



**COORDINACIÓN DE DESARROLLO  
PROFESIONAL E INSTITUCIONAL**

**SUBCOORDINACIÓN DE POSGRADO**

# **T E S I S**

**ANÁLISIS DE LA PRECIPITACIÓN INDUCIDA POR FORZAMIENTO  
OROGRÁFICO, ANTE EL PASO DE FRENTE FRÍOS EN LA PORCIÓN  
NORTE DE CHIAPAS Y SIERRA DE TABASCO**

que para obtener el grado de  
**Maestro en**  
**Ciencias y Tecnología del Agua**

presenta  
**Jorge Enrique Hernández Carrillo**

**Tutor: Dr. René Lobato Sánchez**

**Jiutepec, Morelos**

**2019**

Con fundamento en los artículos 21 y 27 de la Ley Federal del Derecho de Autor y como titular de los derechos moral y patrimoniales de la obra titulada "Análisis de la precipitación inducida por forzamiento orográfico, ante el paso de frentes fríos en la porción norte de Chiapas y Sierra de Tabasco", otorgo de manera gratuita y permanente al Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, autorización para que fijen la obra en cualquier medio, incluido el electrónico, y la divulguen entre su personal, estudiantes o terceras personas, sin que pueda percibir por tal divulgación una contraprestación.

**JORGE ENRIQUE HERNÁNDEZ CARRILLO**

---

Jiutepec, Morelos, a 25 de enero de 2019

# Agradecimientos

A Dios, quien en su infinita bondad, me ama sin medida... y en los momentos de mayor oscuridad, ilumina mi camino para nunca dejarme caer.

A mi madre María, quien en su intercesión constante ante su hijo Jesús, siempre cuida de nosotros y vela por nuestras necesidades. Todo a Jesús por María, todo a María para Jesús.

A mis hermanos María Lilia, Luz del Carmen, José Luis y Ana Victoria, por estar siempre para mí, a través de sus oraciones... los amo.

Al Dr. Eduardo Cervantes y la Sra. Josefina Jaimes, así como a Pepe y Mary, por hacerme sentir feliz en familia, Dios me bendijo por tenerlos a mi lado estos años.

Al Dr. René Lobato, por su apoyo y enseñanzas, estoy seguro de que aprendimos juntos a lo largo de esta experiencia.

A mis sinodales, Dr. Juan Cervantes, Mtro. Indalecio Mendoza, Dr. Martín Montero y Dr. José Antonio Salinas, por su paciencia y cada una de sus aportaciones a mi trabajo.

A Mike Davison y José Gálvez, por sus aportaciones y consejos para la última etapa de este trabajo, nunca olvidaré tal experiencia.

A mis amigos y compañeros de maestría Oscar, Braulio, Mayra, René, de todos aprendí algo...

A Maura y Nury, mis antiguas y grandes amigas, fue una bendición volver a encontrarnos, Dios nos regale más años juntos.

Al personal administrativo de la Subcoordinación de Posgrado, por su eficiencia en cada trámite y cada etapa de este proceso.

Al Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, noble institución que me regaló la oportunidad de crecer académicamente.

*Dedicada a...*

*La mujer que me dio la vida,  
mi Madre,  
que desde el cielo y junto a mi padre,  
sigue rezando por su niño.  
“La extraño mucho Mamita... esta herida nunca sanará”.*

*“Il mio amore per te é come l'acqua,  
a volte é pioggia, a volte é un fiume...  
peró non finirá mai”*

# Índice

<b>1. Introducción</b> .....	1
1.1. Región de estudio .....	1
1.1.1. Climatología .....	1
1.2. Conceptos generales .....	3
1.2.1. Escalas de fenómenos meteorológicos.....	3
1.2.2. Masas de aire y frentes .....	4
1.2.2.1. Frentes fríos.....	5
1.2.3. Precipitación por forzamiento orográfico .....	6
1.2.4. Humedad y razón de mezcla.....	7
1.2.5. Modelo de pronóstico global GFS .....	8
1.2.6. Coeficiente de correlación.....	9
1.2.7. Análisis de frecuencias.....	11
<b>2. Revisión del estado del arte</b> .....	13
2.1. Climatología de frentes fríos en la República Mexicana.....	13
2.2. Influencia de la orografía en los frentes fríos .....	14
2.3. Mitigación del riesgo ante la amenaza de frentes fríos en México .....	16
<b>3. Trabajo operativo desarrollado ante la afectación de frentes fríos en la región de estudio</b> .....	18
3.1. Fundamento teórico .....	21
3.2. Planteamiento del problema.....	22
3.3. Justificación.....	23
3.4. Objetivo .....	24
3.4.1. Objetivos específicos.....	24
3.5. Hipótesis .....	24
<b>4. Metodología</b> .....	25
4.1. Definición de la región en la malla del modelo .....	25
4.2. Selección de eventos y obtención de datos .....	26
4.3. Análisis de regresión lineal simple y múltiple .....	28
4.4. Análisis de frecuencias y función de distribución .....	30
<b>5. Aplicación de la metodología y casos de estudio</b> .....	32
5.1. Eventos seleccionados y recopilación de datos .....	32

5.2.	Gráficas de dispersión y coeficiente correlación .....	36
5.3.	Análisis de frecuencias.....	41
5.4.	Unificación de la región de estudio .....	45
<b>6.</b>	<b>Análisis de resultados</b> .....	<b>51</b>
6.1.	Interpretación de los diagramas de dispersión y coeficientes de correlación.....	51
6.2.	Interpretación de los análisis de frecuencias y su aplicación .....	52
<b>7.</b>	<b>Conclusiones</b> .....	<b>55</b>
<b>8.</b>	<b>Referencias</b> .....	<b>57</b>

# 1. Introducción

## 1.1. Región de estudio

Los estados de Chiapas y Tabasco comparten una zona montañosa que forma parte de la Sierra Madre Oriental, esto de acuerdo con el Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0 (CEM 3.0), específicamente en la porción norte de Chiapas, donde se sobrepasan los 2,000 msnm (INEGI, 2014) y la que es conocida como la subregión Sierra de Tabasco, en donde se alcanza una altitud máxima cercana a los 900 msnm (INEGI, 2012).

La región de estudio comprende tal zona montañosa de la porción norte del estado de Chiapas, así como la sierra de Tabasco. Para este trabajo se consideró una región de aproximadamente 6,600 km<sup>2</sup>, específicamente donde se presentan los mayores acumulados de precipitación ante el paso de frentes fríos, y cuentan con datos de precipitación diaria registrada en diferentes estaciones climatológicas ubicadas y distribuidas en la zona (figura 1.1).

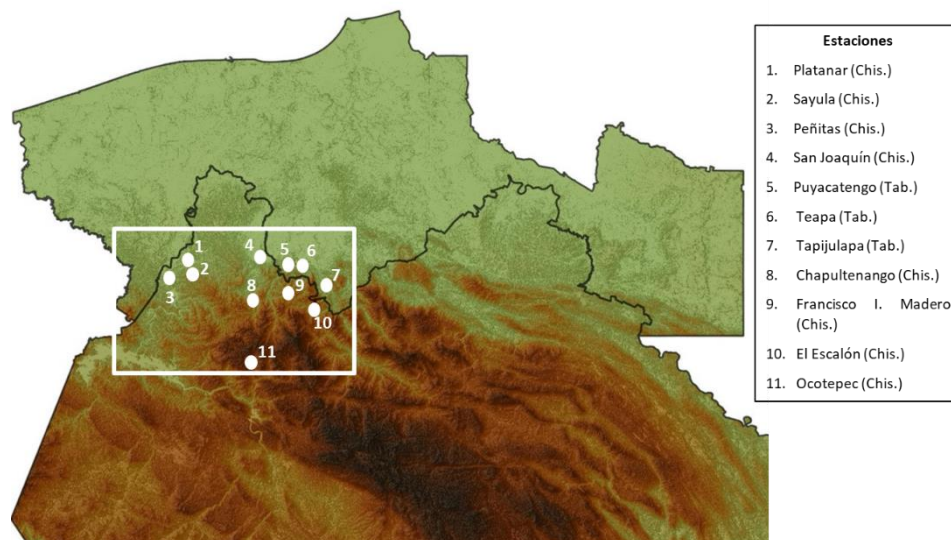


Figura 1.1. Región de estudio y distribución de estaciones climatológicas (Elaboración propia)

### 1.1.1. Climatología

De acuerdo con Hernández-Carrillo (2014), la región comprendida por los estados de Chiapas y Tabasco ha sido afectada a lo largo de su historia por distintos tipos de fenómenos hidrometeorológicos cada año, registrándose grandes cantidades de precipitación, la media anual llega a aproximarse a los 2100 mm, esto debido a su



ubicación geográfica entre los océanos Atlántico y Pacífico, que favorece el ingreso de humedad proveniente de ambas vertientes.

En cuanto a la zona de estudio, es particularmente lluviosa durante todo el año, ya que es afectada por fenómenos hidrometeorológicos tanto de verano como de invierno, incluso por la interacción de ambos. En la figura 1.2, que muestra el mapa con isoyetas promedio anual de Chiapas y Tabasco, se observa claramente cómo en la región de estudio se alcanzan acumulados mayores a 3,000 mm, llegando a ser en un punto hasta mayores a 4,000 mm. En la gráfica de la figura 1.3 puede observarse de otra manera tal situación, quedando de manifiesto que, tanto en los meses de verano como en invierno, pueden registrarse significativos acumulados de precipitación para esta zona.

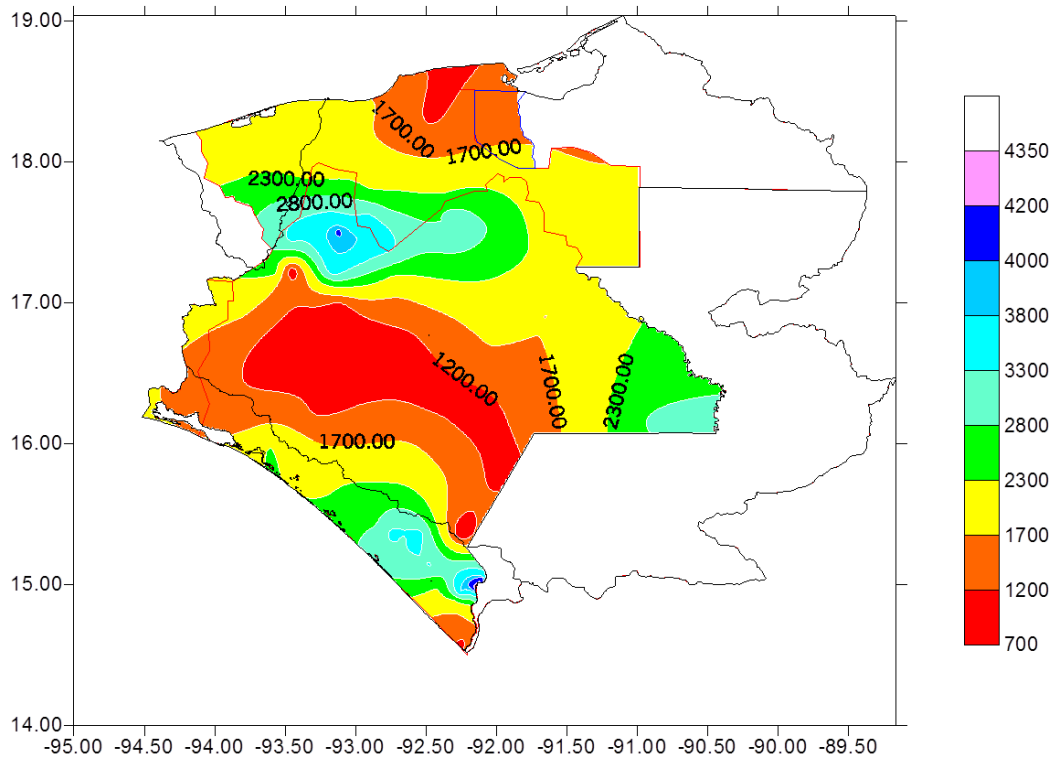


Figura 1.2. Mapa de isoyetas de la lluvia promedio anual en mm, basado en las normales climatológicas 1981-2010 (CONAGUA OCFS, 2011)

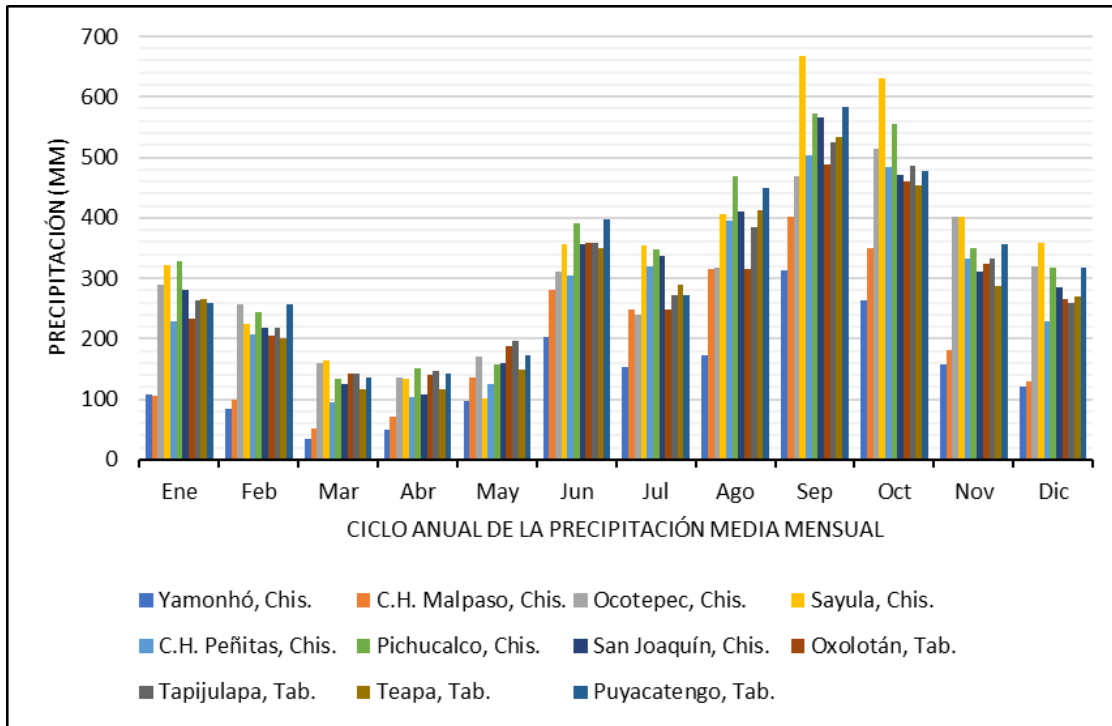


Figura 1.3. Comportamiento de la precipitación media mensual en las estaciones de la zona de estudio (CONAGUA, OCFS 2011)

## 1.2. Conceptos generales

Para poder entender la naturaleza de este trabajo de investigación, es necesario aterrizar diferentes conceptos dentro de la meteorología y que están relacionados con el fenómeno que se analiza, la precipitación asociada al paso de frentes fríos en una zona montañosa, así como las diferentes variables que intervienen y los análisis que se realizarán.

### 1.2.1. Escalas de fenómenos meteorológicos

Al hablar de fenómenos meteorológicos es importante definir sus escalas espaciales y temporales. Existen diferentes definiciones y propuestas de clasificación para estas escalas; Thunis y Bornstein (1995), identificaron al menos tres clasificaciones diferentes aportadas por diferentes autores como Stull en 1988, Pielke en 1984 y Orlansky en 1975. Sin embargo, de manera general pueden presentarse como se muestra en la tabla 1.1.

Tabla 1.1. Escalas meteorológicas (Elaboración propia)

ESCALA	Dimensiones espaciales	Dimensiones temporales	Rango de pronóstico	Ejemplos de fenómenos meteorológicos
<b>Planetaria o Macroescala</b>	Miles de kilómetros	Semanas a meses	A largo plazo (> 10 días)	Ondas planetarias, corrientes en chorro
<b>Sinóptica</b>	Cientos a miles de kilómetros	Días a semanas	Mediano plazo (3 a 10 días)	Frentes, ciclones tropicales, ondas del este
<b>Mesoescala</b>	Desde uno a cientos de kilómetros	Desde una hora a un día	Corto plazo (12 a 48 horas) Nowcasting (1 a 6 horas)	Tormentas convectivas, brisa marina-terral, grandes tornados
<b>Microescala</b>	Centímetros a metros	Minutos	Minutos	Turbulencia, remolinos de polvo, trombas

Puede determinarse entonces que los frentes fríos, fenómenos a analizar en este trabajo, se encuentran clasificados como fenómenos de escala sinóptica. Sin embargo, estos pueden tener un impacto a escalas menores, al favorecer el desarrollo de tormentas y precipitaciones a nivel mesoescalar, como es el caso de precipitaciones por forzamiento orográfico.

### 1.2.2. Masas de aire y frentes

Una masa de aire puede cubrir hasta varios miles de kilómetros cuadrados de superficie, cuyas propiedades de temperatura y humedad son bastante similares en cualquier dirección horizontal. Estas características se desarrollan en regiones generalmente planas y de composición uniforme, con vientos ligeros en superficie; tales regiones son conocidas como regiones de origen (Ahrens, 2000).

Las masas de aire pueden desplazarse lentamente, adquiriendo las propiedades de las superficies que recorren. Cuando dos masas de diferentes propiedades se encuentran, existe una zona o línea imaginaria de transición entre estas, a lo que se denomina frente. Un frente puede ser frío o cálido en función de la masa que domine, por ejemplo, cuando una masa de aire relativamente más frío es más fuerte que una de aire relativamente más cálido, la primera empujará a la segunda, generando un frente frío (Ahrens, 2000).

### 1.2.2.1. Frentes fríos

Un frente frío representa una zona donde el aire más frío y seco se desplaza reemplazando aire más cálido y húmedo, produciendo inestabilidad atmosférica a lo largo de esta zona, con nubosidad de tormentas asociada a su desplazamiento, tal y como se muestra en la figura 1.4. En una carta de superficie, este tipo de frentes se dibuja como una línea azul continua con triángulos a lo largo de ella, mostrando su dirección de desplazamiento. La figura 1.5 presenta un ejemplo genérico del mecanismo descrito, obsérvese cómo por detrás de la línea frontal (del lado de la masa de aire frío) los valores de temperatura oscilan entre los 23 °F (-5°C) y los 39°F (4°C), mientras que del lado de la masa de aire cálido se encuentran entre los 49 °F (9°C) y 59 °F (15°C), siendo clara la diferencia de temperatura entre ambas masas; además la dirección de los vientos cambia significativamente después de la zona frontal (Ahrens, 2000).

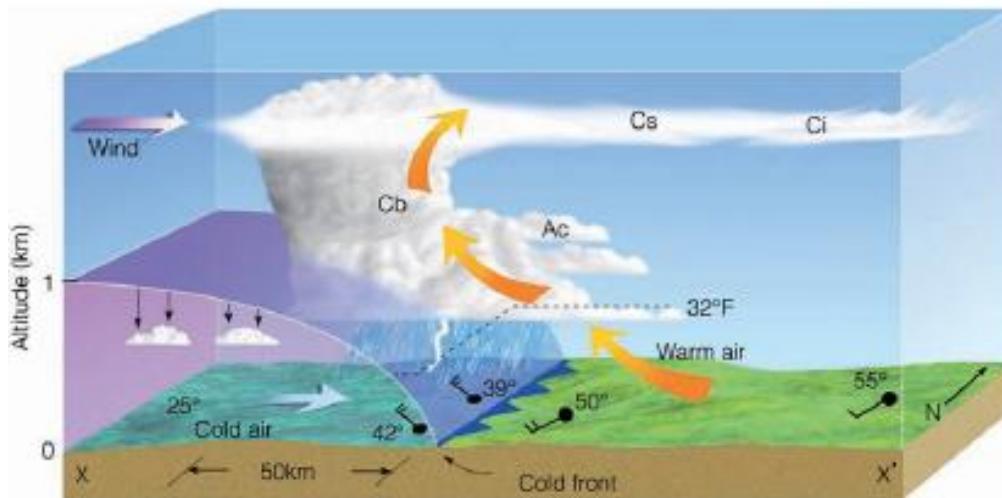


Figura 1.4. Vista en la vertical de las condiciones atmosféricas, en un frente frío (Ahrens, 2007)



Figura 1.5. Representación de un frente frío en un análisis de superficie (Ahrens, 2007)

### 1.2.3. Precipitación por forzamiento orográfico

De acuerdo con Whiteman (2000), existen dos tipos de vientos asociados a zonas montañosas: los flujos por forzamiento orográfico, que ocurren cuando el flujo de vientos a gran escala es modificado y forzado a cambiar por la orografía del terreno; y los vientos diurnos de montaña, también conocidos como circulaciones térmicas, los cuales ocurren debido a los contrastes de temperatura existentes dentro de los sistemas montañosos o entre las montañas y las llanuras que las rodean.

