



**IPICYT**

**INSTITUTO POTOSINO DE INVESTIGACIÓN  
CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA, A.C.**

**POSGRADO EN GEOCIENCIAS APLICADAS**

**“Impacto de las Ondas Tropicales del Este en México”**

Tesis que presenta  
**Hiram Abif Meza Landero**

Para obtener el grado de  
**Maestro en Geociencias Aplicadas**

Director de la Tesis:  
**Dr. José Noel Carbajal Pérez**

San Luis Potosí, S.L.P., octubre de 2020



## Constancia de aprobación de la tesis

La tesis “**(Impacto de las Ondas Tropicales del Este en México)**” presentada para obtener el Grado de Maestro(a) en Geociencias Aplicadas fue elaborada por **(Hiram Abif Meza Landero)** y aprobada el **día de mes de año** por los suscritos, designados por el Colegio de Profesores de la División de Geociencias Aplicadas del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C.

---

**Dr. José Noel Carbajal Pérez**

Director

---

**Dr. José Tuxpan Vargas**

Miembro del Comité Tutorial

---

**Dr. Luis Felipe Pineda Martínez**

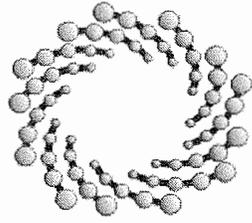
Miembro del Comité Tutorial



## **Créditos Institucionales**

Esta tesis fue elaborada con el apoyo del Centro Nacional del Supercómputo (CNS) del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., bajo la dirección del Dr. José Noel Carbajal Pérez.

Durante la realización del trabajo el autor recibió una beca académica del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (909977) y del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A. C.



**IPICYT**

# Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C.

## Acta de Examen de Grado

El Secretario Académico del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., certifica que en el Acta 065 del Libro Primero de Actas de Exámenes de Grado del Programa de Maestría en Geociencias Aplicadas está asentado lo siguiente:

En la ciudad de San Luis Potosí a los 22 días del mes de octubre del año 2020, se reunió a las 12:00 horas en las instalaciones del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., el Jurado integrado por:

<b>Dr. José Alfredo Ramos Leal</b>	<b>Presidente</b>	<b>IPICYT</b>
<b>Dr. José Tuxpan Vargas</b>	<b>Sinodal</b>	<b>IPICYT</b>
<b>Dr. José Noel Carbajal Pérez</b>	<b>Sinodal</b>	<b>IPICYT</b>

a fin de efectuar el examen, que para obtener el Grado de:

**MAESTRO EN GEOCIENCIAS APLICADAS**

sustentó el C.

**Hiram Abif Meza Landero**

sobre la Tesis intitulada:

***Impacto de las Ondas Tropicales del Este en México***

que se desarrolló bajo la dirección de

**Dr. José Noel Carbajal Pérez**

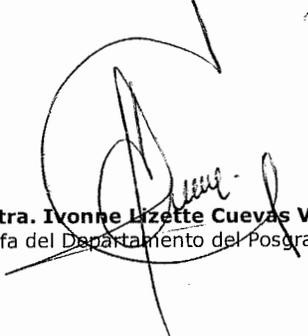
El Jurado, después de deliberar, determinó

**APROBARLO**

Dándose por terminado el acto a las 13:25 horas, procediendo a la firma del Acta los integrantes del Jurado. Dando fe el Secretario Académico del Instituto.

A petición del interesado y para los fines que al mismo convengan, se extiende el presente documento en la ciudad de San Luis Potosí, S.L.P., México, a los 22 días del mes de octubre de 2020.

  
**Dr. Marcial Bonilla Marín**  
Secretario Académico

  
**Mtra. Ivonne Lizette Cuevas Vélez**  
Jefa del Departamento del Posgrado



## Dedicatorias

*Con*

$$(x^2 + y^2 - 1)^3 - x^2 y^3 = 0$$

*A mis padres, quienes siempre me han dado su apoyo incondicional,  
pero sobre todas las cosas, amor, el tesoro más preciado en la vida.*

*“Una persona que no ha pasado a través del infierno de sus pasiones,  
no las ha superado nunca”.*  
*Carl Gustav Jung*

## Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, al Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C. y a la División de Geociencias Aplicadas por darme la oportunidad de realizar mis estudios de maestría.

A mi asesor, el Dr. Noel Carbajal por dirigir el presente trabajo, por las constantes discusiones científicas y retroalimentaciones a fin de apoyar este estudio.

A los miembros de mi comité tutorial, quienes con sus atinadas observaciones contribuyeron a la mejora del presente trabajo.

Hago una mención especial para el Dr. Luis Felipe Pineda, cuyas recomendaciones fueron fundamentales para darle su forma final al trabajo de tesis.

Al Dr. José Tuxpan por haber inducido mi gusto y curiosidad por la percepción remota, disciplina que me gusta bastante al día de hoy.

A mi familia, quienes siempre han estado conmigo en cada momento de mi vida apoyándome y dándome ánimos para seguir adelante.

A mi novia, quien me ha impulsado a creer más en mí mismo, por todo su apoyo incondicional y abrirme la puerta de su vida y de su familia.

Para mis amigos (Dani, Saúl, Nadia, Karen, Uc, Gerardo, Claudia y Christian) por todos los buenos momentos que pasamos juntos, por las horas de risas y buenas discusiones.

A uno de mis mejores amigos, Ángel, por las interminables discusiones sobre meteorología tropical, disciplina que nos apasiona a ambos.

A mi buen amigo, el Dr. Juan Matías Méndez Pérez, quien siempre se ha dado el tiempo para discutir sobre ciencia, tecnología, entre otras cosas.

Para todas las personas que han estado presentes en mi desarrollo profesional y que no se encuentran mencionadas, agradezco inmensamente su apoyo.

# Contenido

Constancia de aprobación de la tesis	ii
Créditos Institucionales	iii
Dedicatorias	v
Agradecimientos	vi
Contenido	vii
Lista de figuras	ix
Lista de tablas	xi
Anexos	xii
Resumen	xiii
Abstract	xiv
1 Introducción	1
1.1 Planteamiento del problema	1
1.2 Antecedentes	1
1.3 Justificación	7
1.4 Objetivos	8
General	8
Específicos	8
1.5 Características de las Ondas Tropicales del Este	8
2 Área de estudio	11
2.1 Características climáticas de la zona de estudio	11
2.2 La humedad en la atmósfera	16
2.2.1 Razón de Mezcla	16
2.2.2 Humedad Específica	16
2.2.3 Humedad Absoluta	17
2.2.4 Presión de vapor	17
2.2.5 Humedad Relativa	17
2.2.6 Comportamiento espacial de la humedad	18
2.2.7 Comportamiento espacial de la humedad en México	18
3 Modelo WRF	20
3.1 Descripción del modelo WRF	20
3.1.1 Parametrizaciones físicas	23
3.1.2 Condiciones iniciales y de frontera	25
3.1.3 Datos ERA-Interim	26

