et al., 2021), sin embargo, aquellos métodos basados en los gradientes de temperatura de brillantes son los más utilizados.

De la revisión bibliográfica, destaca el trabajo realizado por Pinto Da Silva et al., (2016) por su practicidad y aplicación en tiempo real. En este trabajo, la humedad y la inestabilidad, en conjunto con un mecanismo de disparo, son consideradas las principales claves de iniciación y evolución de las tormentas de convección profunda; los datos de satélite pueden proporcionar mediciones indirectas de ambos factores sobre un área amplia y en cortos periodos de tiempo. Es así que Pinto Da Silva et al., (2016) desarrollan un método para la detección de la iniciación y evolución de tormentas de convección profunda a través del uso combinado de técnicas de estimación de convección basadas en satélites, lo cual le proporciona una capacidad de detección multi capa para evaluar mejor la detección de convección severa. Para ello, utilizan el canal infrarrojo de 10.8  $\mu\text{m}$  (MSN IR 10.8) y vapor de agua de 6.2  $\mu\text{m}$  (WV 6.2  $\mu\text{m}$ ) de Meteosat segunda generación (MSG) junto con la temperatura de la tropopausa proporcionada por el modelo GFS, lo cual es muy similar a la técnica de detección IRW-texture desarrollada por Bedka et al., (2010). Las bandas de satélite y los campos de modelo numérico de la atmosfera se manipulan y combinan en cinco parámetros, divididos en dos niveles, con la finalidad de identificar mejor las regiones de convección profunda. El esquema mencionado se muestra esquemáticamente en la Figura 4.1, en donde cada paso se representa por un recuadro en diferente color: ingesta de información (verde), parámetros primarios (azul) y parámetros secundarios (rojo).



**Figura 4.1** Algoritmo de estratificación para detección de convección profunda de Pinto DaSilva et al., 2016.

A grandes rasgos, los pasos mostrados en la Figura 4.1 pueden resumirse como sigue:

1) La primera tarea consiste en la selección de píxeles considerados como críticos con base en un umbral de temperatura de brillantez. Para este caso, el umbral seleccionado es de 233 K, de manera que los píxeles con temperaturas IR 10.8  $\mu$ m más calientes que 233 K (-40.15 C) son excluidos y los más fríos son considerados como pertenecientes al primer parámetro (Ia).

2) Basado en otra técnica de detección de convección húmeda profunda. Se basa en diferencias entre las temperaturas de brillantes (BTD) entre los canales de vapor de agua (WV) e infrarrojo (IR), debido a que a medida que el tope de la nube alcanza la tropopausa, bloquea la radiación de esta última que intenta escapar al espacio. La diferencia real entre la temperatura de brillantes depende de la altura real del tope de nube y la cantidad de WV estratosférico. Valores positivos de esta diferencia son consideradas como convección profunda, por lo tanto, píxeles con valores positivos de la diferencia (WV-IR) son considerados como parte del segundo parámetro (Ib).

3) Para el tercer parámetro, se hace una nueva comparación de las temperaturas basada en la técnica de textura-IR propuesta por Bedka et al., (2010). Esta técnica compara las temperaturas del canal IR 10.8  $\mu$ m con la temperatura de la tropopausa obtenida de un modelo numérico. Para la aplicación descrita en el trabajo de DaSilva, solo los píxeles con temperaturas IR al menos 2 K más fríos que la tropopausa son considerados como parte del tercer parámetro (Ic).

Los tres primeros parámetros son considerados como principales, y los siguientes dos como de segundo nivel, basados en tendencias de temperatura y valores críticos, con la finalidad de proporcionar más información en una misma imagen.



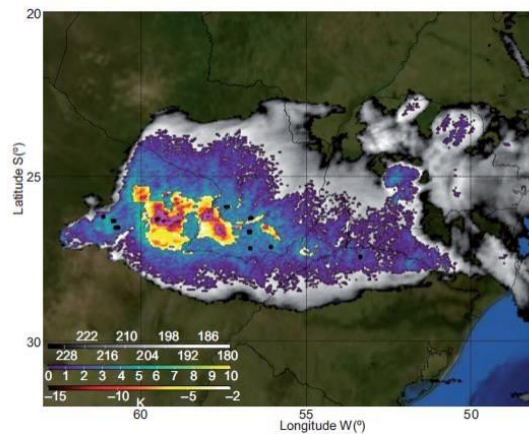
4) El primer parámetro de los de segundo nivel está delimitado por los pixeles que muestran una alta actividad convectiva estimados por las técnicas BTM WV-IR e IR-NWP. En este paso se seleccionan los pixeles con valores positivos de BTM WV-IR mayores a 4 K simultáneamente con pixeles donde IR es al menos 6 K más frío que la temperatura de la tropopausa.

5) El último parámetro es una comparación entre los valores de WV-IR de la imagen anterior y aquellos en la imagen previa. De manera que se marcan los pixeles que ya tienen valores positivos de WV-IR, y en la imagen más nueva la BTM es al menos 3 K más caliente, lo que indicaría un cambio notable en tan solo 15 minutos.

Los parámetros antes mencionados pueden combinarse en una sola imagen con el rango de colores mostrados en la Figura 4.2, y, además, pueden combinarse a través de un solo índice para determinar la intensidad de la tormenta.

$$Intensidad = (IR + [\{IW - NWP\} - \{WV - IR\}]) \quad (1)$$

Gris	Ia	Conv. profunda
Azul a verde	Ib	Intrusión de humedad en las capas sup. durante la ocurrencia de C.S.
Amarillo a anaranjado	Ic	Fuertes corrientes ascendentes
Morado	Ila	Región con la mayor actividad convectiva
Negro	Ilb	Actividad convectiva que se intensifica rápidamente



**Figura 4.2** Ejemplificación de muestra de parámetros en una sola imagen. Tomado de Pinto DaSilva et al., (2016)

La validación de esta metodología se llevó a cabo utilizando datos de radar y de rayos, obteniendo resultados satisfactorios. Por lo tanto, será utilizada para los fines del presente trabajo.

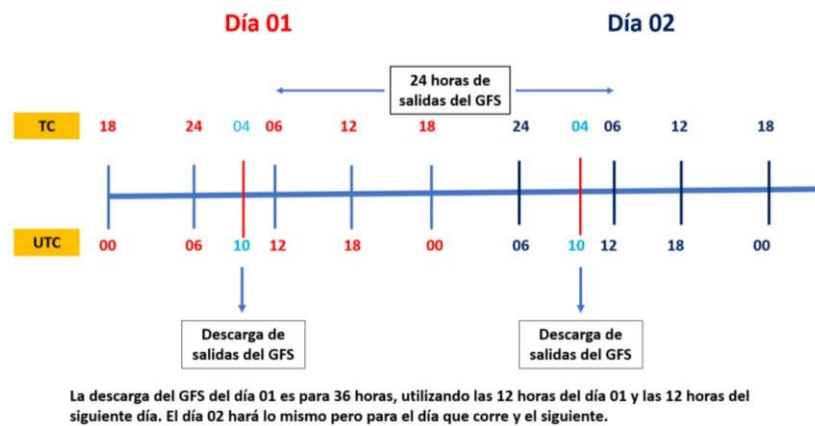
### 4.3 Aplicación a la zona de estudio

Para la aplicación de la metodología descrita con anterioridad, se consideraron los datos de entrada mostrados en la Tabla 4.1. Adicionalmente, se incluyó la ocurrencia de rayos en los tres dominios, cuya fuente también se presenta en dicha tabla.

**Tabla 4.1** Datos de entrada para implementación de la metodología en la zona de estudio.

Variable	Fuente	Descripción	Escala
WV	Banda 08 (6.2 $\mu\text{m}$ )	Upper-Level Tropospheric Water Vapor band	Temporal: 10 min Espacial: 2 km Unidades: K
IR	Banda 13 (10.3 $\mu\text{m}$ )	"Clean" IR Longwave Window Band	
TMP_PO_L7_GLL0	Modelo GFS	Temperatura de la tropopausa	Temporal: 1 hora Espacial: Unidades: K
Lat, Lon	GLM (Geostationary Lightning Mapper)	Ubicación de ocurrencia de rayos	Temporal: 2 segundos

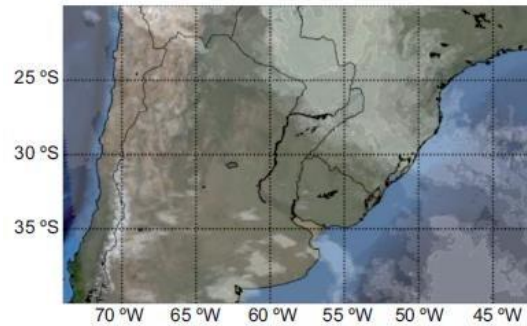
En el caso de la temperatura de la tropopausa, esta fue remallada a la resolución de las imágenes de satélite. Y se utilizaron los pronósticos de las primeras 36 horas, emitidas a las 00 y 06 UTC. En la siguiente figura se muestra un esquema que representa el uso de los pronósticos obtenidos del modelo GFS.



**Figura 4.3** Esquema de utilización de salidas de GFS.

#### 4.4 Ajuste de parámetros a escala local

Es importante mencionar que la metodología de Pinto DaSilva et al., (2016), descrita en el apartado anterior, fue implementada para cubrir una zona extensa en Sudamérica (ver Figura 4.4).



**Figura 4.4** Área de interés considerada en el estudio de Pinto DaSilva et al., (2016).

Por lo anterior, para que dicha metodología pueda ser aplicada exitosamente a la zona de estudio del presente trabajo, los umbrales definidos para la identificación de los cinco diferentes parámetros deben ajustarse a las condiciones prevalecientes en la zona de estudio, en cuanto a escala y condiciones atmosféricas de acuerdo con la latitud en la que se encuentran. Es así que, como parte del presente estudio, se realizó un ajusté de dichos umbrales para hacer la metodología aplicable a procesos de menor escala. La selección de los nuevos umbrales se realizó considerando los siguientes casos de estudio en el Valle de México.

### 1) Evento del 24-25 de septiembre de 2022.

Autoridades de Protección Civil de la Ciudad de México activaron la Alerta Naranja por persistencia de lluvias fuertes en las demarcaciones de Gustavo A. Madero, Iztacalco, Iztapalapa y Venustiano Carranza. La Alerta Amarilla se mantiene en las demarcaciones de Álvaro Obregón, Azcapotzalco, Benito Juárez, Cuauhtémoc, Cuajimalpa, Coyoacán, Magdalena Contreras, Miguel Hidalgo, Milpa Alta, Tláhuac, Tlalpan y Xochimilco.



**Figura 4.5** Nota periodística correspondiente al evento del 24-25 de septiembre, tomada de <https://www.publimetro.com.mx/noticias/2022/09/25/lluvias-cdmx-afectaciones-por-tormenta-electrica/>

**2) Evento del 05-06 de octubre de 2022.**

Se activa la Alerta Naranja debido a la persistencia de nubosidad asociada a lluvia fuerte en las demarcaciones de Coyoacán, Iztapalapa, Tlalpan y Venustiano Carranza. Se pronostica lluvia de 30 a 49 milímetros (mm) entre las 20:30 y las 22:00 horas.

Mientras que la Alerta Amarilla se mantiene en las demarcaciones de Álvaro Obregón, Azcapotzalco, Benito Juárez, Cuajimalpa, Cuauhtémoc, Gustavo A. Madero, Iztacalco, Miguel Hidalgo, Tláhuac y Xochimilco. Para estas alcaldías se prevé lluvia de entre 15 y 29 mm.

**Cancelan partido en el estadio Azteca por tormenta eléctrica**

OCT 5, 2022



**Figura 4.6** Nota periodística correspondiente al evento del 05-06 de octubre, tomada de <https://nrcomunicaciones.com/cancelan-partido-en-el-estadio-azteca-por-tormenta-electrica/>

Considerando ambos eventos, se analizó el rango de valores para cada una de las variables involucradas en la metodología. En la Figura 4.1 y Figura 4.2 se muestran dichos valores para ambos casos de estudio, las líneas en color rojo indican los umbrales definidos originalmente por la metodología de DaSilva para los parámetros principales (Ia, Ib e Ic). Como puede observarse, los umbrales se encuentran lejos del rango de valores en la zona de estudio, por lo que, al utilizarlos, las zonas de inestabilidad identificadas serán menores o nulas. Por lo anterior, se realizó un total de 14 pruebas con los valores mostrados en la Tabla 4.2, con la finalidad de detectar los valores óptimos para cada umbral.

**Tabla 4.2** Tabla de pruebas para definición de umbrales. En color verde se resalta la prueba con los mejores resultados.

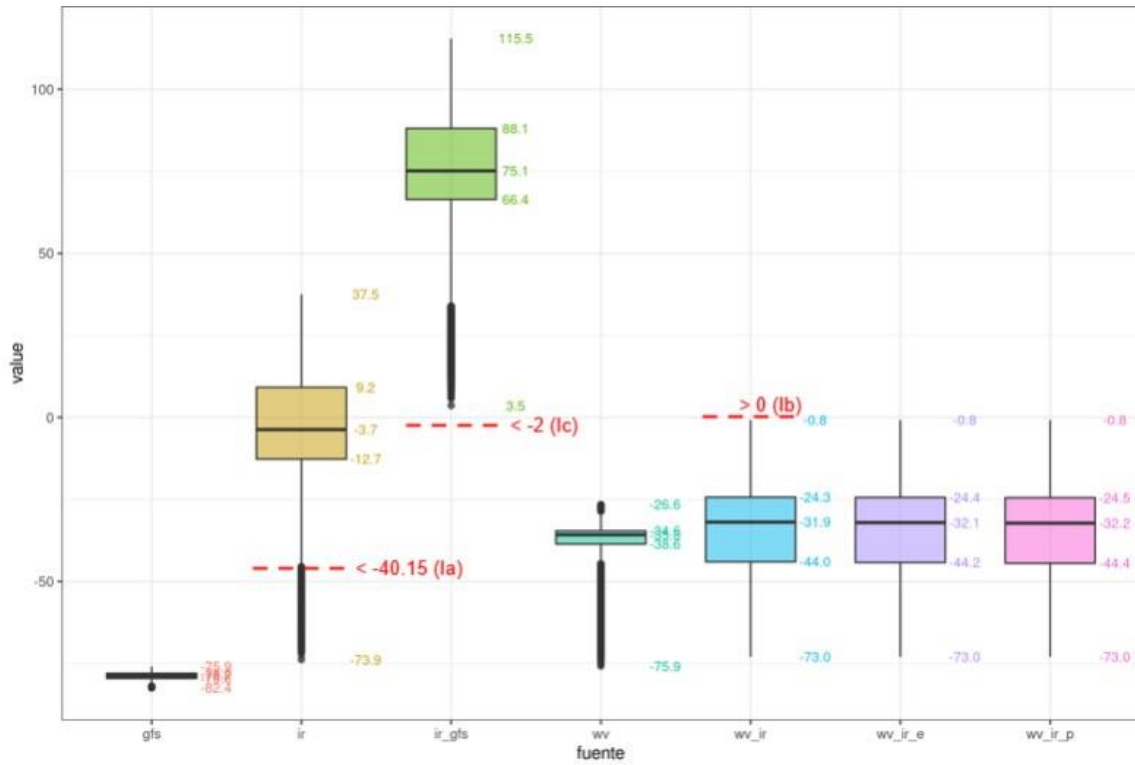
Prueba ID	Ia. IR < Trop.	Ib. WV - IR	Ic. IR - GFS	Ila. (BTD WV - IR > X) y (IR - NWP < Y)	Iib. $\Delta(BTD WV - IR > X) > Y$
0	233 K (-40.15 C)	> 0	< -2	X = 4, Y = -6	X = 0, Y = 3



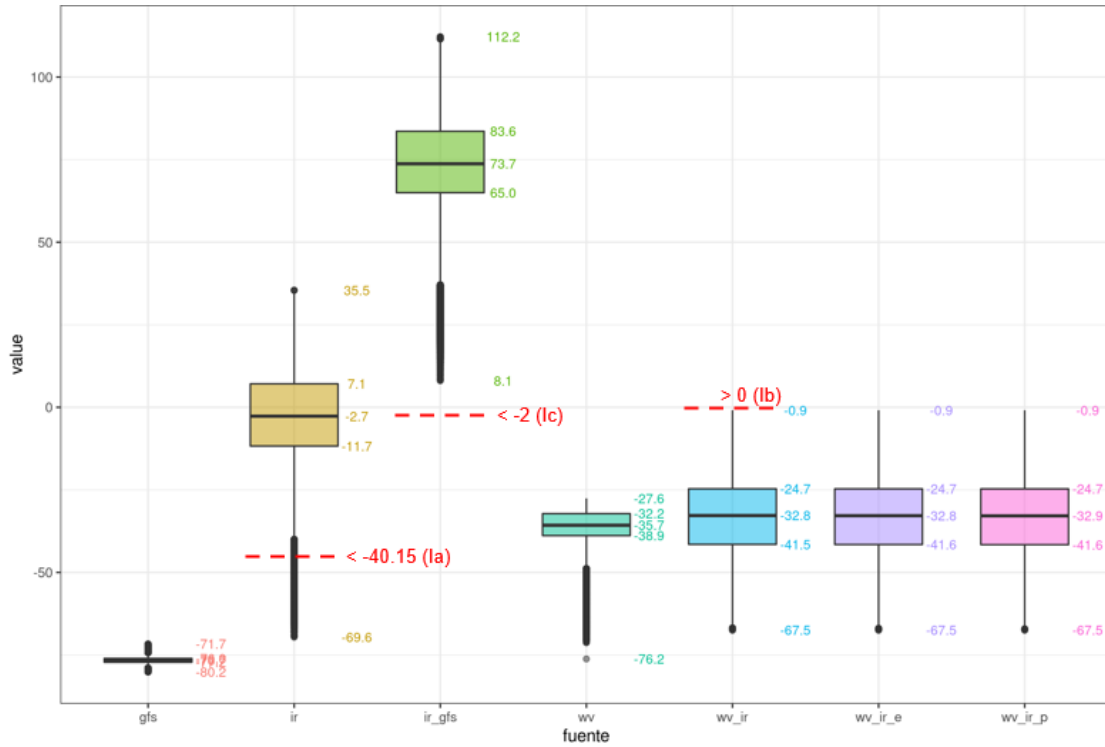
Prueba ID	Ia. IR < Trop.	Ib. WV - IR	Ic. IR - GFS	Ila. (BTD WV - IR > X) y (IR - NWP < Y)	Iib. $\Delta(\text{BTD WV} - \text{IR} > X) > Y$
1	241 (-32.15)	> - 2	< 5	X = 0, Y = 1	X = -2, Y = 0
2	241 (-32.15)	> -5	< 8	X = -1, Y = 4	X = -5, Y = -2
3	243 (-30.15)	> - 7	< 12	X = -3, Y = 8	X = -7, Y = -5
4	243 (-30.15)	> -9	< 16	X = -5, Y = 12	X = -9, Y = -6
5	252 (-21.15)	> - 12	< 18	X = -8, Y = 14	X = -12, Y = -9
6	255 (-18.15)	> -16	< 21	X = -12, Y = 17	X = -16, Y = -13
7	259 (-14.15)	> -20	< 25	X = -16, Y = 21	X = -20, Y = -17
8	261 (-12.15)	> -32	< 50	X = -28, Y = 46	X = -32, Y = -29
9	266 (-8.15)	> -38	< 66	X = -34, Y = 62	X = -38, Y = -35
10	270 (-3.15)	> -44	< 75	X = -40, Y = 71	X = -44, Y = -41
<b>11</b>	<b>243 (-30.15)</b>	<b>&gt; -9</b>	<b>&lt; 17</b>	<b>X = -5, Y = 13</b>	<b>X = -2, Y = 0</b>
12	248 (-25.15)	> -9	< 16	X = -5, Y = 12	X = -9, Y = -6
13	255 (-18.15)	> -9	< 21	X = -5, Y = 17	X = -9, Y = -6
14	255 (-18.15)	> - 12	<23	X = -8, Y =19	X = -12, Y = -9

Para poder evaluar la pertinencia de dichos umbrales, se consideró: 1) la coincidencia de las áreas con precipitación con aquellas resaltadas por la técnica WV-IR (parámetro Ib) y la técnica basada en IR-NWP (parámetro Ic), 2) la ocurrencia de rayos dentro de las áreas resaltadas por la técnica WV-IR (parámetro Ib) y con valores de temperatura IR bajos (parámetro Ia), 3) la coincidencia de parámetros y rayos con municipios afectados (Figura 4.3). Para el caso de la coincidencia con eventos de precipitación se utilizó información de diaria de CHIRPS. Se planea en un futuro incluir datos de NAM. Estos identificadores fueron identificados en el estudio de Pinto DaSilva et al., (2016).

En el caso de la ocurrencia de rayos, estos fueron seleccionados como aquellos acumulados en intervalos de 10 minutos, es decir, entre la emisión de las imágenes de satélite.



**Figura 4.1** Rango de valores para cada variable involucrada en el proceso, correspondientes al evento de 24-25 de septiembre de 2022.



**Figura 4.2** Rango de valores para cada variable involucrada en el proceso, correspondientes al evento de 05-06 de octubre de 2022.

**Precipitación**

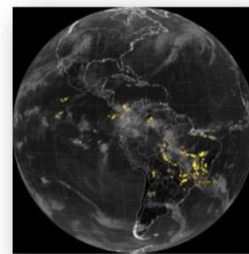
- ✓ Coincidencia de precipitación con áreas resaltadas por la técnica WV-IR (parámetro lb) y núcleos fuertes de precipitación resaltados por el parámetro IR-NWP (parámetro lc)

CHIRPS, NAM

**Rayos**

- ✓ Ocurrencia de rayos dentro de áreas resaltadas por la técnica WV-IR (parámetro lb) y con valores de temperatura IR bajos (parámetro la)

Producto de la segunda etapa  
**GLM**  
(Geostationary Lightning Mapper)  
Recorte a cada ZM



**Municipios afectados**

- ✓ Coincidencia de parámetros y rayos con municipios afectados

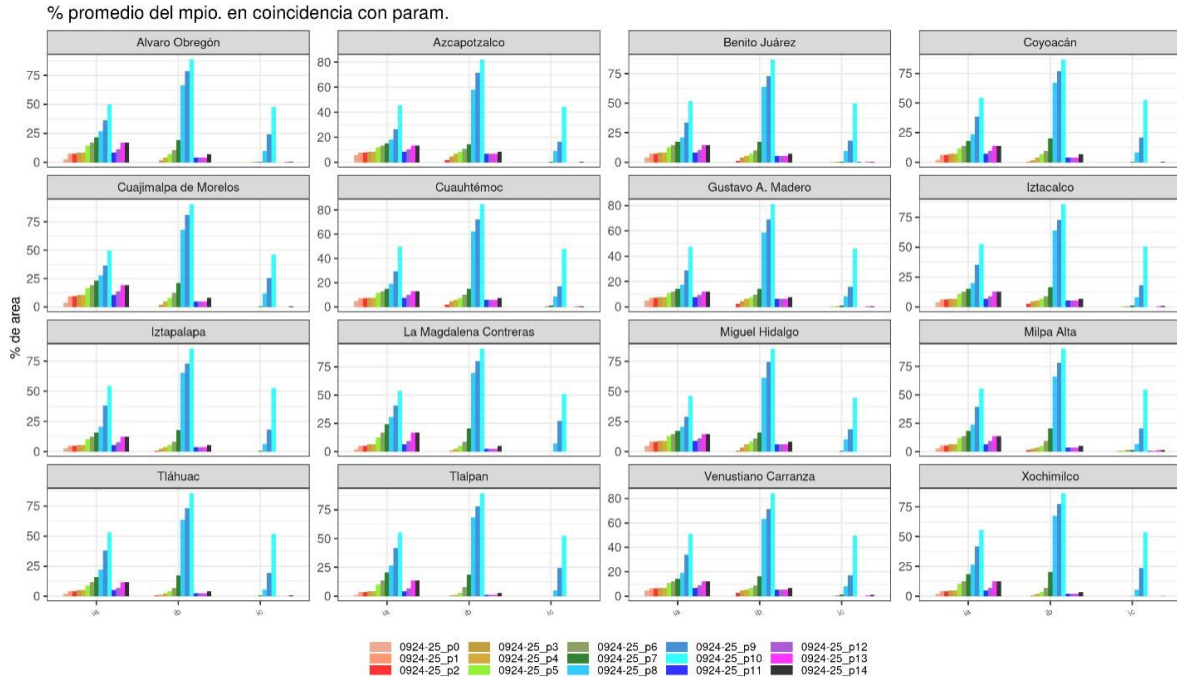
Según notas periódicas

**Figura 4.3** Esquema de evaluación y validación de parámetros.

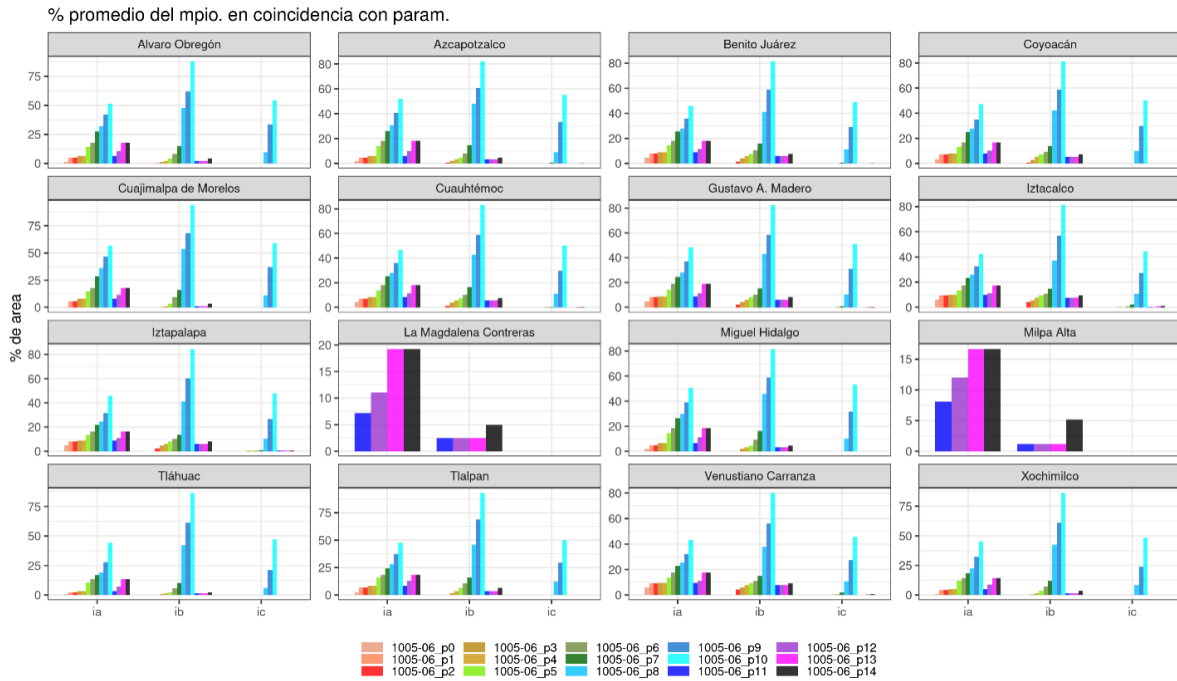
## 4.5 Resultados

En este apartado se muestran los resultados obtenidos al probar con las diferentes pruebas mostradas en la Tabla 4.2. Estos resultados están agrupados en: 1) porcentaje promedio del área de municipio que coincide con el área resaltada por cada uno de los parámetros principales (Figura 4.4 y Figura 4.5), 2) la cantidad de píxeles (ocurrencias) en los que coinciden rayos, parámetros principales y municipios afectados (Figura 4.6 y Figura 4.7) y 3) el porcentaje total de área de precipitación identificada por CHIRPS que a su vez fue identificada por cada uno de los parámetros principales (Figura 4.8); todos, para los eventos de septiembre y octubre mencionados con anterioridad en el apartado 4.4. Como se puede observar, es notorio como en todos los casos las pruebas 8 a 10 presentan los porcentajes y ocurrencias más altos, sin embargo, esto no asegura que el umbral definido tenga el mejor desempeño. Las pruebas 5 a 7 y 14 muestran valores ligeramente mayores que el resto. Para poder ejemplificar cómo es que valores superiores no aseguran un mejor desempeño, se muestran los resultados espaciales de las pruebas 2, 10 y 11 en la Figura 4.9, Figura 4.10 y Figura 4.11, respectivamente. Como se puede observar, la prueba 2 cubre los municipios afectados en parte por los parámetros la e lb, sin embargo, el parámetro lc no está presente; por el contrario, la prueba 10 muestra que los parámetros principales cubren casi en su totalidad los municipios afectados, sin embargo, esto indica una sobreestimación, puesto que el dominio es cubierto casi en su totalidad. Por el contrario, la prueba 11 muestra un desempeño más acertado, en donde los parámetros principales cubren de manera aceptable los municipios más afectados, incluyendo además la ocurrencia de rayos. Esta prueba es una ligera variación de la prueba 4 y fue seleccionada como aquella con el mejor desempeño en base a su desempeño cuantitativo y cualitativo, al observar la correspondiente representación espacial. Como ejemplo de su buen desempeño, en la Figura 4.12 y Figura 4.13 se muestran los momentos en los que se presentaron las mayores afectaciones para cada evento. En el caso de la Figura 4.13, este corresponde a aquel tiempo en el que el partido fue cancelado debido a la ocurrencia de la tormenta eléctrica. En este caso, el municipio afectado (donde se encuentra el estadio azteca) está marcado con una cruz roja y los rayos son representados por los puntos en color azul. Como se observa en ambas figuras, los parámetros principales cubren de forma aceptable los municipios afectados, y al comparar la precipitación diaria de CHIRPS, con la cantidad de veces que un píxel fue resaltado por el parámetro lb a lo largo del día correspondiente, coincide de manera muy acertada con la distribución e intensidad de precipitación estimada por CHIRPS. Esto reafirma la selección de la prueba 11 como la mejor de entre las realizadas, misma que será implementada en tiempo real.