En el caso de los vientos por forzamiento orográfico, el comportamiento de estos está determinado por tres factores: la estabilidad del aire, la velocidad de los vientos y las características topográficas (Whiteman, 2000).

Cuando el flujo de los vientos es modificado por la presencia de las montañas, en ocasiones puede ser forzado a pasar por encima de estas, cuando esto ocurre el aire puede enfriarse al elevarse y la humedad que contiene se condensa generando nubosidad y precipitación del lado de barlovento; mientras que, del lado de sotavento, el aire descenderá más caliente y seco, tal y como se muestra en el esquema de la figura 1.6 (Whiteman, 2000).

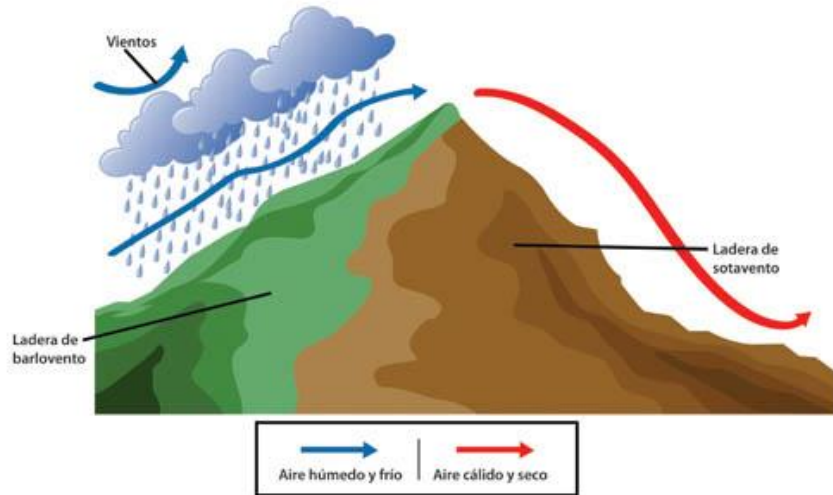


Figura 1.6. Esquema del forzamiento orográfico (recuperado de <http://www.discovery-8.com/el-efecto-fohen/>)

#### 1.2.4. Humedad y razón de mezcla

La humedad del aire puede definirse como la cantidad de vapor de agua que está presente en la atmósfera; la disponibilidad de este depende principalmente de factores como la temperatura o la ubicación geográfica.

De acuerdo con Wallace (2006), la cantidad de vapor de agua presente en una cierta cantidad de aire puede expresarse de maneras diferentes. Dependiendo de la forma en que desee cuantificar con relación al aire en el que se encuentra contenida, algunas de las más importantes son las siguientes:

##### a. Razón de mezcla

Se define como la relación entre la masa de vapor de agua y la masa de aire seco en cierto volumen de aire, usualmente es representada como  $w$  y se expresa en gramos de vapor de agua por kilogramo de aire seco. Se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$w = \frac{m_v}{m_d} \quad (1.1)$$

##### b. Humedad específica

La masa de vapor de agua  $m_v$  en una unidad de masa de aire (aire seco más vapor de agua) se denomina humedad específica  $q$ , y es calculada así:

$$q \equiv \frac{m_v}{m_v + m_d} = \frac{w}{1 + w} \quad (1.2)$$

Wallace también menciona que, debido a que la magnitud de  $w$  es solo un pequeño porcentaje, se deduce que los valores numéricos de  $w$  y  $q$  son casi equivalentes.

c. Humedad absoluta

Se define como la cantidad de vapor de agua medido en gramos, contenido en un determinado volumen de aire, comúnmente un  $m^3$ . Puede observarse que es básicamente lo mismo que la humedad específica, únicamente variando en las unidades que se manejan, en este caso se miden gramos de vapor de agua por metro cúbico de aire.

d. Razón de mezcla de saturación

La razón de mezcla de saturación  $w_s$  con respecto al agua se define como la relación de la masa  $m_{vs}$  del vapor de agua en un volumen dado de aire que está saturado con respecto a una superficie plana de agua pura a la masa  $m_d$  del aire seco. Es decir

$$w_s = \frac{m_{vs}}{m_d} \quad (1.3)$$

e. Humedad relativa

La humedad relativa (RH) es la relación (expresada en porcentaje) entre la razón de mezcla real  $w$  y la razón de mezcla de saturación  $w_s$ , con respecto a una superficie plana de agua pura a la misma temperatura y presión. Puede calcularse así:

$$RH \equiv \left( \frac{w}{w_s} \right) 100 \quad (1.4)$$

El presente estudio se basa en un método para el pronóstico de precipitación con base en el comportamiento del viento y la presencia de razón de mezcla; por esta razón, los valores de humedad del aire utilizados para el análisis serán los de esta variable.

### 1.2.5. Modelo de pronóstico global GFS

La información de los valores de humedad y vientos debe ser obtenida a partir del uso de un modelo numérico operativo, específicamente el Sistema de Pronóstico Global (GFS, por sus siglas en inglés), el cual es un modelo de pronóstico meteorológico desarrollado en el National Centers for Environmental Prediction (NCEP, por sus siglas en inglés). Cuenta con diversas variables atmosféricas y

terrestres a través de datos de temperatura, viento, precipitación, humedad, etc. Presenta un tiempo de pronóstico de hasta 16 días en el futuro, con una resolución horizontal de 28 kilómetros entre los puntos de la cuadrícula (nodos), pero se reduce a 70 kilómetros para pronósticos entre una semana y dos semanas. Es un modelo acoplado, compuesto por cuatro modelos separados (un modelo de atmósfera, un modelo de océano, un modelo de suelo / tierra y un modelo de hielo marino), que se encuentran acoplados para proporcionar las condiciones meteorológicas en estos rangos de tiempo y espacio (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA, 2018). La figura 1.7 muestra la malla completa que utiliza el modelo GFS para su resolución de 0.5°.

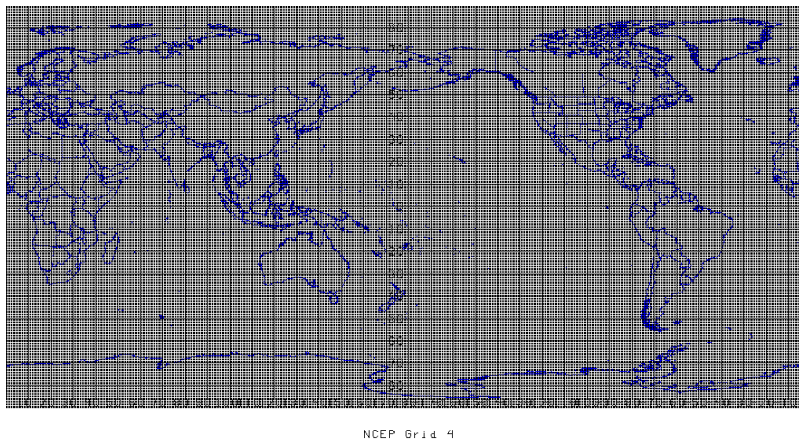


Figura 1.7. Malla global del modelo GFS, resolución de 0.5° (NOAA, 2018)

Los datos de variables meteorológicas proporcionadas por este modelo pueden utilizarse por meteorólogos operativos para realizar el pronóstico y prever lo que puede ocurrir en la atmósfera en un futuro; así como por estos mismos u otros investigadores en diversos análisis de fenómenos meteorológicos ya acontecidos para determinar las causas o componentes que intervinieron en su ocurrencia con características específicas.

#### 1.2.6. Coeficiente de correlación

Se aplicará a los valores de humedad y precipitación asociada un análisis de correlación estadística, de acuerdo con Sabogal (1984), entre la mayoría de las variables meteorológicas existe una relación funcional, lo cual se puede estudiar con el análisis de correlación y regresión. En estadística, la técnica para establecer el grado de asociación o de correlación entre dos o más variables de una población, a partir de una muestra aleatoria, es lo que se conoce como un análisis de correlación.

Para medir dicho grado de correlación existe el concepto de coeficiente de correlación, del cual se conocen varios tipos. El más utilizado es el coeficiente de correlación lineal o de Pearson, que relaciona dos variables cuantitativas y que toma valores entre -1 y +1, donde -1 indica una correlación negativa perfecta y +1 indica



una correlación positiva perfecta, mientras que el cero indica una no asociación o correlación (McGraw-Hill, 2016). La figura 1.8 muestra ejemplos de gráficas de dispersión de datos, con diferentes valores de coeficientes de correlación.

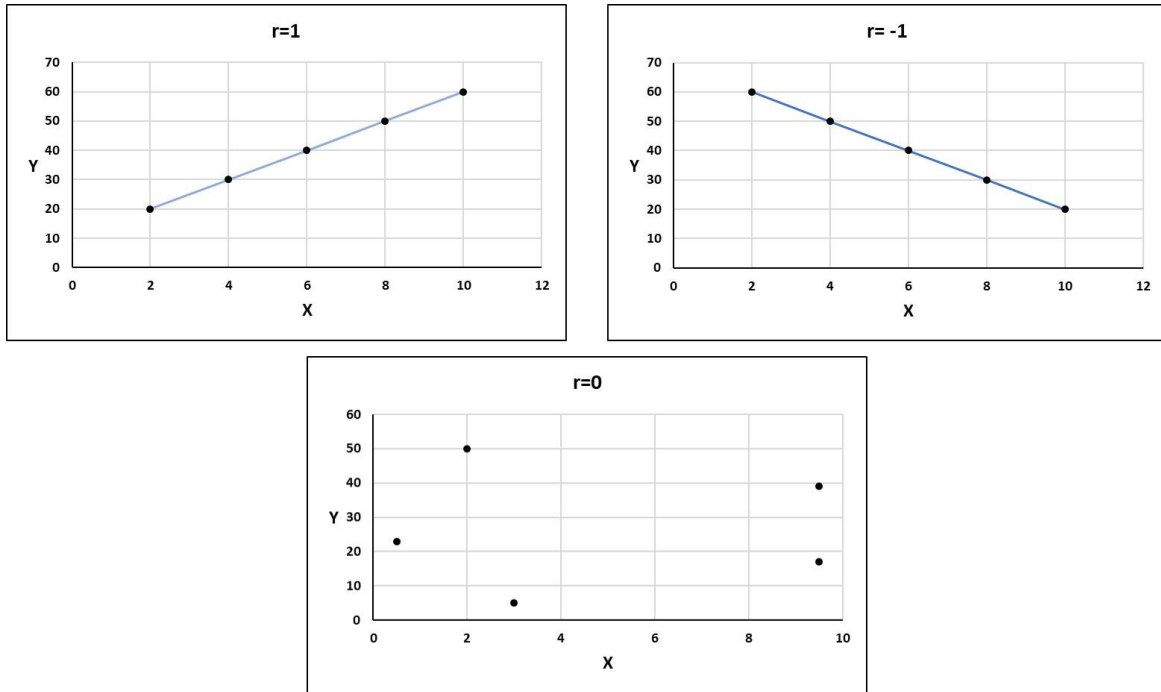


Figura 1.8. Ejemplos de diferentes valores del coeficiente de correlación de Pearson (Elaboración propia)

En el estudio de dos variables aleatorias X e Y sobre una población; este coeficiente se simboliza como  $r_{x,y}$ , ya la fórmula para calcularlo es la siguiente:

$$r_{x,y} = \frac{\sum x_i y_i - n \bar{x} \bar{y}}{(n-1) s_x s_y} = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{\sqrt{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \sqrt{n \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2}} \quad (1.5a)$$

De igual manera, cuando se trabaja con tres variables, puede extenderse esta misma fórmula; por ejemplo, con las variables aleatorias X, Y, Z, la fórmula sería la siguiente:

$$r_{x,y,z} = \frac{\sum x_i y_i z_i - n \bar{x} \bar{y} \bar{z}}{(n-1) s_x s_y s_z} = \frac{n \sum x_i y_i z_i - \sum x_i \sum y_i \sum z_i}{\sqrt{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \sqrt{n \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2} \sqrt{n \sum z_i^2 - (\sum z_i)^2}} \quad (1.5b)$$

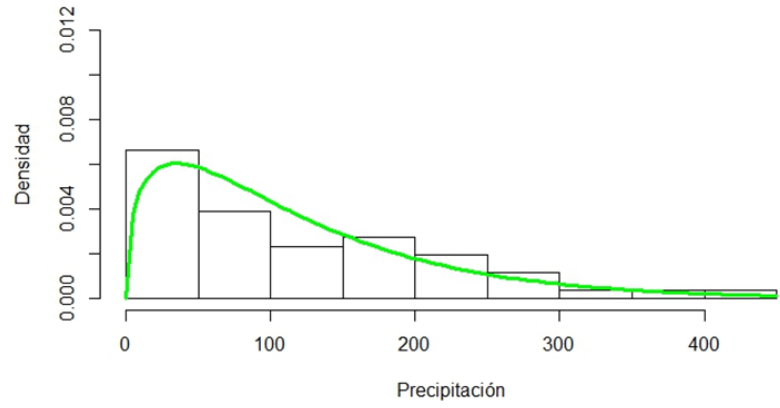
Donde:

- $r_{x,y,z}$  es el coeficiente de correlación
- $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$  son las medias de las variables  $x, y$  y  $z$
- $n$  es el número de datos
- $s_x, s_y, s_z$  son las desviaciones estándar de las variables  $x, y$  y  $z$

### 1.2.7. Análisis de frecuencias

Con el fin de conocer las características de una variable meteorológica como la precipitación y su comportamiento desde un punto de vista probabilístico, una herramienta muy útil puede ser realizando un análisis de frecuencias. Sabogal (1984) también establece que “el análisis estadístico de los datos meteorológicos comienza con la distribución de frecuencias, relativas y acumuladas. Los resultados de estos análisis se pueden presentar gráficamente por los histogramas y los polígonos de frecuencias.”

Básicamente el concepto de probabilidad es muy útil y utilizado en la meteorología, debido a que los pronósticos meteorológicos, al contar siempre con un grado de incertidumbre de ocurrencia, es mejor presentarlos apoyándose en un grado de probabilidad que deberá ser lo más objetivo posible. Por esta misma razón, es que se utilizan las distribuciones de frecuencia, para obtener dicho grado de probabilidad, con base en un análisis objetivo; algunas de las distribuciones de frecuencias más utilizadas en estudios meteorológicos y climatológicos son la distribución normal, distribución binomial, distribución de Weibull o la distribución gamma (Sabogal, 1984). En el caso de la precipitación, de acuerdo con Santana (2014), las funciones de distribución de probabilidades tipo Gamma describen de una mejor manera el comportamiento de las precipitaciones que las funciones normales, ya que se concentran cerca del cero sin rebasar hacia los valores negativos, por lo que no presentan probabilidades de precipitación por debajo de cero, lo cual es físicamente imposible. En la figura 1.9 puede observarse un análisis de frecuencias de precipitación, reflejado en un histograma con un ajuste de distribución Gamma.



**Figura 1.9. Histograma de precipitación con función de distribución Gamma (Elaboración propia)**

## 2. Revisión del estado del arte

### 2.1. Climatología de frentes fríos en la República Mexicana

La temporada de frentes fríos en México inicia en septiembre y concluye en mayo del siguiente año. De acuerdo con la climatología 1981 – 2010 se presentan en promedio 44 sistemas frontales durante una temporada. La importancia del monitoreo de estos sistemas radica en los marcados descensos de temperatura, rachas fuertes de viento y patrones de lluvia intensos asociados a su desplazamiento sobre México durante los meses de invierno (SMN, 2018).

En el análisis realizado por Ramírez y Espinoza (2002), se describe a los frentes fríos o nortes, como determinantes en la climatología de la región litoral del Golfo de México, considerando tres variables principales en la zona continental: la temperatura, la cual presenta descensos importantes; la intensidad de los vientos de componente norte que ingresan al Golfo de México y que impactan a los estados ubicados en esa vertiente; y finalmente, la precipitación ligera continua durante periodos de dos a tres días; destacando su importancia al caracterizar en buena parte la dinámica del Golfo de México, al menos durante nueve meses del año.

Por su parte, González-Robles (2009), definió la climatología de frentes fríos entre 1961 y 2003, gran parte de ellos en el Golfo de México, utilizando como indicadores el viento meridional y la temperatura superficial del mar, además de un índice de penetración de estos sistemas hacia zonas tropicales. Este índice consiste en el número de frentes fríos que lograron alcanzar dichas latitudes cada año en el periodo de análisis; a menor latitud de incidencia del frente frío, mayor índice de penetración se asignó.

La climatología de sistemas frontales para México se presenta en la figura 2.1, a continuación:

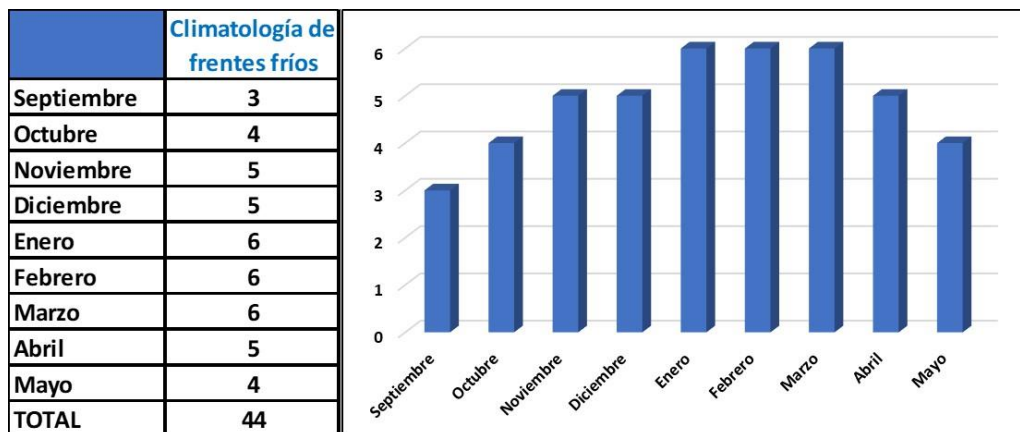


Figura 2.1. Climatología de frentes fríos 1981-2010 (CONAGUA, 2018)

## 2.2. Influencia de la orografía en los frentes fríos

La influencia de la orografía de superficie en los patrones de precipitación da lugar a algunos de los gradientes climáticos más pronunciados a nivel global y desempeña un papel fundamental en la interacción entre la atmósfera y el resto del sistema terrestre en una amplia variedad de escalas de tiempo (Roe, 2005).

La precipitación orográfica es intrínsecamente un fenómeno transitorio. Tiende a ocurrir durante el paso de una perturbación climática preexistente, y las tasas de precipitación pueden variar sustancialmente durante el curso de una sola tormenta a medida que cambian las condiciones sinópticas, como ocurre, por ejemplo, con el paso de un frente (Roe, 2005).

Kirshbaum, Adler, Kalthoff, Barthlott y Serafin (2018), refiriéndose al flujo de impacto y su respuesta al terreno de mesoescala ya sea ascendiendo o desviándose alrededor de él, mencionan que para un flujo continuamente estratificado, adiabático y de estado estacionario con vientos uniformes en estado básico, esta respuesta está determinada por dos parámetros: la altura de la montaña no dimensional ( $M = Nh_m / U$ ), donde  $N$  es la frecuencia de Brunt-Väisälä,  $h_m$  es la altura de la montaña, y  $U$  es la velocidad del viento en la barrera transversal, y la relación de aspecto del terreno ( $r = a_y / a_x$ ), donde  $a_x$  y  $a_y$  son las escalas de longitud del terreno en las direcciones de la barrera transversal y paralela (Smith, 1989).

El impacto que genera la orografía en el paso de los sistemas frontales ha sido estudiado por varios investigadores en diversas partes del mundo; en 1991 Egger y Hoinka presentaron una revisión, aunque no exhaustiva, sí con diversos ejemplos, en el que se mencionan los primeros trabajos experimentales sobre el impacto de la orografía en frentes, de Bjerknes en 1919 además de otros trabajos en regiones como lo Alpes Europeos, los Montes Pirineos, los Montes Apalaches, los Alpes Australianos y los Alpes de Nueva Zelanda; a continuación se presentan algunos de estos casos.

Se analizó el efecto de los Montes Pirineos sobre los frentes fríos durante el evento ocurrido en junio de 1986, con el fin de determinar el grado de afectación de dicha zona montañosa sobre la intensificación de los vientos en el sistema frontal. Lo anterior se apoyó en la utilización de datos de superficie e imágenes de satélite de alta resolución, concluyendo que los vientos sufren una aceleración significativa al canalizarse a través de la orografía de la zona montañosa, alcanzando valores de hasta 19 m/s en comparación con 10 m/s medidos en el mismo periodo, pero a 500 km de los Pirineos (Hoinka & Heimann, 1988).