3.1.4	Diseño de los experimentos numéricos _____	27
3.2	Evaluación estadística y calibración del modelo _____	27
3.3	Datos observados _____	28
3.4	Resultados de la evaluación estadística del modelo _____	30
4	Resultados _____	35
4.1	Número de Ondas Tropicales _____	35
4.2	Condiciones sinópticas predominantes _____	38
4.3	Estructura horizontal y vertical de las Ondas Tropicales del Este _____	40
4.4	Análisis Previo a la entrada de una Onda Tropical _____	43
4.5	Análisis de la Onda Tropical sobre México _____	45
4.6	Análisis posterior al paso de una Onda Tropical _____	47
4.7	Anomalías máximas de humedad específica _____	50
4.8	Anomalías de Temperatura Promedio _____	54
4.9	Acumulados de precipitación para casos de Ondas Tropicales _____	56
5	Discusión _____	61
5.1	Contribución de las Ondas Tropicales a la Precipitación Estacional _____	61
5.2	Impacto de las Ondas Tropicales del Este a la vegetación _____	63
5.3	Relación entre el CLLJ y el número mensual de Ondas _____	68
5.4	Correlación de la Cantidad anual de Ondas Tropicales contra índices del ENSO _____	70
6	Conclusiones _____	74
	Bibliografía _____	81

## Lista de figuras

Figura 1.1: A) Representación vertical de una OT de 0 a 7.5 km. B) Representación de una OT. isobaras de superficie (líneas continuas), distribución de divergencia (DIV) y convergencia (CONV) en superficie, eje de la onda en superficie y en altura (líneas continuas finas). Tomados de Carlson & Lee (1978).....	1
Figura 2.1: Dominio del área de estudio y elevación del terreno.....	11
Figura 2.2: Regiones climáticas de México recuperado de (Granados Ramírez et al., 2008).....	13
Figura 2.3: Distribución espacial de la humedad específica ( $q_e$ ) en México [gr Kg-1] para meses representativos de cada estación. a) Invierno (ENE) b) Primavera (ABR) c) Verano (JUL) d) Otoño (OCT). Recuperada de Tejeda (2018).....	19
Figura 3.1: Esquema de funcionamiento del WRF-ARW. (Fuente: Skamarock et al., 2008).....	21
Figura 3.2: Diagrama esquemático del flujo de datos y componentes del WPS. (Fuente: Skamarock et al., 2008).....	21
Figura 3.3: Módulos del modelo WRF.....	22
Figura 3.4: Distribución de las Estaciones Meteorológicas Automáticas.....	30
Figura 3.5: Sesgo entre precipitación simulada por WRF y CHIRPS para el experimento con la parametrización Arakawa - Schubert.....	33
Figura 3.6: Igual que en 3.5 pero para el experimento con la parametrización Grell 3D.....	34
Figura 3.7: Igual que en 3.5 pero para el experimento con la parametrización de Tiedke.....	34
Figura 4.1: Variabilidad mensual de Ondas Tropicales que entraron a México durante el periodo 2006 - 2015 (azul) y en el año 2015 (rojo).....	36
Figura 4.2: Posición del Anticiclón del Atlántico Norte (A'') en 2015 para: a) junio, b) julio, c) agosto d) septiembre y e) octubre de 2015.....	39
Figura 4.3: a) Esquema ideal de una OT (Tomado de Carlson & Lee, 1978). Isobaras de superficie (líneas punteadas), distribución de divergencia (DIV) y convergencia (CONV) en superficie, eje de la onda en superficie y en altura (líneas continuas) y líneas de corriente de 3000 4000 m. b) Esquema ideal reconstruido a partir del modelo WRF. Distribución de convergencia (CONV rojo) y Divergencia (DIV azul), eje de la onda en 700 hPa (línea continua negra) y líneas de corriente a 700 hPa.....	40
Figura 4.4: a) Diagrama ideal de una OT (Tomado de Carlson & Lee, 1978) en la vertical de 0 a 7.5 km. b) Sección transversal de una Onda Tropical sobre el Golfo de México. La línea continua negra representa el eje de la onda.....	41
Figura 4.5: Diagramas de Hovmöller de la anomalía de humedad específica a una latitud de 18° N para los meses: a) Julio, b) Agosto, c) Octubre, d) Noviembre....	42
Figura 4.6: a) Temperatura de punto de rocío a 700 hPa (°C) para el 02/07/2015 a las 07Z. b) Humedad Específica a 700 hPa (gr kg-1). c) Temperatura Potencial Equivalente a 700 hPa (K). c) Vorticidad Relativa a 700 hPa (10-5 s-1).....	44

Figura 4.7: Secciones verticales desde superficie a 6 Km sobre 19 °N y 85 - 100 °W para el 01/07/2015 a las 05Z de: a) Temperatura de punto de rocío (°C), b) Humedad específica (gr Kg-1), c) Temperatura potencial equivalente (K), d) Vorticidad relativa (10-5 s-1)..... 44

Figura 4.8: a) Temperatura de punto de rocío a 700 hPa (°C) para el 05/07/2015 a las 02Z. b) Humedad Específica a 700 hPa (gr kg-1). c) Temperatura Potencial Equivalente a 700 hPa (K). c) Vorticidad Relativa a 700 hPa (10-5 s-1). ..... 46

Figura 4.9: Secciones verticales desde superficie a 6 Km sobre 19 °N y 85 - 100 °W para el 06/07/2015 a las 02Z de: a) Temperatura de punto de rocío (°C). b) Humedad específica (gr kg<sup>-1</sup>). c) Temperatura Potencial Equivalente (K). d) Vorticidad Relativa respecto del eje zonal (10<sup>-5</sup> s<sup>-1</sup>). ..... 46

Figura 4.10: a) Temperatura de punto de rocío a 700 hPa (°C) para el 08/07/2015 a las 17Z. b) Humedad Específica a 700 hPa (gr kg-1). c) Temperatura Potencial Equivalente a 700 hPa (K). c) Vorticidad Relativa a 700 hPa (10-5 s-1). ..... 49

Figura 4.11: Secciones verticales desde superficie a 6 Km sobre 19 °N y 85 - 100 °W para el 08/07/2015 a las 13Z de a) Temperatura de punto de rocío (°C). b) Humedad específica (gr kg-1). c) Temperatura Potencial Equivalente (K). d) Vorticidad Relativa respecto del eje zonal (10-5 s-1). ..... 50

Figura 4.12: Zona de influencia de las Ondas Tropicales del Este en México (sombreado en patrón de líneas blancas). ..... 51

Figura 4.13: Promedio temporal del Máximo de la Anomalía de Humedad específica para casos de Onda Tropical [gr Kg<sup>-1</sup>] en el periodo junio - noviembre 2015..... 52

Figura 4.14: Promedio temporal del Máximo de la Anomalía de Humedad específica para casos de Onda Tropical [gr Kg-1]. a) junio. b) julio. c) agosto. d) septiembre. e) octubre. f) noviembre. .... 53

Figura 4.15: Anomalía de temperatura promedio para casos de Onda Tropical [°C]. a) junio. b) julio. c) agosto. d) septiembre. e) octubre. f) noviembre..... 55

Figura 4.16: Serie de tiempo mensual de precipitación diaria para a) junio y b) julio ..... 57

Figura 4.17: Precipitación acumulada mensual WRF en azul y CHIRPS en rojo.. 57

Figura 4.18: Precipitación mensual acumulada para casos de Ondas Tropicales. a) junio, b) julio, c) agosto, d) septiembre, e) octubre, f) noviembre ..... 59