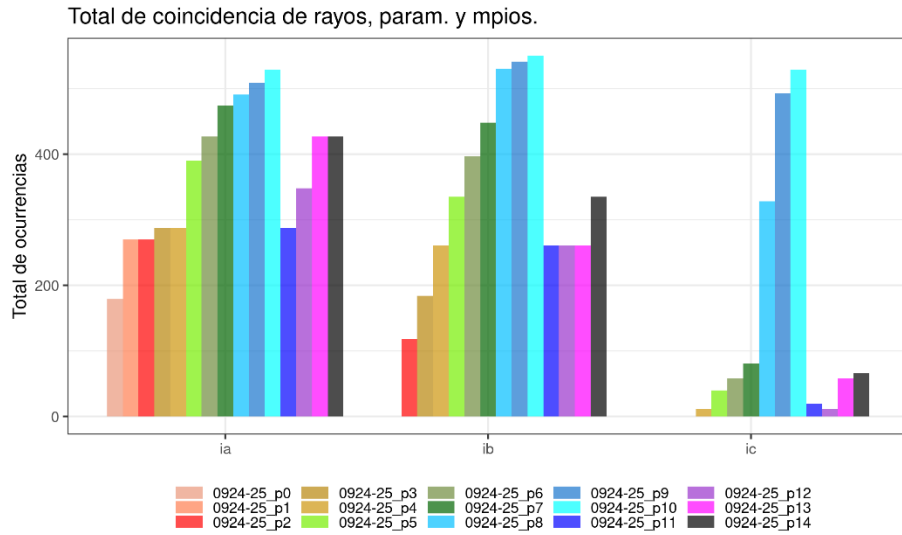




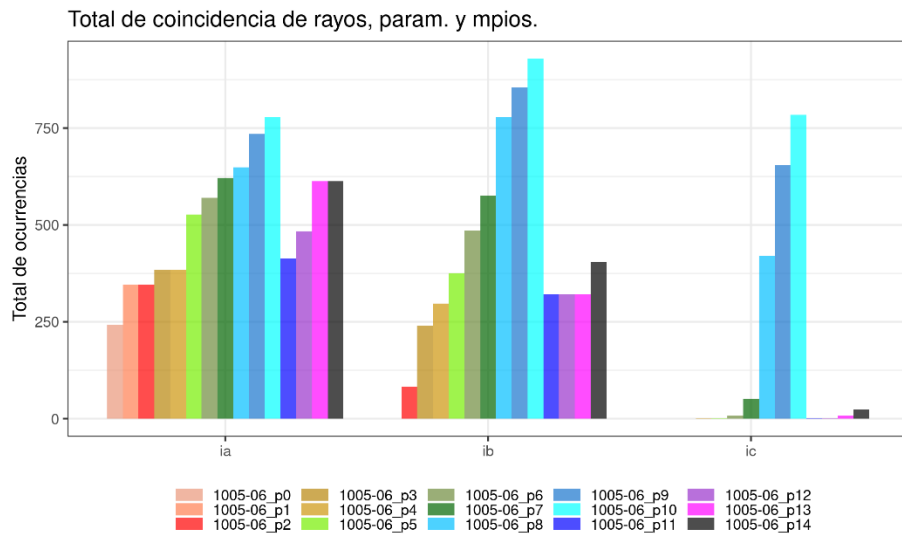
**Figura 4.4** Porcentaje promedio de área del municipio afectado que coincide con los parámetros principales para el evento del 24-25 de septiembre de 2022.



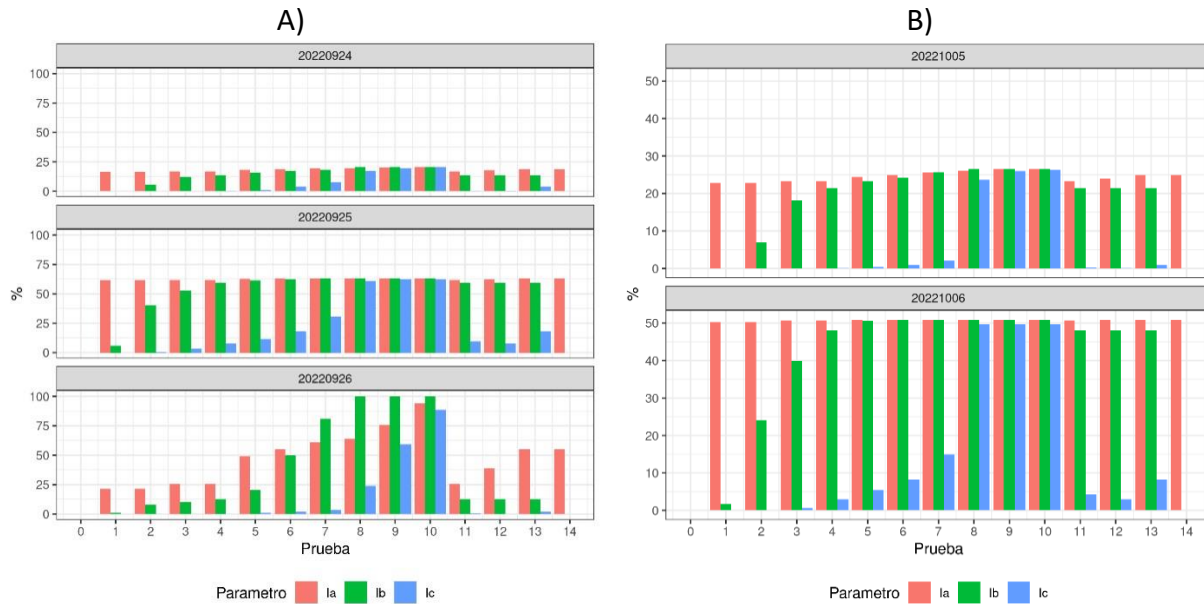
**Figura 4.5** Porcentaje promedio de área del municipio afectado que coincide con los parámetros principales para el evento del 05-06 de octubre de 2022.



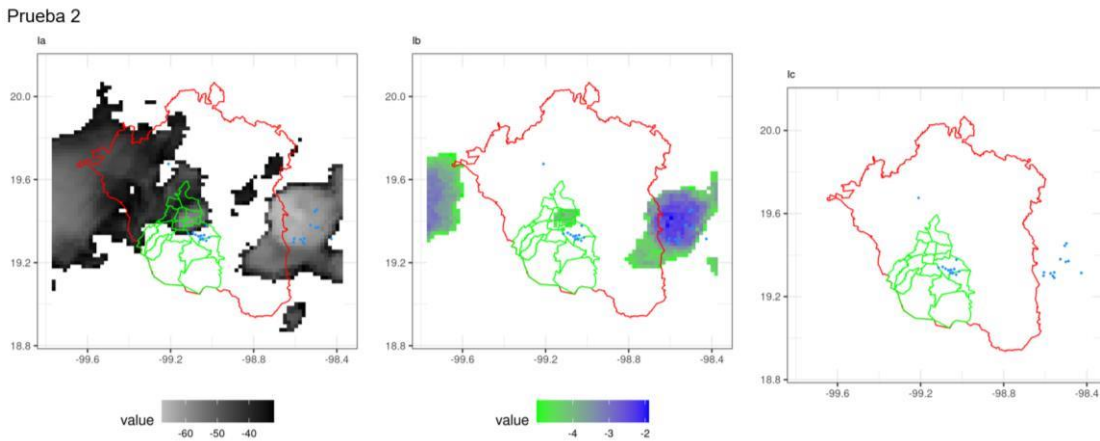
**Figura 4.6** Total de pixeles en los que coinciden rayos, parámetros y municipios afectados a lo largo de todo el evento del 24-25 de septiembre de 2022.



**Figura 4.7** Total de pixeles en los que coinciden rayos, parámetros y municipios afectados a lo largo de todo el evento del 05-06 de octubre de 2022.

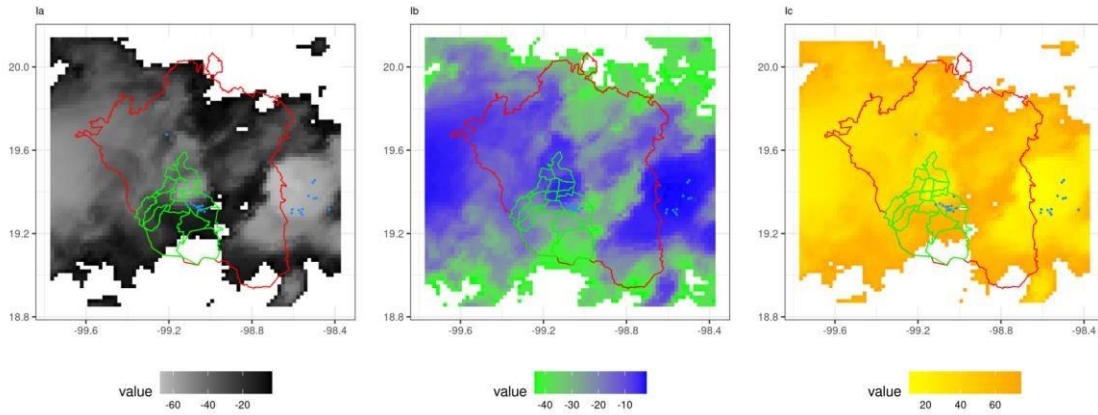


**Figura 4.8** Porcentaje total de área de precipitación identificada por CHIRPS que a su vez fue identificada por cada uno de los parámetros principales, para el evento de A) 24-25 de septiembre y B) 05-06 de octubre de 2022.



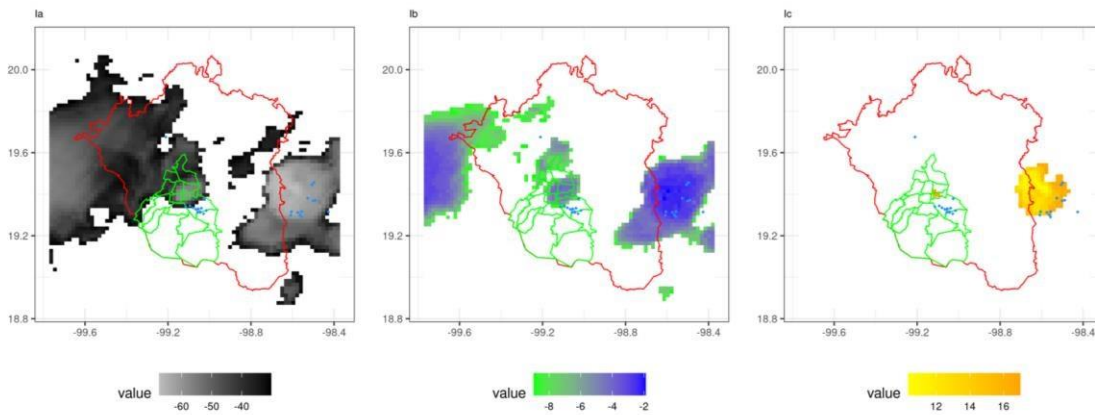
**Figura 4.9** Representación espacial de los resultados obtenidos para la prueba número 2 para el 2022-09-24 23:30:20. Municipios afectados representados por contorno verde.

Prueba 10



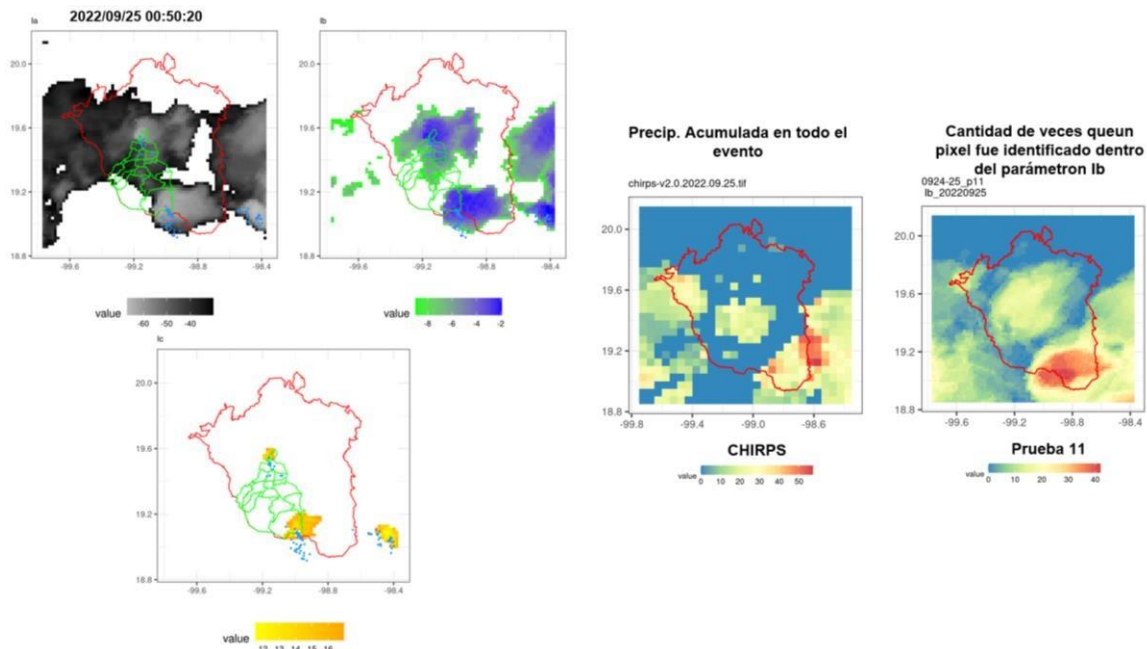
**Figura 4.10** Representación espacial de los resultados obtenidos para la prueba número 10 para el 2022-09-24 23:30:20. Municipios afectados representados por contorno verde.

Prueba 11

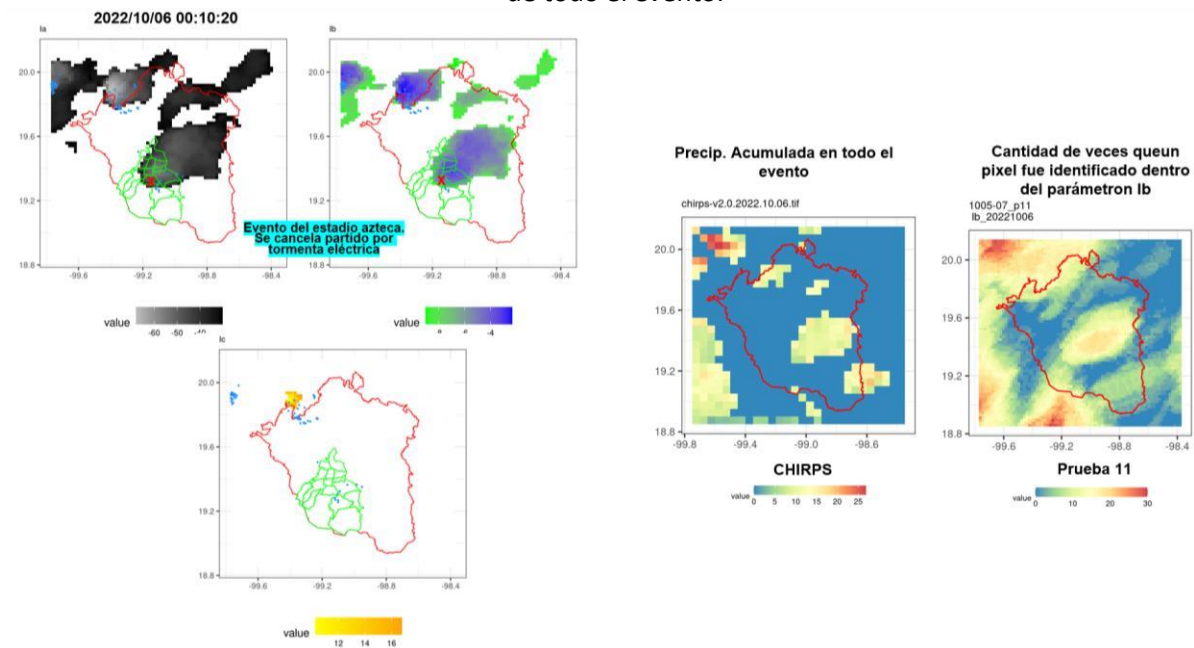


**Figura 4.11** Representación espacial de los resultados obtenidos para la prueba número 11 para el 2022-09-24 23:30:20. Municipios afectados representados por contorno verde.





**Figura 4.12** Ejemplo de desempeño de la prueba 11 para el 2022/09/25 00:50:20 en comparación con la precipitación estimada por CHIRPS y la cantidad de ocurrencias identificadas dentro del parámetro Ib a lo largo de todo el evento.



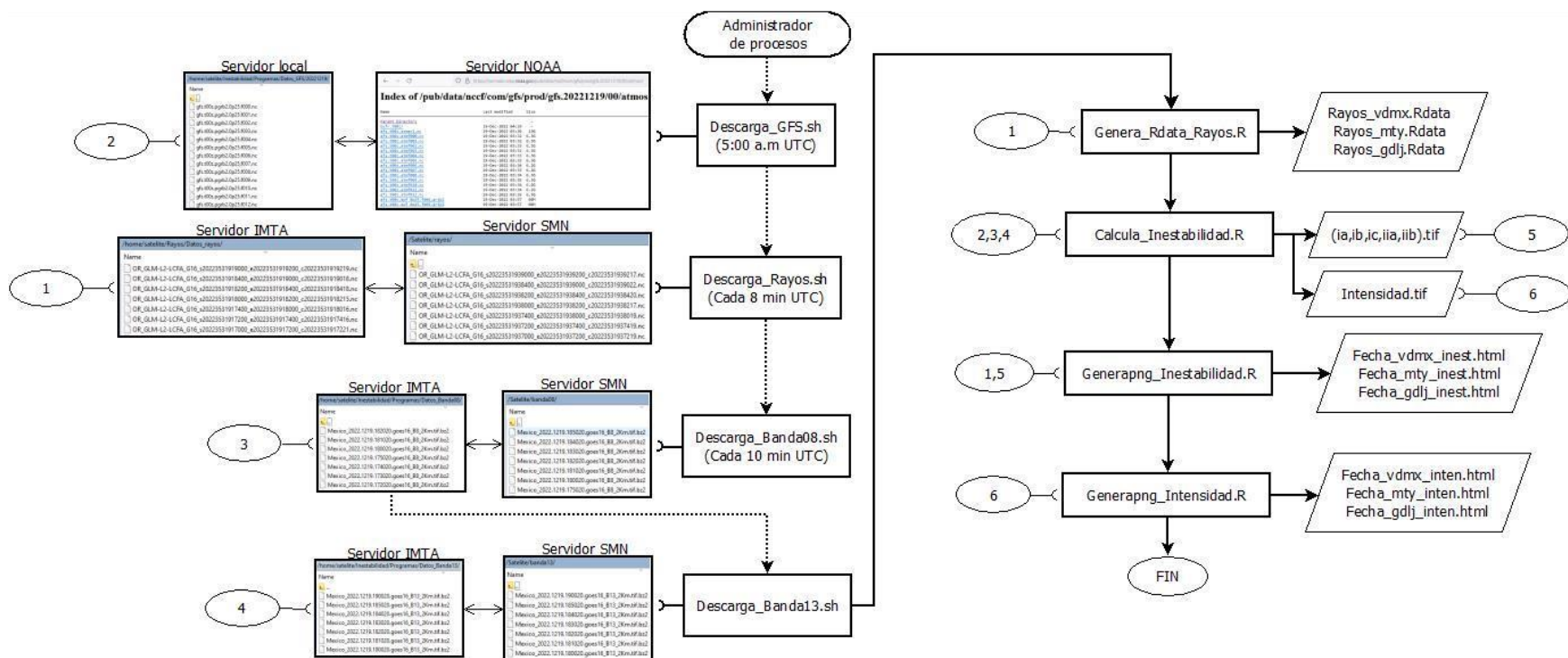
**Figura 4.13** Ejemplo de desempeño de la prueba 11 para el 2022/10/06 00:10:20 en comparación con la precipitación estimada por CHIRPS y la cantidad de ocurrencias identificadas dentro del parámetro Ib a lo largo de todo el evento.

## 4.6 Implementación en tiempo real

De acuerdo a lo planteado en el punto 4.2, se implementó el cálculo de la inestabilidad, intensidad y rayos de manera automatizada para las tres zonas metropolitanas; el procedimiento se muestra en la Figura 4.1. **Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

### 4.6.1 Descarga datos del modelo GFS

Los datos GFS son descargados de la página oficial de la NOAA (Figura 4.15) Operational Model Archive and Distribution System (<https://nomads.ncep.noaa.gov/>) a una resolución de 0.25 de grado en formato netcdf; el tiempo a usar es el t00Z en sus primeras 36 horas. El método de descarga a emplear es el ftp, ya que permite mediante una línea de comando (Figura 4.16) seleccionar solo las variables a usar así como seleccionar región geográfica específica, haciendo que la descarga de archivos sea más rápida ya que su peso es de menor tamaño.



**Figura 4.14** Diagrama de flujo para la automatización del proceso de inestabilidad, intensidad y rayos en las tres zonas metropolitanas.

← → ↻ <https://nomads.ncep.noaa.gov/pub/data/nccf/com/gfs/prod/gfs.20221219/00/atmos/>

## Index of /pub/data/nccf/com/gfs/prod/gfs.20221219/00/atmos

Name	Last modified	Size
<a href="#">Parent Directory</a>		-
<a href="#">bufr.t00z/</a>	19-Dec-2022 04:19	-
<a href="#">gfs.t00z.atman1.nc</a>	19-Dec-2022 03:36	13G
<a href="#">gfs.t00z.atmf000.nc</a>	19-Dec-2022 03:32	6.3G
<a href="#">gfs.t00z.atmf001.nc</a>	19-Dec-2022 03:32	6.3G
<a href="#">gfs.t00z.atmf002.nc</a>	19-Dec-2022 03:33	6.3G
<a href="#">gfs.t00z.atmf003.nc</a>	19-Dec-2022 03:32	6.3G
<a href="#">gfs.t00z.atmf004.nc</a>	19-Dec-2022 03:33	6.3G
<a href="#">gfs.t00z.atmf005.nc</a>	19-Dec-2022 03:33	6.3G
<a href="#">gfs.t00z.atmf006.nc</a>	19-Dec-2022 03:34	6.2G
<a href="#">gfs.t00z.atmf007.nc</a>	19-Dec-2022 03:33	6.3G
<a href="#">gfs.t00z.atmf008.nc</a>	19-Dec-2022 03:34	6.3G
<a href="#">gfs.t00z.atmf009.nc</a>	19-Dec-2022 03:35	6.3G
<a href="#">gfs.t00z.atmf010.nc</a>	19-Dec-2022 03:34	6.2G
<a href="#">gfs.t00z.atmf011.nc</a>	19-Dec-2022 03:34	6.2G
<a href="#">gfs.t00z.atmf012.nc</a>	19-Dec-2022 03:35	6.3G
<a href="#">gfs.t00z.awf_0p25.f006.grib2</a>	19-Dec-2022 03:57	60M
<a href="#">gfs.t00z.awf_0p25.f009.grib2</a>	19-Dec-2022 03:57	60M

Figura 4.15 Página de descarga de datos GFS.

"https://nomads.ncep.noaa.gov/cgi-bin/filter\_gfs\_0p25\_1hr.pl?file=gfs.t"\$t\$z.z.pgrb2.0p25.f"\$f"&lev\_tropopause=on&var\_TMP=on&subregion=&leftlon=240&rightlon=280&toplat=33.5&bottomlat=13&dir=%2Fgfs."\$fecha"%2F00%2Fatmos"

Figura 4.16 Comando para la descarga de datos GFS, por variable y región geográfica.

El programa que realiza la descarga se denomina Descarga\_GFS.sh y está programado para ejecutarse todos los días a las cinco de la mañana en horario UTC, la descarga se guarda en el directorio local /home/satélite/Inestabilidad/Programas/Datos\_GFS/carpetax, donde carpetax se sustituye por el año, mes y día que se realice la descarga; en el gráfico (Figura 4.17) se encuentra la fecha 20221219 y dentro de esta se encontraran los 36 tiempos de descarga.

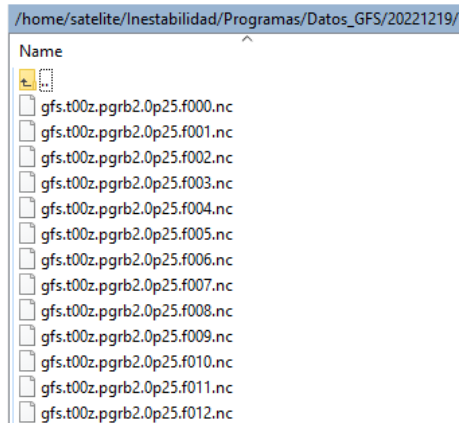
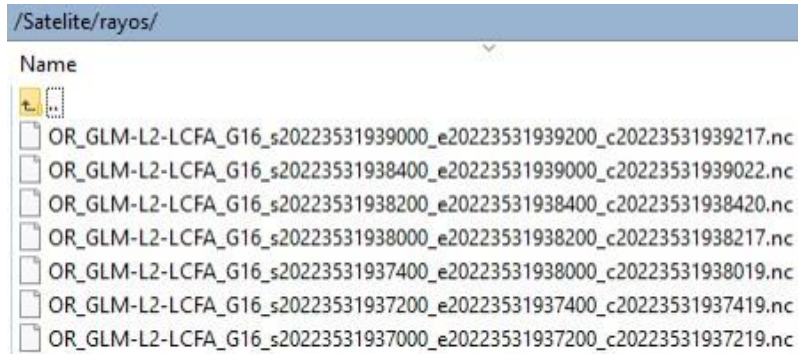


Figura 4.17 Datos GFS descargados en el servidor local.



## 4.6.2 Descarga datos de rayos

El Servicio Meteorológico Nacional (SMN) dispuso de manera interna en su servidor ftp nacional (host: 200.4.8.36) una carpeta llamada rayos en el directorio Satelite (Figura 4.18), en la cual, se almacena diariamente la información en periodos de 1 minuto en formato de archivo netcdf; cabe mencionar que el SMN recorta geográficamente solo para la república mexicana estos archivos.



**Figura 4.18** Servidor de la información de rayos en el SMN.

Para llevar a cabo la descarga de información del sitio ftp mediante un esquema de consulta, donde se obtengan los últimos archivos actualizados de los datos de rayos, se utilizó el programa lftp de Linux. El lftp es un programa de transferencia de archivos que nos permite realizar sofisticadas conexiones de varios tipos como ftp, ftps, http, https, hftp, fish, sftp y file entre servidores. Para utilizar un método u otro, deberemos especificarlo al realizar la conexión.

Si utilizamos lftp junto con la orden `mirror`, podemos transferir-actualizar todo o parte del contenido del servidor, de una sola vez y con un único comando `local`. O bien, podemos realizar el paso inverso, es decir, volcar el contenido completo de local al servidor de internet (con el modificador `-R`). Para llevar a cabo la tarea de descarga de manera automática se creó un script en shell bash llamado `Descarga_Rayos.sh` (Figura 4.19) que se ejecuta cada ocho minutos en el programador de tareas de linux; los archivos se almacenan en el servidor local interno en la carpeta `/home/Satelite/Rayos/Datos_rayos` (Figura 4.20).

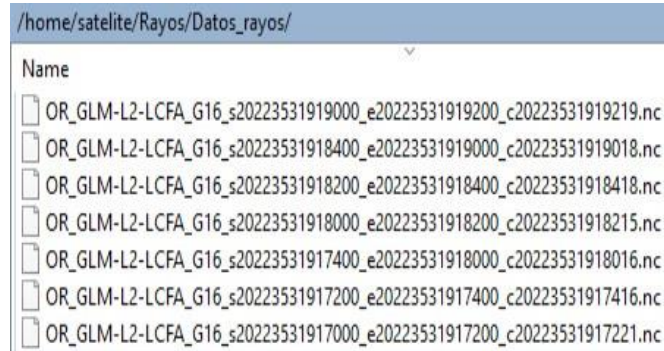
```
#!/bin/bash
cd ~/Rayos
#source ./Up_vars.sh
USER="██████████"
PASS="██████████"
HOST="200.4.8.36"
LOG="/home/satelite/Rayos/Datos_rayos/Rayos.log"

echo Sync started ...

LCD="/~/Rayos/Datos_rayos" #Your local directory
RCD="/Satelite/rayos" #FTP server directory

lftp -c "
set ssl:verify-certificate no
set sftp:auto-confirm yes
open $HOST
user $USER $PASS
mirror -c -v -i "\*.nc" $RCD $LCD
bye
" >(host: 200.4.8.36) █ $LOG
```

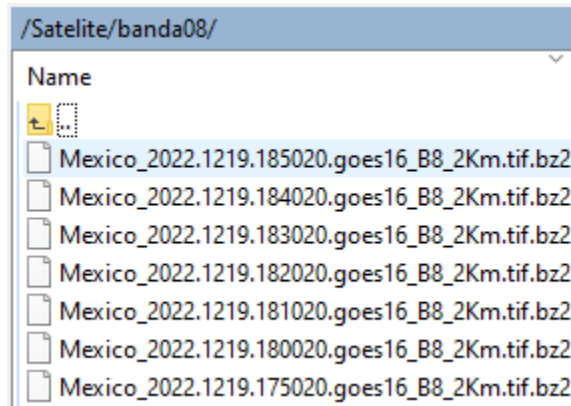
**Figura 4.19** Archivo de descarga de archivos de rayos.



**Figura 4.20** Servidor local de datos de rayos.

### 4.6.3 Descarga datos de satélite (Banda 08)

El Servicio Meteorológico Nacional (SMN) dispuso de manera interna en su servidor ftp nacional (host: 200.4.8.36) una carpeta llamada banda08 en el directorio Satelite (Figura 4.21), en la cual, se almacena diariamente la información en periodos de 10 minutos en formato de tif; cabe mencionar que el SMN recorta geográficamente solo para la república mexicana estos archivos.



**Figura 4.21** Descarga del sitio ftp de la CGSMN la información de la banda 08 del satélite GOES-16.

Para llevar a cabo la descarga de información del sitio ftp mediante un esquema de consulta, donde se obtengan los últimos archivos actualizados de la banda 08, se utilizó el programa lftp de Linux. Para llevar a cabo la tarea de descarga de manera automática se creó un script en shell bash llamado Descarga\_Banda08.sh (Figura 4.22) que se ejecuta cada diez minutos en el programador de tareas de

linux; los archivos se almacenan en el servidor local interno en la carpeta /home/Satelite/Inestabilidad/Programas/Datos\_Banda08 (Figura 4.23).