Llasat Botija (1990), realizó un estudio de varios casos de inundaciones extremas para la región de Cataluña, en España, basado en el análisis de la inestabilidad convectiva a partir de los radiosondeos obtenidos en la isla de Mallorca frente a la zona estudiada, así como el trazo de líneas de corriente durante dichos eventos,

para identificar el flujo dominante; la información meteorológica se obtuvo de boletines y datos de estaciones pluviométricas proporcionados por el Instituto Nacional de Meteorología en España<sup>1</sup>. Se concluyó que la orografía y la inestabilidad atmosférica presente, pueden influir directamente en la distribución espacial de los acumulados más altos de precipitación.

Mediante un análisis basado en datos de radiosondeo, radar Doppler, estaciones en superficie y de aeronaves, medidos durante el paso de un frente frío al sur de la región de Bavaria el 7 de octubre de 1987, Hoinka, Hagen, Volkert y Heimann (1989), establecieron la importancia que tiene la orografía de la cordillera de los Alpes sobre el paso de frentes fríos en esa región, al influir en el comportamiento de estos a una escala local, en el desarrollo de la nubosidad por ascensos forzados de aire frío.

Barret, Garreaud y Falvey (2009), en un estudio de caso en la Cordillera de los Andes y apoyándose en simulaciones del modelo Weather Research and Forecasting (WRF), llegaron a la conclusión de que un incremento en los valores de precipitación ocurrida a lo largo de la zona central de Chile, durante un evento ocasionado por la interacción de una vaguada de niveles altos de la atmósfera y un frente frío en superficie a finales de mayo de 2008, se debió en gran parte a la altitud de la zona y a la interacción con la orografía.

Por otra parte, Valenzuela y Kingsmill (2015) realizaron un estudio para documentar las precipitaciones orográficas producidas a lo largo de las montañas costeras del norte de California durante una tormenta invernal que afectó dicha región del 16 al 18 de febrero de 2004. Para este estudio utilizaron diferentes herramientas de observación, entre las que destacan un radar Doppler banda X, así como diversos sensores meteorológicos. Con base en sus observaciones determinaron que dicho evento se dividió en dos episodios: en el primero, se presentaron un chorro de bajo nivel (LLJ, por sus siglas en inglés) y un flujo de aire atrapado en el terreno (TTA, por sus siglas en inglés), donde el TTA fungió como una barrera que impidió el ingreso profundo hacia el continente del LLJ, favoreciendo lluvias más hacia la costa; mientras tanto, el segundo episodio no contó con la presencia del TTA, por lo que el LLJ ingresó más a fondo, favoreciendo un forzamiento orográfico más pronunciado con acumulados de precipitación más significativos.

En cuanto a la ocurrencia de estos fenómenos en México, Luna (2016) analizó la interacción de los frentes fríos sobre el Golfo de México con la topografía y la relación que puede tener con la formación de un jet de montaña paralelo a la Sierra Madre Oriental (SMO). Para este estudio se simuló mediante el modelo regional WRF, dos frentes fríos significativos de la temporada 2010-2011, destacando las variables principales que los caracterizan, la temperatura de punto de rocío y la energía potencial convectiva disponible; además, se analizaron las condiciones

---

<sup>1</sup> Desde 2008, sucedida por la Agencia Estatal de Meteorología

sinópticas y locales necesarias para el desarrollo de un jet con estas características. Entre las conclusiones destaca que la presencia de la SMO es necesaria para la formación del jet de montaña, además de que la intensidad de los vientos tiene influencia en la distribución de la precipitación en esta zona.

### 2.3. Mitigación del riesgo ante la amenaza de frentes fríos en México

La república mexicana presenta una alta vulnerabilidad ante la afectación por frentes fríos; es por ello, que se vuelve sumamente importante prever con suficiente anticipación los efectos que pudieran causar estos sistemas. Por esta razón, el uso de modelos regionales en conjunto con una metodología para delimitar las áreas de riesgo se torna como una herramienta muy útil en este sentido, dando lugar a los llamados sistemas de alertamiento temprano (Prieto et al., 2011).

En ese mismo orden de ideas, Prieto, Ramírez y San Cristóbal (2008), generaron una metodología para la creación de un sistema de alerta temprana ante frentes fríos y nortes, basado en el cumplimiento de una serie de requisitos, entre los cuales destacan el interés de una institución que ejecute la meteorología operativa, la automatización del sistema, la ejecución del sistema utilizando eventos históricos, la ejecución del sistema de manera experimental durante una temporada invernal, la revisión del sistema y sus resultados, la implementación del sistema de manera operativa y la evaluación de los usuarios que permita una retroalimentación y mejoras del sistema.

En continuidad con lo anterior, Prieto et al. (2011) desarrollaron umbrales a partir de datos proporcionados por el modelo NAM, los cuales fueron establecidos para valores de temperatura mínima, cambios abruptos de temperatura, precipitación y viento, asociados al paso de frentes fríos sobre la República Mexicana, en vías de desarrollar sistemas de alerta temprana ante estos eventos.

Por otra parte, en cuanto a la región de estudio; existen pocos trabajos de investigación publicados y que estén relacionadas al estudio de las afectaciones por frentes fríos en Chiapas y Tabasco; sin embargo, en el ámbito de la meteorología operativa, en el CHMRTG perteneciente al Organismo de Cuenca Frontera Sur (OCFS) de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), se realiza un trabajo de análisis y pronóstico diario ante eventos hidrometeorológicos incluyendo los frentes fríos. En un reporte de actividades, Hernández-Carrillo (2014) señala:

*De acuerdo con la experiencia operativa de este centro de trabajo, se ha detectado que no solo se presentan lluvias significativas hacia los meses de verano; la temporada de invierno también es importante en cuanto a acumulados de precipitación se refiere, pues uno de los fenómenos hidrometeorológicos que más afecta a esta región de Chiapas y Tabasco son los frentes fríos, los cuales llegan a favorecer precipitaciones intensas*

*asociadas principalmente al forzamiento orográfico que se genera por los vientos del norte que azotan la zona montañosa de la porción norte de Chiapas y sierra de Tabasco.*



### 3. Trabajo operativo desarrollado ante la afectación de frentes fríos en la región de estudio

Con base en análisis sinópticos dentro de la meteorología operativa, se ha identificado que cuando estos sistemas meteorológicos alcanzan el Golfo de México, la circulación anticiclónica en un sentido dextrógiro<sup>2</sup> puede llegar a favorecer vientos de componente norte sobre la vertiente costera de los estados de Veracruz, Tabasco, Campeche y Yucatán, alcanzando incluso a los estados de Oaxaca y Chiapas. Puede observarse un ejemplo de esta situación en la figura 3.1, donde el flujo de vientos se presenta del norte para el sureste de México.

Para el caso de los estados de Chiapas y Tabasco, el grupo de meteorólogos del Centro Hidrometeorológico Regional Tuxtla Gutiérrez (CHMRTG) llegó a identificar, de manera empírica, que los vientos del norte al toparse con la zona montañosa de la región de estudio, como efecto durante el paso de un frente frío, son potenciados por la presencia de dicha zona montañosa, y que debido a un forzamiento orográfico de los vientos del norte y a una presencia significativa de la razón de mezcla, se pueden llegar a tener valores importantes de precipitación, que en muchas ocasiones pueden superar acumulados de 100 mm en 24 horas.

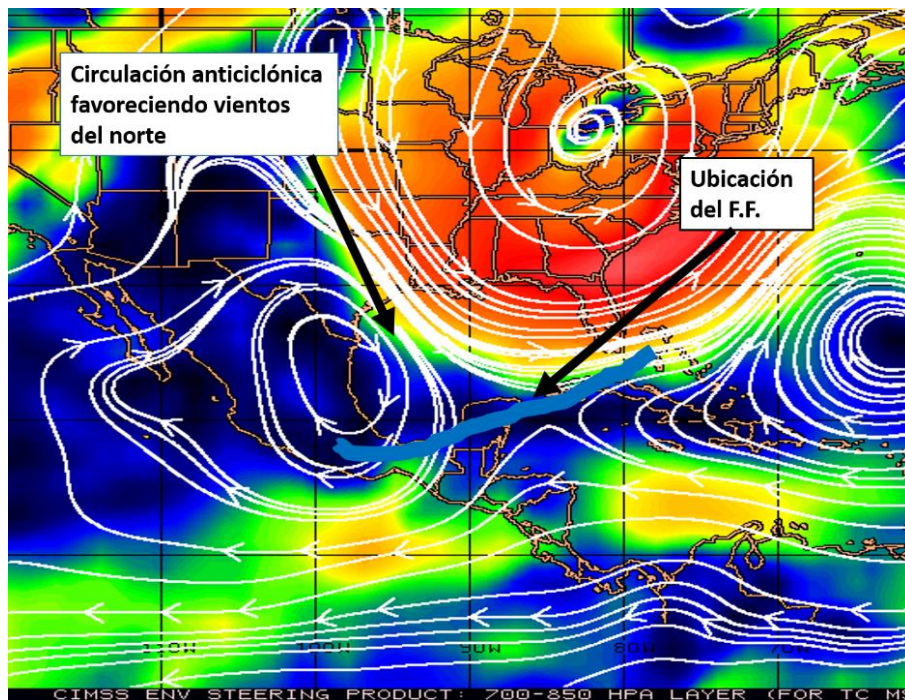


Figura 3.1. Flujo de vientos del norte en la región de estudio (CIMMS, 2018, edición propia)

<sup>2</sup> Se dice cuando el sentido del giro es en favor de las manecillas del reloj.

Dicha metodología empírica se desarrolla en ese centro de trabajo desde hace varios años, transmitiéndose a manera de enseñanza en la operatividad, sin que haya, hasta el momento, un documento o manual al respecto. Este procedimiento es una herramienta que es utilizada específicamente como apoyo para determinar un pronóstico cuantitativo del acumulado de precipitación en 24 horas.

Primeramente, cuando se detecta, con días de anticipación, que un frente frío afectará la región, se da un seguimiento de análisis sinóptico durante el tiempo necesario, además de verificar la proyección del modelo para determinar la intensidad del sistema con base en el gradiente de presión, el descenso en los valores de temperatura esperados con el paso del fenómeno y el pronóstico de los valores acumulados de precipitación.

Adicionalmente, con el fin de determinar un pronóstico más eficiente de la precipitación, con base en la metodología empírica mencionada, el meteorólogo realiza un análisis en conjunto de los valores de razón de mezcla y la dirección del viento sobre la región de estudio, tal método se muestra en la figura 3.2 con un diagrama del proceso, mientras que en la figura 3.3 se muestra un mapa de la región, tal y como lo visualizan los meteorólogos del CHMRTG, en donde se observan valores de razón de mezcla superiores a 13 gr/kg y con vientos de componente norte.

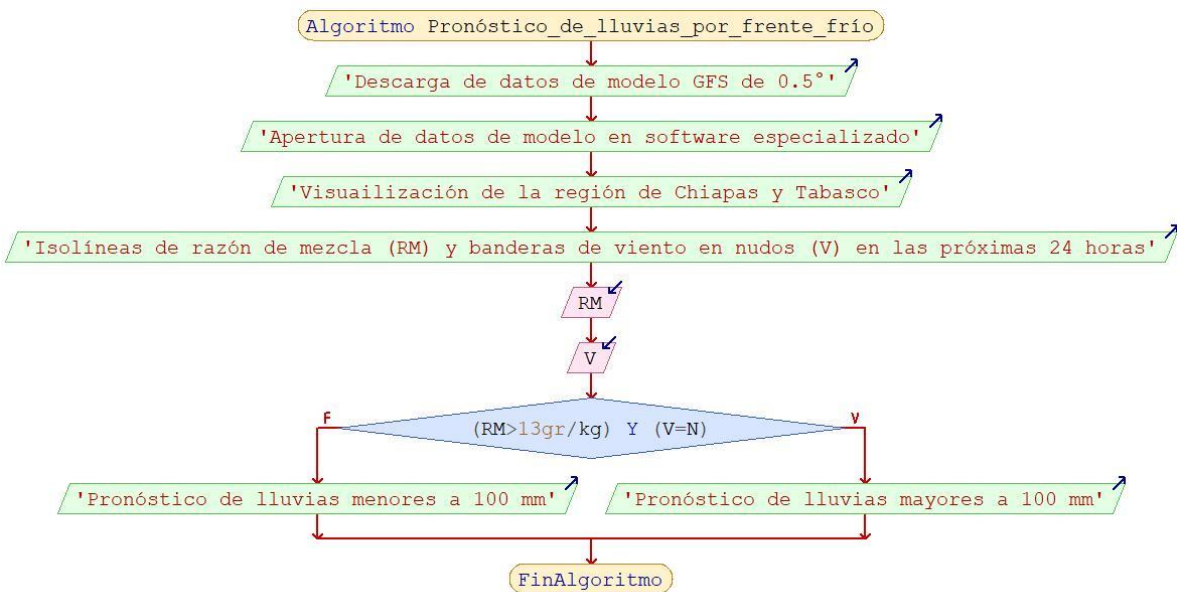


Figura 3.2. Proceso de método empírico para el pronóstico cuantitativo de precipitación

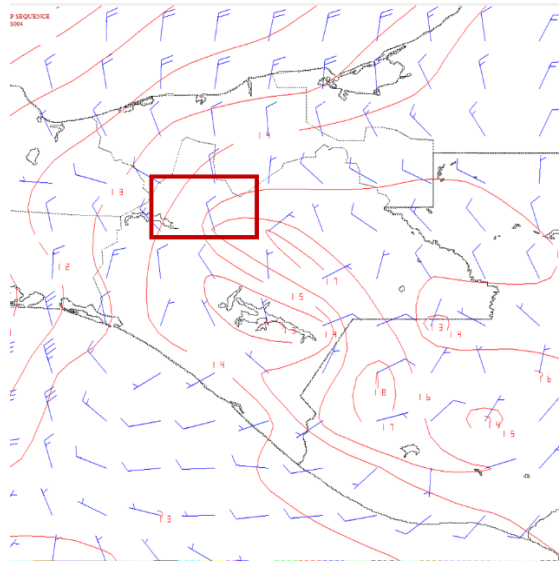


Figura 3.3. Carta de análisis de la región, con vientos e isólinas de razón de mezcla (Elaboración propia)

Un ejemplo de las consecuencias de este fenómeno fue lo ocurrido entre el 30 de noviembre y el 3 de diciembre de 2010, ante el paso del frente frío no. 11 y sus efectos sobre la región, con acumulados de 331.6 mm en 24 horas y de hasta 467.8 mm durante todo el periodo en la localidad de Ocoatepec, Chiapas. La figura 3.4, muestra un mapa de isoyetas resultante de dicho evento, donde puede observarse claramente la concentración de los mayores acumulados en la porción norte de Chiapas.

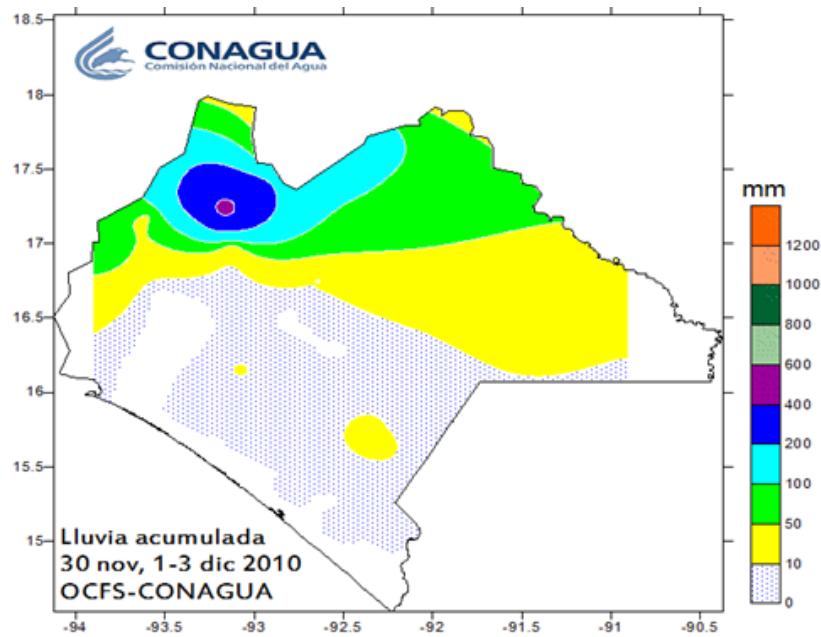


Figura 3.4. Mapa de isoyetas de Chiapas del 30-nov al 3-dic de 2010 (CONAGUA, OCFS, 2010)

### 3.1. Fundamento teórico

La metodología empírica utilizada en el CHMRTG obedece a una serie de conceptos fundamentados en la física y los mecanismos para la formación de las nubes que dan lugar a la precipitación.

Jacobson (2005) expone que las nubes pueden formarse por uno de varios mecanismos. Están las nubes que se forman debido al calentamiento de la superficie y la convección libre, estas nubes son denominadas nubes convectivas. Mientras que también existen las nubes orográficas, de las cuales ya se habló un poco en el capítulo 1.2.3, donde el viento al toparse con una barrera montañosa es obligado a elevarse, enfriándose adiabáticamente y condensándose, dando lugar a la nubosidad. Jacobson también menciona que las nubes también se forman a lo largo de sistemas frontales, en el caso de un frente frío, el aire frío y denso empuja el aire caliente y húmedo verticalmente, lo que hace que el aire caliente se expanda y se enfríe hasta que se produzca la condensación. Tomando esto en consideración, los meteorólogos del CHMRTG identificaron la importancia del viento como una variable de entrada, que al presentarse de componente norte y ser forzado por la zona montañosa de la región, da lugar a la formación de nubes orográficas, que, si se suman a la formación de nubes asociadas al avance del sistema frontal, puede incrementar el potencial de la precipitación. Además de esto, para que se presente la condensación y formación de nubes, es necesario que exista cierta cantidad de vapor de agua en la atmósfera. Esto se refiere en el capítulo 1.2 sobre los conceptos generales, la humedad en el aire puede expresarse de diferentes maneras, entre ellas la razón de mezcla. Dentro de un contexto de dinámica atmosférica, de acuerdo con Jacobson (2005), dos procesos son importantes de considerar, por una parte, la dinámica misma que puede ser descrita a través del proceso de momentum vertical dentro de la nube (ecuación 3.1), el transporte de la misma mediante un proceso advectivo (transporte) y su arribo a la zona con topografía irregular donde esta dinámica se incrementa mediante el transporte de humedad a través de la Energía Potencial Convectiva Disponible (ecuación 3.2).

$$\frac{dw}{dt} = -g - \frac{1}{\rho_a} \frac{\delta p_a}{\delta z} + \frac{1}{\rho_a} (\nabla \cdot \rho_a K_m \nabla) w \quad (3.1)$$

Donde:

- $\frac{dw}{dt}$  es el cambio de la humedad en el tiempo
- $g$  es la gravedad
- $\rho_a$  es la densidad del aire
- $\frac{\delta p_a}{\delta z}$  es el cambio de la presión atmosférica del aire con respecto al cambio de la altura

- $K_m$  es la constante de Kármán.

$$CAPE = g \int_{Z_{LFC}}^{Z_{LNB}} B dz \approx g \int_{Z_{LFC}}^{Z_{LNB}} \left( \frac{\theta_v - \hat{\theta}_v}{\hat{\theta}_v} \right) dZ \quad (3.2)$$

Donde:

- $g$  es la gravedad
- $Z_{LNB}$  es la altura del nivel de boyancia neutral
- $Z_{LFC}$  es la altura del nivel de libre convección
- $B$  es la boyancia
- $\theta_v$  es la temperatura potencial equivalente virtual de la parcela de aire que se eleva
- $\hat{\theta}_v$  es la temperatura potencial equivalente del ambiente

En este procedimiento se optó por utilizar esta variable modelada debido a que expresa la masa del vapor de agua en relación con la masa del aire seco en un volumen de aire, el cual, al ser elevado en la vertical sobre la montaña, puede ser condensado generando la nubosidad.

### 3.2. Planteamiento del problema

Uno de los problemas más desafiantes y difíciles en la predicción numérica del tiempo es el pronóstico cuantitativo de la precipitación, especialmente la predicción de precipitación intensa inducida orográficamente (Smith, 1997; Lin, Chiao, Wang, Kaplan, & Weglarz, 2001). En términos de protección a la población y a la infraestructura, es sumamente importante emitir un pronóstico eficiente que garantice tomar medidas preventivas, con suficiente anticipación. Es por ello que, además de los modelos de pronóstico, se utilizan diversas herramientas como las imágenes de satélite, de radar, los datos de radiosondeo y de estaciones meteorológicas automáticas, los cuales adquieren total relevancia a la hora de realizar un análisis de las condiciones que se presentarán al momento de la ocurrencia del fenómeno.