Figura 5.1: Contribución estacional de la precipitación asociada a Ondas Tropicales a la precipitación estacional [%] en el periodo junio - noviembre de 2015 ..... 61

Figura 5.2: Contribución de las Ondas Tropicales a la precipitación mensual [%]. a) junio, b) julio, c) agosto, d) septiembre, e) octubre, f) noviembre..... 62

Figura 5.3: a) Promedio temporal del Máximo de la Anomalía de Humedad específica para casos de Ondas Tropicales [gr Kg-1] Julio 2015. b) NDVI mayor a 0.5 (vegetación densa) para 2015 a partir de datos del sensor MODIS. .... 67

Figura 5.4: a) Promedio temporal de la Máxima Anomalía de Humedad específica para casos de Onda Tropical [gr Kg-1] periodo junio - noviembre 2015. b) NDVI mayor a 0.5 (vegetación densa) para 2015 a partir de datos del sensor MODIS. . 68

Figura 5.5: Regiones del ENSO ..... 72

## Lista de tablas

Tabla 1.1: Número de ondas tropicales que ingresaron a la República Mexicana por año. Recuperada de Cerón-Hernández (2017)	7
Tabla 3.1: Características del dominio	27
Tabla 3.2: Configuración física de los experimentos	27
Tabla 3.3: Esquemas de parametrización de cumulus para verificación del modelo.	28
Tabla 3.4: Lista de las Estaciones Meteorológicas Automáticas.	29
Tabla 3.5: Evaluación de la parametrización de Tiedke	30
Tabla 3.6: Evaluación de la parametrización de Arakawa - Schubert	31
Tabla 3.7: Evaluación de la parametrización de Grell	31
Tabla 3.8: Evaluación estadística de la precipitación para la estación de la Cuenca del Río Usumacinta	32
Tabla 4.1: Tabla de duración temporal para cada caso particular de Onda Tropical en el periodo junio – noviembre de 2015	37
Tabla 5.1: Valores de correlación entre NDVI y anomalía máxima de Humedad Específica para casos de Onda Tropical.	65
Tabla 5.2: Valores de correlación entre NDVI y Precipitación acumulada para casos de Onda Tropical.	65
Tabla 5.3: Correlación de la cantidad mensual de ondas contra el promedio de área de la magnitud del viento mensual en distintos niveles (925 hPa, 850 hPa, 700 hPa, 500 hPa y a 10 m sobre la superficie)	69
Tabla 5.4: Correlación de la cantidad mensual de Ondas Tropicales contra el promedio mensual de la cortante del viento entre distintos niveles	70
Tabla 5.5: Correlación entre cantidad anual de Ondas Tropicales e Índices ENSO	73

## Anexos

Anexos	77
Anexo 1	77
Correlación de Pearson	77
Sesgo (BIAS)	77
Error Absoluto Medio (MAE)	78
Raíz Cuadrada del Error Cuadrático Medio (RMSE)	78
Significancia de la correlación de Pearson	79

## Resumen

Las Ondas Tropicales (OT) u Ondas del Este, son perturbaciones en la corriente de los vientos Alisios que se desplazan de este a oeste desde las costas de África. Estas ondas tienen su origen en el Jet del Este Africano (JEA) donde se forman a partir de inestabilidades de baja amplitud en el mismo. Las OT son de gran importancia para el desarrollo ciclónico en la cuenca del Atlántico Tropical y para la modulación de la precipitación estacional. Según información del Centro Nacional para la Prevención de Desastres (CENAPRED), en México se registran en promedio 32 OT por año. El estudio de la influencia de las OT sobre la humedad y precipitación en el país es de gran relevancia, principalmente para determinar las zonas que son mayormente afectadas. A su vez, es de gran interés la interacción que tienen este tipo de fenómenos con la orografía compleja de las Sierras Madre Oriental, Occidental y del Sur en el desarrollo de convección y precipitación sobre estas regiones.

El presente estudio ha sido realizado a partir de simulaciones numéricas basadas en la documentación de eventos de OT a partir de cartas sinópticas de la Administración Nacional Atmosférica y Oceánica de los Estados Unidos (NOAA por sus siglas en inglés). A partir de las Ondas Tropicales identificadas se buscó una variable trazadora del fenómeno, posteriormente se generaron mapas de influencia mensual y estacional de las Ondas del Este, además de su impacto en la vegetación. Por otra parte, se pudo estimar la contribución de las Ondas Tropicales del Este a la precipitación estacional.

Se encontró que los procesos termodinámicos de la humedad tienen una gran influencia en la vegetación y su sostenimiento. Se estableció una relación de las OT y su interacción con fenómenos como el Jet de Bajos Niveles del Caribe (CLLJ) y El Niño. Durante los meses con mayor incidencia de Ondas Tropicales se identificó que la precipitación asociada a estas puede constituir del 90 al 100% de la precipitación mensual en algunas regiones del este de México.

## **Abstract**

The Tropical Waves (TWs) or Easterly Waves are disturbances in the current of the Trade winds that move from east to west from the coasts of Africa. These waves have their origin in the African Easterly Jet (AEJ) where they are formed from low amplitude instabilities in it. TWs have greater relevance for cyclonic development in the Tropical Atlantic basin and for the modulation of seasonal precipitation. According to information from the National Center for Disaster Prevention (CENAPRED for its acronym in Spanish), in Mexico there are an average of 32 OTs per year. The study of the influence of TWs on humidity and precipitation in the country have great relevance, mainly to determine the areas that are most affected. In turn, the interaction that these types of phenomena have with the complex orography of the Sierras Madre Oriental, Occidental y del Sur is great interesting in the development of convection and precipitation over these regions.

The present study has been carried out from numerical simulations based on the documentation of TWs events from synoptic charts of the United States National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). From the identified TWs, a tracer variable of these phenomena was sought, after of it monthly and seasonal influence maps of the Easterly Waves were generated, in addition to their impact on vegetation. On the other hand, the contribution of the Tropical Easterly Waves to seasonal precipitation could be estimated.

It was found that the thermodynamic processes of humidity have a great influence on vegetation and its support. A relationship was established between TWs and their interaction with phenomena such as the Caribbean Low Level Jet (CLLJ) and El Niño (ENSO). During the months with the highest incidence of Tropical Waves, it was identified that the precipitation associated with these can constitute 90 to 100% of the monthly precipitation in some regions of eastern Mexico.

# 1 Introducción

## 1.1 Planteamiento del problema

Las Ondas Tropicales (OT) u Ondas Africanas del Este (Fig. 1.1), son perturbaciones de escala sinóptica en la corriente de los vientos Alisios que se propagan en dirección este a oeste sobre el océano Atlántico Norte tropical provenientes de las costas de África Occidental (Burpee, 1972). Estas ondas tienen su origen en la zona del Jet del Este Africano (JEA) entre los 15 y 30 ° E (Krishnamurti, Stefanova & Misra, 2013), se producen cuando la humedad asciende producto de la convección e interacciona con él produciendo inestabilidades de baja amplitud (Diaz & Aiyyer, 2013).