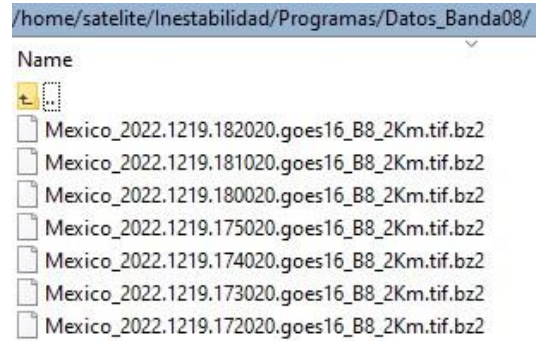
```
#!/bin/bash
cd ~/Inestabilidad/Programas
USER="██████████"
PASS="██████████"
HOST="200.4.8.36"
LOG="/home/satelite/Inestabilidad/Programas/08.log"

echo Sync started ...

LCD="/~/Inestabilidad/Programas/Datos_Banda08" #Your local directory
RCD="/~/Satelite/banda08" #FTP server directory

lftp -c "
set ssl:verify-certificate no
set sftp:auto-confirm yes
open $HOST
user $USER $PASS
mirror -c -v -i "\.bz2" $RCD $LCD
bye
" > $LOG
```

**Figura 4.22** Archivo de descarga de archivos de banda 08.



**Figura 4.23** Servidor local de datos de banda 08.

#### 4.6.4 Descarga datos de satélite (Banda 13)

El Servicio Meteorológico Nacional (SMN) dispuso de manera interna en su servidor ftp nacional (host: 200.4.8.36) una carpeta llamada banda13 en el directorio Satelite (Figura 4.24), en la cual, se almacena diariamente la información en periodos de 10 minutos en formato de tif; cabe mencionar que el SMN recorta geográficamente solo para la república mexicana estos archivos.



**Figura 4.24** Descarga del sitio ftp de la CGSMN la información de la banda 13 del satélite GOES-16.

Para llevar a cabo la descarga de información del sitio ftp mediante un esquema de consulta, donde se obtengan los últimos archivos actualizados de la banda 08, se utilizó el programa lftp de Linux. Para llevar a cabo la tarea de descarga de manera automática se creó un script en shell bash llamado Descarga\_Banda13.sh (Figura 4.25) que se ejecuta cada diez minutos en el programador de tareas de

linux; los archivos se almacenan en el servidor local interno en la carpeta /home/Satelite/Inestabilidad/Programas/Datos\_Banda13 (Figura 4.26).

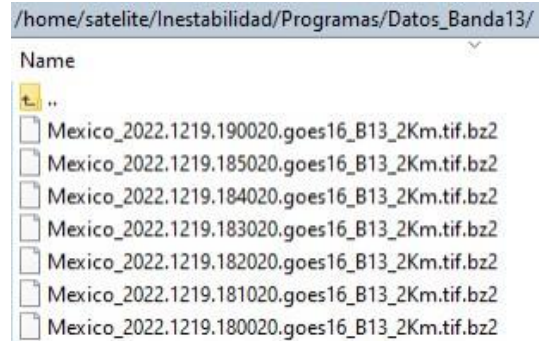
```
#!/bin/bash
cd ~/Inestabilidad/Programas
USER="██████████"
PASS="██████████"
HOST="200.4.8.36"
LOG="/home/satelite/Inestabilidad/Programas/13.log"

echo Sync started ...

LCD="~/Inestabilidad/Programas/Datos_Banda13" #Your local directory
RCD="/Satelite/banda13" #FTP server directory

lftp -c "
set ssl:verify-certificate no
set sftp:auto-confirm yes
open $HOST
user $USER $PASS
mirror -c -v -i "\.bz2" $RCD $LCD
bye
" > $LOG
```

**Figura 4.25** Archivo de descarga de archivos de banda 13.



**Figura 4.26** Servidor local de datos de banda 13.

#### 4.6.5 Genera base de datos de rayos para cada zona metropolitana (Genera\_Rdata\_Rayos.R)

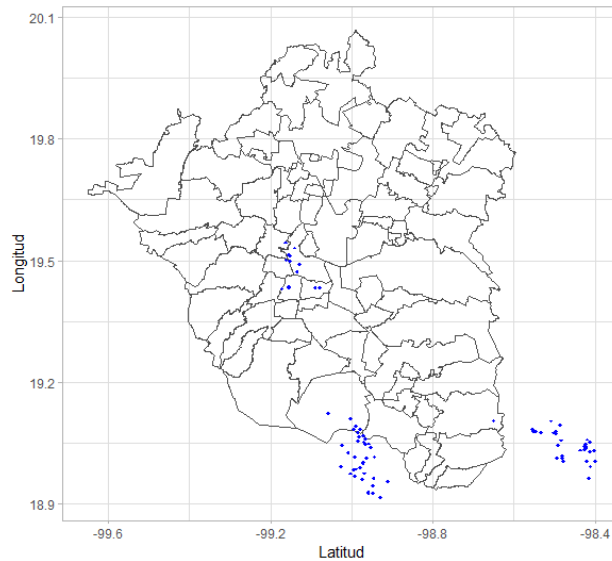
La tarea de generar una base de datos que contenga la información de rayos para cada zona metropolitana se ejecuta cada diez minutos después de que se termina el proceso de descarga de archivos de la banda 13 del satélite GOES-16(4.6.4); la tarea consiste en obtener todos los archivos (Figura 4.20) que almacenen información de 10 minutos hacia atrás a partir de que se ejecute esta tarea; para cada archivo se realiza lo siguiente:

- Se hace un recorte del tif para cada una de las zonas metroplotinas.
- Para cada recorte se verifica si existe registro de información de rayos, en caso afirmativo se llena una base de datos con cinco columnas que corresponden a la latitud-longitud donde se observo el rayo, la hora de inicio del rayo, la hora final en que acabo el rayo y por último la zona metropolitana donde se origino el rayo (Figura 4.27), la base se guarda con el nombre de la zona metropolitana y la extensión Rdata
- Cada base de datos se va actualizando cada diez minutos; las bases se encuentran en el directorio ~/Rayos/Salidas y se usan a la hora de graficar la inestabilidad sobreponiendo la información de los rayos.



	lon	lat	Inicio		Final		ZM
1278	-99.15417	19.43553	2022-09-25	00:40:40	2022-09-25	00:41:00	vdmx
1279	-98.42112	19.03932	2022-09-25	00:40:40	2022-09-25	00:41:00	vdmx
1280	-99.02291	19.04420	2022-09-25	00:40:40	2022-09-25	00:41:00	vdmx
1281	-98.53356	19.07754	2022-09-25	00:40:40	2022-09-25	00:41:00	vdmx
1282	-98.97411	18.96102	2022-09-25	00:40:40	2022-09-25	00:41:00	vdmx
1283	-98.41512	18.96330	2022-09-25	00:41:00	2022-09-25	00:41:20	vdmx

**Figura 4.27** Ejemplo de un Rdata de rayos perteneciente al valle de la Ciudad de México.



**Figura 4.28** Imagen gráfica de la CDMX con información de rayos.

#### 4.6.6 Calcula inestabilidad e intensidad (Calcula\_Inestabilidad.R)

Se lleva a cabo la metodología del algoritmo de estratificación para detección de convección profunda descrita en el punto 4.2, donde recibe como parámetros de entrada los archivos de temperatura en la tropopausa (gfs), banda WV 6.2 y banda IR 10.8; el resultado del algoritmo trae como resultado tres archivos de parámetros principales (IA, IB y IC), dos archivos de parámetros de segundo nivel (IIA y IIB) y por último uno de intensidad de la tormenta; todos los archivos se generan en formato .tif que abarcan la república mexicana

#### 4.6.7 Genera gráfico de inestabilidad y rayos (Generapng\_Inestabilidad.R)

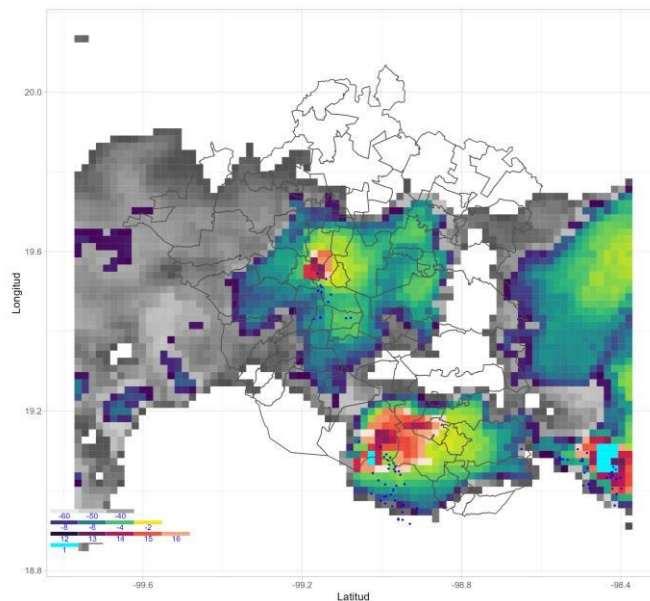
Programa que se encarga de sobreponer cada uno de los archivos .tif que se generan en el punto 4.6.6 más la base de datos de rayos y generar un mapa en formato html (Figura 4.29) que se muestra en la página principal de proyecto, el procedimiento es el siguiente:

- Para cada tif se obtiene el recorte de la zona metropolitana que se esté procesando.
- Se sobreponen los tifs generando una paleta de colores diferentes para cada parámetro principal o secundario.
- Se lee la base de datos de rayos de la zona metropolitana que se esté trabajando y se agrega a la información del punto anterior.
- Se guarda la información con el nombre de la zona metropolitana que se trabaje en formato html y se envía al servidor web para su publicación.

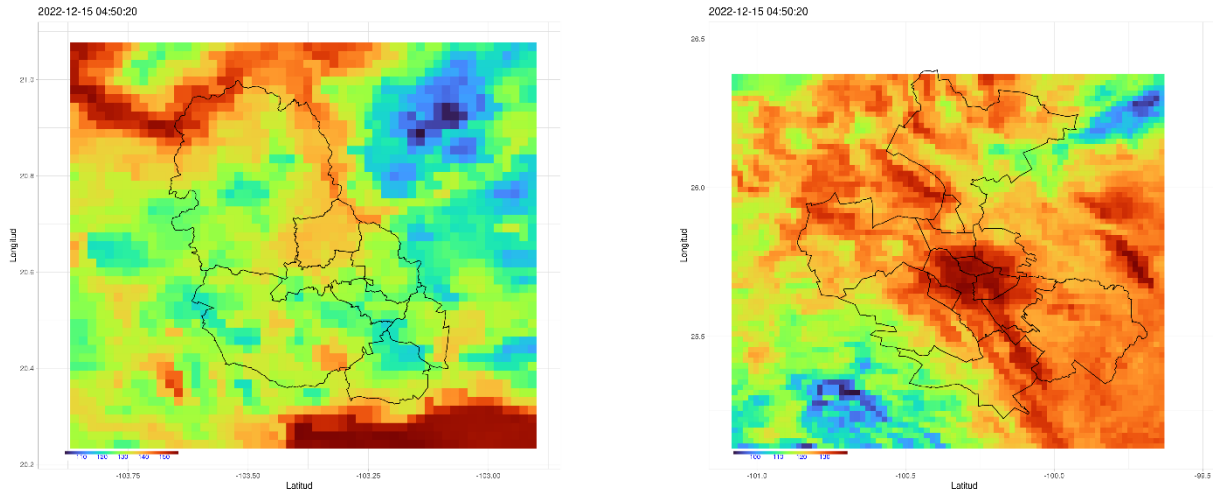
#### 4.6.8 Genera gráfico de intensidad (Generapng\_Intensidad.R)

Programa que se encarga de graficar la intensidad que se generan en el punto 4.6.6 y generar un mapa en formato html (Figura 4.30) que se muestra en la página principal de proyecto, el procedimiento es el siguiente:

- Para el tif de intensidad se obtiene el recorte de la zona metropolitana que se esté procesando.
- Se genera una paleta de colores para la variable intensidad.
- Se guarda la información con el nombre de la zona metropolitana que se trabaje en formato html y se envía al servidor web para su publicación.



**Figura 4.29** Mapa perteneciente a la zona metropolitana de la Ciudad de México donde se concentran los procesos primarios, secundarios y rayos.



**Figura 4.30** Gráficos de Intensidad para las zonas metropolitanas de Monterrey y Guadalajara respectivamente.

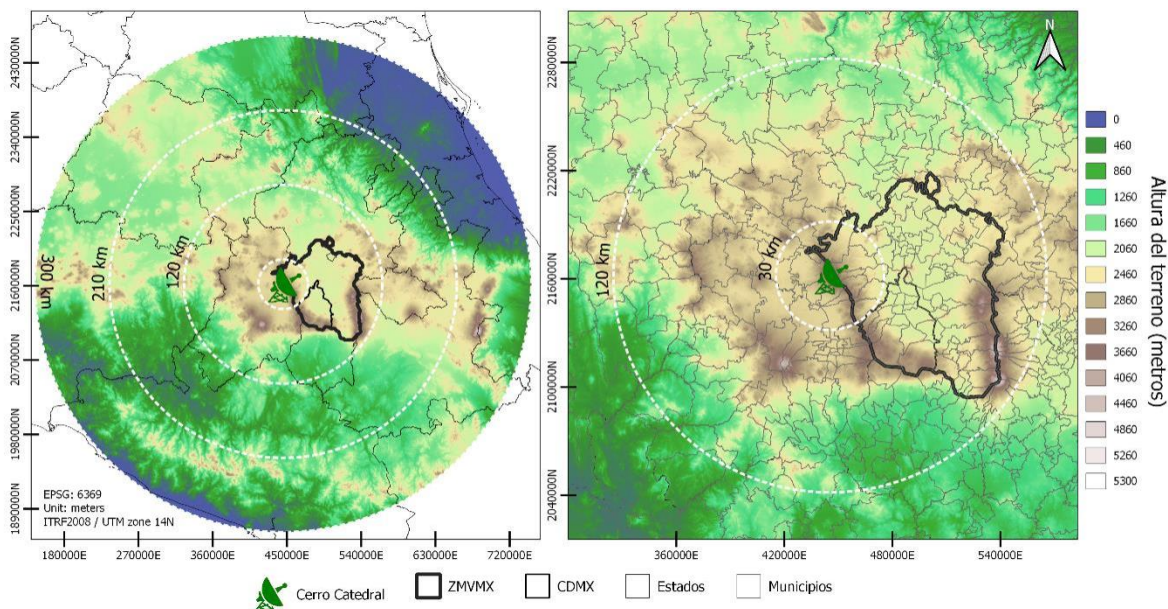
## 4.7 Conclusiones

La metodología seleccionada permite detectar de forma correcta indicadores de inestabilidad atmosférica basada en el uso de imágenes del satélite GOES-16, con la finalidad de identificar tormentas convectivas profundas. De entre las pruebas seleccionadas, la número 11 ha sido implementada para su uso en tiempo real. Las zonas de inestabilidad obtenidas son además presentadas en conjunción con la ocurrencia de rayos en las tres zonas metropolitanas a partir de GLM (Geostationary Lightning Mapper) para otorgar mayor información a los meteorólogos.

## 5. Estudio de la estimación de lluvia en tiempo real mediante información de radar meteorológico Cerro de Catedral sobre la zona metropolitana del Valle de México.

Los radares meteorológicos permiten tener una muy buena caracterización de la distribución de la lluvia estimada a partir de los datos de reflectividad, con alta resolución espacial y temporal (Versini, 2012; Gourley et al., 2014), que son prácticamente imposibles de obtener con una red de sensores en suelo (Licznar; Krajewski, 2016). Al mismo tiempo, se pueden utilizar para validar no solo la información satelital, sino también las predicciones del modelo WRF.

La necesidad de datos con alta resolución espacio-temporal se destaca aún más en regiones afectadas por tormentas convectivas (Faures et al., 1995), como ocurre en la zona metropolitana del Valle de México. Actualmente esta zona cuenta con tres radares meteorológicos en operación, siendo uno de ellos el radar de Catedral, el cual es utilizado de manera operacional por el Servicio Meteorológico Nacional para el seguimiento de tormentas sobre la Ciudad de México (CDMX) y zona metropolitana de Valle de México (Figura 5.31).



**Figura 5.31** - Ubicación del radar Catedral, con destaque de la Ciudad de México y zona metropolitana de Valle de México

Las características del radar de Catedral son presentadas en la Tabla 5.3. El radar de Catedral, también llamado de radar Cerro Catedral, de polarización sencilla en la banda C, cuenta con actualización de las imágenes a cada 6 min y una cobertura máxima de 300 km. Está ubicado en el Cerro la Catedral, Estado





de México, a una altura de aproximadamente 3 700 m.s.n.m., lo que permite cubrir la zona metropolitana del Valle de México dentro del círculo de 120 km de su cobertura.

Los productos del radar, como la lluvia, pueden ser mejores estimados, ampliando la usabilidad y confiabilidad de la información, a través de una mejor calibración del equipo para las condiciones locales. Esta calibración involucra dos procesos principales: la corrección de la información cruda medida por el equipo (sobre todo la reflectividad) y un buen ajuste de la conversión de la reflectividad en intensidad de precipitación.

Los datos de radares meteorológicos están sujetos a diferentes fuentes de error, las cuales tienen que ser corregidas para poder utilizarlos en tiempo real. Entre las posibles fuentes de incertidumbre se encuentran los ecos espurios (*clutters*) y la atenuación de la señal (Krajewski et al., 2010; Liguori y Rico-Ramirez, 2013).

Los *clutters* son ecos no meteorológicos, causados cuando los rayos del radar atingen objetos fijos en la superficie de la tierra u objetos en el aire (ej.: montañas, casas/edificios, turbinas eólicas, aviones, aves). Cuando los rayos atingen estos objetos se altera la señal recibida, lo cual implica errores en la medida de la reflectividad (Gekat et al., 2004; Zhang, 2016). En la mayoría de los casos las obstrucciones son no meteorológica, como por ejemplo derivada de una característica del terreno. Germann y Joss (2004) resaltan que en regiones de montañosas el *clutter* es un serio problema, porque por lo general en estas regiones el radar está ubicado en la cima de las montañas y así se propicia el menor ángulo de elevación de la antena porque está próximo o abajo del horizonte.

La conversión de la reflectividad medida por los radares meteorológicos en intensidad de lluvia está basada en modelos empíricos:  $Z = aR^b$ , propuesto por Marshall y Palmer (1948) con los coeficientes estándares iguales a  $a=200$  y  $b=1.6$  (Marshall et al., 1955). Globalmente, esta relación con los coeficientes originales es ampliamente aplicada, sin embargo, su aplicación indistinta es cuestionable pues se reconoce que los valores de los coeficientes pueden variar en relación con la ubicación geográfica, el clima y, en consecuencia, el tipo de lluvia que se mide. Actualmente, el radar de Catedral utiliza los coeficientes estándares estimados por Marshall y Palmer.

Si bien es cierto que todavía se registran errores en las estimaciones de lluvia a través de radares meteorológicos (Krajewski y Smith, 2002), la habilidad que presentan al conocer la distribución de los núcleos de tormenta en regiones amplias de hasta 300 km de radio, permiten mejorar e implementar sistemas de alertamiento temprano en zonas urbanas.

Dado lo anterior, el objetivo es realizar un estudio para la estimación de lluvia en tiempo real mediante información de radar meteorológico sobre la CDMX (radar de Catedral), generando como producto final análisis sobre los datos del radar enfocados en su uso para este fin y mapas de lluvia sobre la zona metropolitana de Valle de México con alta resolución espacial (62.5 m) y temporal (6 min).

## 5.1 Metodología

El desarrollo de este estudio fue compuesto por diversas etapas, por lo cual se utilizaron metodologías específicas para cada enfoque realizado.

Inicialmente, se realizó una revisión de los datos del radar de Catedral proporcionados por el SMN, con el objetivo de reconocer sus características actuales de calibración y formatos de los archivos. Derivada de este análisis exploratorio se identificó la necesidad de realizar un análisis del bloqueo del haz de la señal del radar derivado del efecto de la topografía local.

Posteriormente, se desarrolló un algoritmo para la calibración de la información generada por el radar y estimación de la intensidad de la precipitación sobre el área de cobertura del radar meteorológico a través de la aplicación de los coeficientes locales. Para la estimación de la precipitación se utilizan los datos de la reflectividad del radar en el plano horizontal, es decir, del PPI, comúnmente del ángulo de elevación más cercano al suelo, sin embargo, sobre el último aplican condiciones que se mencionan más adelante en este documento.

Para tal se realizó un estudio de los coeficientes locales para la estimación de la lluvia, a través del ajuste de los coeficientes de la ecuación de conversión de la reflectividad del radar en intensidad de precipitación (Z-R), con el uso de los datos observados por la red de disdrómetros del Instituto de Ingeniería de la UNAM.

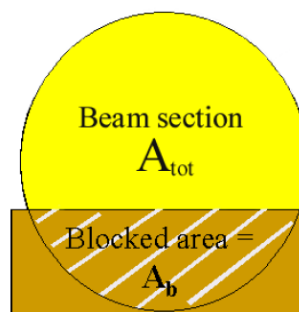
Al final se realizó una prueba de un algoritmo completo que involucre desde la calibración de los datos curdos hasta la estimación de la lluvia en tiempo real y generación de imágenes para la visualización en la plataforma web integrada.

A seguir se presenta a detalle la metodología utilizada en algunas etapas:

### 5.1.1 Evaluación del bloqueo de haz de la señal del radar

Se realizó el cálculo de la fracción de bloqueo del haz para los principales ángulos de elevación de la antena identificados en los datos del radar de Catedral del año de 2021 y 2022. Para ello se consideró la evaluación en el área de la cobertura total del radar de Catedral (300 km).

El análisis fue desarrollado utilizando el esquema propuesto por Bech et al. (2003) para el cálculo de la fracción de bloqueo del haz, lo cual se basa en un modelo digital de elevación y las características del radar para cada ángulo de elevación. De manera esquemática en la Figura 5.32 se presenta como se obtiene esta fracción, también llamada de “*partial beam blockage*” (PBB), a través de la relación entre la sección total y el área bloqueada, la cual se puede escribir con el uso de la ecuación:  $PBB = A_b/A_{tot}$ .



**Figura 5.32** – Esquema del cálculo de la fracción de bloqueo del haz propuesto por Beach et al. (2003). Fuente: Fornasiero et al. (2004).

El modelo digital de elevación (DEM, por sus siglas en inglés) utilizado fue el ASTERGDEM, debido a su calidad de la representación de la realidad de las alturas del terreno, presentando una resolución espacial de 30 m.

La fracción calculada muestra el porcentaje de energía del radar bloqueada debido a la posición que ocupa el radar de Catedral y como resultado se generaron figuras para cada ángulo de elevación representando el bloqueo a través de una escala de colores.

### 5.1.2 Estudio de los coeficientes de la relación Z-R

El estudio de los coeficientes locales ( $a$  y  $b$ ) para conversión de la reflectividad del radar en intensidad de precipitación, fue realizado a través de la relación Z-R de la ley de potencia ampliamente implementada:  $Z = aR^b$  (Marshall y Palmer 1948)

Usualmente los coeficientes son estimados a través de la regresión logarítmica lineal (método de los mínimos cuadrados) entre los pares Z-R, considerando únicamente datos de intensidad de precipitación superiores a 5mm/h (Atlas et al. 1999; Bringi et al. 2003), una vez que las pequeñas gotas son muy difíciles de medir y pueden proporcionar errores en el espectro.

La reflectividad del radar ( $Z$ ) y la intensidad de precipitación ( $R$ ) son proporcionales al 6° y 3° momento de la *raindrop size distribution* (DSD), respectivamente:

$$R = 0.6\pi \times 10^{-3} \int v(D) D^3 N(D) dD$$
$$Z = \int D^6 N(D) dD$$

Donde  $v(D)$  es la velocidad terminal de caída de las gotas ( $m s^{-1}$ ) y  $R$  y  $Z$  son expresados en  $mm h^{-1}$  y  $mm^{-1} m^{-3}$ , respectivamente. Para el presente estudio se utilizó el modelo de velocidad terminal de caída propuesto por Atlas, Srivastava, & Sekhon (1973).

La DSD describe la distribución estadística del tamaño de gotas de lluvia que caen en un punto y es definida como el número medio de gotas de lluvia en un intervalo de diámetro definido presente por unidad volumen del aire:  $N(D)$  ( $mm^{-1} m^{-3}$ ).

Los disdrómetros son instrumentos que miden la DSD en un punto en la superficie y son utilizados para la determinación de la forma de la DSD (Bringi et al., 2003, Raupach y Berne, 2015), lo que habilita una mejor estimativa de la relación Z-R para una determinada localidad. El principio de medición de los disdrómetros consiste en la atenuación de la señal cuando una partícula cruza el rayo láser.

Tomando en cuenta la existencia de una red de monitoreo de la lluvia en tiempo real con 39 disdrómetros ópticos láser, Parsível 2 (OTT, 2016), del Observatorio Hidrológico del Instituto de

Ingeniería de la UNAM (OH-IIUNAM), se torna posible considerar la integración de la DSD para establecer una relación Z-R local.

Para el ajuste de la DSD se considera la distribución gamma normalizada, la cual recientemente ha sido usada en diversos estudios, demostrado buen desempeño (i.e. Bringi et al., 2003; Mallet y Barthes, 2009). La expresión general de la distribución, compuesta por 3 parámetros:  $\mu$  (parámetro de forma),  $N_w$  (parámetro generalizado del intercepto de la DSD gama normalizada) y  $D_o$  (diámetro volumétrico mediano de la gota), es dada por (Bringi and Chandrasekar 2001b; Testud et al. 2001):

$$N(D) = N_w f(\mu) (D / D_o)^\mu \exp[-(3.67 + \mu)D / D_o]$$

donde,

$$f(\mu) = 6 / (3.67)^4 \times (3.67 + \mu)^{\mu+4} / \Gamma(\mu+4)$$

$$D_o \text{ (mm)} = (3.67 + \mu / 4 + \mu) / D_m$$

$$N_w \text{ (mm}^{-1}\text{m}^{-3}) = (4^4 / \pi \rho_w) \times (W / D_m^4)$$

$$D_m \text{ (mm)} = \int N(D) D^4 dD / \int N(D) D^3 dD$$

$$W \text{ (g m}^{-3}) = (\pi \rho_w / 6) \times \int N(D) D^3 dD$$

siendo  $N$  es el número de partículas por unidad de volumen e intervalo de diámetro ( $\text{m}^{-4}$ ),  $D$  se refiere al diámetro de la gota de lluvia (mm) y  $\rho_w$  es la densidad del agua. El  $\mu$  es ajustado a través de la ecuación n°16 presentada en Testud et al. (2001), la cual se basa en  $D/D_m$ .

## 5.2 Análisis e interpretación de la información

### 5.2.1 Comentarios sobre los datos del radar de Catedral

De la revisión de los datos del radar proporcionados por el SMN (datos a partir de 2020), se hacen algunos comentarios. El radar de Catedral fue modernizado a la mitad del año de 2018, donde se realizó cambio de antena por una de la marca de ECC (*Enterprise Electronics Corporation*). En la Tabla 5.3 se presentan las características generales del radar y en la Tabla 5.4 las características de configuración del mismo, al momento actual.

**Tabla 5.3** - Características técnicas del radar Catedral

<b>Radar Cerro Catedral</b>	
<b>Tipo</b>	Banda C, doppler
<b>Polarización</b>	Sencilla
<b>Res. angular</b>	0.53° (promedio) (0.76, 0.76, 0.76, 0.76, 0.42, 0.76, 0.76, 1.13, 1.14, 1.14)
<b>Res. espacial</b>	62.50 m
<b>Res. temporal</b>	6 min
<b>Cob. máxima</b>	300 km



<b>Elevaciones</b>	*actualmente 10 elevaciones (-1.28, -1.0, -0.51, -0.3, -0.28, -0.01, 0.49, 0.99, 1.49, 2.99)
<b>Variables</b>	Reflectividad horizontal, velocidad radial
<b>Altitud</b>	3700 m.s.n.m. (+-1500 sobre el fondo del Valle)
<b>Ubicación</b>	Lat 19.5499 Lon-99.5208 +- 40 km de CDMX (Cerro la Catedral, Estado de México)

**Tabla 5.4** - Características de la configuración del radar Cerro Catedral

<b>Radar Cerro Catedral</b>	
<b>Pulse width</b>	2 $\mu$ s
<b>PRF</b>	300 Hz
<b>Smooth Z</b>	Filter width 1.00 km
<b>Attenuation</b>	$Z = ZO + a * \text{PhiDP}$ a = 0.080
<b>ZDR</b>	$ZDR = ZDRO + b * \text{PhiDP}$ b = 0.020
<b>Z-R</b>	A = 200 B = 1.6 a = 0.0044 b = 1.17
<b>Rain rate factor R(z)</b>	RF = 1.00
<b>Rain rate formula</b>	$Z = A * (R/RF) ^ B$ A = 200 B = 1.6
<b>Dealias velocity</b>	Alpha = 0.8 beta = 0.30
<b>Product Despeckle</b>	% missing requirement = 55 Number of iteration = 10
<b>Clutter filter</b>	50 dB

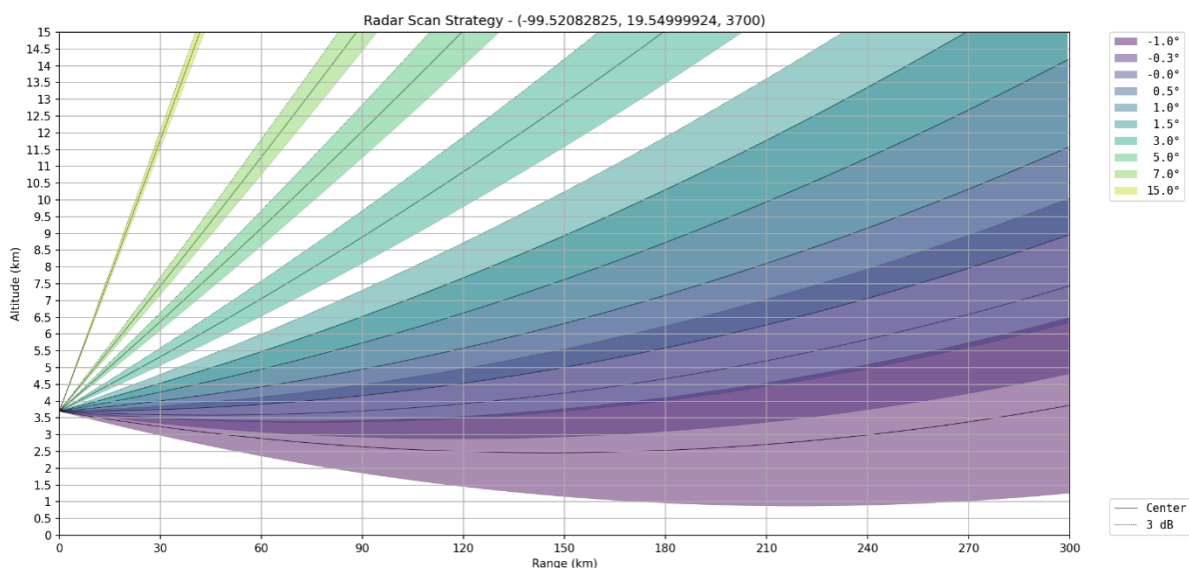
El SMN utiliza el software EDGE para la visualización y descarga de los datos del radar. Automáticamente el software EDGE genera información en formato “.vol”, en el software hay la posibilidad de convertir al formato “netcdf”. Inicialmente, se constató que los datos fueron guardados en formato .vol lo que imposibilitó el manejo de la información sin el uso del software mencionado. A partir de abril de 2021, el personal de SMN configuró una rutina para que los archivos generados sean guardados en formato “netcdf” con la configuración en CF/Radial.