Cada año, la porción norte de Chiapas y la sierra del estado de Tabasco, se encuentra en riesgo por los efectos asociados a las lluvias intensas, inundaciones pluviales o fluviales que en ocasiones pueden ser repentinas, además de deslizamientos de tierra son solo algunos de los peligros a los que se enfrenta la población.

En la zona también se encuentra uno de los sistemas de presas más importantes de la República Mexicana, el Sistema Hidroeléctrico Grijalva, a lo largo del río

Grijalva y conformado por las presas Dr. Belisario Domínguez (Angostura), Ing. Manuel Moreno Torres (Chicoasén), Netzahualcóyotl (Malpaso) y Ángel Albino Corzo (Peñitas). Tan solo en 2009, este sistema generó 11,625 GWh de energía eléctrica, lo que representó el 43.96% de la generación nacional (Ramírez-Salazar, 2011), por lo que también es importante mantener una operación óptima y constante, razón por la cual emitir pronósticos meteorológicos eficientes, que reduzcan los riesgos que pudieran afectar o detener dicha operación. Un ejemplo de esto ocurrió en noviembre de 2007 cuando las constantes lluvias torrenciales generaron un deslizamiento de ladera en el río Grijalva, el segundo más caudaloso de México. Este fenómeno generó un tapón de tierra ubicado entre las presas Malpaso y Peñitas, además de afectar al poblado Juan de Grijalva, municipio de Ostuacán, Chiapas, por el deslizamiento en bloque del terreno y por la inundación repentina, provocando la muerte de 25 personas y significando un alto riesgo para la presa Peñitas y las ciudades ubicadas aguas abajo de esta (Arreguín & Cervantes, 2017).

### 3.3. Justificación

De acuerdo con Hernández-Carrillo (2014), la región comprendida por los estados de Chiapas y Tabasco ha sido afectada a lo largo de su historia por distintos tipos de fenómenos hidrometeorológicos cada año, favoreciendo grandes cantidades de precipitación cuya media anual llega a ser de alrededor de 2100 mm, esto debido a su ubicación geográfica entre los océanos Atlántico y Pacífico, que favorece el ingreso de humedad proveniente de ambas vertientes.

Ante esta situación, es necesario utilizar más y mejores herramientas que sirvan para emitir un mejor pronóstico y que refuercen o complementen a las herramientas ya existentes como los modelos numéricos, sobre todo cuando se presentan acumulados de precipitación intensa. En ese orden de ideas, meteorólogos del CHMRTG, hacen uso de una metodología empírica que, ante la afectación de un frente frío en la región, permite pronosticar lluvias con acumulados iguales o superiores a 100 mm en 24 horas, a partir de la ocurrencia de ciertos valores modelados de razón de mezcla y viento. Se trata de un procedimiento totalmente operativo cuya percepción entre los meteorólogos es que funciona en la mayoría de los casos y que ya lleva varios años ejecutándose de manera rutinaria; sin embargo, este no ha sido validado o verificado de manera objetiva, por lo que es necesario llevar a cabo un análisis que permita evaluar su eficiencia y, si es el caso, mejorar tal metodología.

### 3.4. Objetivo

Verificar de forma objetiva la metodología empírica de pronóstico utilizada en el CHMRTG, mediante el uso de técnicas estadísticas que identifiquen el grado asociación de las variables modeladas de razón de mezcla y viento, con la lámina de precipitación observada, debido al paso de frentes fríos en la porción norte de Chiapas y la sierra de Tabasco. En función de los resultados, recomendar su uso o desestimación de dicha herramienta, en el análisis y pronóstico meteorológico.

#### 3.4.1. Objetivos específicos

- Identificar y seleccionar los eventos de precipitación por frentes fríos en la zona de estudio.
- Obtener diagramas de dispersión y coeficientes de correlación que verifiquen el grado de asociación de las variables involucradas.
- En función de los resultados, proponer modelos de regresión que ayuden al pronóstico de precipitación a partir de valores de razón de mezcla y viento.
- Realizar análisis de frecuencias, obteniendo histogramas de precipitación y ajustes de distribución para obtener valores de probabilidad de rangos de pronóstico de precipitación.

### 3.5. Hipótesis

El análisis del comportamiento de la razón de mezcla, el viento y las precipitaciones intensas asociadas al paso de frentes fríos con efecto orográfico en la zona de la Sierra de Tabasco y Chiapas, contribuye a identificar una relación significativa entre la razón de mezcla y el viento con la precipitación acumulada, así como a la mejora del pronóstico de estos eventos como tarea de la meteorología operativa de la región.

## 4. Metodología

La metodología propuesta consiste el tratamiento de datos modelados y observados, para establecer un análisis estadístico entre variables que se seleccionen. El procedimiento deberá ser el siguiente:

1. Obtención de datos observados de precipitación acumulada en 24 horas.
2. Selección de los eventos a analizar.
3. Obtención de datos modelados a partir del modelo GFS, con base en la selección de eventos.
4. Elaboración de un análisis de regresión de las variables razón de mezcla, viento y precipitación observada.
5. Elaboración de un análisis de frecuencia para la obtención de funciones de distribución.
6. Análisis de los resultados

### 4.1. Definición de la región en la malla del modelo

Existe una distribución de las celdas del modelo de pronóstico Global Forecast System (GFS), con una resolución espacial de 50 x 50 km. Para este estudio, se propone considerar las celdas localizadas sobre la región de estudio y que preferentemente contengan al menos una estación meteorológica (convencional o automática). La figura 4.1 presenta la manera en que se observan las celdas del modelo, resaltando las que se propone utilizar en este estudio.

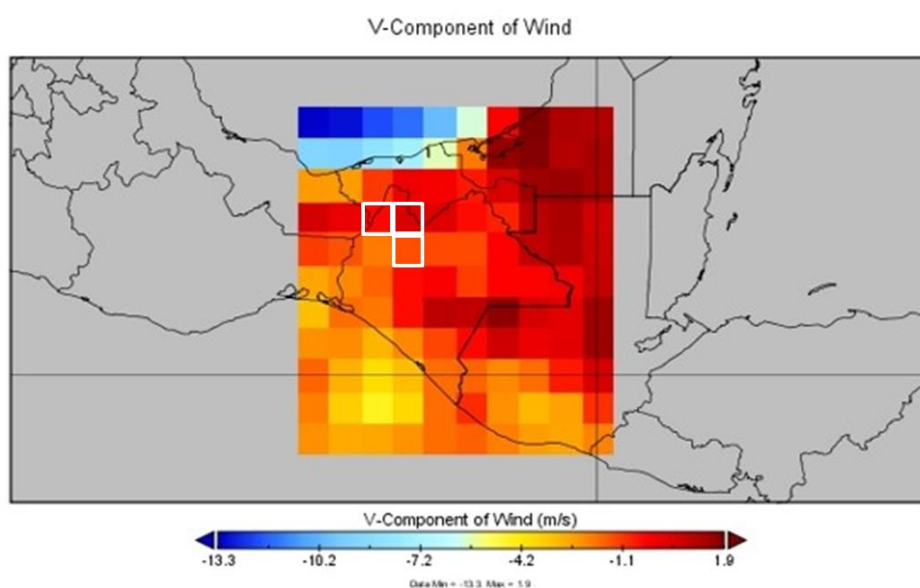


Figura 4.1. Visualización y distribución de celdas del modelo GFS (Elaboración propia)



## 4.2. Selección de eventos y obtención de datos

Se consideró un total de 51 eventos de precipitación asociados al paso de frentes fríos en la región. Para lo cual, se dispuso de datos históricos de acumulados diarios de precipitación dentro del periodo de 2006 al año de la realización de este trabajo, toda vez que los datos modelados únicamente están disponibles a partir del año 2006. Para efecto del presente estudio, se consideraron los eventos más con acumulados de precipitación en 24 h, más altos durante ese periodo de años.

Una vez seleccionados los eventos, se recopilan los datos del modelo numérico a escala global GFS, correspondientes a la corrida de 00:00 h GMT más cercana previa al periodo de mayor afectación de cada evento seleccionado, esto debido a que son los datos que regularmente se utilizan de manera operativa, para llevar a cabo el pronóstico dentro de las siguientes 24 h. Sin embargo, esto no es una limitante, ya que, si se desea, pueden utilizarse los datos de cualquiera de las otras cuatro corridas del modelo (06, 12 y 18 GMT), teniendo en consideración los horarios del periodo de análisis.

La descarga de estos datos se realiza desde el portal del NCEI (National Centers for Environmental Information)<sup>3</sup> de la NOAA. Debido a que estos datos del modelo se presentan en paquetes de archivos por día, que van desde las 00 hasta las 240 horas de pronóstico, además de que corresponden a una malla global; se realiza un recorte tanto espacial como temporal, cubriendo únicamente el periodo y la región de interés; para este caso, se considera un periodo de pronóstico que va desde las 00 hasta las 48 h, así como la región que abarca los estados de Tabasco y Chiapas, en la región comprendida en las latitudes 94.5° y 90° O, y las longitudes 14 ° y 19° N.

Dentro de las variables modeladas, se deben obtener las de interés para este trabajo y que son razón de mezcla y viento, debido a que son las identificadas como relevantes dentro de los ejercicios de pronóstico realizados operativamente en el CHMRTG. Las figuras 4.2 y 4.3 muestran un ejemplo de cómo se pueden presentar desplegados los datos del modelo, tanto en un mapa, como numéricamente distribuidos por celdas.

---

<sup>3</sup><https://www.ncdc.noaa.gov/has/HAS.FileAppRouter?datasetname=GFSGRB24&subqueryby=STATION&appName=&outdest=FILE>

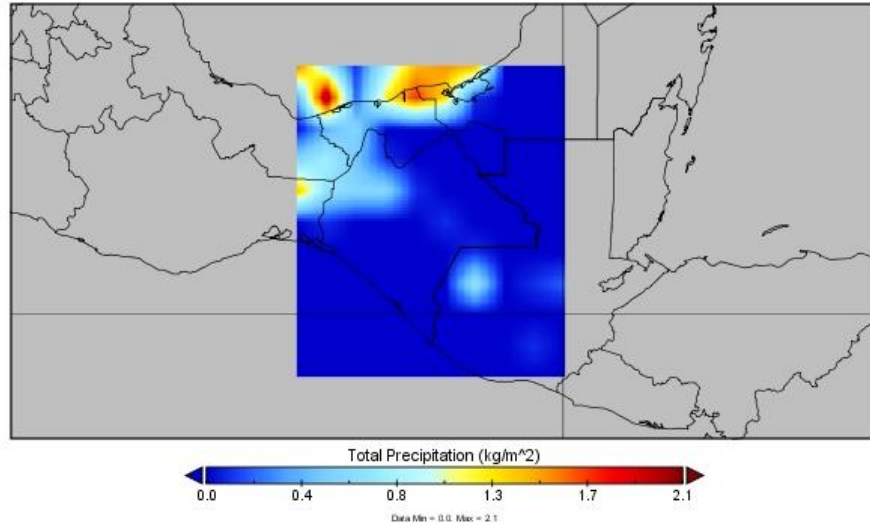


Figura 4.2. Visualización de datos de modelo en mapa (Elaboración propia)

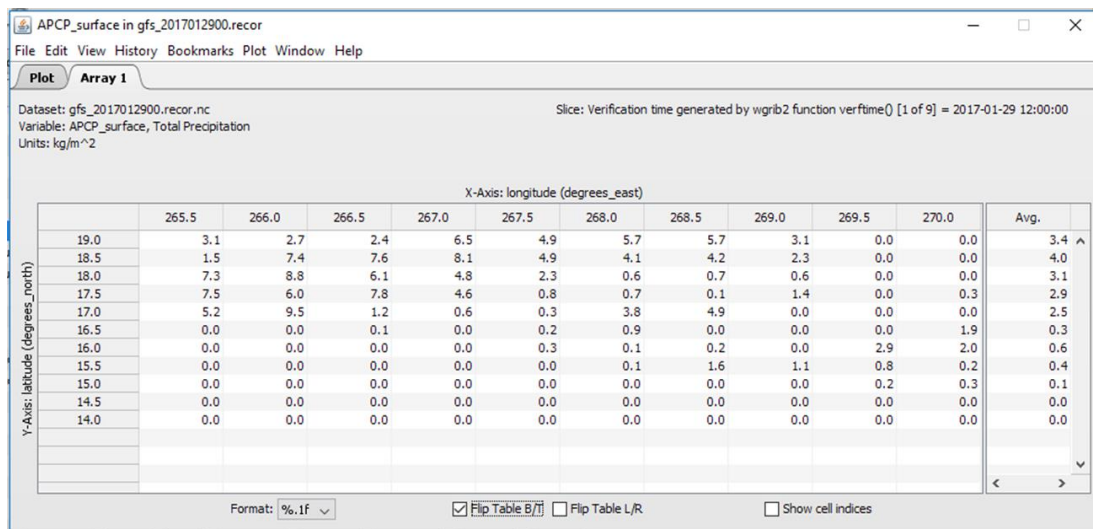


Figura 4.3. Visualización de datos de modelo numéricamente distribuidos por celdas (Elaboración propia)

A continuación, se elabora una matriz por cada una de las celdas de la región de análisis, donde se despliegan los diferentes valores tanto modelados como observados. Dicha matriz quedaría tal y como se muestra en la tabla 4.1.

Tabla 4.1. Matriz de datos por celdas

No. Evento	Fecha	Razón de Mezcla Promedio 850-1000 mb (gr/Kg)	Magnitud Viento en sup. (m/s)	Dir. Viento en sup. (°)	Precipitación Promedio Observada (mm)	Precipitación Máxima Observada (mm)	Estación de registro de la Precipitación Máxima Observada
1	dd/mm/aa <sub>1</sub>	RM <sub>1</sub>	VR <sub>1</sub>	DV <sub>1</sub>	PPO <sub>1</sub>	PMO <sub>1</sub>	ER <sub>1</sub>
2	dd/mm/aa <sub>2</sub>	RM <sub>2</sub>	VR <sub>2</sub>	DV <sub>2</sub>	PPO <sub>2</sub>	PMO <sub>2</sub>	ER <sub>2</sub>
...	...	...	...	...	...	...	...
n	dd/mm/aa <sub>n</sub>	RM <sub>n</sub>	VR <sub>n</sub>	DV <sub>n</sub>	PPO <sub>n</sub>	PMO <sub>n</sub>	ER <sub>n</sub>

De la tabla 4.1, se observa que el valor utilizado de la razón de mezcla es el promedio aritmético de los valores en los niveles de 850 y 100 mb, mientras que la magnitud y dirección del viento son consideradas en superficie.

#### 4.3. Análisis de regresión lineal simple y múltiple

Como parte de la caracterización de la precipitación inducida por forzamiento orográfico ante el paso de frentes fríos en la región, es necesario realizar un análisis de regresión lineal simple, correlacionando razón de mezcla y viento con precipitación observada por separado; múltiple, correlacionando las tres variables al mismo tiempo siendo la precipitación la variable dependiente. Todo lo anterior con el fin de identificar el grado de asociación entre dichas variables, primero generando una serie de diagramas de dispersión y posteriormente calculando los coeficientes de correlación.

El análisis se realiza entre las variables modeladas (aquellas obtenidas del modelo GFS) y la variable observada (aquellas obtenidas de las redes climáticas y meteorológicas) en cada celda, de la siguiente forma:

- Razón de mezcla modelada (RMM) – Precipitación promedio observada (PPO)
- Razón de mezcla modelada (RMM) – Precipitación máxima observada (PMO)
- Viento modelado (UM) – Precipitación promedio observada (PPO)
- Viento modelado (UM) – Precipitación Máxima observada (PMO)
- Razón de mezcla modelada (RMM) – Viento modelado (UM) - Precipitación máxima observada máxima (PMO)
- Razón de mezcla modelada (RMM) – Viento modelado (UM) - Precipitación promedio observada (PPO)

Donde los valores de precipitación máxima y precipitación promedio para cada evento, se obtuvieron de los registros de precipitación en intervalos de 24 h, de las estaciones localizadas dentro de la zona de estudio.

Para establecer el grado de asociación o de correlación entre esas variables, a partir de la muestra aleatoria, se debe realizar un análisis de correlación con el fin de identificar objetivamente si realmente existe, o no, asociación positiva. Moncho (2015), expone las bondades del método de Pearson para obtener el coeficiente de correlación lineal entre variables cuantitativas.

Para lo cual, con apoyo de la matriz de la tabla 4.1 mostrada anteriormente, se construyen diagramas de dispersión tanto simple como múltiple de las variables listadas y se obtiene, para cada una de ellas, el coeficiente de correlación por el método de Pearson. Las figuras 4.4 y 4.5 muestran un ejemplo de este tipo de diagramas.

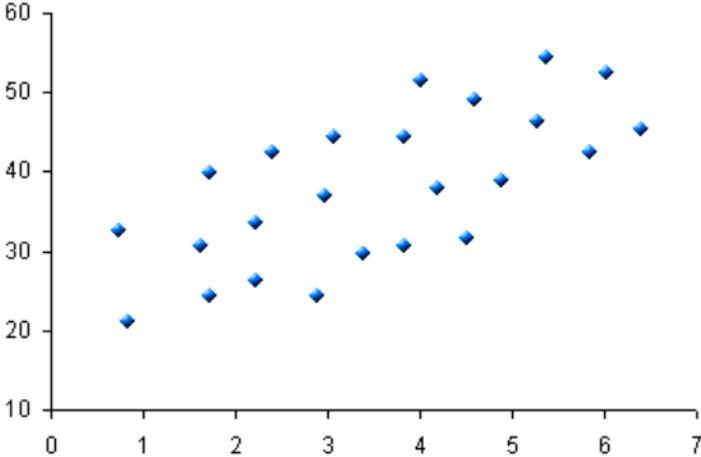


Figura 4.4. Ejemplo de un diagrama de dispersión simple (Calidad y ADR, 2018)

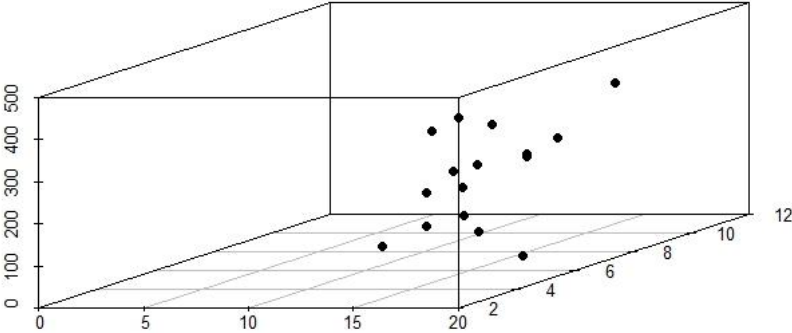


Figura 4.5. Ejemplo de un diagrama de dispersión múltiple (Elaboración propia)

Una vez generados los diagramas de dispersión y habiendo calculado los coeficientes de correlación, se debe evaluar con base en lo anterior, si resulta factible construir un modelo de regresión que permita favorecer el pronóstico de

valores de una variable, en este caso la precipitación, a partir de los valores que se presenten en otras, como lo son RMM y UM. Ejemplos de ecuación de un modelo de regresión lineal simple y múltiple son, respectivamente, los siguientes:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x \quad (4.1a)$$

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 \quad (4.1b)$$

donde:

- $y$  es la variable dependiente
- $x$ ,  $x_1$  y  $x_2$  son variables independientes o explicativas
- $\beta_0$ ,  $\beta_1$  y  $\beta_2$  coeficientes que miden la influencia que las variables explicativas tienen sobre el modelo

Donde  $\beta_0$  es la intersección, mientras que  $\beta_1$  y  $\beta_2$  son cada una de las variables involucradas.

#### 4.4. Análisis de frecuencias y función de distribución

Con el fin de complementar el análisis de correlación o inclusive, cuando la construcción de modelos de regresión no haya sido factible, se realiza un análisis de frecuencias por cada una de las celdas; se generaron histogramas de frecuencia (ver figura 4.6) con los valores de precipitación promedio observada y máxima observada. Sin embargo, debido a que estos histogramas se construyen solo a partir de los valores de precipitación, es necesario asociarlos a los datos modelados de RM y U, por lo que se propone tomar en cuenta una condición inicial con valores de estas variables, de esta manera y con el ajuste de una función de distribución gamma, obtienen valores de probabilidad condicionada; en este caso, calcular la probabilidad de que se presenten ciertos valores de precipitación, habiéndose presentado valores de RMM o UM.