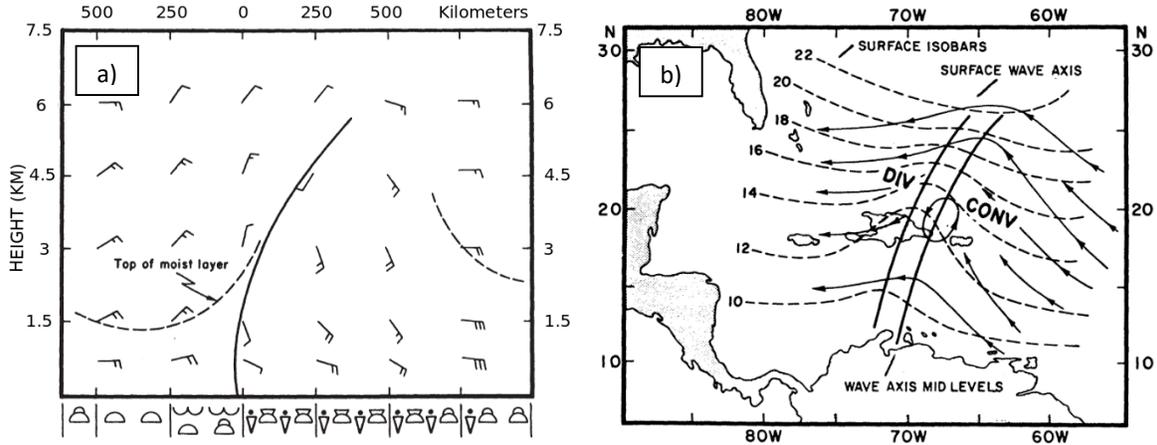


Figura 1.1: A) Representación vertical de una OT de 0 a 7.5 km. B) Representación de una OT. isobaras de superficie (líneas continuas), distribución de divergencia (DIV) y convergencia (CONV) en superficie, eje de la onda en superficie y en altura (líneas continuas finas). Tomados de Carlson & Lee (1978)

## 1.2 Antecedentes

Se han realizado numerosos estudios sobre Ondas Tropicales del Este, es un tema muy documentado desde la década de los años 40, Uno de los primeros avances en la estructura de una Onda Tropical, fue la creación del modelo conceptual de estas (Riehl, 1945). Posteriormente con la llegada de las imágenes de satélite, estos sistemas pudieron ser reconocidos por el patrón de forma de “V invertida” en su nubosidad asociada cuando estas se desplazan sobre el océano (Frank, 1967).

La estructura termodinámica de las Ondas Tropicales comenzó a documentarse a finales de los años 70, cuando empezó a estudiarse la meteorología del Atlántico Tropical a partir de observaciones (Reed et al., 1977), también se realizó el primer corte vertical de temperatura a lo largo de la longitud de onda, lo que permitió obtener más detalles de las características térmicas de una Onda Tropical (Thompson et al., 1979).

Los avances más relevantes en cuanto a la estructura termodinámica y la caracterización dinámica de estos sistemas se dio hasta 1987 (Cho & Jenkins, 1987), cuando se determinó que las variaciones térmicas en una Onda Tropical deben ser pequeñas. Esto a partir de un análisis de escala simple, asumiendo que la variación de temperatura potencial ( $\theta$ ) tiene una magnitud típica dada por la relación entre el número de Froude (Fr) y el número de Rossby (Ro). También se aplica la primera ley de la termodinámica en términos de la temperatura potencial, separaron el flujo medio del flujo de pequeña escala inducido por las nubes cumulus. Así mismo se derivaron aspectos de la dinámica dentro de una onda tropical, como del efecto del calentamiento radiativo.

En el año 2000, ya con mayores herramientas computacionales, se utilizaron métodos objetivos para identificar y trazar ondas a partir de datos de reanálisis generados por el Centro Europeo de Pronóstico a Mediano Plazo (ECMWF por sus siglas en inglés) en el periodo 1979-1998 (C. Thorncroft & Hodges, 2001). Para el diagnóstico, utilizó un método que identifica las Ondas Tropicales a partir de un umbral máximo en el campo de vorticidad relativa ( $+0.5 \times 10^{-5} \text{ S}^{-1}$ ). Para filtrar los sistemas con un tiempo de vida menor de dos días y con un desplazamiento no mayor a  $10^\circ$  ( $\sim 1000 \text{ Km}$ ). Se realizaron ensambles de trayectoria, de esta forma solo los sistemas consistentes con los parámetros antes mencionados eran considerados para el análisis estadístico.

A partir de los datos de entrada, se generaron estadísticas de densidad de trayectoria y génesis, además de tasas de crecimiento/decaimiento. Las densidades son escaladas a densidades numéricas por unidad de área a partir de distribuciones de densidad de probabilidad en donde la unidad de área es equivalente a  $5^\circ$  sobre

una superficie esférica ( $\sim 10^6 \text{ Km}^2$ ). Este artículo establece la importancia de las Ondas Tropicales para la ciclogénesis tropical y su variabilidad interanual.

En un estudio sobre el origen y formación de las ondas del este (G. J. Berry, 2004) analizaron la convección y la dinámica sobre África tropical, generando la hipótesis de que las Ondas Tropicales del Este, se forman como respuesta a forzamientos convectivos derivados de Sistemas Convectivos de Mesoescala que se desarrollan y desplazan a lo largo del Jet del Este Africano (AEJ). Misma idea que es reforzada por otro estudio (Hall et al., 2006), que indica que el AEJ es estable para pequeñas perturbaciones, pero no así para perturbaciones de mesoescala.

Otro estudio observacional sobre la estructura tridimensional y dinámica de las Ondas Tropicales encontró que sobre tierra en el continente africano, estas se propagan a una velocidad cercana a 9 m/s con una longitud de onda del orden de 3600 km y un periodo de 4.8 días (Kiladis et al., 2006). Mientras tanto, cuando se encuentran sobre el Atlántico, las velocidades de fase se ralentizan a 7.5 m/s y las longitudes de onda se contraen a 3000 km.

En 2007 (G. Berry et al., 2007) se aplicó una nueva metodología para analizar Ondas Tropicales del Este usando técnicas de análisis objetivo. A partir del cálculo de la vorticidad debida a la curvatura y la advección de vorticidad por curvatura, considerando la función corriente y tomando en cuenta los valores de vorticidad por curvatura mayor a  $0.5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ . Esto con la finalidad de diferenciar ejes de las zonas de curvatura y excluir ejes de Ondas Tropicales del Este o sistemas débiles. Posteriormente se calcula la advección a partir del cálculo anterior igualmente considerando la función corriente y tomando en cuenta únicamente los valores mayores a  $0 \text{ m s}^{-3}$  para remover pseudoejes, ejes en flujo no divergente que está curvado ciclónicamente. Un tercer filtro es aplicado a la componente zonal de la función corriente considerando únicamente valores menores a  $0 \text{ m s}^{-1}$  para remover ejes de onda en el flujo del oeste. Lo que permite una identificación menos ambigua de las Ondas Tropicales del Este que no depende de la percepción de un observador, reduciendo con ello el error humano.

Sobre las estructuras dinámicas para el desarrollo de Ondas Tropicales del Este, fue demostrado que cuando existe fricción moderada en el Jet del Este Africano, debido a la rugosidad del terreno, las perturbaciones de baja amplitud son realmente estables. Por lo que para la generación de Ondas Tropicales del Este, es necesaria la presencia de “precursores de amplitud finita” (Calentamiento superficial y convección) (Hall et al., 2006).