Inicialmente la resolución temporal de medición del radar de Catedral estaba configurada en 15 min y se hacía barradura de 13 ángulos de elevaciones de la antena. A partir de la mitad de 2021, se configuró el radar para realizar mediciones a cada 6 min y 10 ángulos de elevaciones, la cual sigue actualmente.

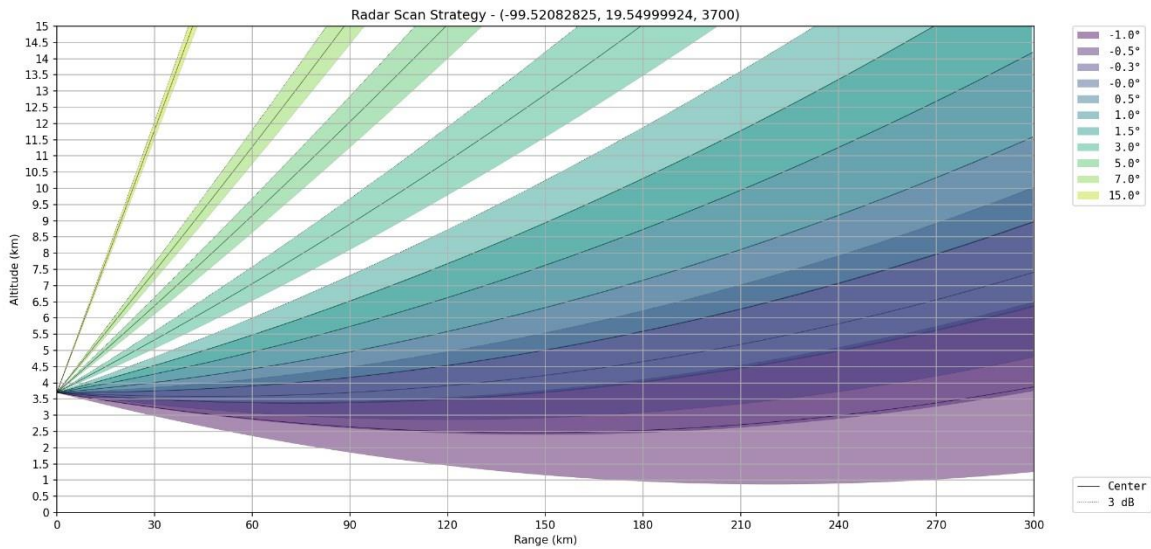
Con relación a la configuración de los ángulos de elevación de la antena para realizar los barridos, se verificó que estos no fueron constantes. Por las necesidades del SMN, se realizaron cambios continuos de las elevaciones, donde en muchas situaciones no se identificaron la constancia de algunas de ellas. Para ejemplificar, se graficaron las estrategias de escaneos de tres períodos, donde se puede observar dicha variabilidad (Figura 5.33, Figura 34 y Figura 35). En el escaneo referente a la fecha de actual se percibe que la elevación más alta es de 3° (Figura 35), mientras que en la fecha de septiembre de 2021 es de 15° (Figura 5.33). Lo mismo se verifican con las elevaciones más bajas, donde se observan las pruebas de diversos ángulos con la intención de encontrar la mejor altura para visualizar las tormentas sobre CDMX.

Adicionalmente, cabe señalar que el SMN utiliza un filtro de corrección de la información cruda (para el *clutter* y la atenuación), desarrollado por ellos, lo cual resulta en resultados satisfactorios. Los datos posteriores a abril de 2021 cuentan con la corrección de este filtro, sin embargo, los archivos “netcdf” contienen también la información cruda.

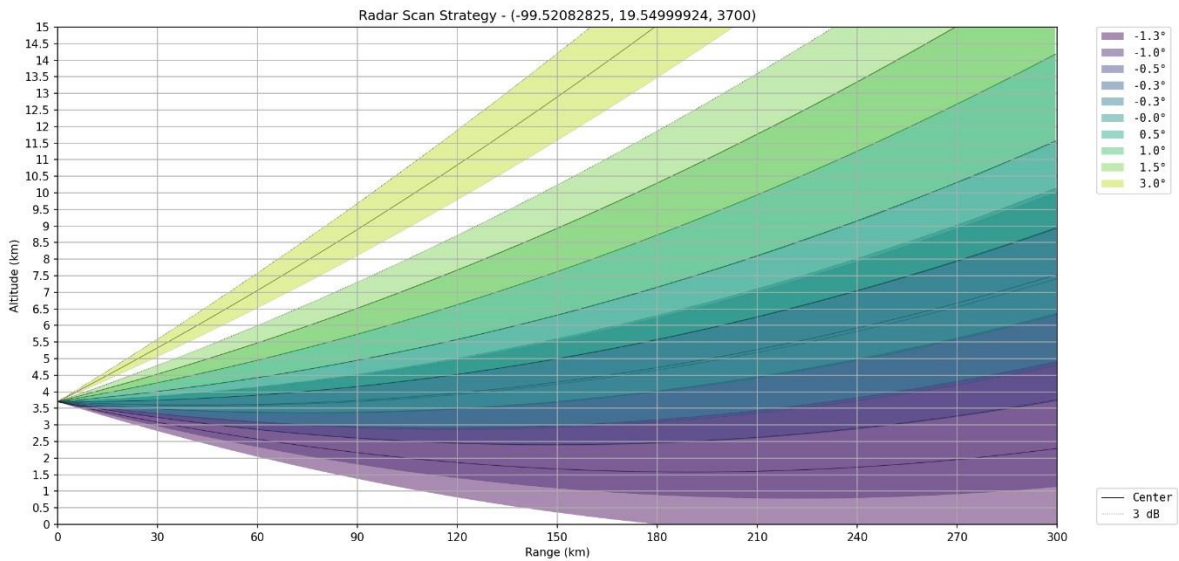
Para una correcta observación de las tormentas próximas al suelo, con la intención de realizar la estimación de la precipitación, se deben involucrar estrategias de escaneo del radar centrada en los ángulos de las elevaciones que permitan la mejor aplicabilidad de la información. En este sentido es importante realizar escaneos continuos en algunas elevaciones para generar información histórica y posibilitar la realización de mejores calibraciones de los datos.



**Figura 5.33** – Estrategia de escaneo del radar de Catedral referente a la fecha de 05/09/2021.



**Figura 34** - Estrategia de escaneo del radar de Catedral referente a la fecha de 07/10/2021.



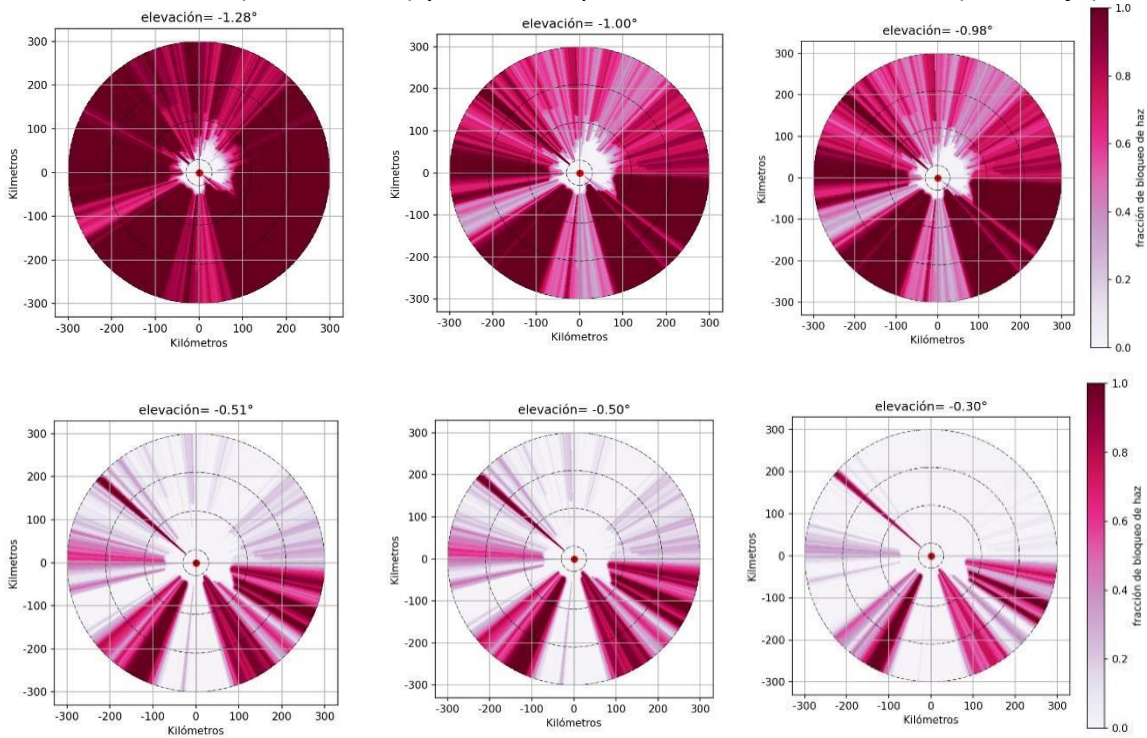
**Figura 35** - Estrategia de escaneo del radar de Catedral referente a la fecha de 19/11/2022.

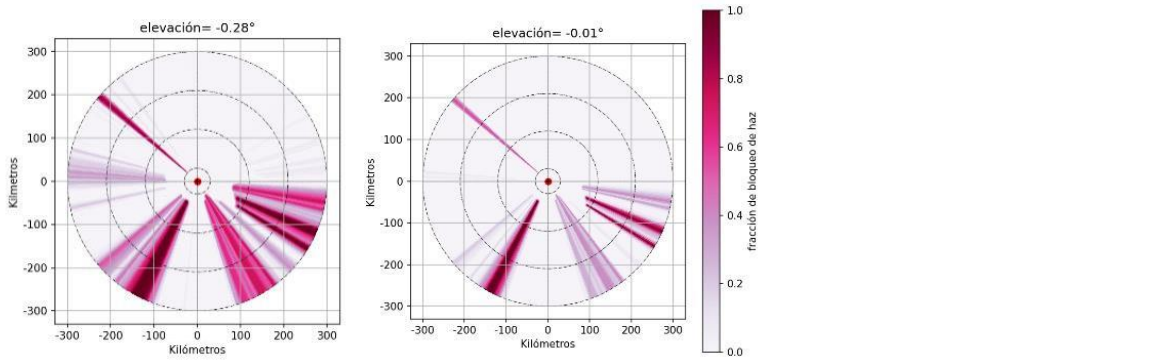
## 5.2.2 Análisis de la fracción de bloqueo de haz

A partir de la observación de las diversas pruebas de ángulos de elevación de la antena del radar de Catedral para la realización de los barridos volumétricos, se propuso realizar un análisis de la fracción

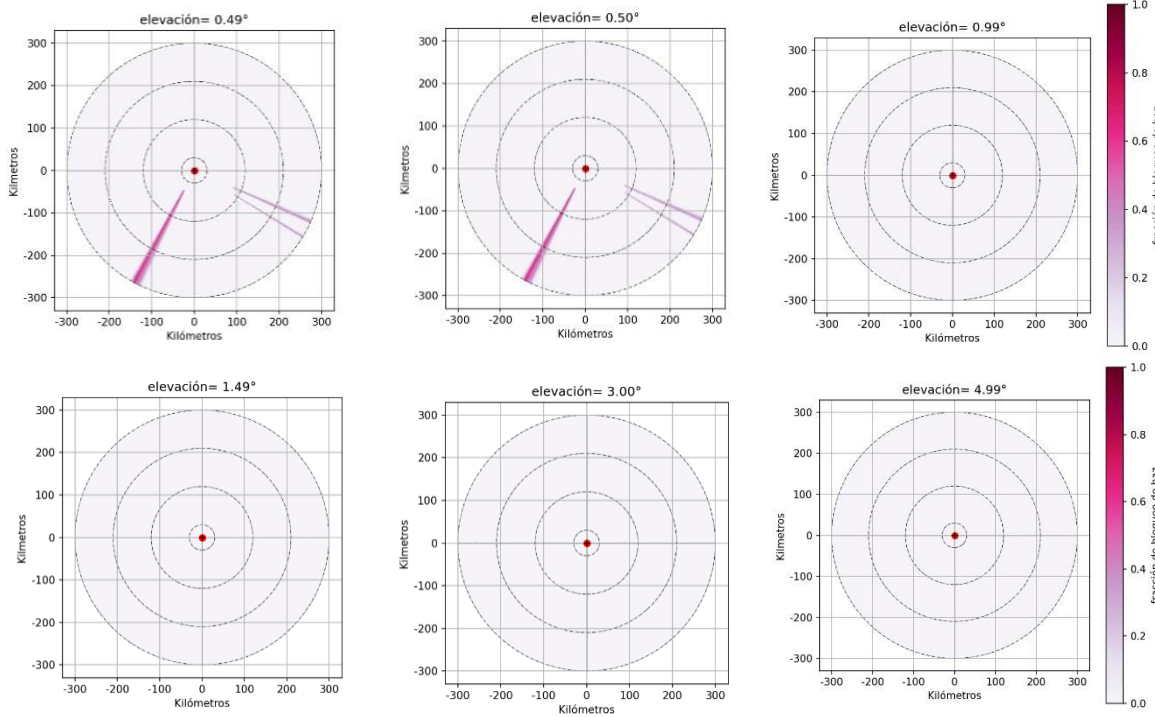
de bloqueo de haz, con el objetivo de entender el efecto que la topografía local genera en las mediciones y evaluar la visibilidad de las tormentas desde el punto del radar. Es importante señalar que, conforme mencionado anteriormente, el radar en cuestión se encuentra instalado en el Cerro la Catedral y cuenta con una altitud de 3,700 m.s.n.m., por lo que está a aproximadamente 1,500 m sobre el nivel de fondo del Valle, lo que implica en la necesidad de realizar barridos con ángulos de elevaciones negativos para visualizar con mejor calidad las celdas de las tormentas que se forman sobre la zona metropolitana del Valle de México. Eso porque el radar de Catedral por su ubicación realiza mediciones arriba del nivel del suelo. Diversos autores, como, por ejemplo, Méndez-Antonio et al. (2009), también comentan sobre el efecto de la ubicación del radar de Catedral y la topografía en la calidad de los datos para uso de estimación de la precipitación.

Para el análisis en cuestión, fueron utilizadas 17 ángulos de elevaciones de la antena del radar: -1.28, -1.00, -0.98, -0.51, -0.50, -0.30, -0.28, -0.01, 0.49, 0.50, 0.99, 1.49, 3.00, 4.99, 5.00, 6.99 y 15.00. Los resultados de la fracción de bloqueo de haz de la señal derivados del análisis del terreno se presentan en la Figura 5.36 y en la Figura 5.37. Con relación a la escala de la fracción, el 0 representa el bloqueo nulo o inexistente (color blanco) y el 1 el bloqueo total del haz de la señal (color rojo).

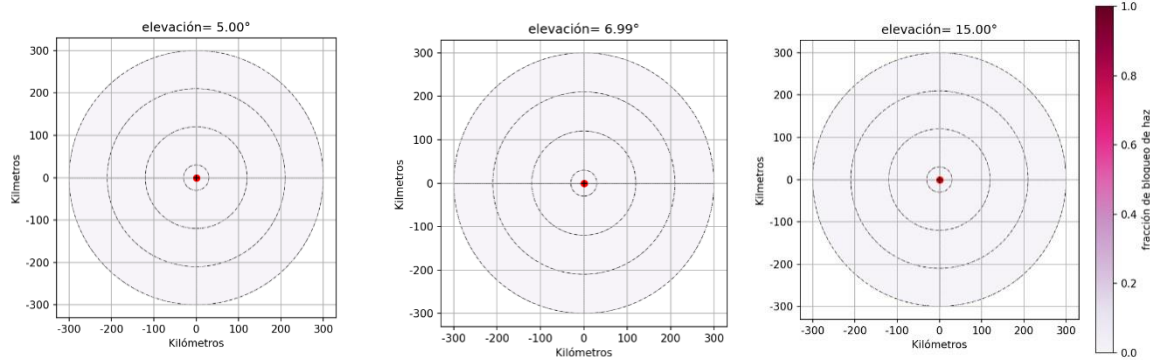




**Figura 5.36** – Fracción de bloqueo del haz para diferentes ángulos de elevación negativos para el radar Cerro Catedral (los círculos negros se refieren a la cobertura del radar de 30, 120, 210 y 300 km).







**Figura 5.37** – Fracción de bloqueo del haz para diferentes ángulos de elevación positivos para el radar Cerro Catedral (los círculos negros se refieren a la cobertura del radar de 30, 120, 210 y 300 km).

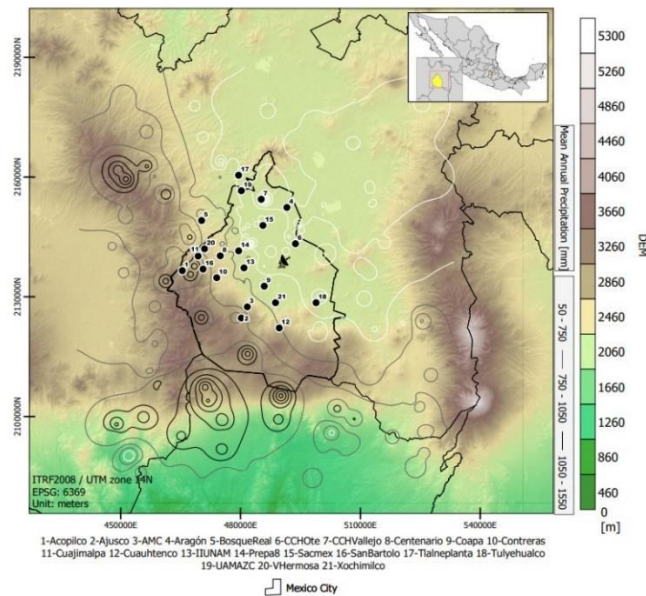
A partir del análisis de las figuras, se percibe que, considerando el área de cobertura total del radar (300 km), el bloqueo del haz es nulo cuando la antena presenta ángulos de elevaciones superiores a  $0.5^\circ$ . Enfocándose en el área de la zona metropolitana del Valle de México, la cual está inserida en el círculo de cobertura de 120 km del radar (segundo círculo negro), se puede verificar que las elevaciones más bajas (por ejemplo,  $-1.28^\circ$  y  $0.98^\circ$ ) presentan algún bloqueo del haz en la zona mencionada, por lo tanto, existirán zonas donde los datos no serán confiables. A partir de la elevación  $-0.51^\circ$  se verifica que el bloqueo del haz se reduce significativamente sobre la zona metropolitana.

Para la estimación de la precipitación con el uso de datos de radares meteorológicos, se utiliza los datos de reflectividad horizontal referentes a los ángulos de elevaciones más bajos, los cuales se refieren a las mediciones más cercanas al suelo. Eso por el hecho de que se busca representar la precipitación efectiva sobre el suelo, utilizando estos datos. El uso de los datos medidos a una altura muy elevada con relación al suelo puede originar una mayor discrepancia entre la estimación y la precipitación que ocurre y es registrada en los pluviómetros.

Cabe señalar que, el caso especial del área de estudio presenta una topografía con predominancia de zonas montañosas alrededor de las ciudades y municipios de interés, como por ejemplo la CDMX. Por lo anterior, existe la necesidad del uso de ángulos de elevaciones negativos, buscando atender el principio mencionado. Derivado del análisis preliminar, se puede sugerir que se realicen evaluaciones de la estimación de la precipitación utilizando datos de la reflectividad medida entre las elevaciones  $-0.50^\circ$  y  $-0.30^\circ$ . Ángulos de elevación muy elevados presentan problemas con la altura para estimar la precipitación, una vez que miden la reflectividad con una mayor distancia del suelo. Esta condición hace con que el uso de la información del radar de Catedral para este fin sea manejado con mucha atención, una vez que, aunque se consideren los barridos horizontales con ángulos de elevación más adecuados, se observan las tormentas en un nivel superior que el de la base de estas.

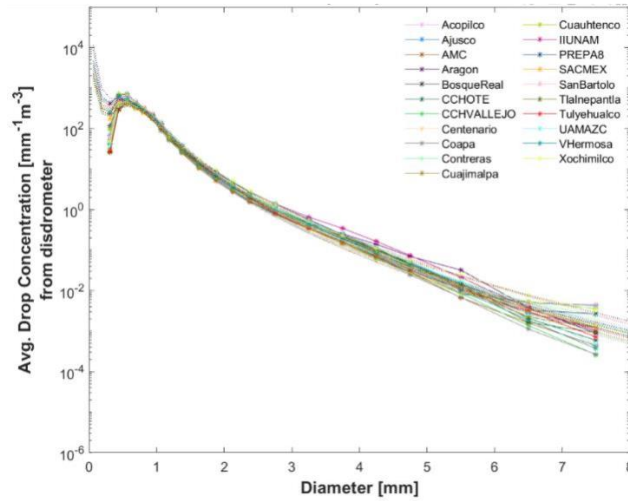
### 5.2.3 Estudio de los coeficientes locales para la relación Z-R

Para el estudio de los coeficientes locales de la relación Z-R, se utilizaron datos con frecuencia de 1 min colectados por 21 disdrómetros entre Junio/2018 y Junio/2019, los cuales están distribuidos espacialmente como se muestra en la **Figura 5.38** . La distancia entre los disdrómetros varía de 25.45 km hasta 32.67 km. De esta manera, fueron evaluados entre 20,190 min y 32,762 min de datos de cada uno de los 21 disdrómetros, lo que totalizó una serie de datos total de todas las estaciones con 534,604 min.



**Figura 5.38** - Ubicación de los 21 disdrómetros del OH-IIUNAM utilizados para el estudio de los coeficientes locales de la relación Z-R.

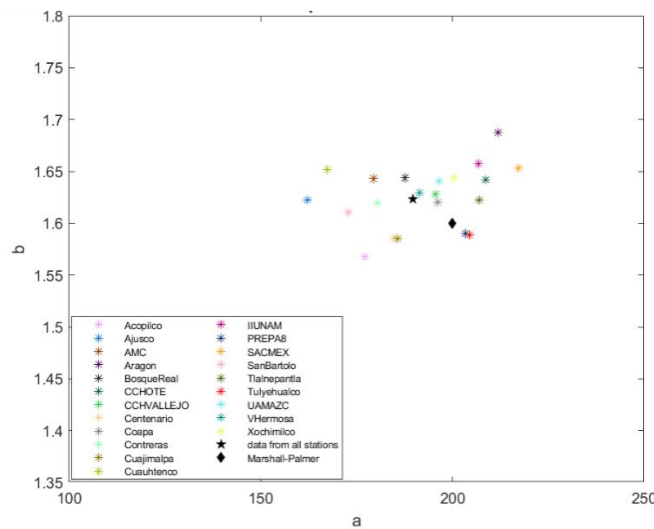
De manera general, la forma promedio de la DSD medida por los disdrómetros y ajustada por la distribución gamma normalizada es muy similar entre los 21 disdrómetros, como se muestra en la Figura 5.39. Con relación a los parámetros de la distribución gamma normalizada, se obtuvo los siguientes valores promedios:  $\log N_w = 3.77 \text{ mm}^{-1}\text{m}^{-3}$ ,  $D_o = 1 \text{ mm}$  y  $\mu = 7.89$ .



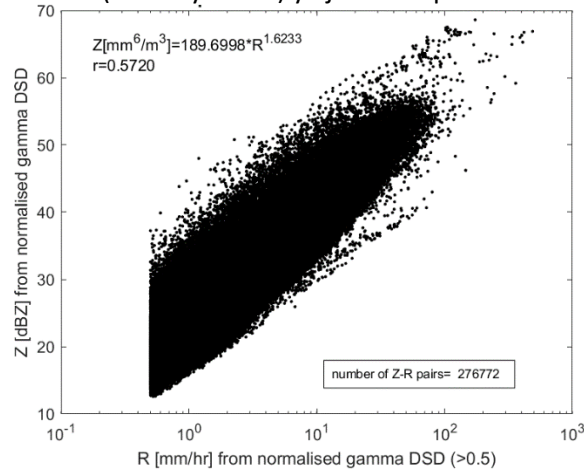
**Figura 5.39** - Forma promedia de la DSD medida y ajustada de los 21 disdrómetros del OH-IIUNAM

Los coeficientes  $a$  y  $b$  de la relación Z-R obtenidos para cada disdrómetro presentan una ligera dispersión alrededor de los valores estándar de Marshall y Palmer ( $a=200$  y  $b=1.6$ ), conforme se puede observar en Figura 5.40. Considerando la aplicabilidad de los resultados del presente estudio, se realizó el ajuste de los coeficientes a través de la unión de la serie de datos de Z y R, calculados por la DSD ajustada, de todas las estaciones, lo cual se presenta en **Figura 41**. Una vez que se verificó que la dispersión entre los puntos evaluados no es tan significativa y que para fines operacionales es viable el uso de una ecuación local única. El valor ajustado para los coeficientes generales, considerando todos los datos mencionados es igual a:  $a = 189.69$  y  $b = 1.62$ .

Se encontraron valores generales de  $a=189.69$  y  $b=1.62$  muy próximos a los estándares, que actualmente son utilizados por el SMN ( $a = 200$  y  $b = 1.6$ ). Sin embargo, esta pequeña diferencia puede proporcionar un mejor ajuste en algunas situaciones.



**Figura 5.40** - Dispersión de los valores de los coeficientes a y b de cada disdrómetro, con comparación a los valores estándares ( $a=200$  y  $b=1.6$ ) y ajustados para todas las estaciones.



**Figura 41** - Ajuste de la relación Z-R utilizando todas las series de datos de los 21 disdrómetros.

#### 5.2.4 Calibración de los datos del radar y estimación de la precipitación

En esta etapa se desarrollaron pruebas de códigos fuentes para la apertura de los datos del radar en formato “netcdf”, así como manejo de los datos de la reflectividad. En esta etapa de estudio, se consideró el uso del filtro elaborado por SMN para la corrección de los datos crudos. Inicialmente se tenía contemplado la prueba de mejores metodologías para la corrección de la información, sin embargo, por el hecho de no contar con una serie temporal suficiente para un ángulo de elevación fijo, no fue posible hacer las pruebas necesarias y desarrollar, por ejemplo, los mapas de probabilidad de *clutter* fijo.

Por lo anterior, partiendo de la reflectividad corregida con el filtro mencionado, se elaboró el código fuente para la conversión en precipitación, aplicando los coeficientes a y b de la relación Z-R estimados.

Para ejemplificar los resultados del código fuente desarrollado, se presentan las imágenes para el evento que ocurrió entre los días 06 y 07 de septiembre de 2021, lo cual derivó las inundaciones en la ciudad de Tula de Allende, Hidalgo.

En la Figura 5.42 se presentan los datos de la precipitación registrada por los disdrómetros de la red del OH-IIUNAM para el evento. Se observa que las estaciones de Cuauhtepac e Indios Verdes registraron las mayores intensidades de precipitación, siendo estas igual a 86.14 mm/h y 52.14 mm/h, respectivamente, lo que generó una precipitación acumulada de 40.78 mm y 32.83 mm, respectivamente.