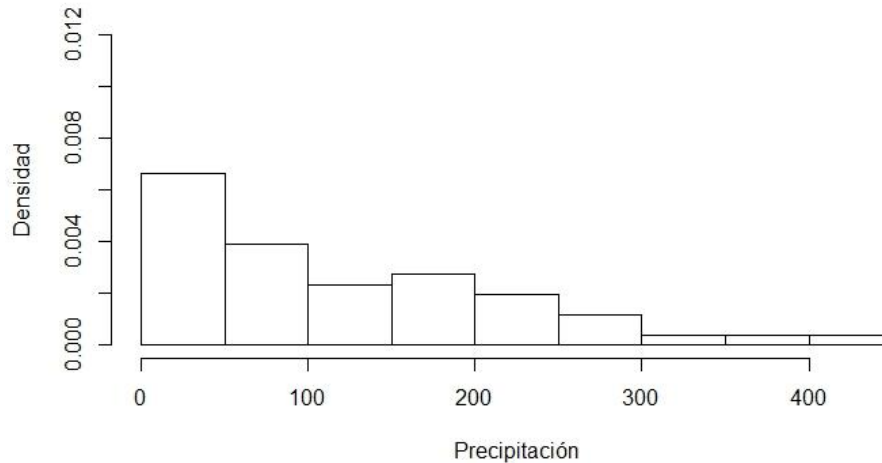


Figura 4.6. Ejemplo de histograma de precipitación (Elaboración propia)

Tal y como se mencionó anteriormente en el capítulo 1.2.7, las funciones de distribución de probabilidades tipo Gamma describen de una mejor manera el comportamiento de las precipitaciones que las funciones normales. por esta razón, se utiliza esta función de distribución, para realizar este análisis probabilístico.

Una vez que se ajusta la precipitación a la función Gamma, se puede identificar la probabilidad para cada lámina de lluvia. Asimismo, es posible estimar la probabilidad de ocurrencia de cada rango de pronóstico de precipitación de acuerdo con la escala definida por el SMN (tabla 4.2). De esta manera, es posible asociar una probabilidad de ocurrencia a la precipitación pronosticada, en función del rango en el que se ubica.

Tabla 4.2. Clasificación de lluvias por acumulados en 24 horas (Elaboración propia con información de CONAGUA, 2017)

ACUMULADO EN 24 HORAS	CLASIFICACIÓN
0.1 - 25 mm	LLUVIAS
25 - 50 mm	LLUVIAS FUERTES
50 - 75 mm	LLUVIAS MUY FUERTES
75 - 150 mm	LLUVIAS INTENSAS
150 - 250 mm	LLUVIAS TORRENCIALES
> 250 mm	LLUVIAS EXTRAORDINARIAS

## **5. Aplicación de la metodología y casos de estudio**

### **5.1. Eventos seleccionados y recopilación de datos**

Para mostrar la relación existente entre el paso de los frentes fríos con la precipitación, se consideraron datos de precipitación diaria en el periodo de 2006 al momento de la elaboración de este trabajo, registrados en estaciones climatológicas en la región de estudio. Se seleccionaron 51 eventos de precipitación asociados al paso de frentes fríos; el análisis de este trabajo se concentra en el pronóstico de lluvias con acumulados iguales o superiores a 150 mm en 24 h, se consideraron todos los eventos posibles donde se haya presentado dicho rango de precipitación. Cabe destacar que, debido a la naturaleza del origen de estos datos, los cuales fueron proporcionados por el SMN, no se realizó ningún filtro de control de calidad de los mismos, utilizándose los mismos tal y como se obtuvieron de la base de datos.

Una vez realizada dicha selección, se procedió a realizar la descarga y depuración de los datos modelados. Finalmente se construyeron las tablas para cada una de las celdas de análisis, como se muestra en las tablas 5.1, 5.2 y 5.3 a continuación.

Tabla 5.1. Matriz de datos de la Celda 1

Evento	Fecha	Datos Modelados			Datos observados		
		R.M. Promedio Capa 850-1000 (gr/Kg)	Magnitud de Viento en Superficie (m/s)	Dirección Viento en Superficie ( ° )	Precip. Promedio Observada (mm)	Precip. Máxima Observada (mm)	Estación de registro
1	06-abr-17	17.0	1.5	1.4	175.5	402.0	Tapijulapa
2	12-nov-16	16.0	1.5	0.5	141.4	373.5	Francisco I. Madero
3	07-ene-17	15.0	3.3	1.5	156.9	332.3	El Escalón (Amatán)
4	07-ene-07	15.0	2.3	358.6	78.0	137.7	San Joaquín
5	12-dic-13	15.5	1.8	0.0	134.5	234.9	San Joaquín
6	30-ene-14	13.0	1.2	1.3	60.7	298.6	Teapa
7	29-dic-12	16.0	2.0	359.3	223.7	264.5	Tapijulapa
8	23-dic-13	16.0	1.9	358.6	215.8	264.1	Teapa
9	01-mar-11	16.0	0.1	0.8	100.0	151.1	Tapijulapa
10	19-feb-12	15.5	2.7	359.7	115.9	241.2	San Joaquín
11	01-nov-09	17.0	2.7	358.5	16.4	28.0	San Joaquín
12	01-ene-08	16.0	3.8	0.5	206.3	234.5	Teapa
13	06-ene-14	14.0	1.8	359.9	163.8	229.8	El Escalón (Amatán)
14	08-nov-13	16.0	2.0	359.0	76.7	100.9	Puyacatengo
15	10-nov-11	14.0	3.3	359.7	94.5	109.3	El Escalón (Amatán)
16	20-dic-12	14.0	3.8	0.2	131.8	186.5	El Escalón (Amatán)
17	02-nov-06	16.0	2.6	358.0	33.3	44.0	Teapa
18	01-ene-07	14.0	2.8	350.0	85.3	95.5	Tapijulapa
19	16-mar-07	12.0	4.1	358.0	24.4	64.0	Tapijulapa
20	02-nov-07	13.0	2.1	8.0	5.4	11.0	Teapa
21	19-ene-08	14.0	1.8	351.0	148.0	164.4	Teapa
22	11-mar-08	14.5	2.1	358.0	22.9	75.0	Tapijulapa
23	30-nov-08	15.0	2.9	10.0	52.6	61.3	Teapa
24	23-feb-09	12.0	2.3	356.2	14.9	31.6	Puyacatengo
25	28-mar-09	15.0	3.5	351.0	2.4	5.8	Teapa
26	03-dic-09	16.0	1.8	360.0	9.6	25.4	San Joaquín
27	25-dic-09	13.0	1.5	5.0	8.7	18.3	San Joaquín
28	12-mar-10	13.0	2.5	355.3	8.3	18.1	Puyacatengo
29	02-nov-10	16.0	2.4	10.0	27.0	51.2	Teapa
30	11-ene-11	14.0	2.4	357.0	62.4	140.6	Tapijulapa
31	10-feb-11	13.0	2.1	358.0	43.0	49.0	Tapijulapa
32	07-dic-11	12.0	2.4	10.0	59.1	72.9	Tapijulapa
33	26-ene-12	14.0	2.7	355.0	25.5	48.7	Tapijulapa
34	03-mar-12	13.0	3.0	359.0	24.4	48.9	Tapijulapa
35	13-nov-12	13.0	2.6	5.0	8.3	12.5	Tapijulapa
36	16-ene-13	13.0	3.0	350.0	130.6	230.1	Teapa
37	25-mar-13	14.0	2.5	2.0	26.6	40.0	Tapijulapa
38	02-nov-13	16.0	1.9	356.0	66.6	100.2	Tapijulapa
39	15-dic-13	14.0	3.0	355.0	135.2	192.5	Tapijulapa
40	04-mar-14	15.0	2.0	357.0	4.4	20.5	San Joaquín
41	13-nov-14	15.0	2.6	355.0	42.4	61.8	San Joaquín
42	24-dic-14	12.0	2.0	5.3	45.9	53.5	San Joaquín
43	05-feb-15	12.0	1.7	357.0	36.1	59.0	Puyacatengo
44	22-nov-15	15.0	1.7	356.9	58.2	157.6	Tapijulapa
45	18-dic-15	15.0	3.3	3.2	90.8	169.1	El Escalón (Amatán)
46	01-ene-16	15.0	1.8	354.2	85.9	171.2	Teapa
47	26-nov-16	14.0	0.8	350.1	33.6	60.3	Tapijulapa
48	09-dic-16	14.0	1.0	346.0	23.8	35.4	Puyacatengo
49	19-dic-16	13.0	1.6	348.0	18.9	33.2	Chapultenango
50	17-feb-16	14.0	1.8	2.0	18.1	41.8	Chapultenango
51	29-ene-17	11.0	1.4	7.0	70.4	110.0	Tapijulapa



Tabla 5.2. Matriz de datos de la Celda 2

Evento	Fecha	Datos Modelados			Datos observados		
		R.M. Promedio Capa 850-1000 (gr/Kg)	Magnitud de Viento en Superficie (m/s)	Dirección Viento en Superficie ( ° )	Precip. Promedio Observada (mm)	Precip. Máxima Observada (mm)	Estación de registro
1	06-abr-17	17.0	3.5	0.1	73.3	127.6	Sayula
2	12-nov-16	16.0	1.6	0.2	15.1	34.2	Sayula
3	07-ene-17	15.0	10.3	360.0	114.7	204.0	Sayula
4	07-ene-07	15.0	3.1	359.4	124.5	329.0	Sayula
5	12-dic-13	15.5	1.3	0.5	191.7	325.4	Sayula
6	30-ene-14	13.0	0.8	358.8	3.2	5.6	Sayula
7	29-dic-12	16.0	2.6	359.4	80.0	148.5	Sayula
8	23-dic-13	16.0	1.9	358.4	131.8	173.0	Sayula
9	01-mar-11	16.0	1.6	358.8	145.2	255.0	Peñitas
10	19-feb-12	15.5	3.1	358.9	80.2	93.7	Sayula
11	01-nov-09	17.0	1.5	1.2	219.5	257.9	Sayula
12	01-ene-08	16.0	7.3	0.2	92.2	122.2	Sayula
13	06-ene-14	14.0	2.4	359.6	78.4	106.3	Sayula
14	08-nov-13	16.0	2.5	358.5	160.4	274.7	Sayula
15	10-nov-11	14.0	3.0	359.8	120.2	158.5	Sayula
16	20-dic-12	14.0	3.6	359.5	41.4	64.8	Sayula
17	02-nov-06	15.0	2.9	350.0	53.9	61.7	Sayula
18	01-ene-07	13.0	4.1	355.0	101.8	123.9	Sayula
19	16-mar-07	12.0	4.4	357.0	6.7	12.0	Sayula
20	02-nov-07	13.0	2.0	358.2	6.8	13.6	Peñitas
21	19-ene-08	14.0	2.5	352.0	61.4	100.0	Sayula
22	11-mar-08	14.5	2.0	350.0	9.0	11.5	Sayula
23	30-nov-08	15.0	2.4	9.0	54.9	66.8	Sayula
24	23-feb-09	12.0	3.3	353.0	5.8	11.6	Peñitas
25	28-mar-09	15.0	2.7	349.0	0.0	0.0	
26	03-dic-09	16.0	2.5	5.0	25.3	74.2	Platanar
27	25-dic-09	13.0	1.0	6.0	7.6	13.2	Sayula
28	12-mar-10	13.0	1.8	351.0	0.2	0.4	Sayula
29	02-nov-10	16.0	2.5	5.0	52.8	79.6	Peñitas
30	11-ene-11	14.0	3.2	355.0	66.2	109.9	Sayula
31	10-feb-11	13.0	2.4	352.0	36.5	68.7	Sayula
32	07-dic-11	12.0	2.6	5.0	47.1	54.1	Peñitas
33	26-ene-12	14.0	2.6	350.0	24.1	47.2	Sayula
34	03-mar-12	13.0	2.6	356.0	2.5	5.2	Peñitas
35	13-nov-12	13.0	2.9	355.0	5.8	11.8	Sayula
36	16-ene-13	13.0	3.8	352.0	36.0	50.2	Peñitas
37	25-mar-13	14.0	3.1	357.0	10.1	13.5	Peñitas
38	02-nov-13	16.0	2.4	350.0	67.8	84.8	Sayula
39	15-dic-13	14.0	3.2	351.0	129.9	193.6	Sayula
40	04-mar-14	15.0	2.5	360.0	47.0	84.3	Sayula
41	13-nov-14	15.0	3.1	353.0	105.2	125.6	Sayula
42	24-dic-14	12.0	2.4	0.6	44.0	45.7	Sayula
43	05-feb-15	12.0	4.2	356.4	34.8	48.9	Sayula
44	22-nov-15	15.0	2.0	354.0	37.3	51.2	Sayula
45	18-dic-15	15.0	7.9	355.0	133.5	173.7	Peñitas
46	01-ene-16	15.0	2.9	351.0	91.3	106.4	Platanar
47	26-nov-16	14.0	2.5	350.6	34.2	56.9	Sayula
48	09-dic-16	14.0	4.8	346.0	17.5	50.7	Sayula
49	19-dic-16	13.0	5.1	348.0	53.8	107.5	Sayula
50	17-feb-16	14.0	4.9	359.7	48.0	82.4	Sayula
51	29-ene-17	11.0	5.9	3.0	58.1	86.5	Peñitas

Tabla 5.3. Matriz de datos de la Celda 3

Evento	Fecha	Datos Modelados			Datos observados		
		R.M. Promedio Capa 850-1000 (gr/Kg)	Magnitud de Viento en Superficie (m/s)	Dirección Viento en Superficie ( ° )	Precip. Promedio Observada (mm)	Precip. Máxima Observada (mm)	Estación de registro
1	06-abr-17	17.0	3.0	0.2	185.1	185.1	Ocotepec
2	12-nov-16	16.0	1.5	0.2	377.3	377.3	Ocotepec
3	07-ene-17	15.0	2.1	360.0	343.0	343.0	Ocotepec
4	07-ene-07	15.0	3.0	360.0	29.0	29.0	Ocotepec
5	12-dic-13	15.5	2.6	0.3	101.3	101.3	Ocotepec
6	30-ene-14	13.0	2.3	0.1	0.5	0.5	Ocotepec
7	29-dic-12	16.0	2.9	360.0	24.0	24.0	Ocotepec
8	23-dic-13	16.0	2.2	359.8	224.3	224.3	Ocotepec
9	01-mar-11	16.0	2.0	0.4	120.0	120.0	Ocotepec
10	19-feb-12	15.5	2.7	359.7	24.5	24.5	Ocotepec
11	01-nov-09	17.0	4.7	359.5	175.0	175.0	Ocotepec
12	01-ene-08	16.0	4.4	0.4	86.0	86.0	Ocotepec
13	06-ene-14	14.0	3.3	359.9	244.4	244.4	Ocotepec
14	08-nov-13	16.0	2.4	360.0	153.0	153.0	Ocotepec
15	10-nov-11	14.0	3.0	359.9	280.0	280.0	Ocotepec
16	20-dic-12	14.0	2.2	0.1	220.9	220.9	Ocotepec
17	02-nov-06	17.0	3.4	1.2	87.5	87.5	Ocotepec
18	01-ene-07	15.0	3.2	359.0	150.5	150.5	Ocotepec
19	16-mar-07	12.0	5.0	359.0	9.3	9.3	Ocotepec
20	02-nov-07	13.0	3.6	5.8	0.0	0.0	Ocotepec
21	19-ene-08	14.0	1.6	354.6	129.0	129.0	Ocotepec
22	11-mar-08	14.5	3.7	6.0	62.0	62.0	Ocotepec
23	30-nov-08	15.0	2.2	8.0	0.0	0.0	Ocotepec
24	23-feb-09	12.0	3.7	358.7	0.0	0.0	Ocotepec
25	28-mar-09	15.0	3.1	359.4	0.0	0.0	Ocotepec
26	03-dic-09	16.0	2.7	8.0	0.0	0.0	Ocotepec
27	25-dic-09	13.0	2.6	2.0	0.0	0.0	Ocotepec
28	12-mar-10	13.0	4.7	3.0	0.0	0.0	Ocotepec
29	02-nov-10	16.0	2.2	357.0	0.0	0.0	Ocotepec
30	11-ene-11	14.0	2.6	2.0	20.0	20.0	Ocotepec
31	10-feb-11	13.0	3.2	1.2	66.6	66.6	Ocotepec
32	07-dic-11	12.0	2.8	3.0	43.5	43.5	Ocotepec
33	26-ene-12	14.0	2.8	359.0	100.0	100.0	Ocotepec
34	03-mar-12	13.0	1.7	4.0	90.3	90.3	Ocotepec
35	13-nov-12	13.0	2.5	359.0	1.9	1.9	Ocotepec
36	16-ene-13	13.0	3.2	354.8	128.0	128.0	Ocotepec
37	25-mar-13	14.0	2.8	359.0	9.1	9.1	Ocotepec
38	02-nov-13	16.0	2.3	356.0	113.5	113.5	Ocotepec
39	15-dic-13	14.0	2.9	357.6	200.5	200.5	Ocotepec
40	04-mar-14	15.0	2.1	359.8	0.0	0.0	Ocotepec
41	13-nov-14	15.0	2.6	358.0	108.9	108.9	Ocotepec
42	24-dic-14	12.0	3.4	5.0	51.3	51.3	Ocotepec
43	05-feb-15	12.0	2.4	2.1	94.1	94.1	Ocotepec
44	22-nov-15	15.0	2.5	5.3	248.8	248.8	Ocotepec
45	18-dic-15	15.0	1.9	3.8	278.5	278.5	Ocotepec
46	01-ene-16	15.0	2.8	5.7	46.8	46.8	Ocotepec
47	26-nov-16	14.0	2.4	5.0	42.2	42.2	Ocotepec
48	09-dic-16	14.0	1.8	3.0	9.1	9.1	Ocotepec
49	19-dic-16	13.0	3.5	2.0	61.8	61.8	Ocotepec
50	17-feb-16	14.0	3.1	5.6	32.3	32.3	Ocotepec
51	29-ene-17	11.0	3.3	7.0	20.7	20.7	Ocotepec

## 5.2. Gráficas de dispersión y coeficiente correlación

Para encontrar el grado de correlación entre las variables modeladas como son la razón de mezcla y el viento, con la variable observada que es la precipitación, primero de manera simple y posteriormente de manera múltiple, se depuraron y organizaron todos los datos, procediendo posteriormente al análisis estadístico para cada celda.

Se generaron los diagramas de dispersión y, de acuerdo con la metodología mostrada en el capítulo 1.2.6, para cada análisis se obtuvo el coeficiente de correlación de Pearson con base en las ecuaciones mostradas en dicho capítulo. En la tabla 5.4 se presenta un resumen de los diferentes valores de coeficientes de correlación obtenidos en cada caso, mientras que en las figuras 5.1, 5.2, y 5.3, con sus correspondientes incisos, se muestran cada uno de los diagramas de dispersión.