Un estudio más reciente sobre la génesis de las Ondas Tropicales del Este (C. D. Thorncroft et al., 2008) demostró que el calentamiento en zonas próximas al Jet del Este Africano (cerca de Darfur) produce una depresión que 5 a 7 días después llega a la costa este de África. Así mismo refuerza la teoría de que las Ondas Tropicales del Este se generan por el calentamiento asociado a zonas más al oeste del Jet del Este Africano. En escalas de tiempo estacionales a interanuales además de considerar el comportamiento promedio del Jet del Este Africano se debe considerar la naturaleza y variabilidad de los precursores de convección por calentamiento de amplitud finita. De acuerdo con los resultados obtenidos por este estudio si los precursores (calentamiento y convección) son más intensos y frecuentes se asocian a una actividad más fuerte de Ondas Tropicales del Este. La variabilidad estacional y subestacional del Jet del Este Africano, también juega un papel esencial entre los factores de iniciación que determinan una actividad significativa de Ondas Tropicales del Este.

En el ámbito de modelación numérica, se realizó un estudio para determinar la importancia de la convección en la generación de Ondas Tropicales del Este sobre África (G. J. Berry & Thorncroft, 2011). Para ello, fue utilizado el modelo Weather Research and Forecasting Model (WRF) (Skamarock et al., 2008) en un dominio que abarca desde África central hasta la costa occidental de África con una resolución espacial de 50 Km (300 x 135 puntos de malla) y salidas trihorarias. Como datos de entrada para el modelo, se utilizaron datos de Análisis Final (FNL) del Centro Nacional de Predicción Ambiental de los Estados Unidos (NCEP por sus siglas en inglés) de 1° X 1°. Después de realizar 32 pruebas de configuración y analizar subjetivamente los resultados comparando contra los datos FNL y de la

Misión de Estimación de Lluvia en los Trópicos (TRMM por sus siglas en inglés) (Huffman et al., 2007), se determinó la siguiente configuración:

- Esquema de Cumulus: nuevo esquema de Grell3D
- Esquema de Microfísica: Thompson Graupel
- Esquema de Radiación de Onda Larga: Rapid Radiative Transfer Model (RRTM)
- Esquema de Radiación de Onda Corta: Dudhia
- Esquema de Capa Límite Planetaria: Mellor–Yamada–Janjic (Eta) TKE vertical mixing
- Esquema de Capa Superficial: Monin–Obukhov (Janjic Eta)
- Esquema de Superficie Terrestre: Difusión Térmica

Las salidas de las simulaciones numéricas fueron analizadas usando la técnica objetiva de G. Berry et al., 2007 a 700 hPa.

Del análisis de los resultados numéricos se obtuvo que la velocidad de propagación de la perturbación fue de aproximadamente  $9 \text{ m s}^{-1}$ . Así mismo concluyen que la habilidad del WRF para representar el fenómeno, decae conforme avanza el tiempo de simulación, obteniendo resultados poco precisos al final de la simulación.

Realizaron perfiles verticales de calentamiento (Razón de calentamiento  $\text{K día}^{-1}$ ) de los cuales determinaron que por encima del nivel de congelación ( $\sim 5 \text{ km}$ ) se encuentra una parte estratiforme donde existe un calentamiento debido a la condensación en la región del yunque. Mientras que, en los niveles por debajo del nivel de congelación, se da un enfriamiento a causa de la evaporación en niveles bajos.

Una de las conclusiones más relevantes de ese estudio es que durante el ciclo de vida de las Ondas Tropicales del Este, la relevancia dinámica de la convección es igual de importante que la dinámica adiabática en el crecimiento de estas. Derivado de una simulación sin parametrización de cumulus (“funcionamiento en seco” o eliminación de la convección en el modelo), se concluyó que, para la intensificación

a escala sinóptica de las Ondas Tropicales del Este, es necesaria la existencia de convección.

Otra conclusión de gran importancia es que la convección de mesoescala y las Ondas Tropicales del Este a escala sinóptica están dinámicamente acoplados, por lo que no pueden considerarse una consecuencia del otro.

En 2014 fue publicado un estudio por investigadores de la Met Office del reino unido, en el que se propone una nueva metodología objetiva que pretende ser lo más simple posible y computacionalmente eficiente para la detección y seguimiento de Ondas Tropicales del Este (Bain et al., 2014). El método se centra en producir diagramas de Hovmöller (longitud-tiempo) de vorticidad por curvatura, posteriormente se aplica un gradiente para filtrar crestas y ejes de onda, luego, se aplica un laplaciano para enmascarar las crestas y por último se elimina el ruido y se unen las secciones de propagación. El resultado es una imagen binaria que muestra las Ondas Tropicales del Este en propagación. Los sistemas de menor escala que no se propagan son correctamente filtrados, pero los elementos pequeños que si se propagan no son correctamente enmascarados.

Según Dominguez et al., 2020 las Ondas Tropicales del Este, son sistemas que contienen gran cantidad de humedad y su variabilidad tiene impacto en la precipitación estacional (de mayo a noviembre) en la región tropical de América. Se realizaron comparaciones de datos de distintas fuentes como Observaciones, ERA-Interim, el Reanálisis del Sistema de Pronóstico climático (CFSR por sus siglas en inglés), la Misión de Estimación de Lluvia en los Trópicos (TRMM por sus siglas en inglés) y salidas del modelo WRF inicializadas a partir de ERA-Interim. Encontrando que ERA-Interim reproduce de forma adecuada la precipitación tropical asociada a las Ondas Tropicales del Este.

En ese estudio se encontró que la correlación de 0.63 entre la precipitación acumulada del verano y la precipitación asociada únicamente a Ondas Tropicales del Este. La sumatoria de días en que las Ondas Tropicales del Este pasan por una zona en específico también muestra una buena correlación ( $r=0.52$ ) con la precipitación estacional. También se menciona que durante condiciones de El Niño

una menor cantidad de Ondas Tropicales del Este alcanzan el norte de Sudamérica, mientras que pasa lo contrario en condiciones de La Niña. En condiciones neutrales no reportan anomalías en la densidad de trayectoria. De las simulaciones a partir del modelo WRF obtuvieron que simula adecuadamente la actividad de Ondas Tropicales del Este, pero subestima la densidad de trayectoria de estas, sin embargo, las simulaciones realizadas con microfísica WRF Single-Moment 6-Class (WSM6) capturan mejor la actividad de Ondas Tropicales del Este que en las que se consideraron otros esquemas de microfísica. Lo que indica que el esquema de microfísica WSM6 genera un gran impacto en la actividad este fenómeno. En cuanto la precipitación, dos de las simulaciones realizadas con el esquema de convección de Tiedke simulaban correctamente la precipitación. De lo anterior se puede decir que el modelo regional, simula adecuadamente los patrones de circulación del viento asociados a la estructura de las Ondas Tropicales del Este, pero no así sus condiciones asociadas a precipitación.

### 1.3 Justificación

En México según datos del Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) se registran en promedio 32 OT por año (Cerón-Hernández, 2017) (Tabla 1.1). El estudio de la influencia de las OT sobre la humedad y la precipitación en el país es de gran relevancia, ya que durante el verano la precipitación es modulada principalmente por estos sistemas, lo que los hace fundamentales para la climatología del país.