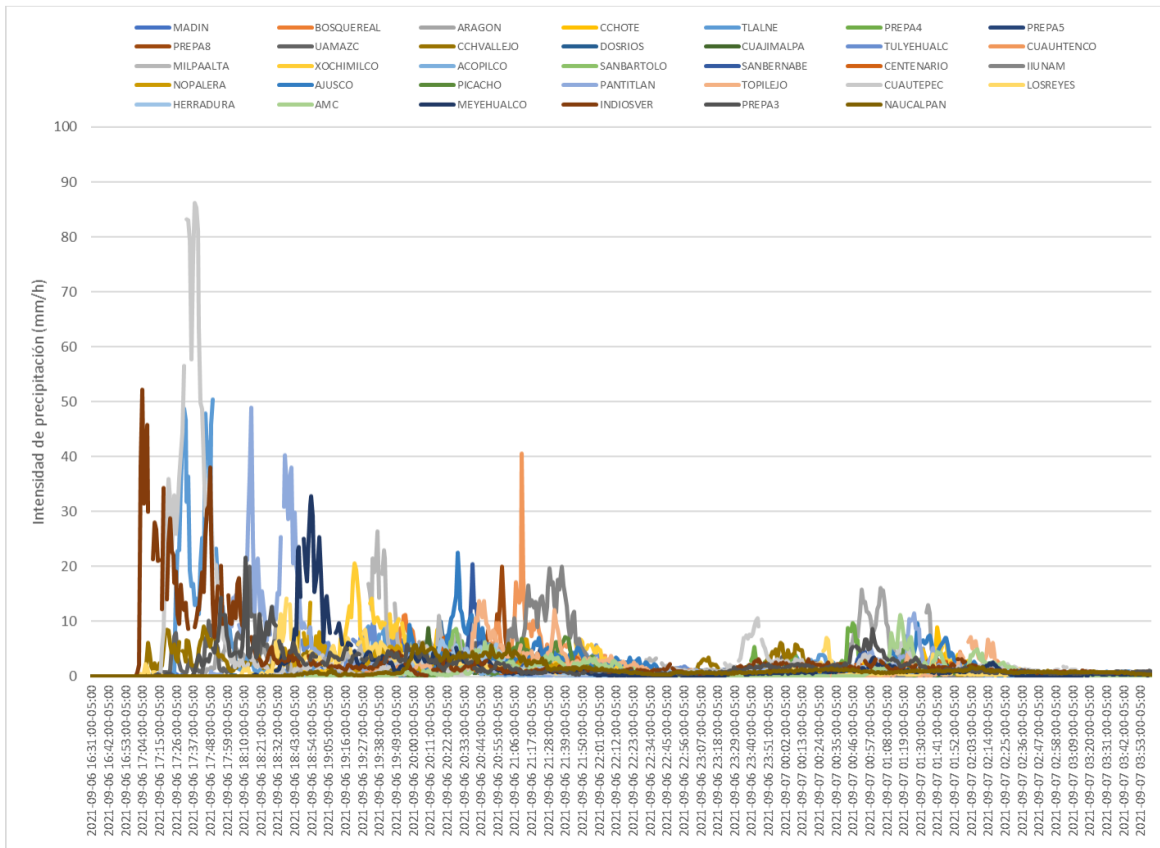
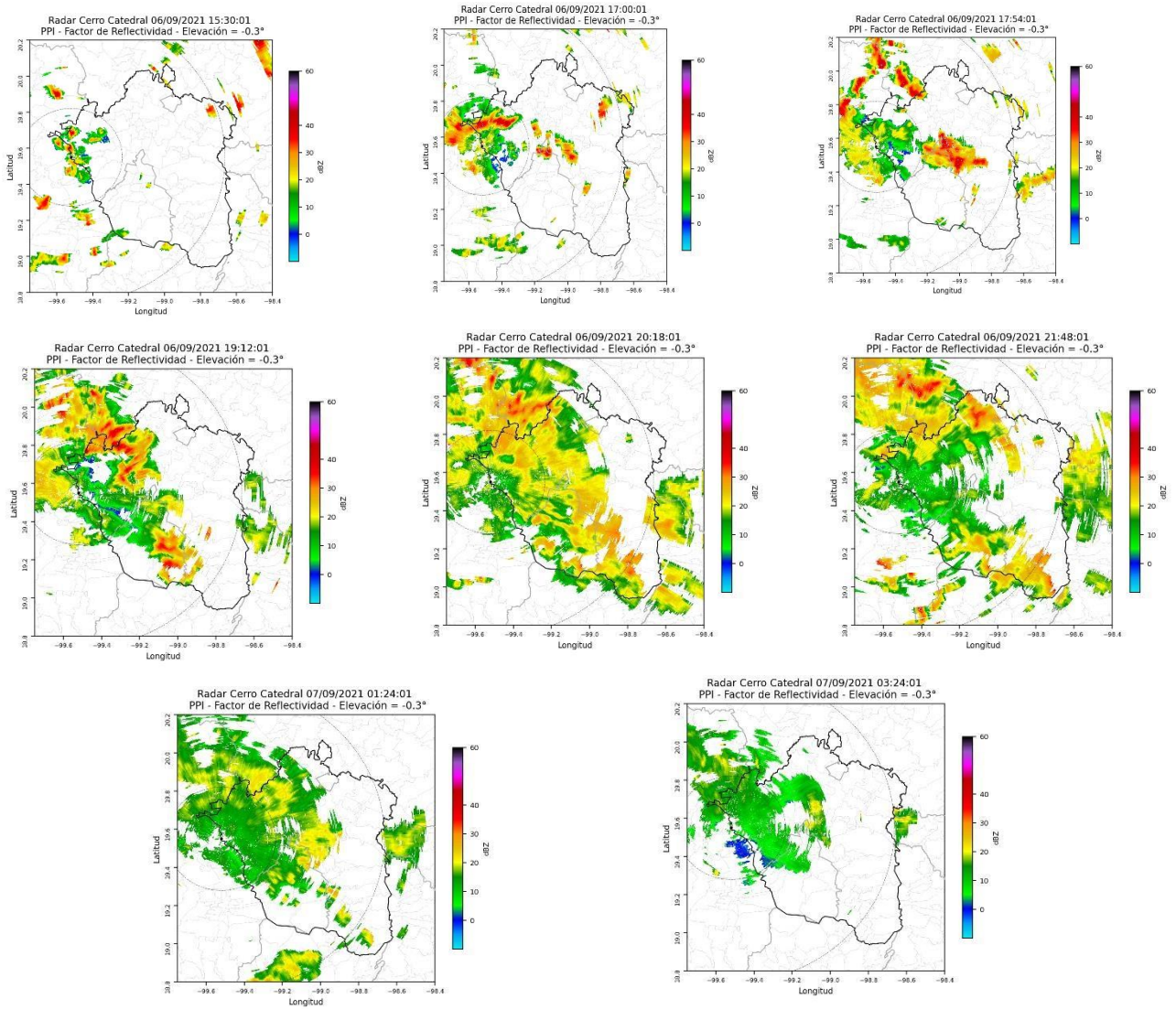


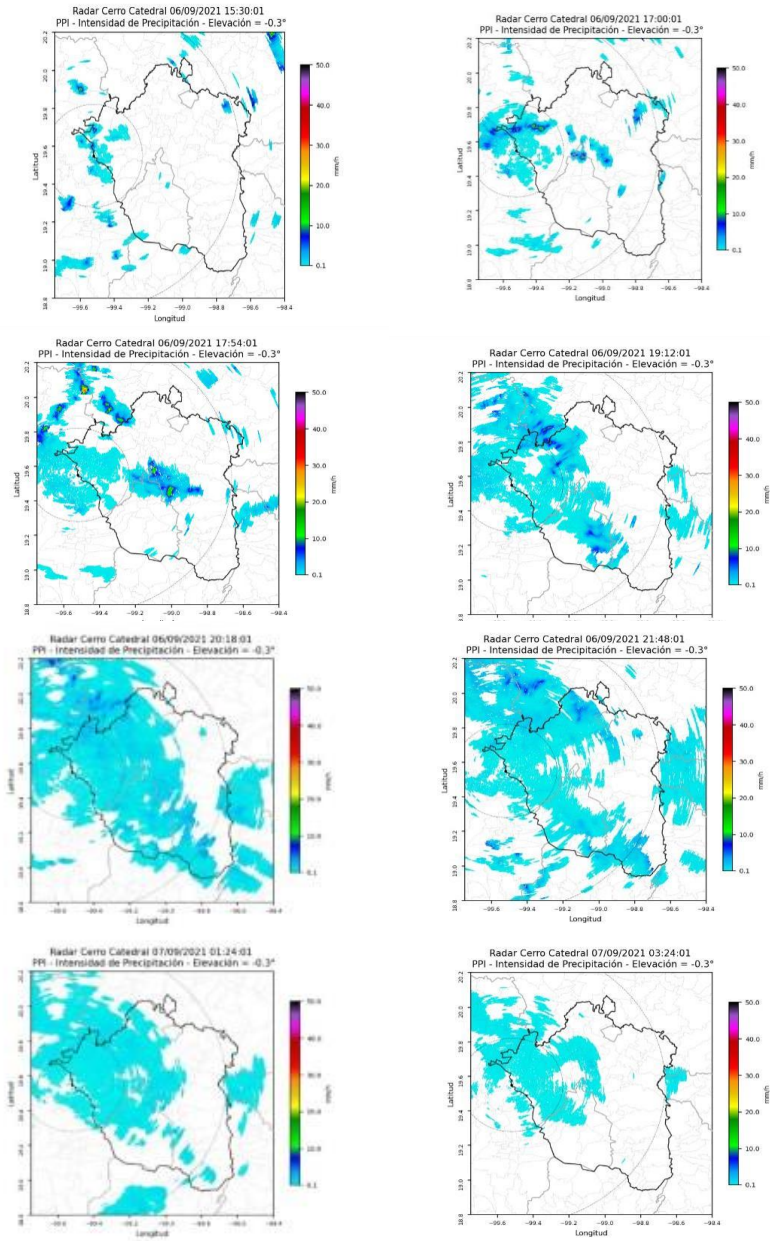
Figura 5.42 – Precipitación registrada por los disdrometros del OH-IIUNAM entre los días 06 y 07/09/2021.

En la Figura 5.43 se pueden observar los datos de la reflectividad para algunos horarios del evento, donde se observa el crecimiento de la tormenta en la zona central del radar, como también el desarrollo de la tormenta sobre la Ciudad de México. En la Figura 5.44 se observa la estimación de la precipitación para este mismo período. Se observa que los coeficientes aplicados no resultaron en una buena estimación de la precipitación para este evento, indicando que se necesitan evaluaciones más puntuales y valoración de otras metodologías de ajustes.





**Figura5.43** – Imágenes de la reflectividad del radar para el evento del día 06 y 07/09/2022.



**Figura 5.44** – Imágenes de la lluvia estimada con los coeficientes ajustado para el evento del día 06 y 07/09/2022.

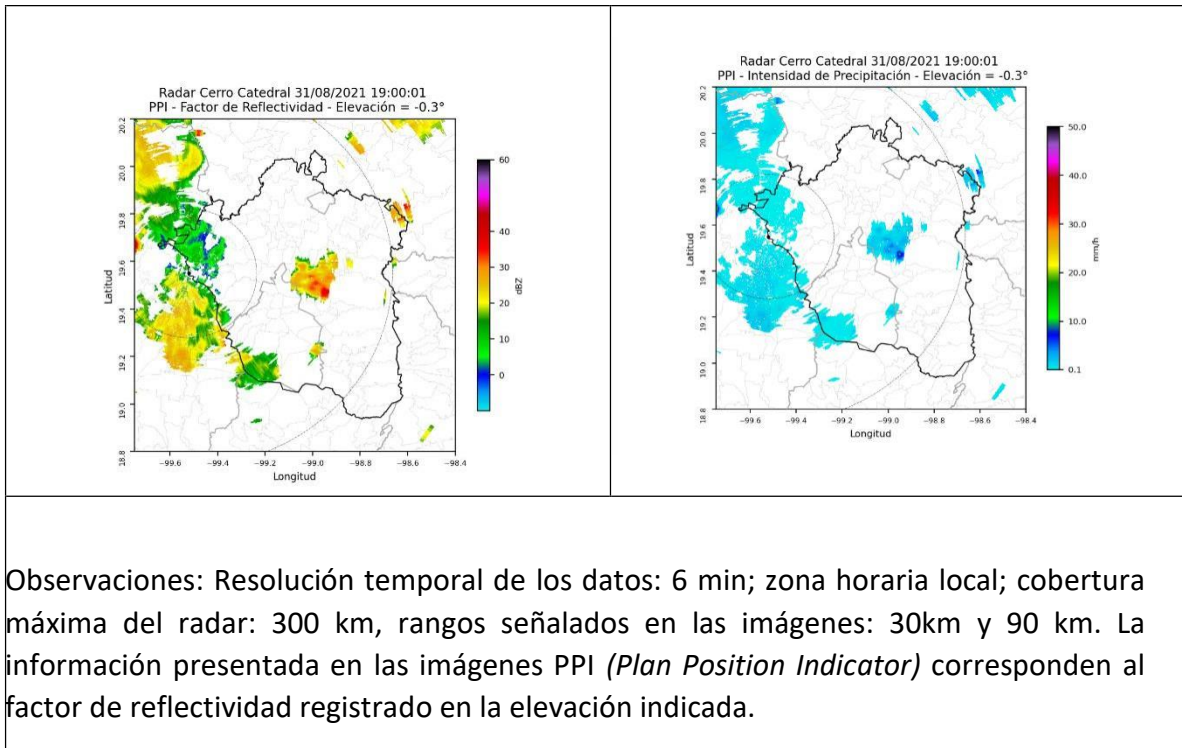
### 5.2.5 Comentarios para la estimación de la lluvia en tiempo real

Considerando los hallazgos del presente estudio con el objetivo de establecer una rutina automática para la estimación de la precipitación en tiempo real utilizando los datos del radar Cerro de Catedral, sobre el área de la zona metropolitana de Valle de México, se hacen algunos comentarios. Primeramente, que se establezca una estrategia de escaneo con ángulos de elevaciones constantes, o por lo menos, algunos puntuales. Considerando la futura existencia de una serie temporal de datos, se sugiere realizar estudios de evaluación del filtro de corrección de *clutter* y atenuación utilizada actualmente, posteriormente concentrarse en el uso de metodologías de ajuste de la precipitación estimada, como por ejemplo a través del uso de *filtro de kalman*.

En el caso futuro de contar con la generación de las estimaciones de la precipitación, se presenta en la **Tabla 5.5** la propuesta de la estructura de los datos del radar para la página para la visualización en tiempo real de esta información.

**Tabla 5.5** – Propuesta de estructura de los datos del radar para componer el sistema de visualización

<p>Radar de Catedral (Banda C)                  Ubicación: Cerro la Catedral, Estado de México (+-40 km de CDMX)                  (Lat.:19.5499 y Lon.: -99.5208)</p> <p>A partir de las imágenes del radar se puede acompañar en tiempo real la posición, el desplazamiento y la intensidad de las tormentas en el área de cobertura del radar.</p>	
<p>Variable: Factor de reflectividad del radar (dBZ)</p> <p>El valor del factor de reflectividad del radar depende de las características de los hidrometeoros que están presentes en las nubes. Esta variable indica la intensidad de las tormentas, por lo general, valores elevados de la reflectividad corresponden a lluvias intensas, mientras que los valores más bajos a nubes pocas profundas y en dado caso lluvia ligera.</p>	<p>Variable: Intensidad de precipitación (mm/h)</p> <p>La reflectividad (Z) se puede relacionar con la intensidad de lluvia <sup>®</sup> a través de ecuaciones empíricas, como la ampliamente utilizada propuesta por Marshall y Palmer (1948). La intensidad de precipitación presentada en las imágenes corresponde a la estimación realizada aplicaron los coeficientes de la ecuación de Marshal y Palmer ajustados al área de estudio.</p>



## 6. Sistema de visualización y consulta que integre los resultados de las salidas numéricas del modelo WRF, probabilidad de convección severa y corrección de lluvia y detección de convección severa por satélite.

### 6.1 Marco Teórico

El desarrollo del sistema de visualización y consulta tiene el objetivo principal de integrar los productos de las componentes desarrolladas en la etapa I y etapa II del proyecto, para así servir como una herramienta para el personal operativo de la Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional (CGSMN). Es necesario resaltar que para todo desarrollo de sistemas es de importancia la definición de una metodología en la cual la modelación formal del proyecto deberá estar presente para alcanzar el éxito del proyecto (Serna Montoya, 2010).

El desarrollo de sistemas puede verse como la construcción e integración de programas que se crean a través de asociaciones lógicas programadas para lograr una correcta codificación de los lenguajes y poder permitir una validación sobre un conjunto de pruebas (Parra Castrillón, 2011).

Otra definición que se le da a la modelación de procesos de software es *“una representación simplificada de un proceso de software, representada desde una perspectiva específica. Por su naturaleza los modelos son simplificados, por lo tanto, un modelo de procesos del software es una abstracción de un proceso real”* (Delgado Olivera y Díaz Alonso, 2021).

Las metodologías que son aplicables al desarrollo de lo sistemas son definidas de acuerdo al producto





final que se desea alcanzar, esta variedad de sistemas a desarrollar permite la existencia de distintas metodologías de software como son el modelo de desarrollo en cascada, incremental, evolutivo, de espiral, entre otras. Todas las metodologías tienen como objetivo principal obtener un entregable específico de acuerdo a los requisitos, análisis, diseño e implementación. Asimismo, los modelos genéricos no deben considerarse como descripciones definitivas de los procesos de software, por el contrario, deben ser tomadas como abstracciones útiles que pueden ser aplicadas a distintos enfoques del desarrollo de software, es por esta razón que los modelos antes mencionados son descripciones que pueden ser retomadas para el logro del objetivo final del proyecto a desarrollar (Delgado Olivera y Díaz Alonso, 2021).

El modelo en cascada es quizá el primer modelo de desarrollo de software el cual consta de cinco actividades fundamentales, las cuales se deben desarrollar de forma secuencial, siendo la fase de definición de requisitos la única en donde se realiza la recolecta de los requisitos funcionales y no funcionales del sistema y donde la última fase es la operación y mantenimiento. Este modelo no permite la retroalimentación entre fases, ni de la generación de prototipos para afinar detalles del producto.

Los modelos evolutivos tienen por objeto entender los requisitos que el usuario tiene y trabajan para mejorar la calidad de los mismos, la principal característica es comenzar con el desarrollo de un prototipo que se ira redefiniendo con cada ciclo del modelo, hasta lograr un prototipo que satisfaga las necesidades del proyecto.

El modelo de desarrollo de software en espiral es representado como su nombre lo indica en forma de espiral, donde en lugar de tener una secuencia de actividades donde las actividades no tienen retroalimentación, esta entrelaza las mismas dentro de su desarrollo y validación.

Durante las últimas décadas la ingeniería de software ha ido evolucionando constantemente intentando llevar una adaptación completa del desarrollo de software, estas adaptaciones se han visto marcadas por las distintas etapas que envuelven a los paradigmas de programación, entre los que se encuentra el enfoque estructural y el enfoque orientado a objetos, siendo este último el que ha permitido ampliar la brecha de la implementación de la metodología para el desarrollo de sistemas ágiles.

Teniendo conocimiento de la importancia de la ingeniería de software y de la implementación de una metodología de desarrollo, se han considerado algunas de las buenas prácticas del marco de gestión de proyectos ágiles SCRUM, siendo que entre las características que brinda SCRUM es la capacidad de proveer retroalimentación durante el desarrollo del prototipo inicial, incluyendo dentro del mismo no solo las experiencias de sistema actual, sino facilitar la incorporación de las experiencias aprendidas por los desarrolladores durante su formación profesional, debido a la naturaleza del proyecto y a la diversidad de expertos que se encuentran colaborando, este marco de trabajo permite al desarrollador abstraer esas experiencias y potenciarla en entregas que enriquezcan al sistema final (Mariño y Alfonso,





2014).

## 6.2 Arquitectura de desarrollo

La evolución de la computación para brindar servicios tecnológicos ha sido envuelta principalmente en cuatro eras: la era de la computadora central; la era de las computadoras dedicadas; la era del cómputo a través de redes; la era de la arquitectura cliente-servidor.

La era de la computadora central se caracteriza por tener una computadora central que se encargaba de proveer servicios a un grupo particular de usuarios y estos se conectaban de forma remota, por otro lado, la era de las computadoras dedicadas se enfocaba en prestar servicios al usuario lo que hizo que surgiera la necesidad de la aparición de las computadoras pequeñas con una característica enfocada en la facilidad de manejo.

En la era del cómputo a través de redes se centra en la accesibilidad de la información y del intercambio a través de un computador, donde todos los usuarios se encuentran comunicados debido a la característica de tener almacenada la información en varios computadores y finalmente la era de la arquitectura cliente-servidor, es aquella donde cada usuario es denominado como cliente produce una solicitud de información a cualquier computador que tiene almacenada la información, este computador es denominado servidor y es quien da respuestas a las solicitudes del cliente (Murillo Morera, 2010).

Esta evolución constante de la computación deja claro que no se puede hablar de un desarrollo completo de la computación debido al constante surgir de nuevas tecnologías y de arquitecturas, y de la necesidad de adaptarse a las metodologías emergentes para lograr el objetivo de algún proyecto en específico, siempre teniendo presente la naturaleza del mismo y hacia que usuarios se ha dirigido.

Por ello el desarrollo del sistema se dirige bajo el enfoque de una arquitectura cliente-servidor lo que posibilita que las solicitudes de visualización de los productos sean resueltas y administradas por un computador central y este reciba todos los productos de forma transparente para el usuario final (Vera, Zúñiga y Bernal, 2013).

## 6.3 Modelo de negocio

El interpretar mediante imágenes la mayor parte del tiempo resulta más sencillo, de ahí que es importante para el desarrollo de los sistemas emplear diagramas, que permitan a los involucrados, brindar un panorama más claro de las funcionalidades del sistema. Dentro de las herramientas que



tienen dicho fin se encuentran los diagramas con el Lenguaje Unificado de Modelado (UML), el cual permite una imagen visual comprensible por los usuarios de negocios y quienquiera que desee entender un sistema. Como bien se describe en el artículo Lenguaje de modelamiento unificado (UML) para modelamiento de embotelladora, en el que cual nos describe que, *UML se define como un lenguaje gráfico para visualizar, especificar, construir y documentar los artefactos de un sistema con gran cantidad de software. Proporciona una forma estándar de diagramar planos de un sistema, abarcando las partes conceptuales (funciones del sistema, y en principio también procesos industriales), y los objetos concretos (clases escritas en lenguajes de programación específico, esquemas de bases de datos, componentes de software reutilizables)* (Parra, Ruiz y Paz, 2005).

Los casos de uso proporcionan una estructura para expresar requisitos funcionales en el contexto de procesos empresariales y de sistema. Pueden representarse como un elemento gráfico en un diagrama y como una especificación de caso de uso en un documento textual, tal y como se menciona el artículo **Método para el modelado y prueba de Diagramas de Casos de Uso mediante redes de Petri**, en el cual describe que *“El modelado de software es clave en el desarrollo de aplicaciones informáticas, es una forma gráfica de visualizar, construir y documentar un sistema, además de que pueden utilizarse para la comunicación con el cliente”*. Por otro lado, un caso de uso representa un objetivo sencillo de un sistema y describe una secuencia de actividades y de interacciones con el usuario para alcanzar el objetivo.

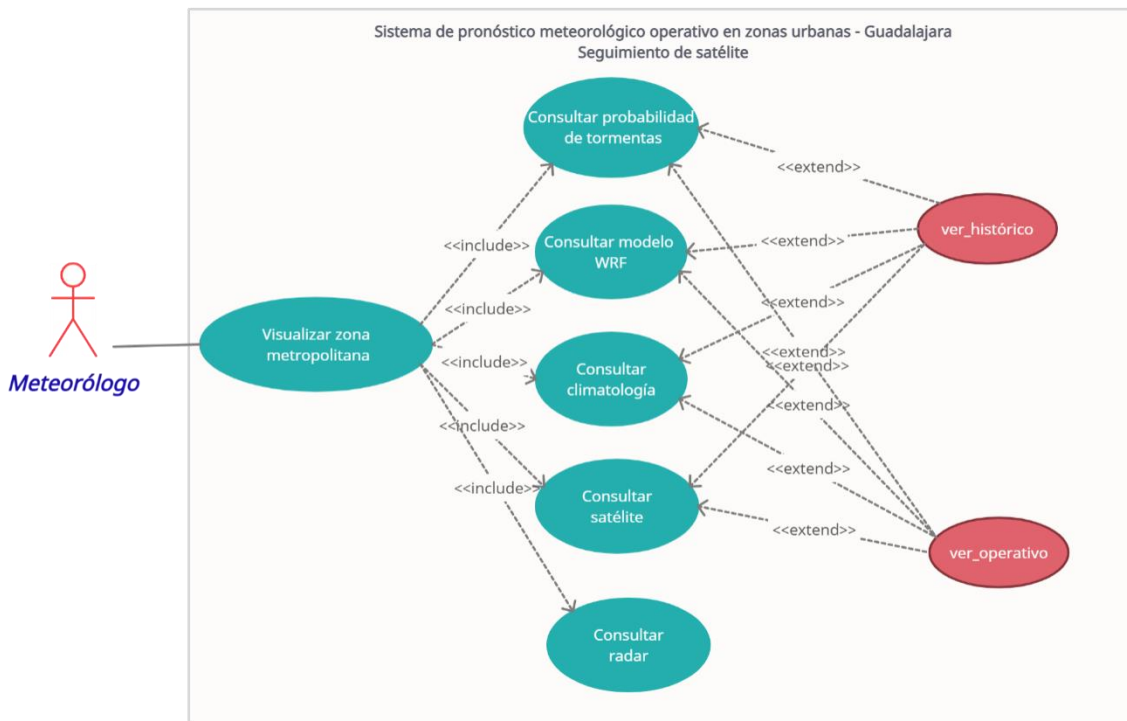
Los diagramas de caso de uso son utilizados para reunión los requerimientos de uso de un sistema y con base en ellos se pueden utilizar los datos de diferentes maneras, tales como:

1. Identificar las funcionalidades y roles que interactúan con ellas.
2. Una visión de alto nivel, en la cual los involucrados en el desarrollo del sistema, puede visualizar de manera más sencilla los usuarios que interactúan con el sistema y su funcionalidad.
3. Identificar factores internos y externos.

Según el artículo **Generación del diagrama de casos de uso a partir del lenguaje natural o controlado: una revisión crítica**, *el diagrama de casos de uso es importante en el desarrollo de aplicaciones de software para capturar los requisitos funcionales y para manejar la complejidad de sistemas robustos*. Por otro lado, define a los diagramas de casos de uso como *“diagrama que muestra las relaciones entre los actores y el sujeto (sistema) y los casos de uso. Jacobson en 1987 y Jacobson et al en 1992 introdujeron el diagrama de casos de uso, que describe los requisitos funcionales del sistema en términos de las secuencias de acciones”*. En OMG, Schach y Fowler se presentan los siguientes elementos de su especificación:

- Casos de uso: son caracterizados por las especificaciones de un conjunto de acciones que un actor o un conjunto de actores del sistema realiza sobre él.
- Actores: son los roles que un usuario o un conjunto de usuarios realizan dentro del sistema.
- Relaciones: permite identificar la comunicación que existe entre los actores y los casos de uso del sistema, estas pueden ser de cuatro tipos:
  - Asociación: relación establecida entre los actores y casos de uso.
  - <<include>>: se presenta cuando el caso de uso origen incluye también el comportamiento descrito por el caso de uso destino.
  - <<extend>>: ocurre cuando el caso de uso origen extiende el comportamiento del caso de uso destino.
  - <<inheritance>>: un caso de uso origen hereda la especificación del caso de uso destino y posiblemente la modifica y/o amplía. Este tipo de relación también se presenta entre los actores.

Teniendo de conocimiento la importancia de la modelación del negocio mediante la implementación del diagrama de casos de uso, a continuación, se puede ver el diagrama que corresponde al sistema, el diagrama está compuesto por ocho casos de uso y un actor (ver, figura 6.1).



**Figura 6.1** Modelo de casos de uso del sistema de visualización. Fuente: elaboración propia.

## 6.4 Descripción de los actores del sistema

La descripción de los actores permite comprender las acciones que los usuarios del sistema podrán realizar al interactuar con él, en el caso del sistema de visualización solo se describe un actor denominado “Meteorólogo”.

<b>Nombre de actor</b>	Meteorólogo
<b>Descripción</b>	Es aquel actor que puede realizar la consulta de información en el sistema
<b>Tipo de actor</b>	Primario
<b>Acciones</b>	Actúa con el caso de uso: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Visualiza zona metropolitana</li> </ul>

**Tabla 1.** Descripción de actor “Meteorólogo”. Fuente: elaboración propia.

## 6.5 Descripción de casos de uso

La descripción de los casos de uso permite comprender la naturaleza de la acción que representa el caso de uso, los actores con los que se involucra, las interacción que tiene con otros casos de uso del sistema, las condiciones que deben existir para su correcto funcionamiento, el cual está reflejado en el flujo de datos y las condiciones finales en las que el sistema debe ser liberado para que se encuentre listo para otras solicitudes de los actores.

A continuación, se presenta la descripción del modelo de casos de uso del sistema donde se puede ver lo antes mencionado:

<b>Caso de uso</b>	Sistema de pronóstico meteorológico operativo en zonas urbanas.
<b>Descripción</b>	Permite la visualización y consulta de la información del pronóstico meteorológico operativo en zonas urbanas.
<b>Actor:</b>	Meteorólogo
<b>Relaciones</b> <<include>>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Consultar probabilidad de tormentas</li> <li>• Consultar modelo WRF</li> <li>• Consultar climatología</li> <li>• Consultar satélite</li> <li>• Consultar radar</li> </ul>

<b>Relaciones</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ver histórico</li> <li>• Ver operativo</li> </ul>
<b>&lt;&lt;extend&gt;&gt;</b>	
<b>Precondiciones</b>	El servidor en el cual está alojado el sistema debe estar disponible.
<b>Flujo de datos</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. El sistema muestra un menú con las opciones con las que cuenta el usuario “Meteorólogo”.</li> <li>2. El usuario “Meteorólogo” selecciona la opción que desea consultar, entre las que se encuentran:             <ol style="list-style-type: none"> <li>a. Probabilidad de tormentas</li> <li>b. Modelo WRF</li> <li>c. Climatología de tormentas</li> <li>d. Seguimiento de satélite</li> <li>e. Estimación de lluvia por radar</li> </ol> </li> <li>3. El sistema, según la opción seleccionada por el usuario, el sistema solicita se ingresen datos para la muestra de los datos.</li> </ol>
<b>Pos-condiciones</b>	El sistema está preparado para realizar otra consulta de información.
<b>Flujo de datos alternativo</b>	3.1. Si el usuario “Meteorólogo” no ingresa los datos solicitados por el sistema, no se estará en condiciones de visualizar la información en el caso de información histórica.

**Tabla 6.2.** Descripción del modelo de caso de uso del “Sistema de pronóstico meteorológico operativo en zonas urbanas”. Fuente: elaboración propia

Con el fin de especificar las acciones que el caso de uso “consultar climatología” contempla, a continuación se muestra la descripción del mismo.