Tabla 5.4. Coeficientes de correlación por celda de análisis

Variables correlacionadas*	Valores de coeficiente de correlación de Pearson		
	Celda 1	Celda 2	Celda 3
RMM-PPO	0.384	0.526	0.332
RMM-PMO	0.376	0.518	0.332
UM-PPO	0.061	0.123	-0.255
UM-PMO	-0.053	0.131	-0.255
RMM-UM-PPO	0.391	0.555	0.387
RMM-UM-PMO	0.378	0.549	0.387

\*Estas siglas son con base en lo mostrado en el capítulo 4.3

### CELDA 1

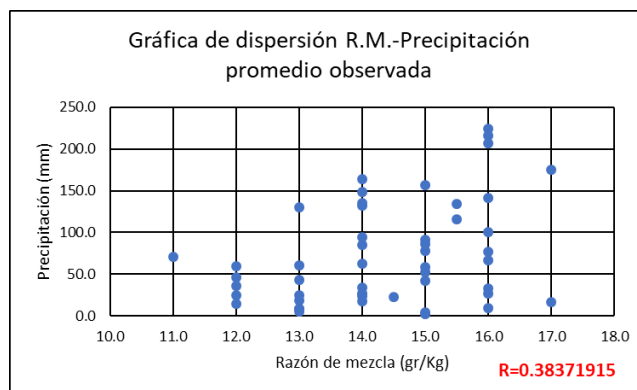


Figura 5.1a. Diagrama de dispersión simple y Coeficiente de correlación, Razón de Mezcla y Precipitación Promedio Observada de Celda 1

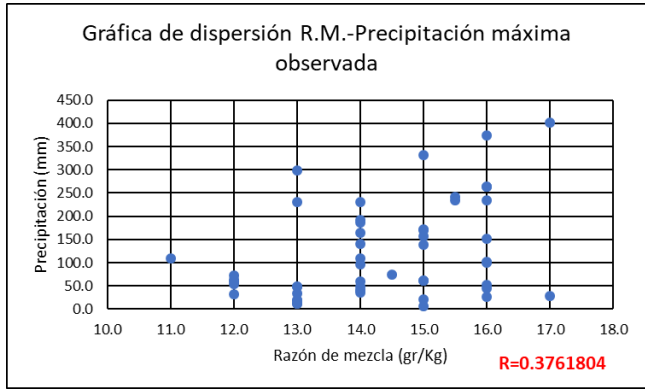


Figura 5.1b. Diagrama de dispersión simple y Coeficiente de correlación, Razón de Mezcla y Precipitación Máxima Observada de Celda 1

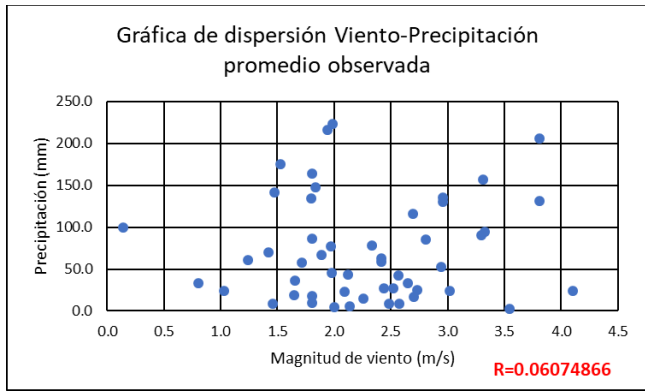


Figura 5.1c. Diagrama de dispersión simple y Coeficiente de correlación, Viento y Precipitación Promedio Observada de Celda 1

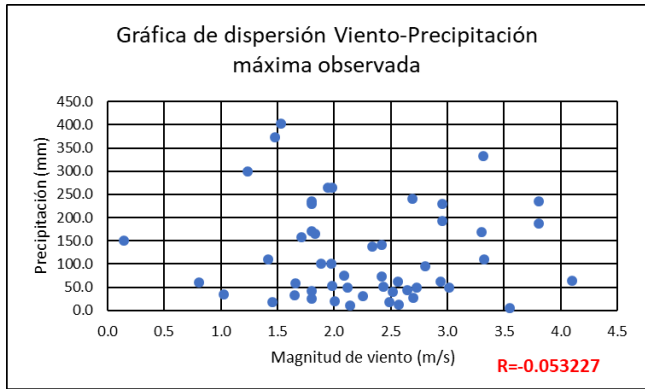


Figura 5.1d. Diagrama de dispersión simple y Coeficiente de correlación, Viento y Precipitación Máxima Observada de Celda 1

GRÁFICA DE DISPERSIÓN R.M., VIENTO, PRECIP. MED. OBS.

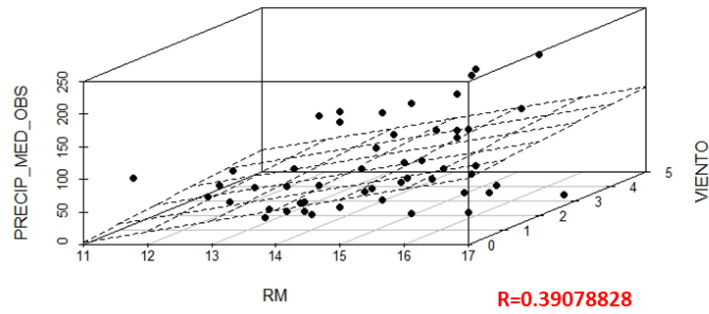


Figura 5.1e. Diagrama de dispersión múltiple y Coeficiente de correlación, Razón de Mezcla, Viento y Precipitación Media Observada de Celda 1

GRÁFICA DE DISPERSIÓN R.M., VIENTO, PRECIP. MÁX. OBS.

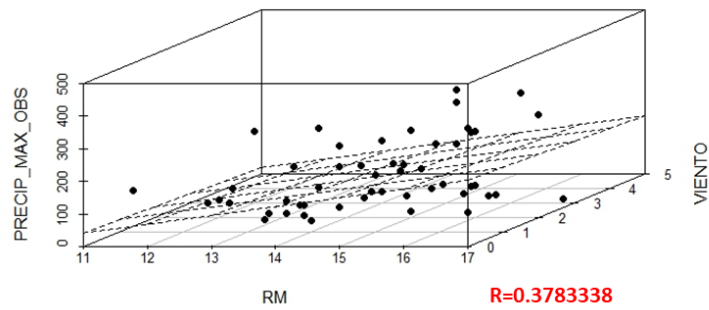


Figura 5.1f. Diagrama de dispersión múltiple y Coeficiente de correlación, Razón de Mezcla, Viento y Precipitación Máxima Observada de Celda 1

## CELDA 2

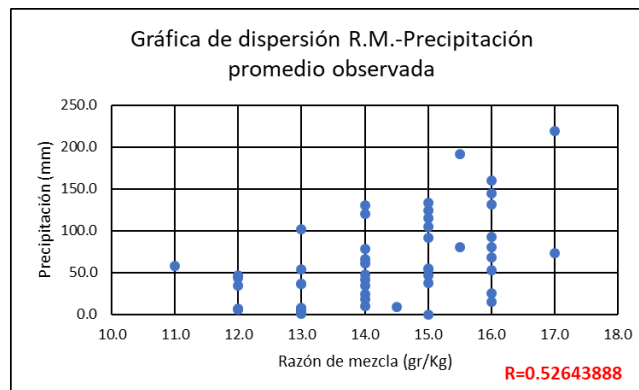


Figura 5.2a. Diagrama de dispersión simple y Coeficiente de correlación, Razón de Mezcla y Precipitación Promedio Observada de Celda 2

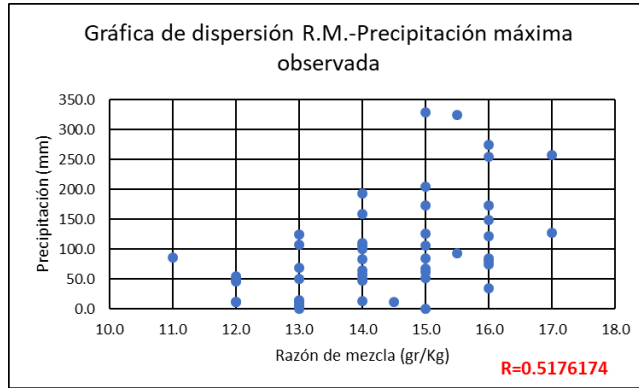


Figura 5.2b. Diagrama de dispersión simple y Coeficiente de correlación, Razón de Mezcla y Precipitación Máxima Observada de Celda 2

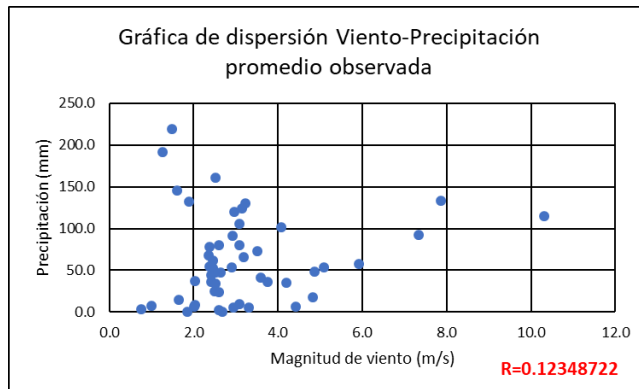


Figura 5.2c. Diagrama de dispersión simple y Coeficiente de correlación, Viento y Precipitación Promedio Observada de Celda 2

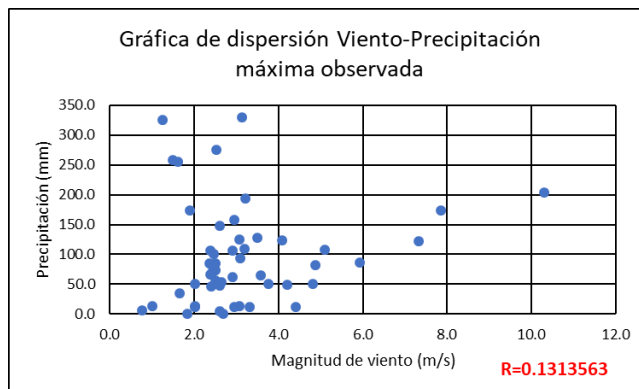


Figura 5.2d. Diagrama de dispersión simple y Coeficiente de correlación, Viento y Precipitación Máxima Observada de Celda 2

GRÁFICA DE DISPERSIÓN R.M., VIENTO, PRECIP. MED. OBS.

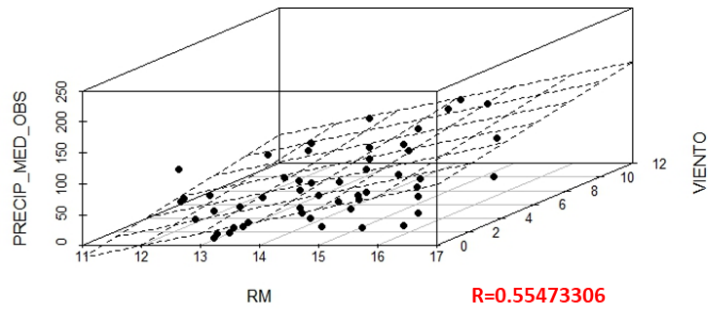


Figura 5.2e. Diagrama de dispersión múltiple y Coeficiente de correlación, Razón de Mezcla., Viento y Precipitación Media Observada de Celda 2

GRÁFICA DE DISPERSIÓN R.M., VIENTO, PRECIP. MÁX. OBS.

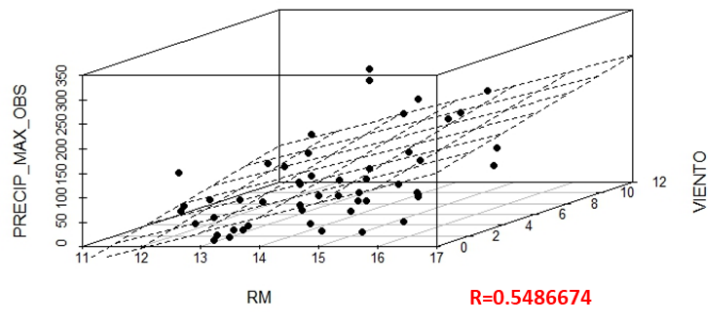


Figura 5.2f. Diagrama de dispersión múltiple y Coeficiente de correlación, Razón de Mezcla, Viento y Precipitación Máxima Observada de Celda 2

### CELDA 3

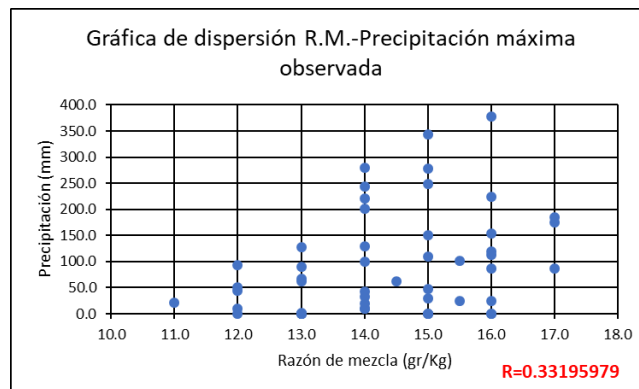


Figura 5.3a. Diagrama de dispersión simple y Coeficiente de correlación, Razón de Mezcla y Precipitación Máxima Observada de Celda 3

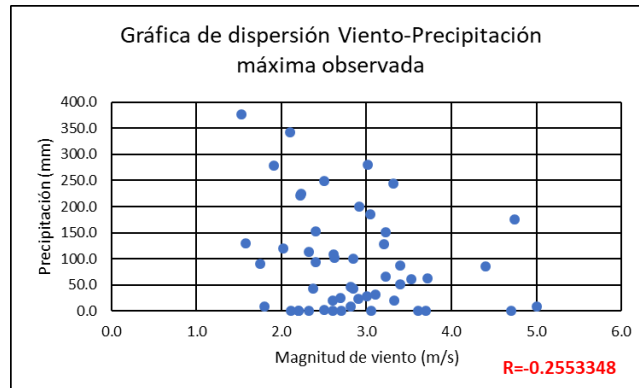


Figura 5.3b. Diagrama de dispersión simple y Coeficiente de correlación, Viento y Precipitación Máxima Observada de Celda 3

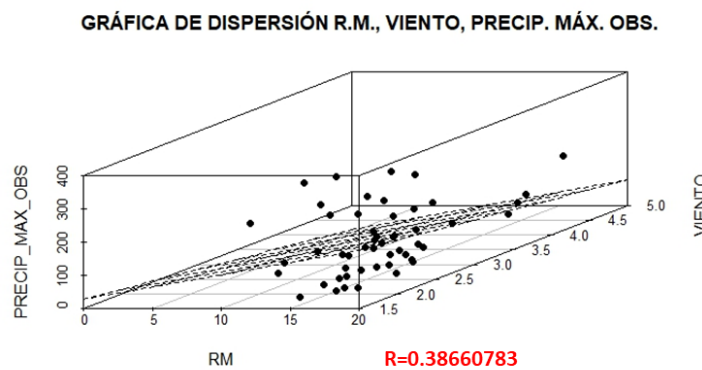


Figura 5.3c. Diagrama de dispersión múltiple y Coeficiente de correlación, Razón de Mezcla, Viento y Precipitación Máxima Observada de Celda 3

### 5.3. Análisis de frecuencias

Para complementar el análisis y tratando de explicar los resultados mostrados por las correlaciones tanto simple como conjunta, y considerando que se cuenta con un número de casos de estudio relevante, se realizó un análisis probabilístico.

Se generaron histogramas de frecuencia para cada uno de los diversos datos de precipitación en cada celda de análisis, seguido de realizar un ajuste de distribución gamma. Una vez llevado a cabo lo anterior, tomando en consideración los rangos de pronóstico de precipitación en 24 h utilizados por el SMN (ver tabla 4.2), se obtuvo la probabilidad de ocurrencia de cada uno de esos rangos dentro de cada función de distribución. Los resultados pueden observarse en la tabla 5.5, donde se presentan los diferentes valores de probabilidad de ocurrencia para cada rango de pronóstico en las diferentes celdas de análisis, mientras que en las figuras 5.4, 5.5 y 5.6 con sus correspondientes incisos, se muestran los histogramas con las funciones de distribución Gamma elaborados para cada caso.



Tabla 5.5. Probabilidad de ocurrencia por rango de pronóstico y celda de análisis

Rangos de pronóstico	Valores de probabilidad					
	Celda 1		Celda 2		Celda 3	
	Precipitación media observada	Precipitación máxima observada	Precipitación media observada	Precipitación máxima observada	Precipitación media observada	Precipitación máxima observada
0.1-5 mm	3.2%	1.6%	3.7%	2.4%	6.1%	6.2%
5.1-25 mm	19.6%	10.6%	22.5%	14.5%	18.9%	18.8%
25.1-50 mm	23.2%	15.0%	25.3%	18.4%	17.4%	17.4%
50.1-75 mm	17.5%	13.9%	17.8%	15.6%	13.0%	13.0%
75.1-150 mm	26.2%	29.7%	23.7%	29.0%	23.4%	23.4%
150.1-250 mm	8.5%	18.6%	6.0%	14.4%	12.9%	12.9%
>250 mm	1.8%	10.6%	1.0%	5.7%	8.3%	8.3%

### CELDA 1

#### Histograma y función de distribución gamma

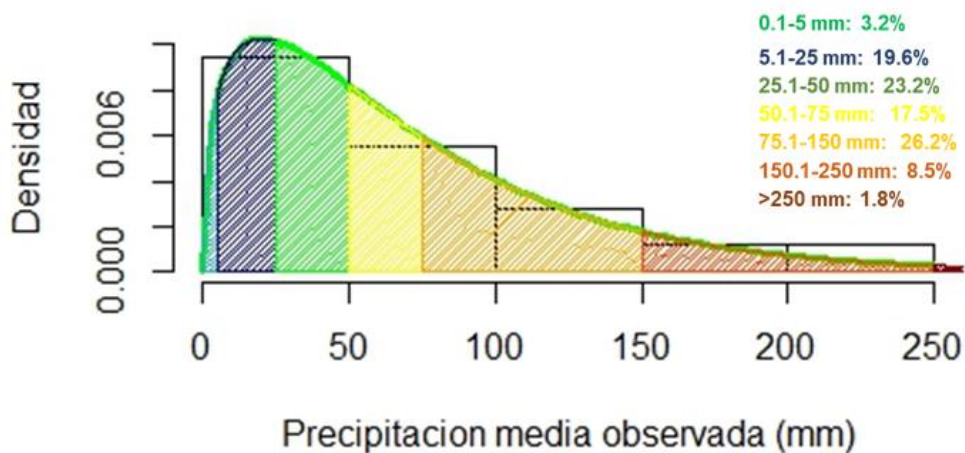


Figura 5.4a. Rangos de probabilidad para la Precipitación Media Observada de Celda 1

## Histograma y función de distribución gamma

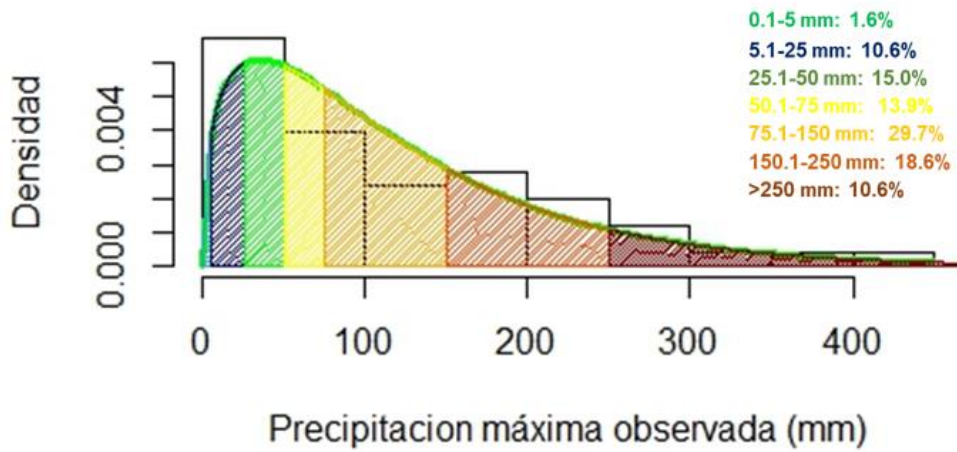


Figura 5.4b. Rangos de probabilidad para la Precipitación Máxima Observada de Celda 1

## CELDA 2

## Histograma y función de distribución gamma

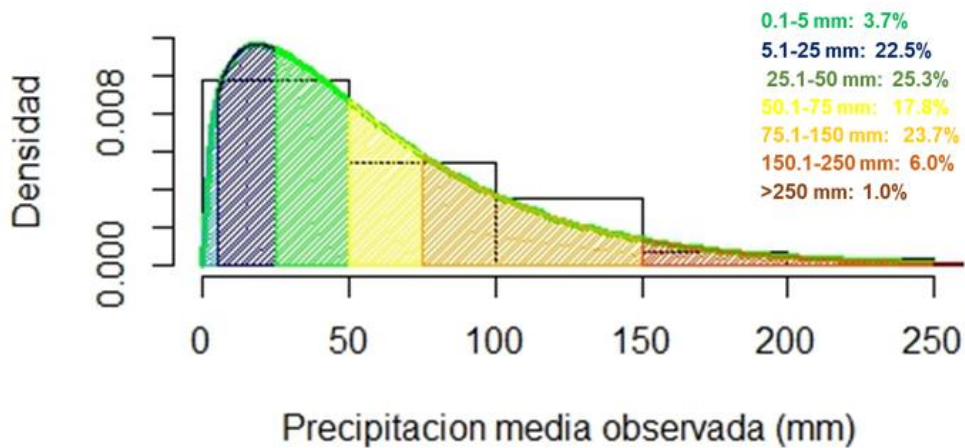


Figura 5.5a. Rangos de probabilidad para la Precipitación Media Observada de Celda 2