Tabla 1.1: Número de ondas tropicales que ingresaron a la República Mexicana por año. Recuperada de Cerón-Hernández (2017)

<b>Año</b>	<b>Número de Ondas Tropicales</b>
2006	45
2007	37
2008	37
2009	37
2010	27
2011	18
2012	16
2013	20
2014	36

2015	44
Promedio	32

## 1.4 Objetivos

### General

Identificar el impacto de las Ondas Tropicales del Este en México y diagnosticar los efectos de estas sobre el clima del país.

### Específicos

1. Delimitar las zonas donde las Ondas Tropicales tienen mayor influencia a partir de anomalías en determinadas variables atmosféricas.
2. Diagnosticar los efectos que tienen las Ondas Tropicales al interactuar con zonas de orografía compleja en México.

## 1.5 Características de las Ondas Tropicales del Este

Las Ondas Tropicales del Este son fenómenos que deben tratarse con todo el rigor de una onda en física, ya que cuentan con todas las características de un fenómeno propio de la mecánica ondulatoria. Su dirección de propagación, como su nombre lo indica, es de este a oeste, tienen un periodo de tres a cuatro días entre ondas, la velocidad de fase típica de una Onda Tropical es de 10 a 15 Kt (~18.5 – 28 km/h) y su longitud de onda de 2000 a 4000 km (Kiladis et al., 2006), en la vertical se extiende desde la superficie hasta los 5 km (500 hPa).

Algunas otras propiedades meteorológicas, termodinámicas y dinámicas de las Ondas Tropicales del Este serán detalladas a continuación (Davison, 1999):

- Generalmente tiempo estable al oeste del eje de la onda
  - Convergencia en niveles altos / Divergencia en niveles bajos
  - Patrón de subsidencia seco
- Tiempo activo e inestable al este del eje de la onda
  - Convergencia en niveles bajos / Divergencia en niveles altos
  - Humedad en capas profundas
  - Precipitación asociada a convección
- Núcleo cálido

Implica que la temperatura aumenta hacia el eje de la onda. La temperatura y la temperatura potencial mostrarán pocos o ningún cambio en la horizontal y el gradiente vertical.

- Calor latente de condensación

Las Ondas Tropicales tienden a acumular aire húmedo. Debido a esto, la ondulación térmica es más fácilmente visible si se analiza la temperatura potencial equivalente y/o la temperatura de punto de rocío en lugar de la temperatura. La temperatura potencial equivalente es un mejor trazador que la temperatura, debido a que considera el calor latente de evaporación combinándolo con el calor sensible de la masa de aire.

Debido a que las Ondas Tropicales son sistemas de núcleo cálido, dependen de la humedad y por lo tanto del calor latente de condensación como fuente de alimentación, lo que respalda el uso de la temperatura potencial equivalente para su identificación.

- Máxima Vorticidad Ciclónica en niveles bajos decreciendo con la altura
- Viento cortante
  - Cortante débil en niveles bajos que favorece a la convección
  - Cortante fuerte impide su desarrollo
- Inestabilidad convectiva conlleva a su intensificación nocturna
- Inclinación Positiva
  - La curvatura se extiende de este a oeste con la altura
  - Divergencia en bajos niveles al oeste del eje
  - Convergencia en niveles bajos al este del eje
  - Convección organizada generalmente sigue la trayectoria de la onda tropical (al este del eje)
- Inclinación negativa
  - Pocas por temporada
  - La pendiente se extiende de oeste a este con la altura

- Aumento en la velocidad del viento del este en bajos niveles (Maharaj, 1995)
- Convergencia en niveles bajos al oeste del eje de la onda
- Divergencia en niveles bajos al este del eje de la onda
- La Convección organizada generalmente precede a la Onda Tropical (Oeste del eje de la onda)

## 2 Área de estudio

El estudio se centra en la sección occidental de la cuenca del Atlántico, en la zona del mar Caribe y Golfo de México abarcando también casi completamente el territorio mexicano ( $6.15 - 32.72^\circ \text{ N}$  y  $53.61 - 116.38^\circ \text{ W}$ ) (Fig. 2.1). La precipitación en esta zona se ve altamente influenciada por OT durante el verano (Dominguez et al., 2020).

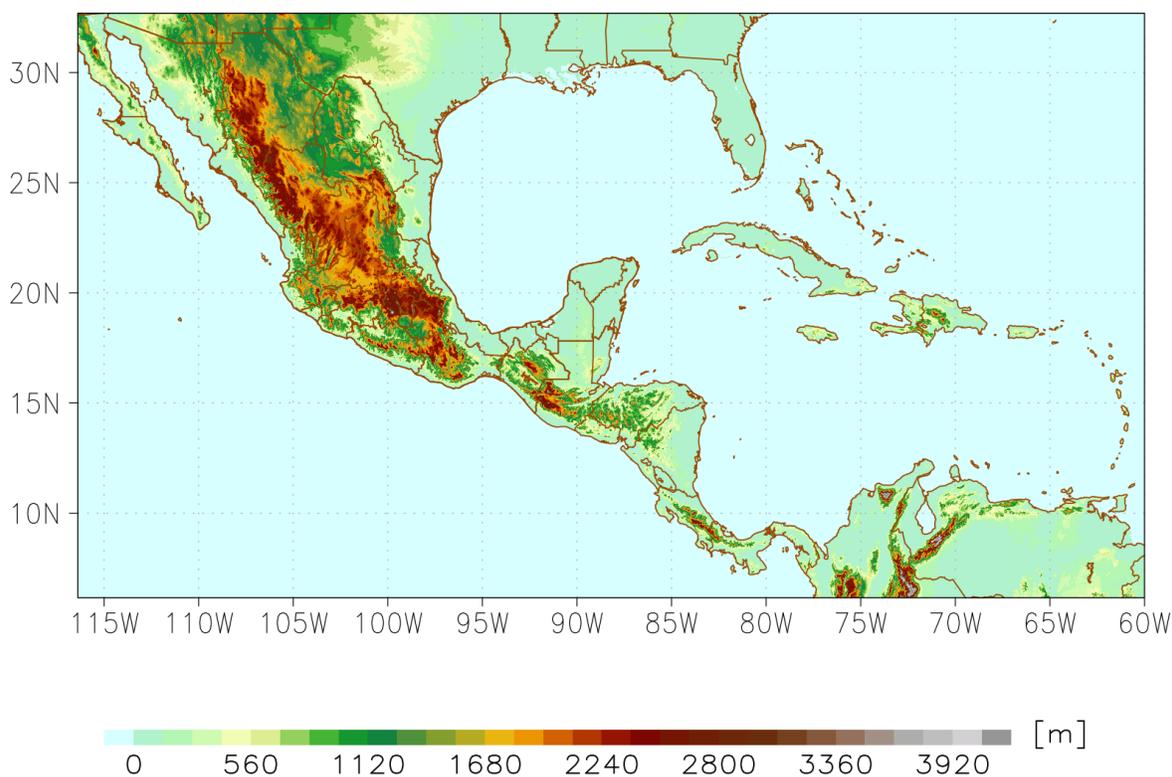


Figura 2.1: Dominio del área de estudio y elevación del terreno

### 2.1 Características climáticas de la zona de estudio

En este capítulo se discutirá sobre el clima de la zona de estudio dividiéndolo principalmente en dos grandes regiones, México y el Mar Caribe. Esto principalmente debido a que, sobre México, al contar con un territorio más amplio, tiene zonas específicas con clima continental, mientras que el Caribe es ampliamente dominado por un ambiente marítimo.