<b>Caso de uso</b>	Consultar climatología
<b>Descripción</b>	Permite la visualización de climatología de tormentas
<b>Actor:</b>	Meteorólogo
<b>Precondiciones</b>	El servidor en el cual está alojado el sistema debe estar disponible.
<b>Flujo de datos</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. El usuario “Meteorólogo”, selecciona la opción “Climatología de tormentas”.</li> <li>2. El sistema muestra las opciones requeridas para la visualización del sistema.</li> <li>3. El usuario “Meteorólogo”, selecciona las siguientes opciones:</li> </ol>



	<ol style="list-style-type: none"> <li>a. Tipo de dato (observaciones o re-análisis)</li> <li>b. Variable meteorológica o índice</li> <li>c. Periodicidad (estacional o mensual)</li> <li>d. Estaciones o meses depende de la selección de tipo de dato, variable meteorológica y periodicidad.</li> </ol>
	4. El sistema, según la opción seleccionada por el usuario “Meteorólogo”, muestra la información.
<b>Postcondiciones</b>	El sistema está preparado para realizar otra consulta de información.
<b>Flujo de datos alterno</b>	3.1. Si el usuario no selecciona los datos solicitados por el sistema, no se estará en condiciones de visualizar la información.

**Tabla 6.3** Descripción del caso de uso - consultar climatología. Fuente: elaboración propia.

Las acciones del caso de uso “Consultar modelo WRF” se describen a continuación, a fin de dar a conocer la interacción entre el usuario y el flujo de datos dentro del mismo.

<b>Caso de uso</b>	Consultar modelo WRF
<b>Descripción</b>	Permite la visualización del modelo WRF
<b>Actor:</b>	Meteorólogo
<b>Precondiciones</b>	El servidor en el cual está alojado el sistema debe estar disponible.
<b>Flujo de datos</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. El usuario “Meteorólogo”, selecciona la opción “Modelo WRF”.</li> <li>2. El sistema muestra las opciones requeridas para la visualización del sistema.</li> <li>3. El usuario “Meteorólogo”, selecciona las siguientes opciones:                     <ol style="list-style-type: none"> <li>a. Fecha a consultar</li> <li>b. Hora de corrida del modelo WRF</li> <li>c. Variables meteorológicas o índices</li> <li>d. Tiempo de acumulación, se refiere a que, si los productos son con resultados a 24, 6 o una hora.</li> </ol> </li> <li>4. El sistema, según la opción seleccionada por el usuario “Meteorólogo”, muestra la información.</li> </ol>
<b>Postcondiciones</b>	El sistema está preparado para realizar otra consulta de información.

**Flujo de datos alterno** 3.1. Si el usuario no selecciona los datos solicitados por el sistema, no se estará en condiciones de visualizar la información.

**Tabla 6.4.** Descripción del caso de uso – consultar modelo WRF. Fuente: elaboración propia.

Las acciones del caso de uso “Consultar satélite” se describen a continuación, con el objeto de conocer la interacción entre el usuario y el flujo de datos dentro del mismo.

<b>Caso de uso</b>	Consultar satélite
<b>Descripción</b>	Permite la visualización de seguimiento de satélite de la lluvia registrada.
<b>Actor:</b>	Meteorólogo
<b>Precondiciones</b>	El servidor en el cual está alojado el sistema debe estar disponible.
<b>Flujo de datos</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. El usuario “Meteorólogo”, selecciona la opción “Seguimiento de satélite”.</li> <li>2. El sistema muestra las opciones requeridas para la visualización del sistema.</li> <li>3. El usuario “Meteorólogo”, selecciona las siguientes opciones:             <ol style="list-style-type: none"> <li>a. Fecha a consultar</li> <li>b. Hora de UTC</li> </ol> </li> <li>4. El sistema muestra 3 productos:             <ol style="list-style-type: none"> <li>a. Lluvia estimada del satélite</li> <li>b. Lluvia estimada del satélite corregida</li> <li>c. Curvas de masa</li> </ol> </li> <li>5. El sistema, según la opción seleccionada por el usuario “Meteorólogo”, muestra la información.</li> </ol>
<b>Postcondiciones</b>	El sistema está preparado para realizar otra consulta de información.
<b>Flujo de datos alterno</b>	3.1. Si el usuario no selecciona los datos solicitados por el sistema, no se estará en condiciones de visualizar la información.

**Tabla 6.5** Descripción del caso de uso – consultar satélite. Fuente: elaboración propia

Para los casos de uso “ver histórico” y “ver operativo” extienden la funcionalidad de los casos de uso con los que interactúan, a continuación se describe cada uno de ellos:

<b>Caso de uso</b>	Ver histórico
<b>Descripción</b>	Permite la visualización de la información histórica
<b>Actor:</b>	No actúa con el actor
<b>Precondiciones</b>	El servidor en el cual está alojado el sistema debe estar disponible.
<b>Flujo de datos</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. El sistema recibe los datos de los casos de uso:             <ol style="list-style-type: none"> <li>a. Consultar probabilidad de tormentas</li> <li>b. Consultar modelo WRF</li> <li>c. Consultar climatología</li> <li>d. Consultar satélite</li> <li>e. Consultar radar</li> </ol> </li> <li>2. El sistema arroja el histórico de la información solicitada</li> </ol>
<b>Postcondiciones</b>	El sistema está preparado para realizar otra consulta de información.
<b>Flujo de datos alternativo</b>	-

**Tabla 6.6** Descripción del caso de uso – ver histórico. Fuente: elaboración propia

<b>Caso de uso</b>	Ver operativo
<b>Descripción</b>	Permite la visualización de la información operativa.
<b>Actor:</b>	No actúa con el actor
<b>Precondiciones</b>	El servidor en el cual está alojado el sistema debe estar disponible.
<b>Flujo de datos</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>3. El sistema recibe los datos de los casos de uso:             <ol style="list-style-type: none"> <li>a. Consultar probabilidad de tormentas</li> <li>b. Consultar modelo WRF</li> <li>c. Consultar climatología</li> <li>d. Consultar satélite</li> <li>e. Consultar radar</li> </ol> </li> <li>4. El sistema arroja la información operativa solicitada</li> </ol>
<b>Postcondiciones</b>	El sistema está preparado para realizar otra consulta de información.
<b>Flujo de datos alternativo</b>	-

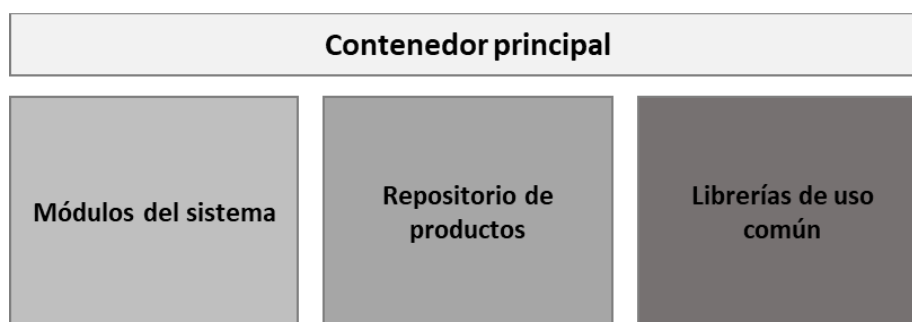
**Tabla 6.7** Descripción del caso de uso – ver operativo. Fuente: elaboración propia

## 6.6 Implementación del sistema

El sistema de visualización y consulta ha sido desarrollado mediante la integración de las herramientas y lenguajes de programación: PHP, HTML, marco de diseño Bootstrap, librería JQuery, bajo la estructura de una arquitectura cliente-servidor.

## 6.7 Estructura interna del sistema

La integración antes mencionada permitió lograr una estructura interna del sistema que permite la escalabilidad del mismo, es decir, que la extensibilidad y alcance del sistema puede ser dotada de nuevas funcionalidades con una curva de aprendizaje reducida, manteniendo una simplicidad en su estructura de origen (ver, figura 6.2).



**Figura 6.2** Estructura interna del sistema de visualización y consulta. Fuente: elaboración propia.

La estructura interna del sistema cuenta con los siguientes componentes:

- Contenedor principal
- Módulos del sistema
- Repositorio de productos
- Librerías de uso común

### ***Contenedor principal***

Este componente mantiene toda la estructura interna del sistema, es decir, es la raíz principal del sistema de aquí se desprende el componente “módulos del sistema”, “repositorio de productos” y “librerías de uso común”.

### ***Módulos del sistema***

Este componente resguarda los módulos que agregan funcionalidades al sistema, y permite mantener la escalabilidad del mismo, al incorporar otros módulos que se deseen desarrollar bajo esta estructura,

debido a que cada módulo integrado no depende de forma directa de algún otro a excepción de un único módulo que es de configuración, el cual solo provee información de configuración inicial.

### ***Repositorio de productos***

Componente dentro del cual los procesos automáticos de entrega de productos de los procesos de “probabilidad de tormentas”, “modelación con WRF” y “seguimiento de satélite”, así como los resultados del estudio de “climatología de tormentas” y “estimación con radar”, mantienen la actualización de sus productos en un orden establecido, que permite al sistema proveer una capacidad de consulta a los usuarios sobre los productos de forma operativa y de consulta histórica, según corresponda la funcionalidad solicitada.

Los productos son clasificados en las siguientes categorías:

- Climatología
- Radar
- Satélite
- Tormentas
- Wrf

### ***Librerías de uso común***

Componente que concentra las librerías que se utilizan en común entre los módulos del sistema, esta centralización permite mantener un mantenimiento sobre las librerías si en algún momento es necesario. Dentro de esto se pueden agregar nuevas librerías que son utilizadas por otros módulos de recién integración.

## **6.8 Estructura general del sistema de visualización**

El prototipo en evolución que se ha desarrollado ha logrado tener la siguiente estructura gráfica, esto con base en la interacción que ha existido como parte de las reuniones del marco de desarrollo SCRUM, asimismo, se puede ver que el sistema mantiene la integridad y coherencia con los lineamientos del Gobierno Federal, sin embargo, al ser un sistema que será de uso restringido, esto permite adaptar dichos lineamientos para ofrecer una mejor experiencia de uso para los usuarios finales.

Este prototipo en evolución integra las bondades del lenguaje de programación PHP junto con la potencia y ligereza del marco de diseño Bootstrap y la librería JQuery, esta última para permitir una interacción entre los algoritmos desarrollados del lado del cliente con los algoritmos desarrollados del lado del servidor, siguiendo la naturaleza de la arquitectura cliente-servidor.

Los componentes principales de la estructura gráfica del prototipo del sistema son:

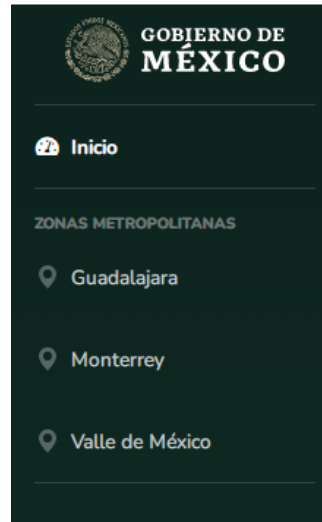
- Menú de módulos
- Menú de submódulos



- Área de visualización e interacción.

### Menú de módulos

Esta sección del sistema permite a los usuarios del sistema el acceso a los recursos que están disponibles para las zonas metropolitanas Guadalajara, Monterrey y Valle de México, bajo esta construcción este menú es el punto de enlace entre los módulos del sistema y las vistas que los módulos brindan para su uso (ver, figura 6.3).



**Figura 6.3.** Menú de módulos. Fuente: elaboración propia.

### Menú de submódulos

Este menú despliega los submódulos que han sido programados para el módulo que ha sido seleccionado, este menú es propio de cada módulo y no depende de las funcionalidades de los distintos módulos integrados en el sistema (ver, figura 6.4).

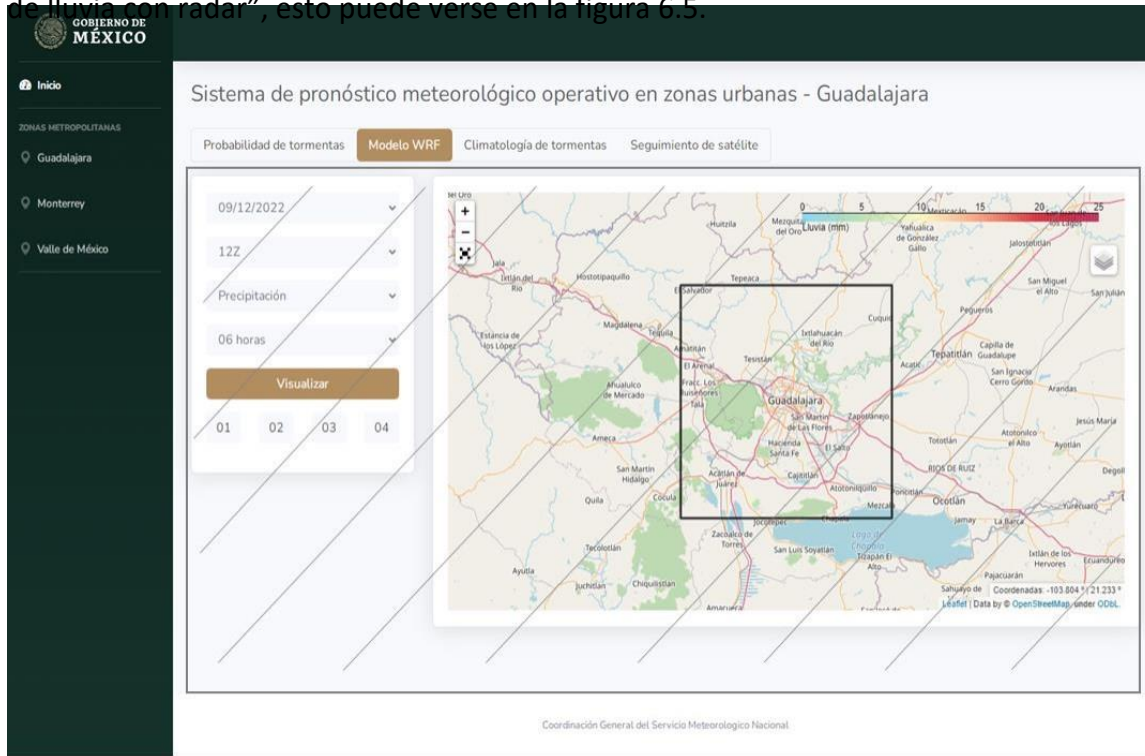


**Figura 6.4** Menú de submódulos. Fuente: elaboración propia.

### Área de visualización e interacción

Este componente es el área destinada para la visualización y los mecanismos necesarios para la consulta que han sido desarrollados para los módulos y submódulos del sistema. Esta área cubre la mayor parte

del lienzo de la pantalla con el fin de proveer la mayor cantidad de espacio y resaltar los productos finales que son resultados de los desarrollos de los equipos de trabajo “probabilidad de tormentas”, “modelación numérica con WRF”, “climatología de tormentas”, “seguimiento de satélite” y “estimación de lluvia con radar”, esto puede verse en la figura 6.5.



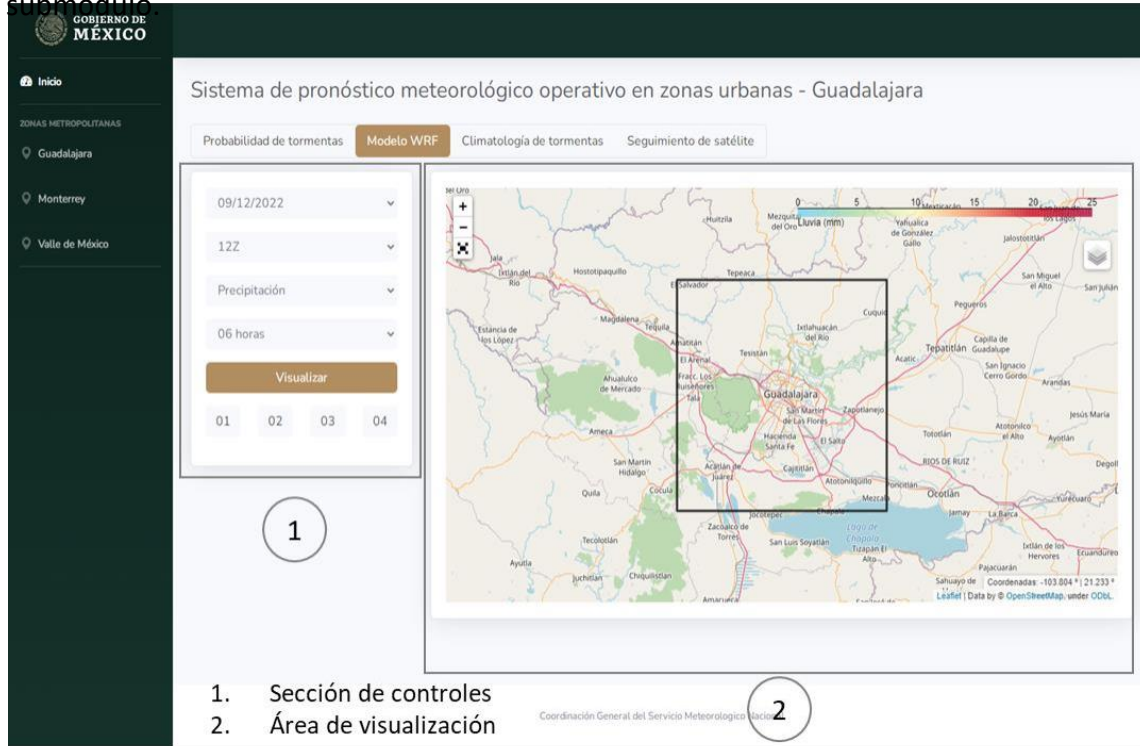
**Figura 6.5** Área de visualización e interacción. Fuente: elaboración propia

## 6.9 Submódulos de las zonas metropolitanas

Dentro del sistema se han desarrollado los prototipos para los módulos de las zonas metropolitanas Guadalajara, Monterrey y Valle de México, estos módulos a excepción de los productos de radar son brindados dentro de sus funcionalidades, a continuación, se enlistan los productos que están disponibles dentro de cada uno:

- Modelo WRF
- Climatología de tormentas
- Seguimiento de satélite
- Probabilidad de tormentas

Los submódulos cuentan con una estructura que incluye una sección de controles de consulta y de área de visualización del producto (ver, figura 6.6), la distribución de estas secciones es diseñada de acuerdo a cada submódulo.



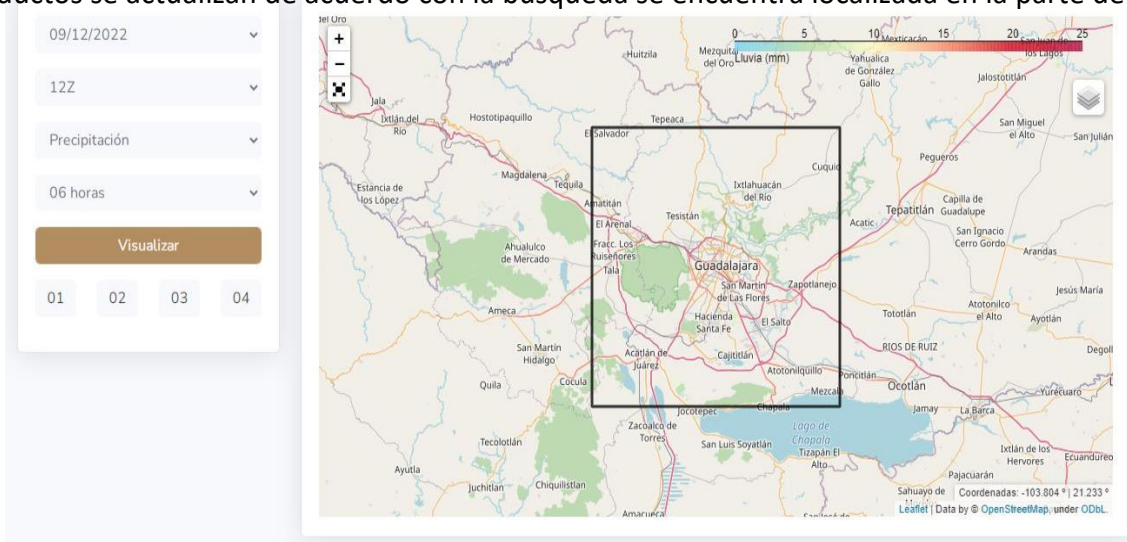
**Figura 6.6** Distribución de área de visualización e interacción de submódulos. Fuente: elaboración propia.

La sección de controles se ajusta de acuerdo a los productos que se han desarrollado para consulta dentro del sistema, ya que cada submódulo provee un producto en específico y sus características que lo definen, mismas que proveen la diversidad de productos.

### 6.9.1 Submódulo modelo WRF

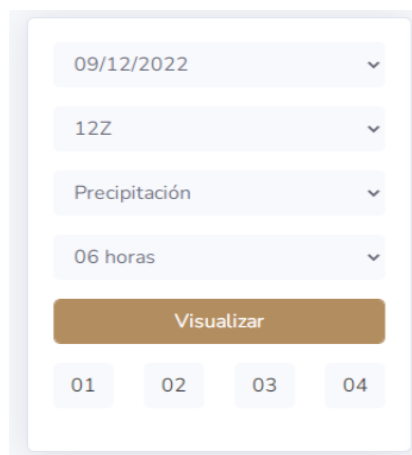
Este submódulo provee al sistema de las capacidades para el acceso a los productos que son resultados de la ejecución del modelo numérico WRF para las tres zonas metropolitanas (Guadalajara, Monterrey y Valle de México).

Centrándose en el área de visualización e interacción de este submódulo como se puede ver en la figura 6.7 la sección de controles se encuentra localizada en la parte izquierda y el área de visualización donde los productos se actualizan de acuerdo con la búsqueda se encuentra localizada en la parte derecha.



**Figura 6.7** Área de visualización e interacción del modelo WRF. Fuente: elaboración propia.

Los controles que este módulo brinda al usuario son necesarios para acceder a todos los productos que son generados a partir de la ejecución del modelo numérico WRF empleado en el presente proyecto y de los productos que han sido seleccionados para su implementación en el estudio.



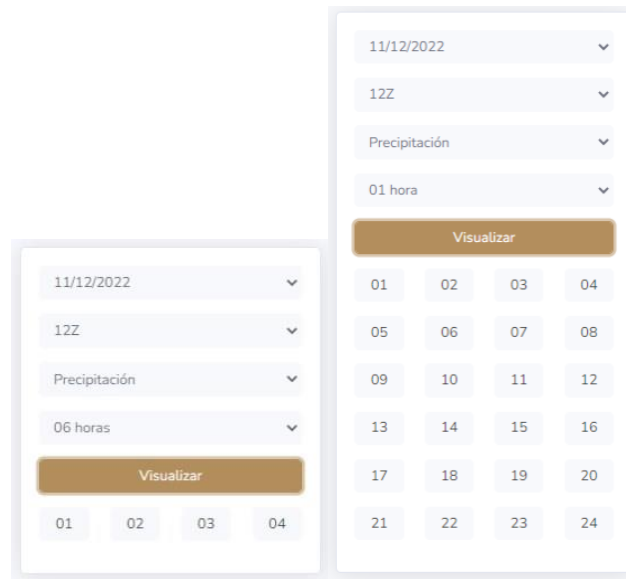
**Figura 6.8** Controles del submódulo modelo WRF

Dentro de los controles de búsqueda, este submódulo permite la selección de:

- Fecha

- Hora de ejecución del modelo numérico WRF
- Variable meteorológica o índice
- Tiempo de acumulación

Del tiempo de acumulación al seleccionar un valor distinto a un acumulado cada 24 horas, este ajusta los controles de tal forma que se tenga acceso a los cuatro productos en el caso de un acumulado cada seis horas o de 24 productos en el caso de un acumulado de cada hora (ver, figura 6.9).



11/12/2022	11/12/2022
12Z	12Z
Precipitación	Precipitación
06 horas	01 hora
Visualizar	Visualizar
01 02 03 04	01 02 03 04
	05 06 07 08
	09 10 11 12
	13 14 15 16
	17 18 19 20
	21 22 23 24

**Figura 6.9** Ajuste de controles con base a tiempo de acumulación. Fuente: elaboración propia.

Las tres zonas metropolitanas comparten el mismo diseño y funcionalidad, mismo que puede ser visto en la figura 10-12, donde claramente se observa la similitud de diseño y únicamente la variación en los productos entregados.



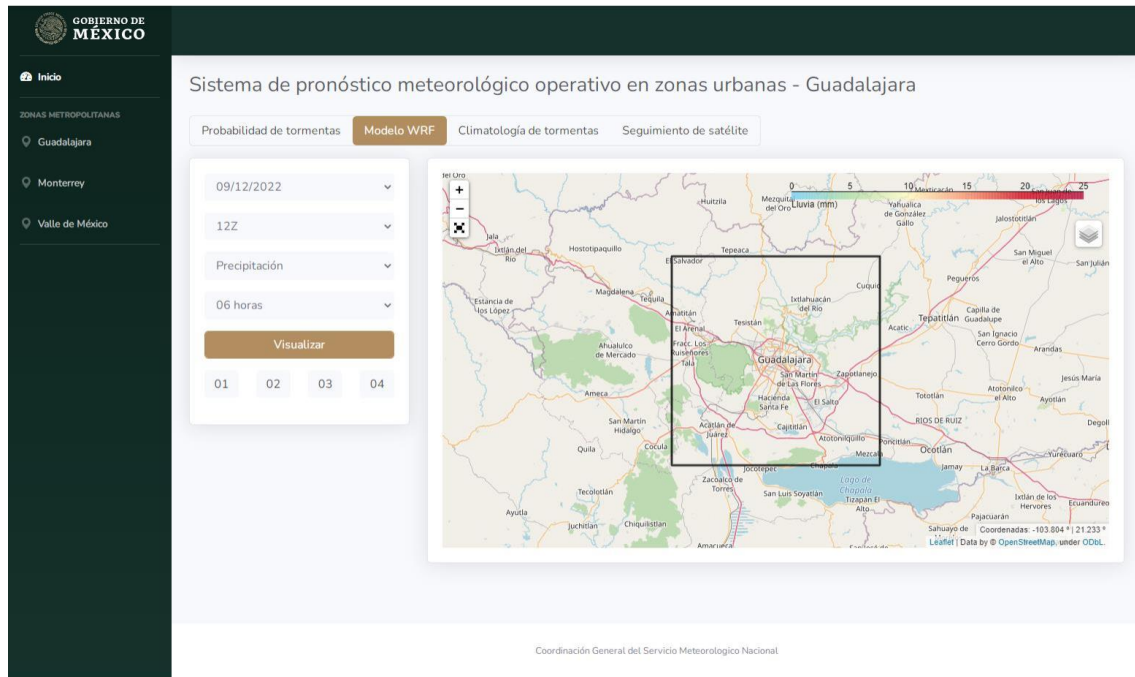


Figura 6.10 Submódulo modelo WRF implementado en la zona metropolitana Guadalajara. Fuente: elaboración propia.

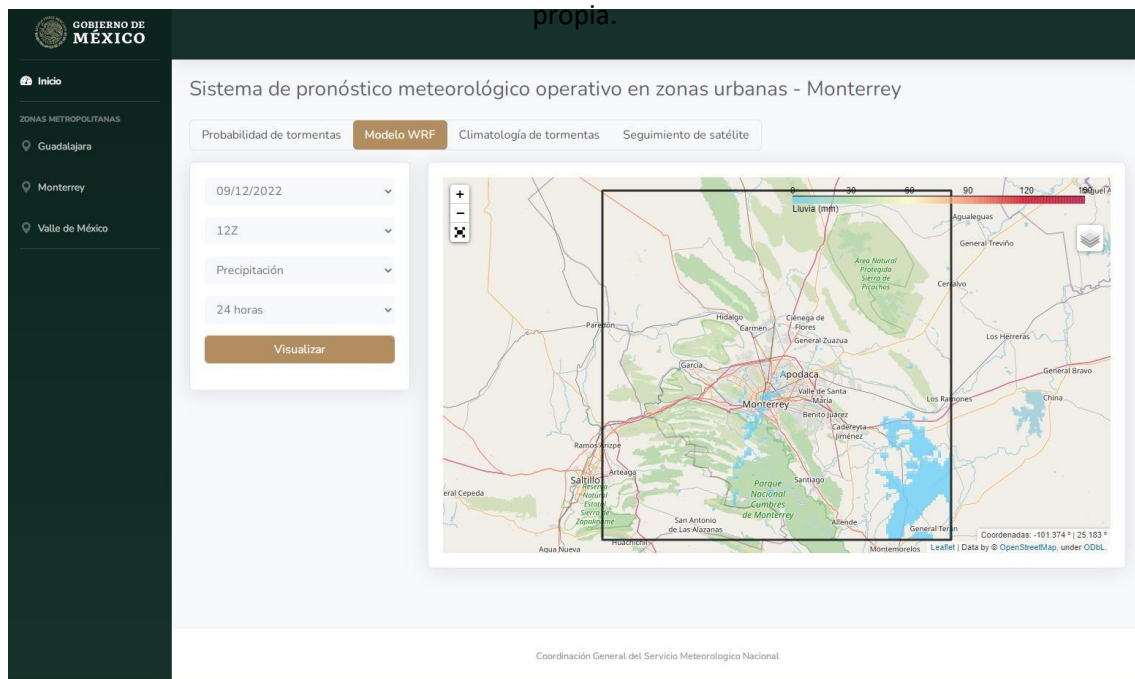
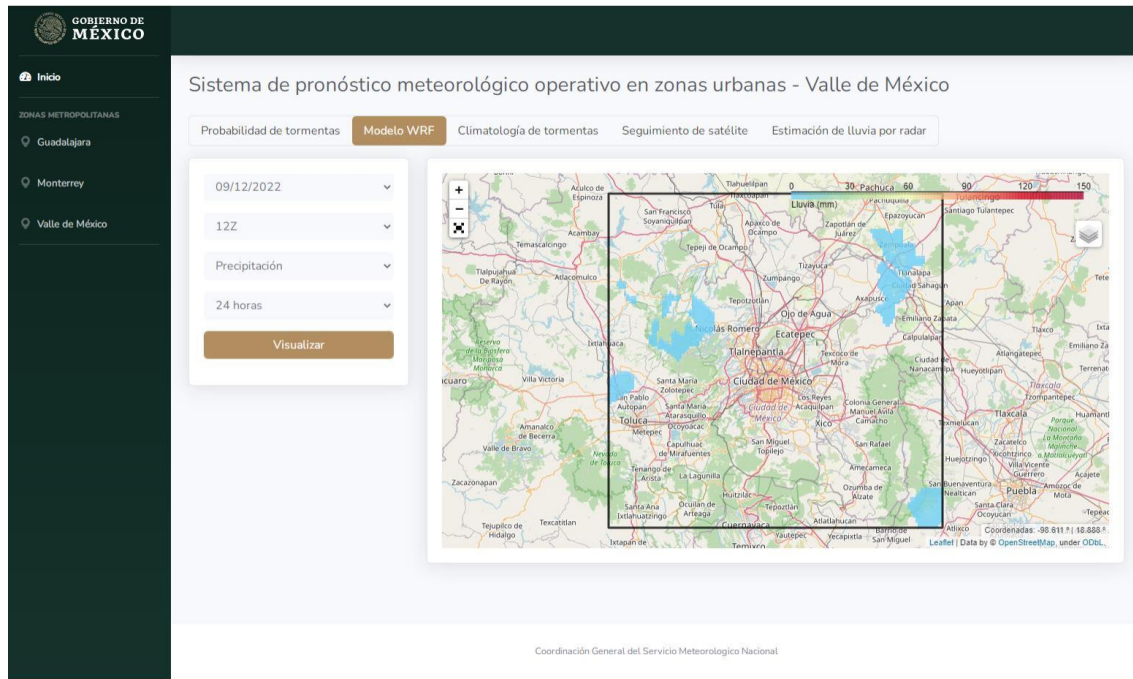


Figura 6.11 Submódulo modelo WRF implementado en la zona metropolitana Monterrey. Fuente: elaboración propia.