## Histograma y función de distribución gamma

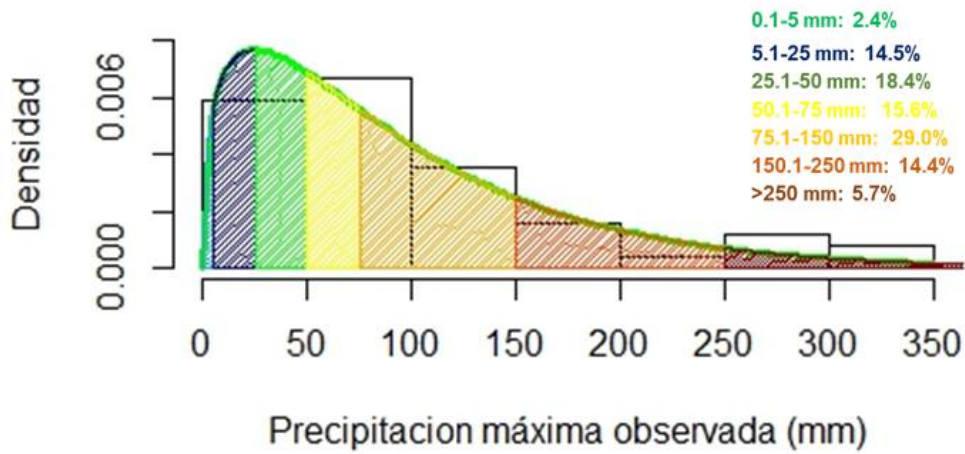


Figura 5.5b. Rangos de probabilidad para la Precipitación Máxima Observada de Celda 2

### CELDA 3

## Histograma y función de distribución gamma

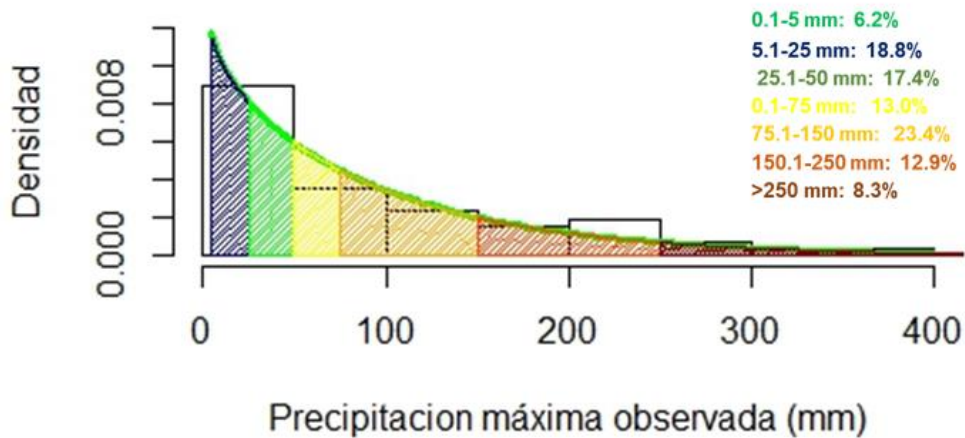


Figura 5.6. Rangos de probabilidad para la Precipitación Máxima Observada de Celda 3

#### 5.4. Unificación de la región de estudio

Con el fin de complementar el análisis, se realizó una consideración adicional de los datos unificados en una sola región de estudio, sin llevar a cabo una división de celdas. La matriz obtenida es la siguiente (tabla 5.6):

**Tabla 5.6. Matriz de datos de región de estudio unificada**

Evento	Fecha	Datos Modelados			Datos observados		
		R.M. Promedio Capa 850-1000 (gr/Kg)	Magnitud de Viento en Superficie (m/s)	Dirección Viento en Superficie ( ° )	Precip. Promedio Observada (mm)	Precip. Máxima Observada (mm)	Estación de registro
1	06-abr-17	17.0	2.7	0.1	145.8	402.0	Tapijulapa
2	12-nov-16	16.0	1.6	0.2	128.4	377.3	Ocoteppec
3	07-ene-17	15.0	5.2	360.0	162.3	343.0	Ocoteppec
4	07-ene-07	15.0	2.8	360.0	90.9	329.0	Sayula
5	12-dic-13	15.5	1.9	0.0	149.8	325.4	Sayula
6	30-ene-14	13.0	1.4	0.1	38.8	298.6	Teapa
7	29-dic-12	16.0	2.5	360.0	153.6	264.5	Tapijulapa
8	23-dic-13	16.0	2.0	359.8	195.9	264.1	Teapa
9	01-mar-11	16.0	1.3	358.8	119.4	255.0	Peñitas
10	19-feb-12	15.5	2.8	359.7	95.6	241.2	San Joaquín
11	01-nov-09	17.0	3.0	359.5	112.4	257.9	Sayula
12	01-ene-08	16.0	5.2	0.2	148.5	234.5	Teapa
13	06-ene-14	14.0	2.5	359.9	152.5	229.8	El Escalón (Amatán)
14	08-nov-13	16.0	2.3	360.0	113.1	274.7	Sayula
15	10-nov-11	14.0	3.1	359.9	123.7	280.0	Ocoteppec
16	20-dic-12	14.0	3.2	0.1	111.6	220.9	Ocoteppec
17	02-nov-06	16.0	3.0	358.0	47.8	87.5	Ocoteppec
18	01-ene-07	14.0	3.4	359.0	101.7	150.5	Ocoteppec
19	16-mar-07	12.0	4.5	359.0	15.9	64.0	Tapijulapa
20	02-nov-07	13.0	2.6	358.2	4.1	13.6	Peñitas
21	19-ene-08	14.0	2.0	354.6	113.2	164.4	Teapa
22	11-mar-08	14.5	2.6	358.0	22.6	75.0	Tapijulapa
23	30-nov-08	15.0	2.5	8.0	46.9	66.8	Sayula
24	23-feb-09	12.0	3.1	358.7	10.2	31.6	Puyacatengo
25	28-mar-09	15.0	3.1	359.4	1.0	5.8	Teapa
26	03-dic-09	16.0	2.3	360.0	14.3	74.2	Platanar
27	25-dic-09	13.0	1.7	2.0	7.2	18.3	San Joaquín
28	12-mar-10	13.0	3.0	355.3	4.2	18.1	Puyacatengo
29	02-nov-10	16.0	2.4	357.0	33.3	79.6	Peñitas
30	11-ene-11	14.0	2.7	2.0	58.5	140.6	Tapijulapa
31	10-feb-11	13.0	2.6	358.0	43.4	68.7	Sayula
32	07-dic-11	12.0	2.6	3.0	53.4	72.9	Tapijulapa
33	26-ene-12	14.0	2.7	359.0	34.4	100.0	Ocoteppec
34	03-mar-12	13.0	2.5	359.0	24.4	90.3	Ocoteppec
35	13-nov-12	13.0	2.7	359.0	6.3	12.5	Tapijulapa
36	16-ene-13	13.0	3.3	354.8	106.6	230.1	Teapa
37	25-mar-13	14.0	2.8	359.0	18.2	40.0	Tapijulapa
38	02-nov-13	16.0	2.2	356.0	72.2	113.5	Ocoteppec
39	15-dic-13	14.0	3.0	357.6	140.7	200.5	Ocoteppec
40	04-mar-14	15.0	2.2	360.0	14.5	84.3	Sayula
41	13-nov-14	15.0	2.8	358.0	66.4	125.6	Sayula
42	24-dic-14	12.0	2.6	0.6	46.1	53.5	San Joaquín
43	05-feb-15	12.0	2.8	357.0	43.0	94.1	Ocoteppec
44	22-nov-15	15.0	2.1	356.9	69.8	248.8	Ocoteppec
45	18-dic-15	15.0	4.4	3.2	119.5	278.5	Ocoteppec
46	01-ene-16	15.0	2.5	354.2	83.9	171.2	Teapa
47	26-nov-16	14.0	1.9	350.1	34.5	60.3	Tapijulapa
48	09-dic-16	14.0	2.5	346.0	20.8	50.7	Sayula
49	19-dic-16	13.0	3.4	2.0	32.3	107.5	Sayula
50	17-feb-16	14.0	3.3	359.7	27.5	82.4	Sayula
51	29-ene-17	11.0	3.6	3.0	61.7	110.0	Tapijulapa

Como puede observarse en dicha tabla, los datos son muy similares a los mostrados en las matrices de celdas. A continuación, tal y como se realizó en cada uno de los análisis por celdas, se procedió a realizar generar los diagramas de dispersión, obteniendo los coeficientes de correlación de Pearson; la figura 5.7 en todos sus incisos muestra los resultados de dichos diagramas, así como los valores de los coeficientes de correlación para cada caso.

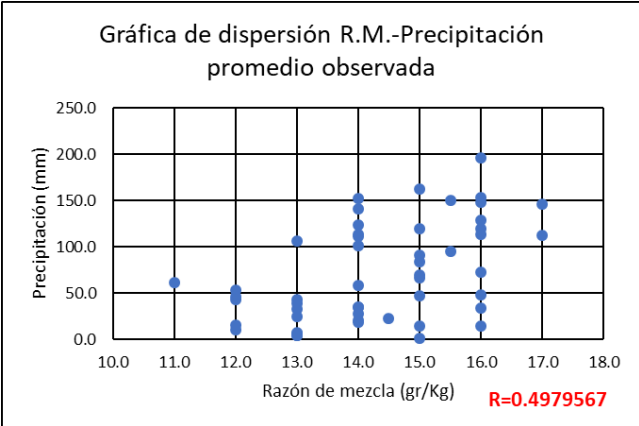


Figura 5.7a. Diagrama de dispersión simple y Coeficiente de correlación, Razón de Mezcla y Precipitación Promedio Observada para región unificada

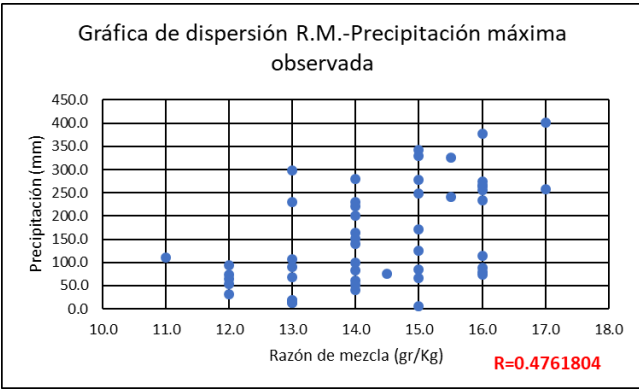


Figura 5.7b. Diagrama de dispersión simple y Coeficiente de correlación, Razón de Mezcla y Precipitación Máxima Observada para región unificada

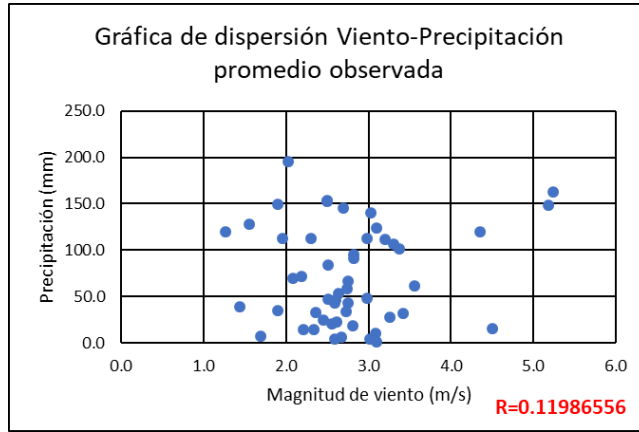


Figura 5.7c. Diagrama de dispersión simple y Coeficiente de correlación, Viento y Precipitación Promedio Observada para región unificada

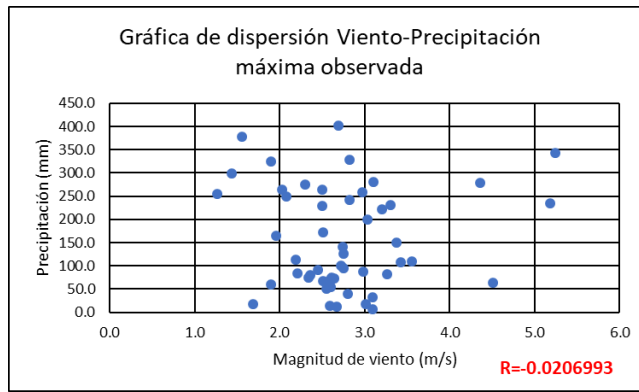


Figura 5.7d. Diagrama de dispersión simple y Coeficiente de correlación, Viento y Precipitación Máxima Observada para región unificada

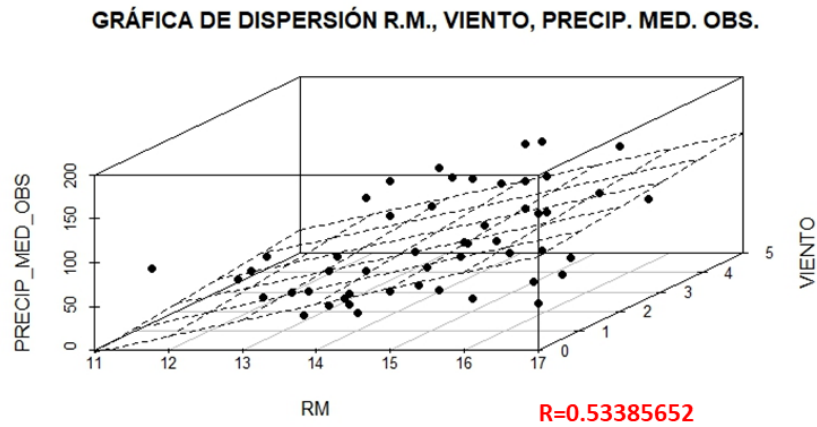


Figura 5.7e. Diagrama de dispersión múltiple y Coeficiente de correlación, Razón de Mezcla, Viento y Precipitación Media Observada para región unificada

GRÁFICA DE DISPERSIÓN R.M., VIENTO, PRECIP. MÁX. OBS.

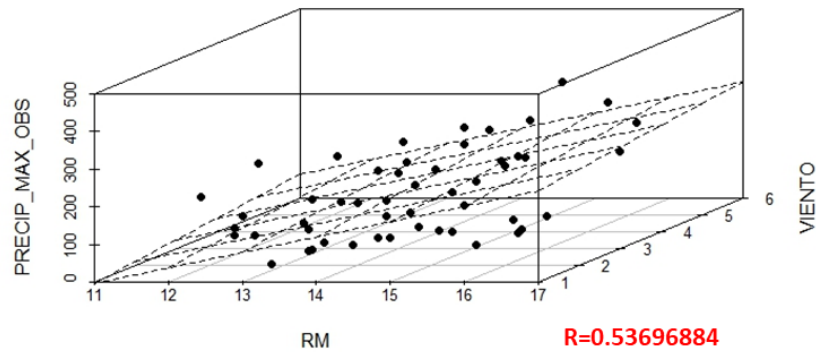


Figura 5.7f. Diagrama de dispersión múltiple y Coeficiente de correlación, Razón de Mezcla, Viento y Precipitación Máxima Observada para región unificada

A continuación, se presenta la tabla 5.7 con los valores de los coeficientes de correlación obtenidos en el análisis de la región de estudio unificada.

Tabla 5.7. Coeficientes de correlación de análisis para región de estudio unificada

Variables correlacionadas*	Valores de coeficiente de correlación de Pearson
RMM-PPO	0.4979567
RMM-PMO	0.4761804
UM-PPO	0.1198656
UM-PMO	0.0206993
RMM-UM-PPO	0.5338566
RMM-UM-PMO	0.5369689

\*Estas siglas son con base en lo mostrado en el capítulo 4.3

Finalmente, al igual que en la división de la región en celdas, como parte del análisis probabilístico, se procedió a generar los histogramas de frecuencia correspondientes, así como el ajuste de distribución gamma. De igual manera, se consideraron los rangos de pronóstico de precipitación en 24 h (ver tabla 3.2) para obtener los valores de probabilidad de ocurrencia para cada rango establecido. Los resultados se muestran en las figuras 4.2a y 4.2b.



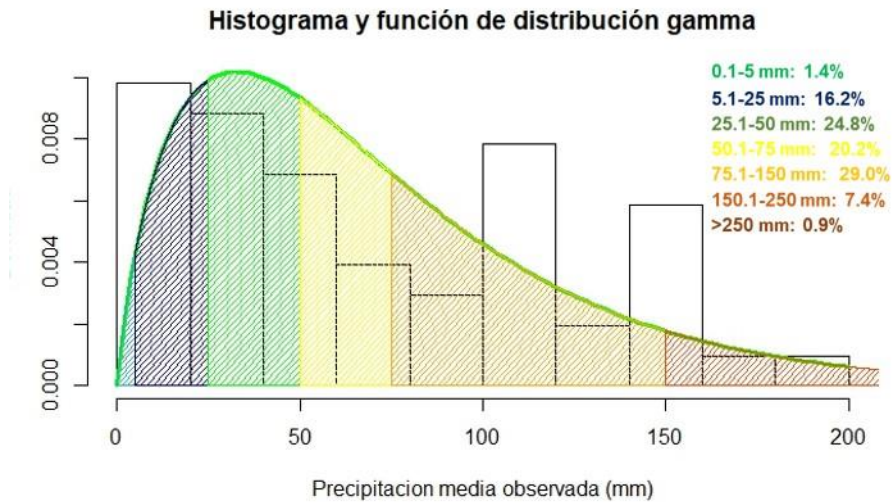


Figura 5.5a. Rangos de probabilidad para la Precipitación Media Observada para región unificada

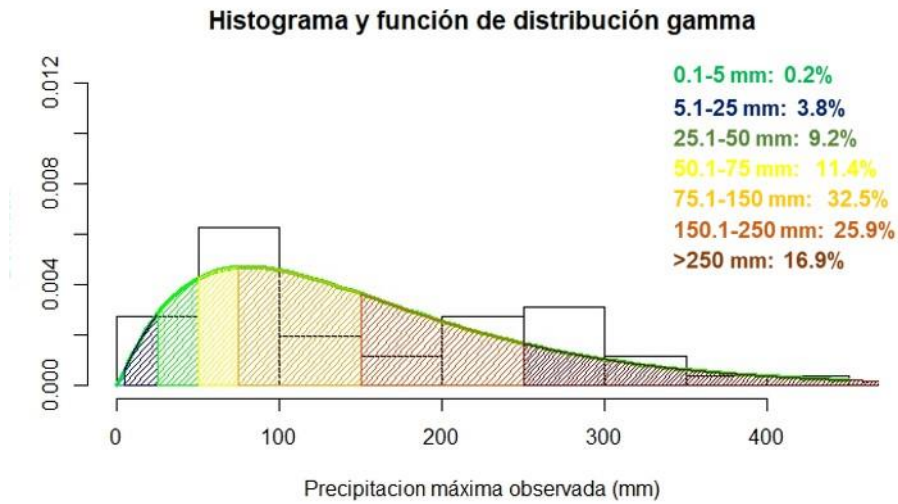


Figura 5.5b. Rangos de probabilidad para la Precipitación Máxima Observada para región unificada

De lo anterior, la tabla 5.8 muestra el resumen de los valores de probabilidad para este caso.



**Tabla 5.8. Probabilidad de ocurrencia por rango de pronóstico para región unificada**

Rangos de pronóstico	Valores de probabilidad	
	Precipitación media observada	Precipitación máxima observada
<b>0.1-5 mm</b>	1.4%	0.2%
<b>5.1-25 mm</b>	16.2%	3.8%
<b>25.1-50 mm</b>	24.8%	9.2%
<b>50.1-75 mm</b>	20.2%	11.4%
<b>75.1-150 mm</b>	29.0%	32.5%
<b>150.1-250 mm</b>	7.4%	25.9%
<b>&gt;250 mm</b>	0.9%	16.9%

## 6. Análisis de resultados

El análisis estadístico se desarrolló en dos etapas: la primera apoyada en el análisis de regresión y la obtención de coeficientes de correlación, con el fin de hallar un grado de asociación significativo entre las variables modeladas y la ocurrencia de valores de precipitación, tal que permitiera determinar de manera objetiva la veracidad o ineficiencia del método empírico, hasta ahora llevado a cabo en el CHMRTG. La segunda surge con el fin de complementar la primera etapa, al implementar un análisis probabilístico para que, ya sea que los valores de los coeficientes de correlación hayan sido o no significativos para caracterizar el fenómeno, se ofrezca una herramienta que permita clasificar los rangos de pronóstico de precipitación con base en valores de probabilidad obtenidos a partir de un análisis de frecuencias, esto reforzará el criterio del meteorólogo operativo en el momento de emitir un pronóstico cuantitativo de precipitación. A continuación, se presenta el análisis de los resultados obtenidos.

### 6.1. Interpretación de los diagramas de dispersión y coeficientes de correlación

Este trabajo surge a partir de la realización de una metodología empírica por parte de los meteorólogos de CHMRTG. De acuerdo con lo mencionado en el capítulo 3, existe la percepción de que, ante la ocurrencia de un frente frío, cuando el modelo de pronóstico estima valores de mezcla de 13 gr/kg o mayores, además de vientos del norte impactando sobre la región de estudio, puede presentarse un acumulado significativo de precipitación.