El clima del Mar Caribe, durante las estaciones de verano y otoño se ve principalmente dominado por sistemas tropicales, tal es el caso de Ondas Tropicales

del Este, Vaguadas, Ciclones Tropicales, las variaciones latitudinales de la Zona Intertropical de Convergencia (ITCZ) e intraestacionales de la Corriente de Bajos Niveles del Caribe (CLLJ). Así como cualquier tipo de perturbaciones en los vientos Alisios y en algunas zonas la Sequía de Medio Verano (MSD). La variabilidad climática de esta región también está ligada a oscilaciones de mayor amplitud como el ENSO<sup>1</sup>.

Sobre México, las variaciones climáticas por región son ciertamente más complejas, en primera instancia debido la gran variación latitudinal de su territorio (14.54083 - 32.7183 °N), además de que la porción continental es mayor a la de las islas del Caribe. Adicionalmente se tienen cuatro principales barreras montañosas de considerable elevación, la Sierra Madre Oriental al este, la Sierra Madre Occidental al oeste, la Sierra madre del Sur que se extiende en el margen oeste paralelo a la costa desde el estado de Jalisco hasta Oaxaca y, por último, la Faja Volcánica Transmexicana. Todo esto se traduce en una gran diversidad de climas, ya que los cuatro principales factores que determinan el clima de una región son: La latitud, la altitud, continentalidad (proximidad a grandes cuerpos de agua) y el relieve.

A México se le puede dividir en once regiones climáticas a partir de la clasificación de Köppen modificado (García, 1964): Noroeste de México, Golfo de California, Pacífico Central, Norte, Centro, Noreste, Golfo de México, Cuenca del Balsas y Valles de Oaxaca, Pacífico Sur, Sureste y Península de Yucatán.

A continuación, se describirá brevemente y de manera sintetizada el clima de cada una de estas regiones poniendo especial atención en su precipitación y régimen pluviométrico (Fig. 2.2):

---

<sup>1</sup> [https://upcommons.upc.edu/bitstream/han\\_dle/2099.1/5800/02.pdf?sequence=3&isAllowed=y](https://upcommons.upc.edu/bitstream/han_dle/2099.1/5800/02.pdf?sequence=3&isAllowed=y)  
Consultada el 21 de mayo de 2020



Figura 2.2: Regiones climáticas de México recuperado de (Granados Ramírez et al., 2008)

Hacia el noroeste del país se encuentran las zonas Noroeste, Golfo de California y Pacífico Central, las dos primeras se encuentran ampliamente dominadas por la faja subtropical de alta presión y la corriente fría de California por lo que la subsidencia mantiene una atmósfera estable la mayor parte del año, hacia la porción más al norte la precipitación se da mayoritariamente en el invierno, constituyendo un clima más mediterráneo – muy seco. Es en esta estación cuando los sistemas invernales y ciclones extratropicales generan advección fría y húmeda produciendo nevadas hacia las zonas altas de las Sierras de San Pedro Mártir, Tarahumara y Madre Occidental. Sobre las porciones oriental y sur de esta amplia zona, durante el verano se dan precipitaciones generadas por transporte de humedad de océano a continente a partir de un calentamiento diferencial de la superficie de ambos cuerpos, a lo que se le conoce como circulación de tipo monzónica. Esta circulación ocasiona lluvias de tipo convectivo al interactuar con la superficie cálida del continente y con la Sierra Madre Occidental. Particularmente hacia el centro del Pacífico la precipitación sucede principalmente en verano, siendo mayor hacia las

zonas serranas a barlovento del Océano Pacífico produciendo que los climas se distribuyan en franjas paralelas a la línea de costa, siendo más húmedos al oeste.

El clima de la región Norte, por su posición geográfica es dominado por la faja subtropical de alta presión que mantiene una atmósfera estable dando origen a su característica aridez con poca precipitación a lo largo del año. La lejanía de grandes cuerpos de agua como los océanos favorecen esta condición. Además, las Sierras Madre Oriental y Occidental flanquean la región al este y al oeste respectivamente, lo que limita el flujo de humedad de ambos océanos hacia la región dando origen a un clima muy continental. La mayor parte de la precipitación en esta zona se da entre los meses de julio y octubre cuando los vientos alisios del noreste se fortalecen y eficientizan el transporte de humedad desde el Golfo de México. Esto en combinación con el calentamiento excesivo de la superficie genera precipitaciones de tipo convectivo. Durante el invierno las precipitaciones suelen ser muy escasas y eventuales, producto de los sistemas invernales que generan nevadas sobre los picos más altos de las zonas serranas. En general los climas de la región van de secos a muy secos con lluvias en verano.

Hacia las regiones del Centro de México, Cuenca del Río Balsas y Valles de Oaxaca debido a la influencia del relieve tiene grandes variaciones térmicas.

En las zonas colindantes al Golfo de México (Región Noreste y Golfo de México) que van desde las planicies costeras hasta zonas altas de la Sierra Madre Oriental y la porción oriental de la Faja Volcánica Transmexicana, por lo que existe una gran variación térmica debida a la orografía generando climas muy cálidos hacia las zonas de planicie costera, templados hacia las Sierras y muy fríos – de hielos perpetuos en la cima del volcán Citlaltépetl. La precipitación está principalmente influenciada por la humedad proveniente del Golfo de México y del Atlántico Tropical. Este aire cálido y húmedo asciende mecánicamente sobre las zonas serranas, al elevarse se enfría y condensa para generar precipitaciones y nieblas densas. Durante el verano (época más lluviosa del año), el transporte de humedad se incrementa y con ello las precipitaciones, esto debido a las Ondas Tropicales del Este presentes en la corriente de los vientos alisios. Para esta región los Ciclones

Tropicales tienen gran relevancia debido a la gran precipitación que llevan a la zona. Durante el invierno la precipitación disminuye su concentración, pero no su ocurrencia, producto de los “Nortes” la lluvia invernal depende de la intensidad de estos, que transportan humedad hacia las zonas serranas y producen desde nieblas densas, lloviznas y precipitaciones que pueden llegar a ser relevantes

Sobre las planicies costeras del noreste se presenta un régimen intermedio de forma aislada, hacia las zonas montañosas ubicadas en la porción norte de la Sierra Madre Oriental se mantiene un régimen de lluvias en verano con una alta tasa de precipitación en el invierno. Los climas presentes en la región van de los secos, cálidos húmedos y templados hacia las zonas montañosas.