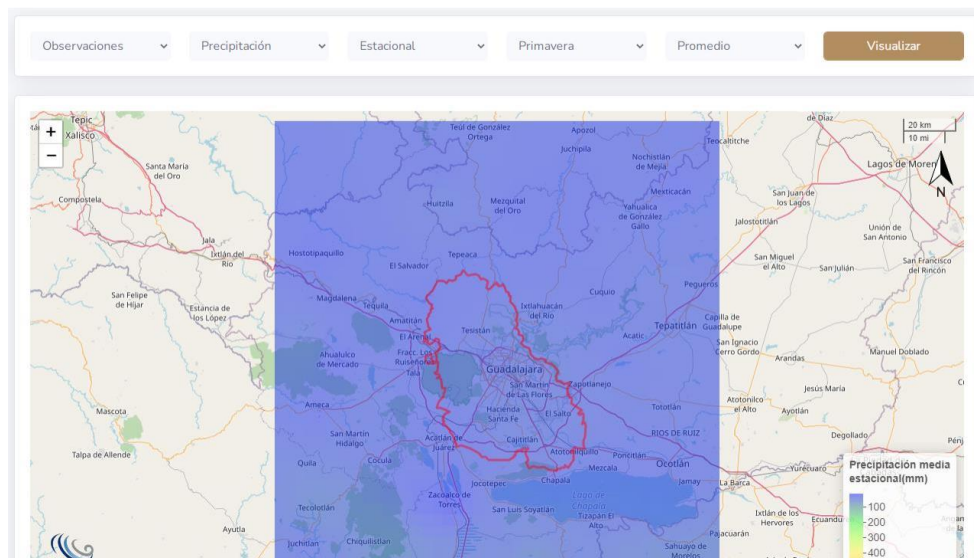


**Figura 6.12** Submódulo modelo WRF implementado en la zona metropolitana Valle de México. Fuente: elaboración propia.

### 6.9.2 Submódulo climatología de tormentas

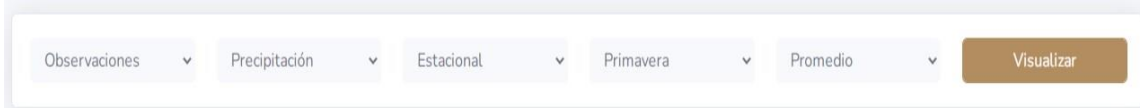
Este submódulo provee al sistema de las capacidades para el acceso a los productos que ha sido resultado de un estudio de climatología de tormentas para las tres zonas metropolitanas (Guadalajara, Monterrey y Valle de México).

Centrándose en el área de visualización e interacción de este submódulo como se puede ver en la figura 13 la sección de controles se encuentra localizada la parte superior, por encima del área de visualización misma que permite ver los productos de acuerdo con los criterios de búsqueda.



**Figura 6.13** Área de visualización e interacción de climatología de tormentas. Fuente: elaboración propia.

Los controles brindan al usuario lo necesario para acceder a todos los productos desarrollados por el estudio de climatología de tormentas especificados dentro del proyecto.



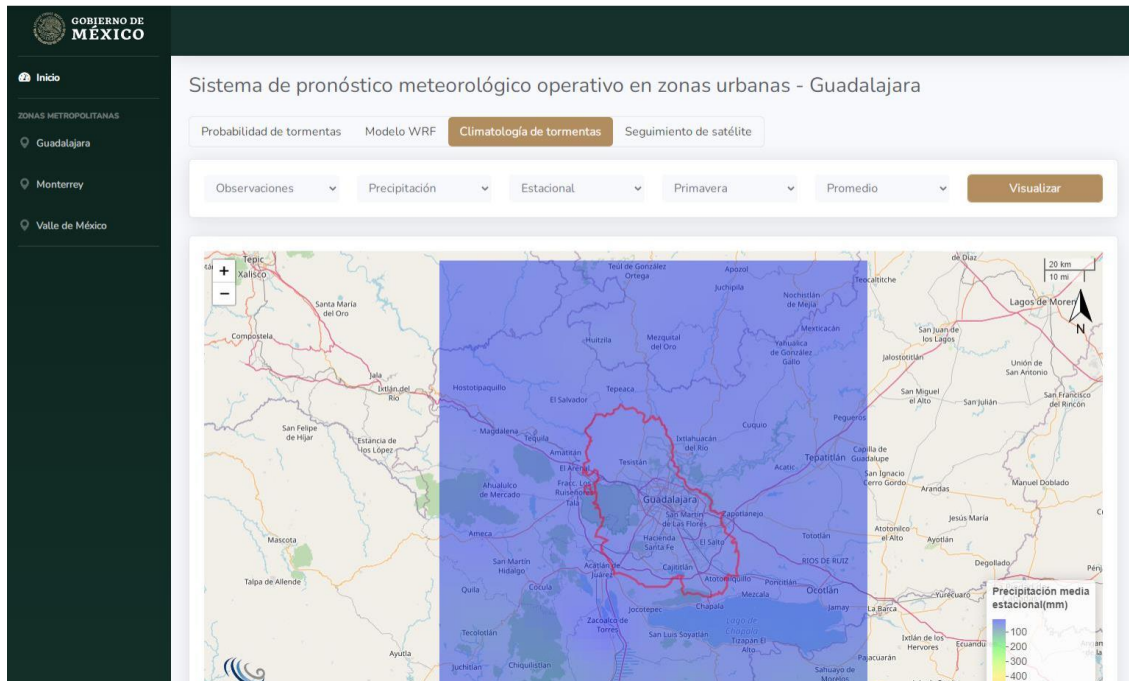
**Figura 6.14** Controles del submódulo climatología de tormentas. Fuente: elaboración propia.

Dentro de los controles de búsqueda, este submódulo permite la selección de:

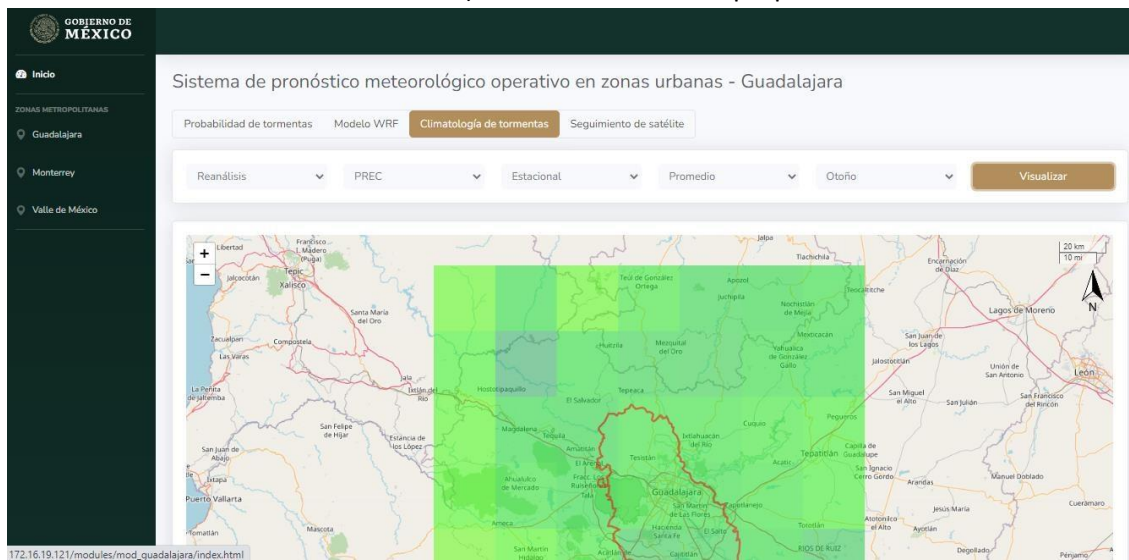
- Tipo de producto a visualizar de acuerdo a los datos empleados (observaciones o re-análisis)
- La variable o índice meteorológico
- Periodo de estudio (estacional o mensual)

En algunas variables en específico se brindan las opciones para selección de percentiles.

Las tres zonas metropolitanas comparten el mismo diseño y funcionalidad, mismo que puede ser visto en la figura 6.15-6.20, donde claramente se observa la similitud de diseño y únicamente la variación en los productos entregados.

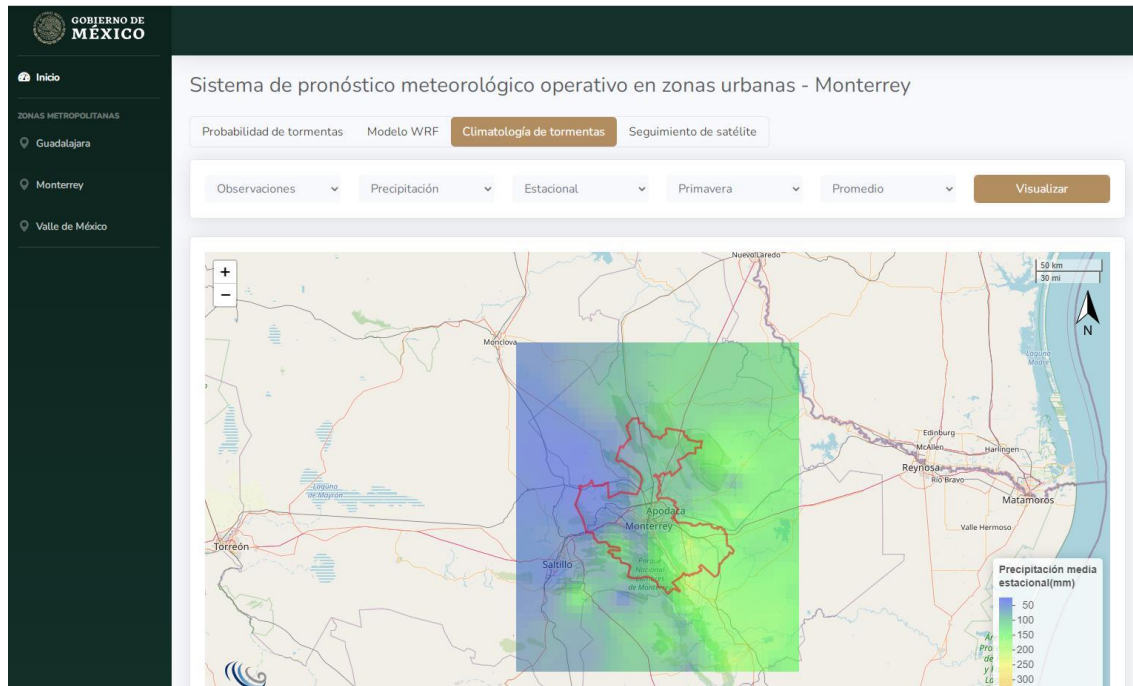


**Figura 6.15** Submódulo climatología de tormentas implementado en la zona metropolitana Guadalajara (datos observados). Fuente: elaboración propia.

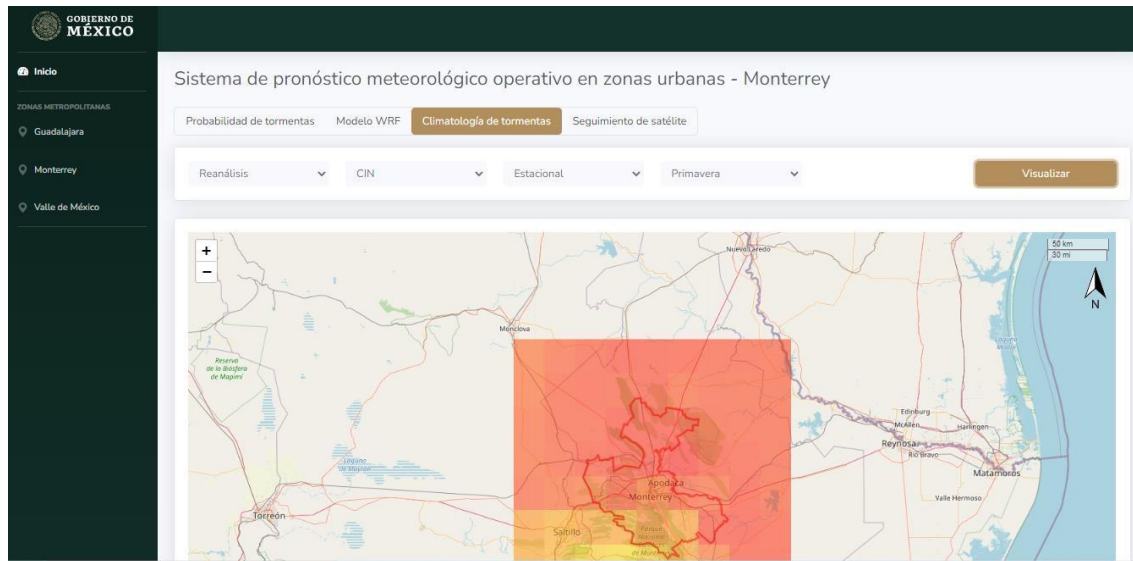


**Figura 6.16** Submódulo climatología de tormentas implementado en la zona metropolitana Guadalajara (datos re-análisis). Fuente: elaboración propia.



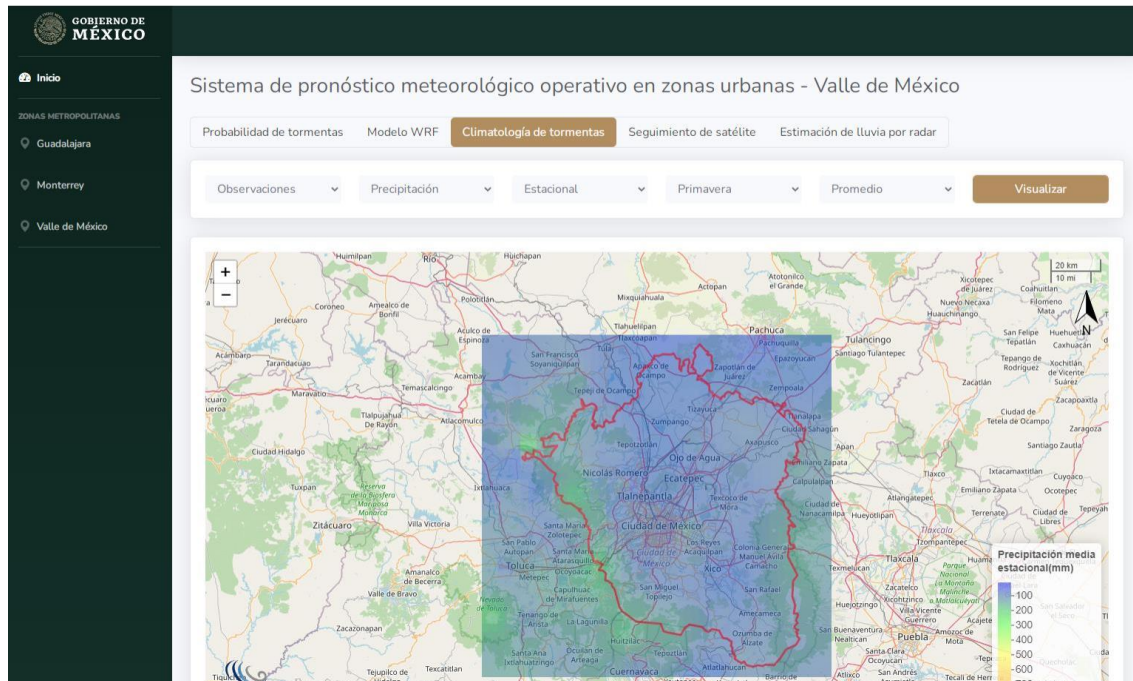


**Figura 6.17** Submódulo climatología de tormentas implementado en la zona metropolitana Monterrey (datos observados). Fuente: elaboración propia.

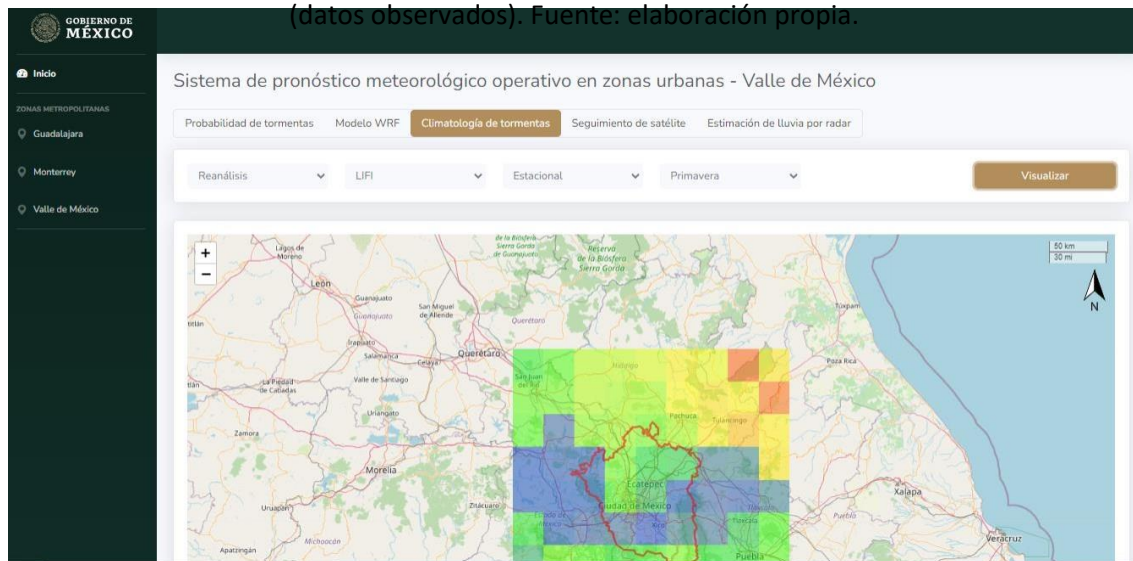


**Figura 6.18** Submódulo climatología de tormentas implementado en la zona metropolitana Monterrey (datos re-análisis). Fuente: elaboración propia.





**Figura 6.19** Submódulo climatología de tormentas implementado en la zona metropolitana Valle de México (datos observados). Fuente: elaboración propia.

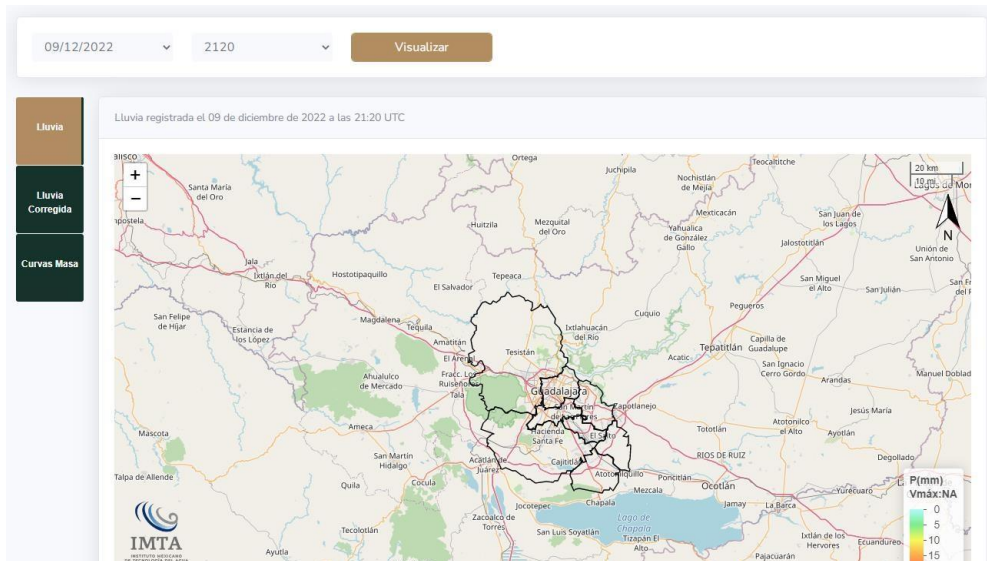


**Figura 6.20** Submódulo climatología de tormentas implementado en la zona metropolitana Valle de México (datos re-análisis). Fuente: elaboración propia.

### 6.9.3 Submódulo seguimiento de satélite

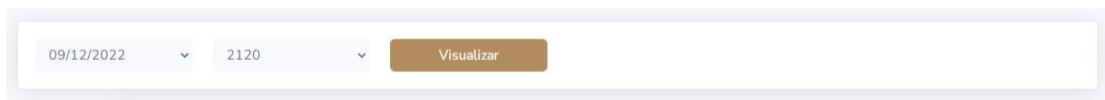
Este submódulo provee al sistema de las capacidades para el acceso a los productos que han resultado de análisis e implementación de algoritmos para seguimiento de información de satélite para las tres zonas metropolitanas (Guadalajara, Monterrey y Valle de México).

Dentro del área de visualización e interacción de este submódulo se puede ver en la figura 6.21 que la sección de controles se encuentra localizada la parte superior, por encima del área de visualización misma que permite ver los productos de acuerdo con los criterios de búsqueda, sin embargo, esta brinda tres tipos de resultados por criterio de búsqueda.



**Figura 6.21** Área de visualización e interacción de seguimiento de satélite. Fuente: elaboración propia.

Los controles brindan al usuario lo necesario para acceder a todos los productos que se generan diariamente dependiendo de la disponibilidad de la información que reporta el satélite.



**Figura 6.22** Controles del submódulo climatología de tormentas. Fuente: elaboración propia.

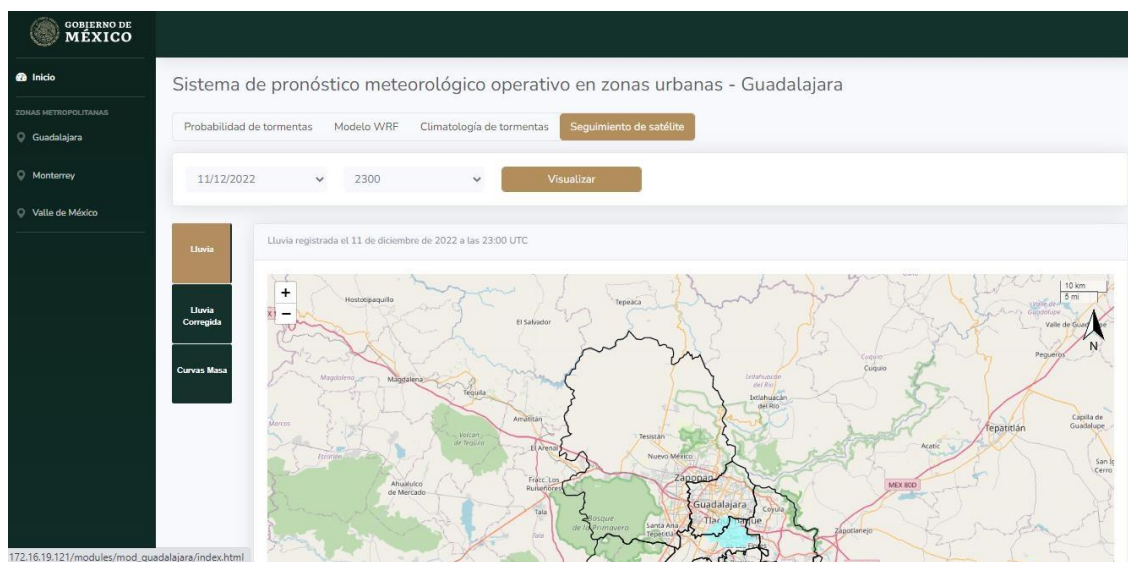
Dentro de los controles de búsqueda, este submódulo permite la selección de:

- Fecha del producto a consultar
- Hora de registro de lluvia por parte del satélite.

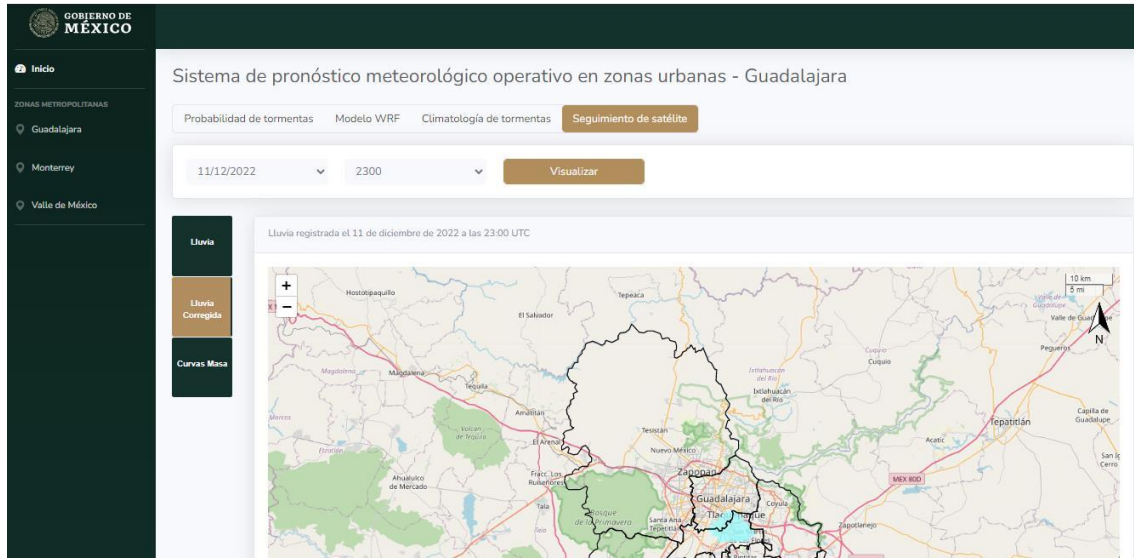
Los tres productos que se entregan para cada hora de registro de lluvia por parte del satélite:

- Producto que muestra el registro de lluvia en cada zona metropolitana
- Producto que muestra el registro de lluvia con una corrección estadística en cada zona metropolitana.
- Gráficas de las series de curvas masa (registro de precipitación acumulada del satélite con y sin corrección, y precipitación acumulada de observaciones)

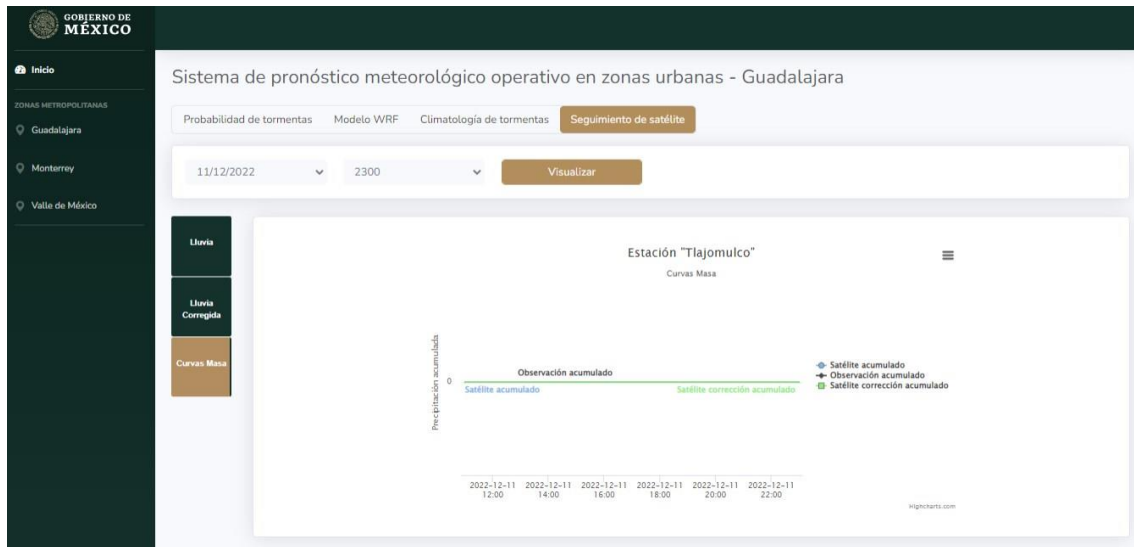
Las tres zonas metropolitanas comparten el mismo diseño y funcionalidad, mismo que puede ser visto en la figura 6.23-6.31, donde claramente se observa la similitud de diseño y únicamente la variación en los productos entregados.



**Figura 6.23** Submódulo seguimiento de satélite implementado en la zona metropolitana Guadalajara (Lluvia sin corrección). Fuente: elaboración propia.