De acuerdo con los diagramas mostrados en las figuras 5.1a, 5.1b, 5.2a, 5.2b y 5.3a, a pesar de que se distingue una tendencia donde el acumulado de precipitación es mayor conforme aumentan los valores de razón de mezcla, es difícil establecer un grado de asociación representativo, debido a que, para varios eventos con diferentes valores de lluvia, puede presentarse el mismo valor de razón de mezcla. Los valores de los coeficientes de correlación de estas variables, para el caso de las celdas 1 y 3, van de 0.33 a 0.38; para el caso de la celda 3, los valores son de hasta 0.52. El grado de asociación entre las variables es poco significativo, por lo que se propone complementarse con un análisis probabilístico que pueda ofrecer otra herramienta de análisis en el pronóstico de precipitación.

Al analizar los diagramas contenidos en las figuras 5.1c, 5.1d, 5.2c, 5.2d y 5.3b, donde se correlacionan el viento modelado con los valores de precipitación tanto media como máxima observadas, puede observarse que la dispersión de los datos es aún mayor que el caso de la razón de mezcla, alcanzando coeficientes con valores de hasta 0.13 de correlación positiva y de -0.25 de correlación negativa, por lo que es evidente que, al igual que en los análisis de regresión simples, siempre será necesario complementar este método con otras herramientas de análisis.

Finalmente se analizaron los diagramas múltiples tridimensionales contenidos en las figuras 5.1e, 5.1f, 5.2e, 5.2f y 5.3c, donde se correlacionan las tres variables en cuestión, siendo la precipitación tanto media como máxima observadas. Esta parte es importante, debido a que la metodología empírica utilizada en el CHMRTG se desarrolla utilizando las tres variables. Aquí puede observarse un caso similar a la de la razón de mezcla con lluvia, ya que se presenta una aparente correlación positiva en aumento, llegando a ser más evidente para la celda 2. Sin embargo, al igual que en casos anteriores, los valores de los coeficientes de correlación que se presentan van de 0.38 a 0.56.

Ahora bien, al realizar estos mismos análisis sobre la región de estudio de manera unificada, tal y como se realiza en la práctica en el CHMRTG. Con base en los resultados obtenidos de los diferentes incisos de la figura 5.7, así como la tabla 5.7, se puede observar una mejoría en el valor de los coeficientes de correlación tanto de la relación entre la razón de mezcla modelada con la precipitación observada, alcanzando un valor de hasta 0.497, además del valor de hasta 0.536 en el caso del análisis de correlación entre la razón de mezcla modelada, viento y precipitación observada. Sin embargo, en los casos donde se correlacionó únicamente el viento con la precipitación observada, los valores continúan siendo muy poco significativos. Teniendo en consideración la necesidad de emitir pronósticos de precipitación más eficientes, aunque se presentó una mejoría en los valores de los coeficientes de correlación, sobre todo en el análisis múltiple, se opta por complementar con un análisis probabilístico, toda vez que estos valores no son suficientes para generar un modelo de regresión que se considere eficiente.

## 6.2. Interpretación de los análisis de frecuencias y su aplicación

La selección de 51 eventos permitió contar con una muestra suficientemente representativa de la ocurrencia de estos fenómenos; las tablas 5.1, 5.2 y 5.3 muestran claramente los valores en la dirección del vientos; las rosas de los vientos construidas a partir de esos valores y contenidas en las figura 6.1, muestran que en la totalidad de los casos el mayor porcentaje de eventos tuvo una componente visiblemente del norte, con un pequeño porcentaje oscilando entre el nor-noroeste y el nor-noreste.

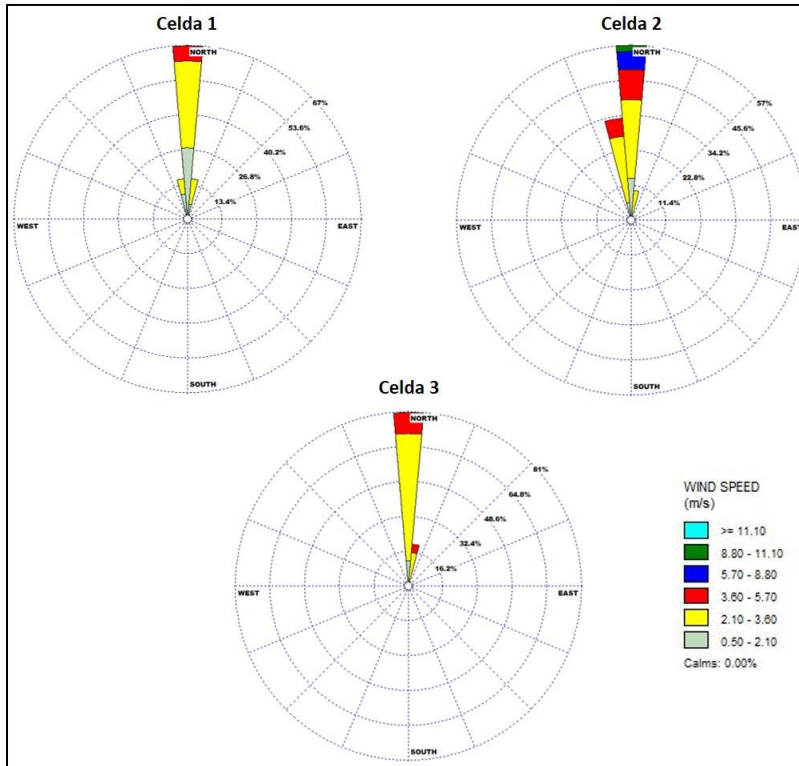


Figura 6.1. Rosas de los vientos de cada una de las celdas de análisis (Elaboración propia)

Por otra parte, en cuanto a los valores de razón de mezcla, también de las tablas 5.1, 5.2 y 5.3, puede observarse que, para las tres celdas, en los 51 eventos los valores oscilaron entre los 11 gr/kg y los 17 gr/kg, destacando que solamente en seis eventos se presentaron valores por debajo de los 13 gr/kg, de los cuales cinco son de 12 gr/kg y solo uno es de 11 gr/kg.

De los dos párrafos anteriores, puede entonces tomarse una consideración fija de eventos de precipitación ante el paso de frentes fríos con vientos del norte y una razón de mezcla de 13 gr/kg o mayor. Con esta condicionante, se construyeron los histogramas descritos en las figuras 5.4, 5.5 y 5.6 (con sus respectivos incisos), los cuales se ajustaron a una función de distribución gamma.

Dentro de la meteorología operativa, se necesario pronosticar valores acumulados de precipitación en cierto periodo de tiempo, siendo el más común de 24 horas; la figura 4.2 mostró la clasificación de rangos de pronóstico manejada por el SMN, la cual se utilizó para este trabajo incrustándola en las diferentes funciones distribución en cada celda, tanto de precipitación media como máxima observada y, de esta manera obtener la probabilidad de ocurrencia para cada caso.

Lo anterior puede interpretarse de la manera siguiente: por ejemplo, para el caso de la celda 1, la probabilidad de ocurrencia mostrados en las figuras 5.4a y 5.4b, así

como en la tabla 5.5 del capítulo 5, fueron los que se muestran a continuación en la tabla 6.1:

**Tabla 6.1. Probabilidad de ocurrencia de valores de precipitación en la celda 1, (extraído de la tabla 5.5)**

<b>Pronóstico</b>	<b>Celda 1</b>	
	<b>Precipitación Media Observada</b>	<b>Precipitación Máxima Observada</b>
<b>0.1-5 mm</b>	3.2%	1.6%
<b>5.1-25 mm</b>	19.6%	10.6%
<b>25.1-50 mm</b>	23.2%	15.0%
<b>50.1-75 mm</b>	17.5%	13.9%
<b>75.1-150 mm</b>	26.2%	29.7%
<b>150.1-250 mm</b>	8.5%	18.6%
<b>&gt;250 mm</b>	1.8%	10.6%

De lo anterior, en términos de la meteorología operativa aplicada, puede decirse que ante el paso de un frente frío sobre la región de estudio, con una razón de mezcla igual o superior a 13 gr/kg y con vientos de componente norte, existe una probabilidad del 36.4% de que se presente un acumulado de precipitación promedio de 75 mm o superior, pero una probabilidad del 58.9% de que, al menos en una de las estaciones de esa celda se presente una lluvia puntual en ese mismo rango. Esto representa una lógica común, ya que los valores altos de precipitación no siempre deben ocurrir de forma generalizada, en muchos casos solo se tratará de algún punto o estación donde se presenten estos acumulados.

De igual manera, para el caso de la región de estudio unificada, se analizaron los histogramas generados y mostrados en las figuras 5.5a y 5.5b, así como la tabla 5.8., considerando la misma condicionante de que al presentarse una razón de mezcla de al menos 13 gr/kg, con viento de componente norte, existe la probabilidad del 37.3% de que pueda presentarse una precipitación promedio en la zona de al menos en el rango de 75-150 mm, mientras que también existiría una probabilidad de 69.8% de que se presente algún valor máximo en ese rango de pronóstico. Sin embargo, debe destacarse que, como puede observarse en estos histogramas, el ajuste de distribución no es tan representativo, como lo es en los histogramas generados por celdas, por lo que el uso de estos valores de probabilidad para cuando se evalúa la región de estudio de manera unificada, deberá ser con un criterio más reservado ante la menor representatividad de la función de distribución.

## 7. Conclusiones

Se realizaron dos tipos de análisis estadísticos: en primer lugar, se buscó llevar a cabo un análisis determinístico en favor de encontrar un modelo de regresión a partir de diagramas de dispersión y con el cálculo de coeficientes de correlación; en segundo lugar, se realizó un análisis probabilístico, mediante análisis de frecuencias obteniendo valores de probabilidad de ocurrencia para algunos rangos de pronóstico de precipitación.

Parte del objetivo marcado, consiste en analizar objetivamente la relación entre las variables involucradas y así recomendar el uso o desestimación del método empírico desarrollado operativamente por los meteorólogos del CHMRTG, cuando se busca pronosticar los rangos de precipitación ante la inminente afectación por parte de un frente frío en la región de estudio. Para esta parte, se efectuó el análisis de regresión y se obtuvieron los coeficientes de correlación entre las variables, donde, de ser correcta esta metodología, deberían haberse obtenido valores de correlación relativamente altos, lo que daría pie al desarrollo de un modelo de regresión que sirviera como una buena herramienta en el análisis para el pronóstico de estos fenómenos. Sin embargo, los valores obtenidos no fueron lo suficientemente significativos, para definir un modelo de regresión que favorezca o proporcione una herramienta de pronóstico de precipitación confiable, en términos de la meteorología operativa.

Para generar una herramienta que ayude en el análisis meteorológico para el pronóstico de lluvias en la región de estudio, ante el paso de frentes fríos, el análisis probabilístico adquirió importancia al proveer de valores objetivos de probabilidad para la ocurrencia de ciertos rangos de precipitación, ante condiciones fijadas de razón de mezcla y vientos. De acuerdo con lo analizado, puede concluirse que el método probabilístico ofrece mejores resultados, que el determinístico; sin embargo, en términos operativos, siempre será necesario verificar todas las herramientas disponibles para el análisis meteorológico y emitir un pronóstico lo más confiable posible.

El método empírico utilizado en el CHMRTG, al igual que cualquier método de análisis de pronóstico, siempre deberá complementarse con el mayor número de herramientas posibles. Las condiciones expuestas en él para que ocurran acumulados de precipitación intensas son necesarias más no son las únicas, ya que deberán tomarse en cuenta otras condicionantes meteorológicas, además de las ya consideradas, tal y como se propone a continuación:

- El método empírico expuesto en el CHMRTG en el análisis para el pronóstico de lluvias ante el paso de frentes frío en la región, requiere considerar otros criterios complementarios para pronosticar valores altos de precipitación, como en muchas ocasiones suele hacerse.

- Es necesario realizar siempre un análisis a escala sinóptica de los diversos fenómenos meteorológicos que pueden estar afectando e interactuando con el sistema frontal, tales como corrientes en chorro en niveles altos, líneas de cortantes o la misma ubicación del jet de niveles bajos asociado a los vientos del norte.
- Es necesario incorporar análisis de patrones hemisféricos como el ENSO, PDF, AMO y otros que puedan ampliar o reducir la dinámica atmosférica.
- El análisis probabilístico ofreció una herramienta útil para ofrecer pronósticos desde un punto de vista de probabilidades, de manera objetiva; esto significa que teniendo las condicionantes establecidas de razón de mezcla y vientos de componente norte, podrían emplearse las tablas de probabilidad, para establecer el pronóstico cuantitativo de precipitación. Sin embargo, de nueva cuenta, es necesario analizar muchas otras herramientas para apoyar o descartar estos valores de probabilidad.
- Aunque el análisis de la región de estudio, de manera unificada es más aproximado a lo que se realiza operativamente en el CHMRTG, la diferencia con lo realizado al momento de dividir la región en celdas no es significativa, por lo que se presentan ambas opciones, quedando a criterio del meteorólogo si desea realizar un análisis más detallado con datos modelados por celdas de resolución o más general considerando a toda la región.
- Si bien los resultados pueden proveer una herramienta que puede ser útil en el análisis de pronóstico meteorológico, lo cierto es que son muy generales. Por lo que estos resultados permitieron básicamente establecer una caracterización del comportamiento de la precipitación en la región, cuando se presentan ciertas condiciones de variables modeladas como razón de mezcla y precipitación.
- Finalmente, como trabajo a futuro, este trabajo puede servir como antecedente para profundizar en el análisis tomando en cuenta otras variables como la temperatura superficial del mar o la actividad ciclónica previa a la temporada invernal en cuestión.

## 8. Referencias

- Ahrens C. D. (2000). *Meteorology today: An introduction to weather, climate, and the environment*. Pacific Grove, CA: Brooks/Cole, pp. 109, 302, 303, 313-315.
- Ahrens C. D. (2007). *Meteorology today: An introduction to weather, climate, and the environment*. Pacific Grove, CA: Brooks/Cole, pp. 300-301
- Arreguín-Cortés, F. I., y Cervantes-Jaimes, C. E. (2017). Flood Risk Management in Mexico. In *Flood Risk Management*. InTech.
- Barrett, B. S., Garreaud, R., & Falvey, M. (2009). Effect of the Andes Cordillera on Precipitation from a Midlatitude Cold Front. *Monthly Weather Review*, pp. 137, 3092–3109.
- Comisión Nacional del Agua, Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional (2018): *Reporte del Clima en México*, p. 19.
- Egger, J., & Hoinka, K. P. (1992). Fronts and orography. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 48(1-4), pp. 3-36.
- González, M. (2009). *Climatología de los frentes fríos (Tesis para obtener el grado de Licenciatura en ciencias atmosféricas)*, Universidad Veracruzana. p. 72
- Hernández-Carrillo, J. E. (2014). *Experiencia profesional en el Centro Hidrometeorológico Regional Tuxtla Gutiérrez (Reporte para obtener el grado de Licenciatura)*. Universidad Veracruzana, Xalapa, Veracruz, México.
- Hoinka K. P., Hagen M., Volkert H., Heimann D. (1989). On the influence of the Alps on a cold front. *DLR, Institute for Atmospheric Physics*, 42<sup>a</sup>, pp. 140-164.
- Hoinka K. P., Heimann D.. (1988). Orographic Channeling of a Cold Front by the Pyrenees. *Picture of the month*, pp.116, 1817-1823.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2012): *Perspectiva Estadística de Tabasco*. México, p. 10
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2014): *Perspectiva Estadística de Chiapas*. México, p. 32



- Jacobson, Mark (1999). *Fundamentals of atmospheric modeling*. Cambridge University Press. pp. 239-241.
- Jacobson, Mark (2005). *Fundamentals of atmospheric modeling*. Second edition. Cambridge University Press. pp. 600-601.
- Kirshbaum, D., Adler, B., Kalthoff, N., Barthlott, C., & Serafin, S. (2018). Moist orographic convection: Physical mechanisms and links to surface-exchange processes. *Atmosphere*, 9(3), p. 80.
- Llasat, M. C. (1990). Influencia de la orografía y la inestabilidad convectiva en la distribución espacial de lluvias extremas en Cataluña. *Acta Geológica Hispánica*, 25, pp. 197-208.
- Lin, Y. L., Chiao, S., Wang, T. A., Kaplan, M. L., & Weglarz, R. P. (2001). Some common ingredients for heavy orographic rainfall. *Weather and forecasting*, 16(6), pp. 633-660.
- Luna, R. B. (2016). *Interacción de los frentes fríos con la Sierra Madre Oriental (Tesis de Maestría en Ciencias)*. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California, México.
- Moncho J. (2015). *Estadística aplicada a las ciencias de la salud*. Barcelona, España: Elsevier, pp. 167-168
- Prieto, R., Cortés, V. E., Jiménez, M., Matías, L. G., Eslava, H. & Ramírez, R. (2011). *Automatización del Sistema de Alerta Temprana para Frentes Fríos y Nortes*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua: Jiutepec, Morelos, México.
- Prieto, R., Ramírez, R. & San Cristóbal, B. C. (2008). *Metodología para la creación e implementación de un sistema de alerta temprana para frentes fríos y nortes (Informe final)*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua: Jiutepec, Morelos, México.
- Ramírez, M., & Espinosa, I. (2002). Seguimiento de nortes en el litoral del Golfo de México en la temporada 1999-2000. *Revista Geográfica*, (131), pp. 5-19.
- Ramírez-Salazar, L. E. (2011). *Actualización de las avenidas de diseño de las presas del Río Grijalva (Tesis de licenciatura)*. México, D.F.: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Roe, G. H. (2005). Orographic precipitation. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 33, pp. 645-671.

- Sabogal, T. N. (2017, octubre 5). La Aplicación de la Estadística en la Meteorología. Revista De La Universidad De La Salle, 4(10), pp. 35-48. Recuperado a partir de <https://revistas.lasalle.edu.co/index.php/ls/article/view/4877>
- Santana, J. S., & Mateos, E. (2014). El arte de programar en R: Un lenguaje para la estadística. México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, p. 112-113
- Smith, R.B. Hydrostatic flow over mountains. Adv. Geophys. (1989), 31, pp. 1–41
- Smith, R. B., and Coauthors, (1997): Local and remote effects of mountains on weather: Research needs and opportunities. Bull. Amer. Meteor. Soc., 78, pp. 877–892.
- Thunis, P. & Bornstein, R., (1995). Hierachy of mesoscale assumptions and equations. Journal of atmospheric sciences. 53, 3. Pp. 380-381.
- Valenzuela R. A. & Kingsmill D. E.. (Septiembre 2015). Orographic Precipitation Forcing along the Coast of Northern California during a Landfalling Winter Storm. American Meteorological Society, 143, pp. 3570-3590.
- Wallace, J. M.& Hobbs, P. V. (2006). Atmospheric Science An Introductory Survey. Estados Unidos: Elsevier, pp. 80-82.
- Whiteman, D. (2000). Mountain Meteorology: Fundamentals and Applications. Oxford University Press. New York, pp. 103,141.

### **Páginas web consultadas**

- Calidad y ADR (2018). Diagrama de Dispersión, Figura 4.4. Recuperado de <https://aprendiendocalidadyadr.com/diagrama-de-dispersion/>
- CONAGUA, Servicio Meteorológico Nacional (2017). Rangos de pronóstico de acumulados de precipitación en 24 horas. Recuperado de <http://smn.cna.gob.mx/es/>
- CIMSS (2018). Flujo de vientos promedio derivados de satélite. Recuperado de <http://tropic.ssec.wisc.edu/>
- Discovery (2018). El efecto Foehn, Figura 2.3. Recuperado de <http://www.discovery-8.com/el-efecto-fohen/>

- INEGI (2018), Datos de relieve de Chiapas y Tabasco. Recuperado de <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/datosrelieve/continental/Descarga.aspx>
- McGraw-Hill, (2016). Curso en línea de probabilidad y estadística, Cap. 13. Recuperado el 29 de octubre de 2016 de <http://www.mcgraw-hill.com.mx/pye01e/prelim/soft1.html>
- NCEI (2017). Datos del modelo GFS. Solicitados y recuperados de <https://www.ncdc.noaa.gov/has/HAS.FileAppRouter?datasetname=GFSGRB24&subqueryby=STATION&applname=&outdest=FILE>
- NOAA (2018). Global Forecast System (GFS), Figura 2.4. Recuperado de <https://www.ncdc.noaa.gov/data-access/model-data/model-datasets/global-forecast-system-gfs>