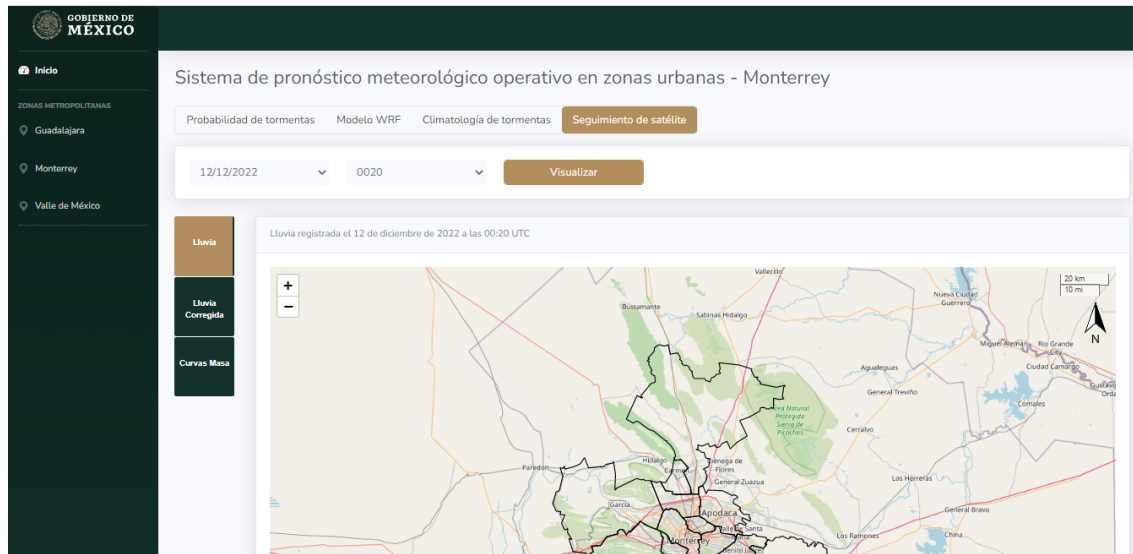


**Figura 6.24** Submódulo seguimiento de satélite implementado en la zona metropolitana Guadalajara (lluvia con corrección). Fuente: elaboración propia.

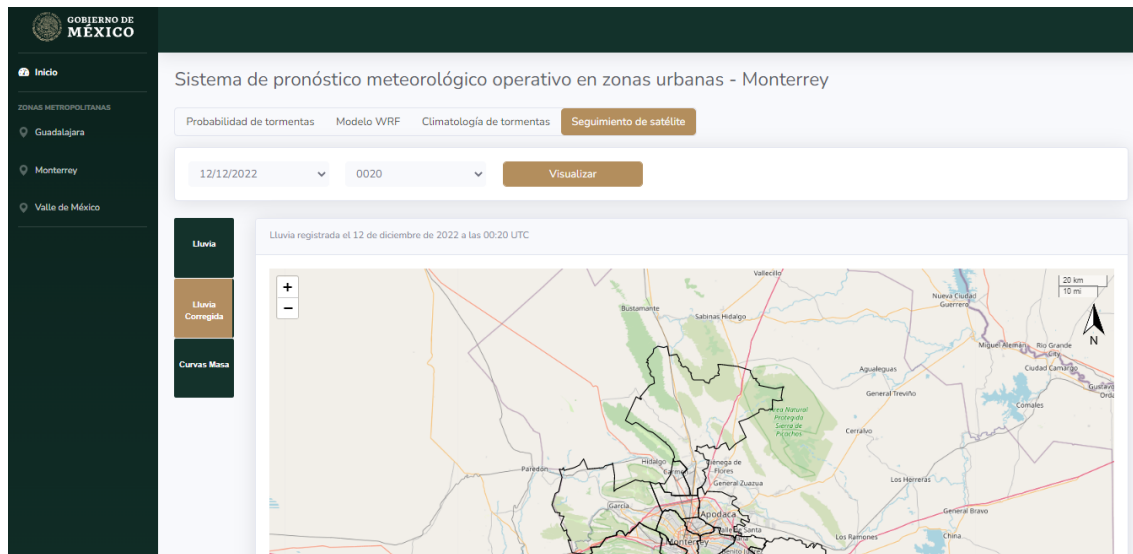


**Figura 6.25** Submódulo seguimiento de satélite implementado en la zona metropolitana Guadalajara (curvas masa). Fuente: elaboración propia.



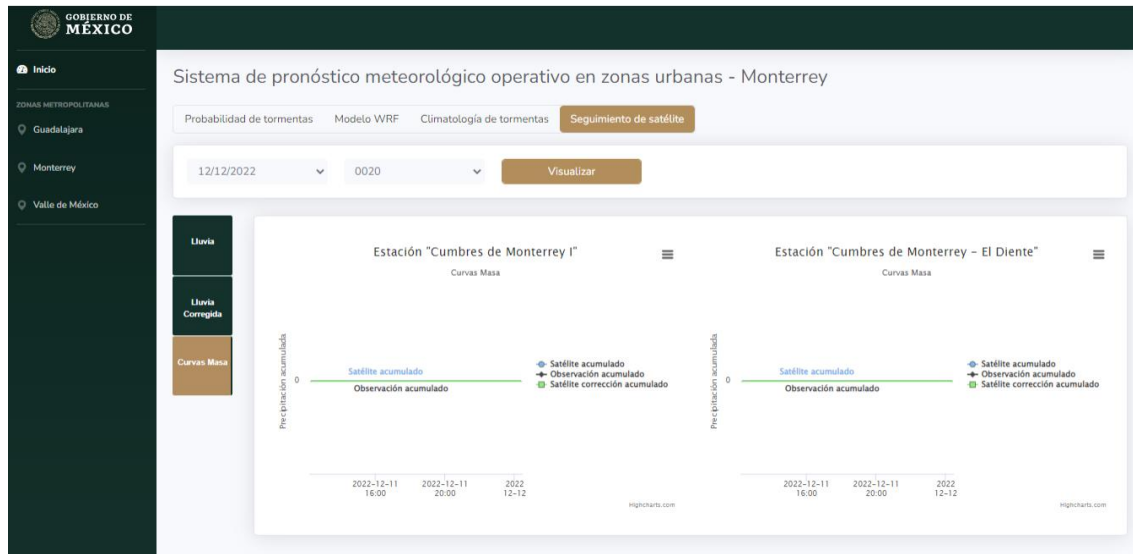


**Figura 6.26** Submódulo seguimiento de satélite implementado en la zona metropolitana Monterrey (lluvia sin corrección). Fuente: elaboración propia.

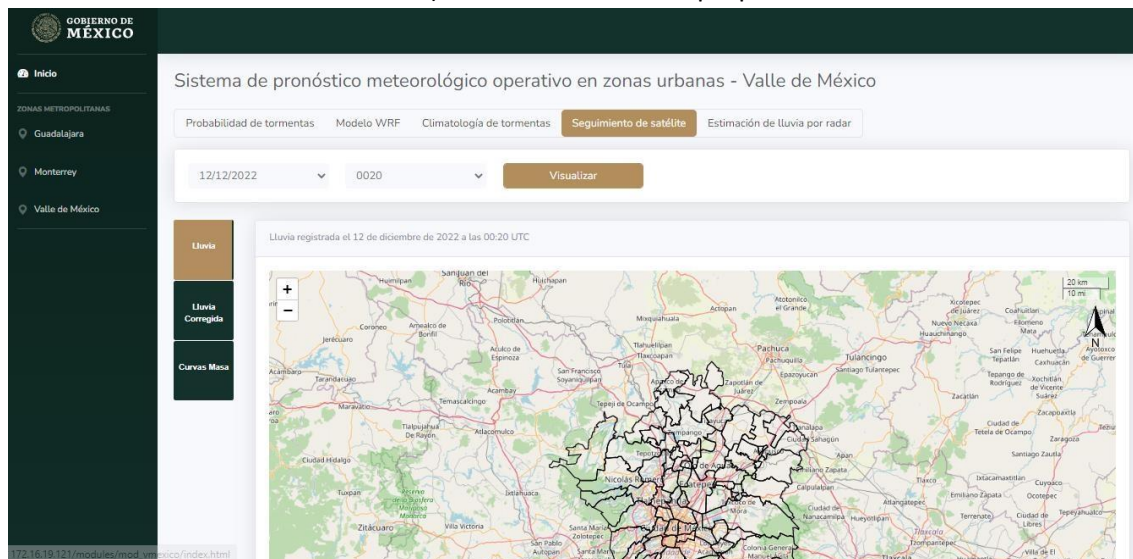


**Figura 6.27** Submódulo seguimiento de satélite implementado en la zona metropolitana Monterrey (lluvia con corrección). Fuente: elaboración propia.

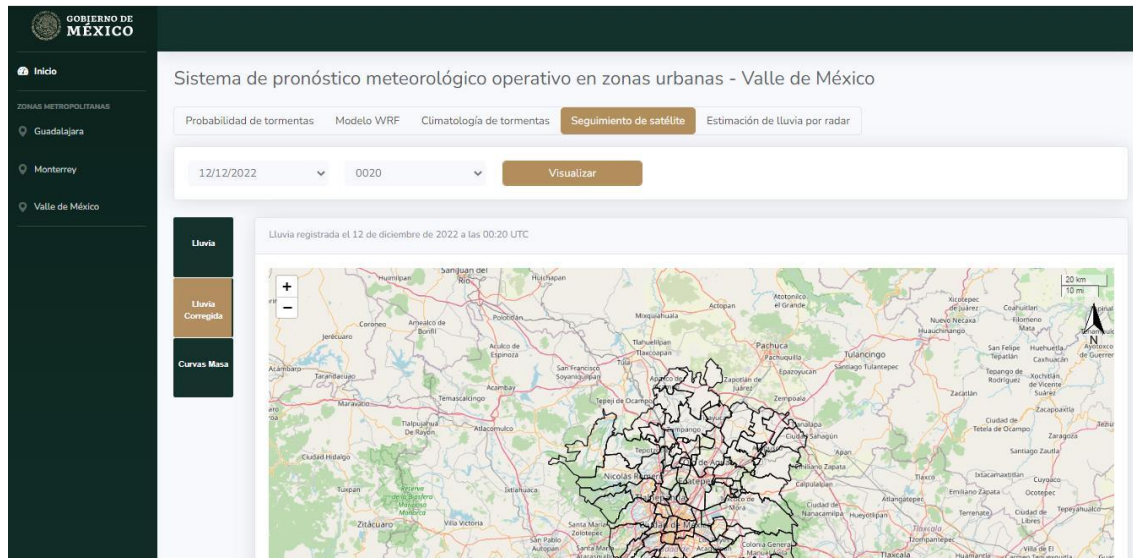




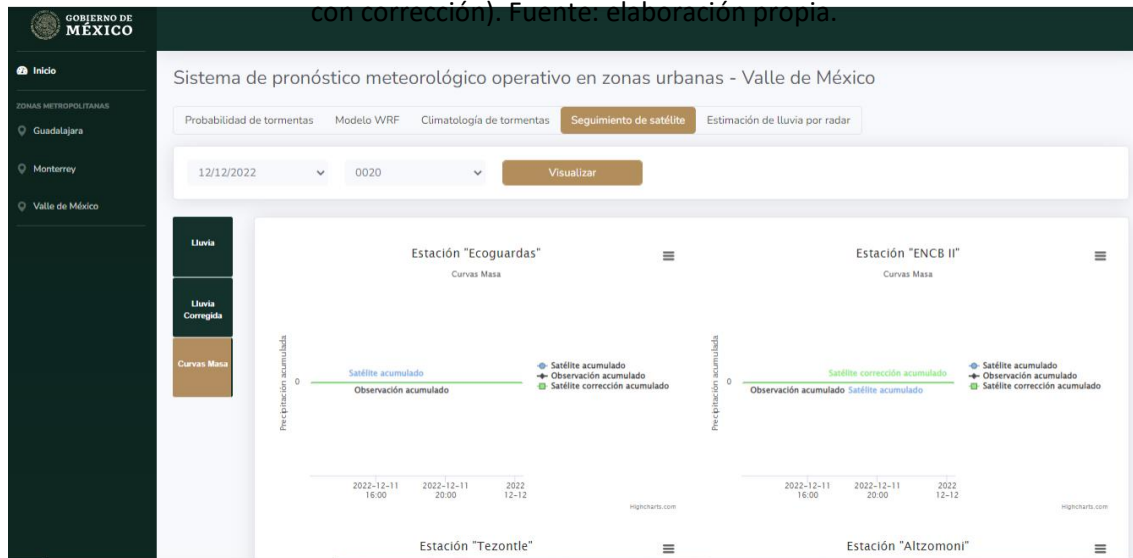
**Figura 6.28** Submódulo seguimiento de satélite implementado en la zona metropolitana Monterrey (curvas masa). Fuente: elaboración propia.



**Figura 6.29** Submódulo seguimiento de satélite implementado en la zona metropolitana Valle de México (lluvia sin corrección). Fuente: elaboración propia.



**Figura 6.30** Submódulo seguimiento de satélite implementado en la zona metropolitana Valle de México (lluvia con corrección). Fuente: elaboración propia.



**Figura 6.31** Submódulo seguimiento de satélite implementado en la zona metropolitana Valle de México (curvas masa). Fuente: elaboración propia.



## 7 Referencias

### 7.1 Referencias Capítulo 2 (Modelación numérica)

- Adn 40 (9 abril 2021). Reportan lluvia fuerte y granizo en varias alcaldías de la CDMX. <https://www.adn40.mx/ciudad/lluvia-fuerte-granizo-alcaldias-cdmx-erv>
- Chen, S.-H. and Sun, W.-Y. (2002). "A one-dimensional time dependent cloud model". *Journal of the Meteorological Society of Japan*. Serie II, 2002, 80(1), 99-118. <https://doi.org/10.2151/jmsj.80.99>
- Chilango (20 de junio de 2019). Lluvia provoca inundaciones en la GAM y caos en el Metro. <https://www.chilango.com/noticias/inundaciones-en-la-gam-20-junio/>
- Chilango (24 mayo 2021). #CámateTláloc: fotos y videos de la tormenta de anoche. <https://www.chilango.com/noticias/tormenta-del-24-de-mayo-cdmx/>
- Chilango (28 abril 2021). #Fotos y videos de la fuerte granizada en el Centro de CDMX. <https://www.chilango.com/noticias/fuerte-granizada-en-el-centro/>
- Chilango (3 abril 2020). ¡Abril, sorpréndeme!: viernes de granizo y tormenta eléctrica. <https://www.chilango.com/noticias/granizada-3-de-abril-2020/>
- Chilango (6 de junio de 2019). Lluvia provoca inundaciones, encharcamientos y hasta bandera nacional rota. <https://www.chilango.com/noticias/las-lluvias-reportadas-6-de-junio/>
- Chilango (8 de julio de 2019). #Fotos: llueve en 13 alcaldías; estas son las zonas con encharcamientos. <https://www.chilango.com/noticias/lluvia-de-este-lunes-8-de-julio/>
- Chilango (8 junio 2020). Tláloc volvió: graniza en 7 alcaldías de la CDMX (videos). <https://www.chilango.com/noticias/graniizo-lluvia-del-8-de-junio/>
- Dudhia, J. (1996). "A multi-layer soil temperature model for MM5". *The Sixth PSU/NCAR Mesoscale Model Users' Workshop*, Boulder, 22-24 July 1996, pp. 49-50.
- El UNIVERSAL (23 de mayo de 2019). Reportan caída de granizo en dos alcaldías de CDMX. <https://www.eluniversal.com.mx/metropoli/cdmx/reportan-caida-de-granizo-en-dos-alcaldias-de-cdmx-0>
- Grell, G. A. and Freitas, S. R. (2014). "A scale and aerosol aware stochastic convective parameterization for weather and air quality modeling". *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14, 5233-5250. <https://doi.org/10.5194/acp-14-5233-2014>
- Iacono, M. J., Delamere, J. S., Mlawer, E. J., Shephard, M. W., Clough, S. A. and Collins, W. D. (2008). "Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models". *Journal of Geophysical Research*, 113(D13103), 1-8. <https://doi.org/10.1029/2008JD009944>
- INFOBAE (6 de diciembre de 2019). Intensa lluvia con granizo inundó la CDMX en plena contingencia ambiental. <https://www.infobae.com/america/mexico/2019/05/16/intensa-lluvia-con-granizo-inundo-la-cdmx-en-plena-contingencia-ambiental/>



- Jiménez, P. A., Dudhia, J., Gonzalez–Rouco, F., Navarro, J., Montavez, J. P. and Garcia–Bustamante, E. (2012). “A Revised Scheme for the WRF Surface Layer Formulation”. *Monthly Weather Review*, 140(3), 898-918. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-11-00056.1>
- Milbrandt, J. A. and Yau, M. K. (2005a). “A multimoment bulk microphysics parameterization. Part I: Analysis of the role of the spectral shape parameter”. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 62(9), 3051–3064. <https://doi.org/10.1175/JAS3534.1>
- Milbrandt, J. A. and Yau, M. K. (2005b). “A multimoment bulk microphysics parameterization. Part II: A proposed three–moment closure and scheme description”. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 62(9), 3065–3081. <https://doi.org/10.1175/JAS3535.1>
- Nakanishi, M. and Niino, H. (2006). “An improved Mellor–Yamada level 3 model: its numerical stability and application to a regional prediction of advecting fog. *Boundary-Layer Meteorology*, 119, 397–407. <https://doi.org/10.1007/s10546-005-9030-8>
- Nakanishi, M. and Niino, H. (2009). “Development of an improved turbulence closure model for the atmospheric boundary layer”. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 87(5), 895–912. <https://doi.org/10.2151/jmsj.87.895>
- Noticias en la Mira (15 marzo 2020). Pega lluvia y granizo en la CDMX. <https://noticiasenlamira.com/cdmx/lluvia-granizo-inundaciones-calzada-ignacio-zaragoza/>
- Olson, Joseph B., Kenyon, J, Wayne, A., Brown, J., Pagowski, M. and Sušelj, K. (2019). “A Description of the MYNN-EDMF Scheme and the Coupling to Other Components in WRF–ARW”. NOAA Technical Memorandum OAR GSD, 61, pp. 37. <https://doi.org/10.25923/n9wm-be49>
- REFORMA (20 julio 2019). Pega granizo en Tlalpan y Coyoacán. [https://www.reforma.com/aplicacioneslibre/preacceso/articulo/default.aspx?\\_rval=1&urlredirect=https://www.reforma.com/pega-granizo-en-tlalpan-y-coyoacan/ar1727932?referer=--7d616165662f3a3a6262623b727a7a7279703b767a783a--](https://www.reforma.com/aplicacioneslibre/preacceso/articulo/default.aspx?_rval=1&urlredirect=https://www.reforma.com/pega-granizo-en-tlalpan-y-coyoacan/ar1727932?referer=--7d616165662f3a3a6262623b727a7a7279703b767a783a--)

## 7.2 Referencias Capítulo 3 (Probabilidad de tormentas)

- Brooks, H. E., Lee, J. W. y Craven, J. P. (2003). The spatial distribution of severe thunderstorm and tornado environments from global reanalysis data. *Atmospheric Research*, 67–68, 73–94. [https://doi.org/10.1016/S0169-8095\(03\)00045-0](https://doi.org/10.1016/S0169-8095(03)00045-0)
- Flórez López, R., & Fernández Fernández, J. M. (2008). *Las Redes Neuronales Artificiales: Fundamentos teóricos y aplicaciones prácticas*. Oleiros (La Coruña) España. Netbiblo. ISBN 978-84-9745-246-5.
- Godoy-Viera, A. F. (2017). Técnicas de aprendizaje de máquina utilizadas para la minería de texto. *Investig. bibl*, 103-126. ISSN 0187-358X.
- James, G., Witten, D., Hastie, T., Tibshirani, R. (2013). *An introduction to statistical learning : with applications in R*. New York :Springer. ISBN 9781461471370
- Wilks, D.S. (2011). *Statistical methods in the atmospheric sciences* , Third edition, Academic Press / Elsevier. ISBN 978-0-12-385022-5.





### 7.3 Referencias Capítulo 4 (Detección de convección profunda)

Ai Y., Li J., Shi W., Scmit T.J., Cao C., Wanbiao L., 2017. Deep convective cloud characterizations from both broadband imager and hyperspectral infrared sounder measurements. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. doi:10.1002/2016JD025408

Bedka K., Brunner J., Dworak R., Feltz W., Otkin J., Greenwald T., 2010. Objective Satellite-Based Detection of Overshooting Tops Using Infrared Window Channel Brightness Temperature Gradients. *Journal of applied meteorology and climatology*. DOI: 10.1175/2009JAMC2286.1

Lee Y., Kummerow C.D., Ebert-Uphoff I., 2021. Applying machine learning methods to detect convection using Geostationary Operational Environmental Satellite-16 (GOES-16) advanced baseline imager (ABI) data. *Atmospheric measurements techniques*, 14, 2699-2716. <https://doi.org/10.5194/amt-14-2699-2021>

Mikus P. y Strelec N.M., 2012. Satellite-based overshooting top detection methods and an analysis of correlated weather conditions. *Atmospheric Research*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosres.2012.09.001>

Pinto Da Silva C.N., Alves H.B., Assis C.A.B, 2016. A method for convective storm detection using satellite data. *Atmósfera* 29 (4), 343-358. doi: 10.20937/ATM.2016.29.04.05

Wang G., Wang H., Zhuang Y., Wu Q., Chen S., Kang H., 2021. Tropical Overshooting Cloud-Top Height Retrieval from Himawari-8 Imagery Based on Random Forest Model. *Atmosphere*, 12, 173.

<https://doi.org/10.3390/atmos12020173>

### 7.4 Referencias Capítulo 5 (Radares)

Atlas, D., R. C. Srivastava, and R. S. Sekhon. 1973. "Doppler Radar Characteristics of Precipitation at Vertical Incidence." *Reviews of Geophysics* 11(1):1.

Atlas, David, Carlton W. Ulbrich, Frank D. Marks, Eyal Amitai, and Christopher R. Williams. 1999. "Systematic Variation of Drop Size and Radar-Rainfall Relations." *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 104(D6):6155–69.

Bech, J., Codina, B., Lorente, J., & Bebbington, D. (2003). The sensitivity of single polarization weather radar beam blockage correction to variability in the vertical refractivity gradient. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 20(6), 845–855. [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(2003\)020<0845:TSOSPW>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(2003)020<0845:TSOSPW>2.0.CO;2)

Bringi, V. N. and V. Chandrasekar. 2001b. "The Polarimetric Basis for Characterizing Precipitation (Chapter 7)." Pp. 378–533 in *Polarimetric Doppler Weather Radar: Principles and applications*. Cambridge: Cambridge University.

Bringi, V. N., V. Chandrasekar, J. Hubbert, E. Gorgucci, W. L. Randeu, and M. Schoenhuber. 2003. "Raindrop Size Distribution in Different Climatic Regimes from Disdrometer and Dual-Polarized Radar Analysis." *Journal of the Atmospheric Sciences* 60(2):354–65

Faures, J.-M., Goodrich, D., Woolhiser, D.A., Sorooshian, S. Impact of small-scale spatial rainfall variability on runoff modeling *J. Hydrol.*, 173 (1995) 309-326

Fornasiero, A., Amorati, R., Alberoni, P. P., Ferraris, L., and Tara-masso, A. C.: Impact of combined beam blocking and anomalous propagation correction algorithms on radar data quality, 3rd European Radar Conference, Visby, pp. 216–222, 2004.





- Gekat, F., Meischner, P., Friedrich, K., Hagen, M., Koistinen, J., Michelson, D. B., Huuskonen, A. The State of Weather Radar Operations, Networks and Products, Chapter. 1 in Weather Radar: Principles and Advanced Applications, P. Meischner (ed.), 2004.
- Germann, U., Joss, J., Operational Measurement of Precipitation in Mountainous Terrain, Chapter. 2 in Weather Radar: Principles and Advanced Applications, P. Meischner (ed.), 2004.
- Gourley, J. J., Flamig, Z. L., Hong, Y., Howard, K. W. Evaluation of past, present and future tools for radar-based flash-flood prediction in the USA. *Hydrological Sciences Journal*, volumen 59:7, p. 1377-1389, 2014.
- Kraemer, H. R. Verworn. Improved C-band radar data processing for real time control of urban drainage systems, 11th International Conference on Urban Drainage, Edinburgh, Scotland, UK, (2008).
- Krajewski, W. F., Smith, J. A. Radar hydrology: rainfall estimation. *Advances in Water Resources*, volume 25, p. 1387-1394, 2002.
- Krajewski, W. F., Villarini, G., Smith, J. A. Radar-Rainfall Uncertainties Where are We after Thirty Years of Effort? *American Meteorological Society*, vol. 91 (1), 87, 2010.
- Licznar, P., Krajewski, W. F., Precipitation Type Specific Radar Reflectivity-rain Rate Relationships for Warsaw, Poland, *Acta Geophysica*, 64(5) (2016) 1840–1857.
- Liguori, S., Rico-Ramirez, M. A. (2013). A review of current approaches to radar-based quantitative precipitation forecasts. *International Journal of River Basin Management*, 12(4), 391–402.
- Mallet, Cécile and Laurent Barthes. 2009. “Estimation of Gamma Raindrop Size Distribution Parameters: Statistical Fluctuations and Estimation Errors.” *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 26(8):1572–84.
- Marshall, J. S., Palmer, W. M. K., Marshall, J. S., & Palmer, W. M. K. (1948). The distribution of raindrops with size. *Journal of Meteorology*, 5(4), 165–166.
- Marshall, J. S., Hitschfeld, W., & Gunn, K. L. S. (1955). *Advances in Radar Weather*. *Advances in Geophysics*, 2, 1–56. [https://doi.org/10.1016/S0065-2687\(08\)60310-6](https://doi.org/10.1016/S0065-2687(08)60310-6)
- Méndez-Antonio, B. et al. Analysis of daily precipitation based on weather radar information in México City. *Atmósfera* [online]. 2009, vol.22, n.3, pp.299-313. ISSN 0187-6236.
- OTT, Hydromet GmbH. 2016. Operating Instructions Present Weather Sensor OTT Parsivel 2. Kemplen, Germany.
- Raupach, T. H. and A. Berne. 2015. “Correction of Raindrop Size Distributions Measured by Parsivel Disdrometers, Using a Two-Dimensional Video Disdrometer as a Reference.” *Atmospheric Measurement Techniques* 8(1):343–65
- Testud, Jacques, Stéphane Oury, Robert A. Black, Paul Amayenc, and Xiankang Dou. 2001. “The Concept of ‘Normalized’ Distribution to Describe Raindrop Spectra: A Tool for Cloud Physics and Cloud Remote Sensing.” *Journal of Applied Meteorology* 40(6):1118–40.
- Versini, P. A. Use of radar rainfall estimates and forecasts to prevent flash flood in real time by using a road inundation warning system. *Journal of Hydrology*, 416-417, p. 157-170, 2012.
- Zhang, G., *Weather radar polarimetry*. Taylor & Francis, 2016.



## 8.5 Referencias Capítulo 6 (Visualización del sistema)

- AMESCUA, A., Análisis y diseño estructurado y orientado a objetos de sistemas informáticos, McGraw-Hill Interamericana, Madrid, 2003.
- C. Parra, R. Ruiz, P. Paz, “Modelado de procesos y desarrollo de sistemas software: Integración UML y EPC”. IX Congreso de Ingeniería de Organización. Guijón, 8 y 9 de septiembre 2005.
- COCKBURN, A., Writing Effective Use Cases, Addison-Wesley Pub. Co, Reading, 2000.
- de Dios Murillo Morera, J., & Caamaño Polini, S. (2010). MEJORAMIENTO DE LA LATENCIA DE LA RED MEDIANTE EL CAMBIO DE TAMAÑO DE BÚFER PARA APLICACIONES FTP UTILIZANDO EL MODELO CLIENTE/SERVIDOR SEGÚN EL TAMAÑO PROMEDIO DE LOS ARCHIVOS A SER TRANSMITIDOS. *Uniciencia*, (24),74-81.[fecha de Consulta 11 de Diciembre de 2022]. ISSN: . Recuperado de: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=475947765008>
- Delgado Olivera, Lisdania de la Caridad, & Díaz Alonso, Lexys Manuel. (2021). Modelos de Desarrollo de Software. *Revista Cubana de Ciencias Informáticas*, 15(1), 37-51. Epub 31 de marzo de 2021. Recuperado en 11 de diciembre de 2022, de [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2227-18992021000100037&lng=es&lng=es](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2227-18992021000100037&lng=es&lng=es)
- FOWLER, M., UML Distilled: A brief guide to the Standard Object Modeling Language, Addison-Wesley, Reading, 2004.
- JACOBSON, I., Object-Oriented Development in an Industrial Environment, Special issue of SIGPLAN Notices, 22(12), 183–191, 1987.
- JACOBSON, I., CHRISTERSON, M., JONSSON, P., AND OVERGAARD, G., ObjectOriented Software Engineering: A Use Case Driven Approach. Addison-Wesley, New York, 1992.
- Mariño, S. I., & Alfonzo, P. L. (2014). Implementación de SCRUM en el diseño del proyecto del Trabajo Final de Aplicación. *Scientia Et Technica*, 19(4),413-418.[fecha de Consulta 11 de Diciembre de 2022]. ISSN: 0122-1701. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=84933912009>
- OMG. Unified Modeling Language: Superstructure version 2.0. Final adopted specification ptc/03-08-02. Needham, US. Object Management Group, Inc., 2003.
- SCHACH, S., Análisis y diseño orientado a objetos con UML y el proceso unificado, McGraw-Hill Interamericana, Mexico, D.F., 2004.
- Serna Montoya, E. (2011). Métodos formales e Ingeniería de Software. *Revista Virtual Universidad Católica Del Norte*, 1(30), 158–184. Recuperado a partir de <https://revistavirtual.ucn.edu.co/index.php/RevistaUCN/article/view/62>
- Parra Castrillón, E., (2011). Propuesta de metodología de desarrollo de software para objetos virtuales de aprendizaje -MESOVA. *Revista Virtual Universidad Católica del Norte*, (34), 113-137.
- Vera, A., Zúñiga, N., & Bernal, Á. (2013). Herramienta en línea para la programación y depuración remota de funciones lógicas digitales. *Ingeniería y Competitividad*, 15(1),79-91. [fecha de Consulta 11 de Diciembre de 2022]. ISSN: 0123-3033. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=291329165007>