Las regiones pacífico sur y sureste deben su clima al desplazamiento estacional de la Zona intertropical de convergencia (ZIC). En verano, la ZIC suele desplazarse hacia el norte, típicamente alcanza latitudes por encima de los 18°N cubriendo ambas regiones en su totalidad y produciendo lluvias convectivas. Además, el calentamiento superficial sobre la cuenca del río Balsas genera una circulación de océano a continente generando las mayores precipitaciones sobre las laderas a barlovento de la Sierra Madre del Sur. Otro factor importante para considerar es que durante el verano la región se ve influenciada por la ocurrencia de Ciclones Tropicales que se forman frente a las costas de Guerrero, Oaxaca y Chiapas. Su trayectoria usualmente es hacia el oeste alejándose de la costa, pero cuando las condiciones de presión son propicias, estos toman trayectorias hacia continente produciendo una gran cantidad de precipitaciones sobre la línea de costa y las zonas serranas. Es una zona altamente susceptible a las Ondas Tropicales del Este. Las precipitaciones en invierno son poco abundantes y se limitan a las partes altas de las sierras. Los climas de la región van de los cálidos subhúmedos hasta los templados y semifríos (en zonas altas de la Sierra Madre del Sur), existen puntualmente climas fríos a muy fríos en los picos del Volcán de Fuego, el Nevado y el Tacaná.

En la Península de Yucatán el clima es dominado por el régimen de los vientos alisios del noreste, aunque debido a que no hay barreras orográficas importantes el

único mecanismo capaz de producir precipitación es la convección por calentamiento superficial. A su vez, durante el verano meteorológico la región es altamente influenciada por los Ciclones Tropicales que tienen su génesis en Las Antillas y por las Ondas Tropicales del Este. El clima en la región es predominantemente cálido subhúmedo con lluvias en verano.

## 2.2 La humedad en la atmósfera

La humedad en el aire es simplemente el vapor de agua (gas inodoro e incoloro que se forma al evaporarse el agua líquida o al sublimarse la misma en estado sólido), este al enfriarse puede condensarse y formar gotitas de agua líquida (Tejeda, 2018). La humedad puede cuantificarse utilizando diferentes parámetros y/o unidades físicas, tales como relaciones entre masas de aire, agua/aire, o masa entre volumen, entre otras formas. A continuación, se describirán más a detalle, pero de manera muy sencilla las formas de medir o cuantificar la humedad atmosférica:

### 2.2.1 Razón de Mezcla

Suponiendo que tenemos un cuarto controlado y cerrado sin personas ni objetos que perturben el ambiente de este, el cuarto cuenta con una ventana, misma que durante las noches se empaña, esto sucede porque se enfría y la humedad interior se condensa formando pequeñas gotitas de agua. Si pudiéramos separar el agua del aire seco contenido dentro del cuarto, podríamos saber independientemente la masa total de agua (gr) y la masa total de aire seco (Kg), de esta forma podríamos obtener una relación entre la cantidad de agua y aire seco en el interior de este. A dicha relación se le llama “razón de mezcla”:

$$\text{Razón de Mezcla } (w) = \frac{\text{Masa del vapor de agua } (gr)}{\text{Masa de aire seco } (Kg)}$$

### 2.2.2 Humedad Específica

Otra relación que puede ser derivada del ejemplo anterior, es si dividiéramos la masa total de agua entre la masa total de aire seco más vapor de agua (masa de aire húmedo). A esta relación se le denomina “humedad específica” (**qe**):

$$\text{Humedad específica } (q_e) = \frac{\text{Masa del vapor de agua (gr)}}{\text{Masa de aire total (Kg)}}$$

Esta es de cierta forma equivalente a la razón de mezcla (w).

### 2.2.3 Humedad Absoluta

En algunos casos, es preferible utilizar una relación en la que se considere el volumen de aire, tal es el caso de zonas de gran elevación, como lo son las zonas montañosas. En estos casos específicos se toma la masa de agua (gr) entre el volumen de aire (m<sup>3</sup>), a esta medida se le denomina “humedad absoluta” o “densidad de vapor de agua”:

$$\text{Humedad Absoluta } (\rho_w) = \frac{\text{Masa del vapor de agua (gr)}}{\text{Volumen de aire (m}^3\text{)}}$$

### 2.2.4 Presión de vapor

Asumiendo al aire (de una forma simplista) como una mezcla de aire seco y vapor de agua, se puede calcular la presión de cada porción de ambos gases en la mezcla, pero de acuerdo con la ley de Dalton de las presiones parciales, la suma de las presiones parciales de cada componente da como resultado la presión total de la mezcla. Entonces la presión parcial que ejercen las moléculas de vapor de agua en el aire húmedo se denomina “presión de vapor” (Arhens & Henson, 2019). Cuando el vapor de agua comienza a condensarse esa presión parcial cambia su nombre a “presión de vapor de saturación”.

### 2.2.5 Humedad Relativa

La humedad relativa (HR), no indica en realidad la cantidad real de vapor de agua en el aire. Pero indica qué tan cerca se encuentra el aire de llegar a la saturación. Esta variable es una relación entre la cantidad total de vapor de agua en el aire y la cantidad máxima de vapor de agua requerida para alcanzar la saturación a una temperatura y presión dadas en un lugar en un tiempo determinado (Arhens & Henson, 2019). Se expresa de la siguiente manera, ya sea en términos de la presión de vapor (e) y la presión de vapor de saturación (e<sub>s</sub>) o en su caso de la razón de mezcla (w) y la razón de mezcla de saturación (w<sub>s</sub>):

$$\text{Humedad Relativa (HR)} = \frac{\text{Presión de vapor (e)}}{\text{Presión de vapor de saturación (es)}} \times 100\%$$

$$\text{Humedad Relativa (HR)} = \frac{\text{Razón de mezcla (w)}}{\text{Razón de mezcla de saturación (ws)}} \times 100\%$$

### 2.2.6 Comportamiento espacial de la humedad

En cuanto a las variaciones espaciales de la humedad en la atmósfera, estas están estrictamente ligadas a los ambientes que se encuentran por debajo de la capa más superficial de aire, es decir, si el aire se encuentra ya sea sobre cuerpos de agua, tales como océanos, lagos, ríos, lagunas, o sobre selvas, bosques de niebla o vegetación densa. Bajo tales circunstancias, las condiciones son mucho más húmedas que si el aire se encontrara sobre suelo desnudo, áreas urbanas o zonas desérticas. Así mismo, la distribución de la humedad también depende del transporte generado por el viento (advección) que lleva la humedad desde un punto a otro sobre el planeta.

En la vertical, el transporte de humedad queda limitado al transporte de las masas de aire desde superficie hacia capas más altas de la atmósfera, que es generado por la convección y el ascenso de estas debido a interacciones con la orografía. Mismo ascenso únicamente queda limitado hasta la zona donde ocurra el proceso de condensación y se formen nubes, niebla o neblina. Por ello, en la mayoría de los casos, la humedad disminuye con la altura.

### 2.2.7 Comportamiento espacial de la humedad en México

México, al ser un país tropical y estar flanqueado tanto al este como al oeste por el océano Atlántico y Pacífico respectivamente, tiene un gran aporte en la humedad que se transporta hacia el continente, a su vez, las selvas tropicales en el sureste y bosques sobre el occidente, noreste, oriente y sur del país mantienen gran cantidad de humedad sobre el territorio.

Las estaciones más húmedas en México son el Verano y el Otoño, mientras que las más secas son el Invierno y la Primavera (Fig. 2.3)(Tejeda, 2018), esto principalmente debido a que durante los meses del verano meteorológico boreal, gran parte de la porción continental se ve influenciada por sistemas meteorológicos

tropicales. Tal es el caso de Ondas Tropicales, Huracanes, vaguadas y algunos Sistemas Convectivos de Mesoescala.

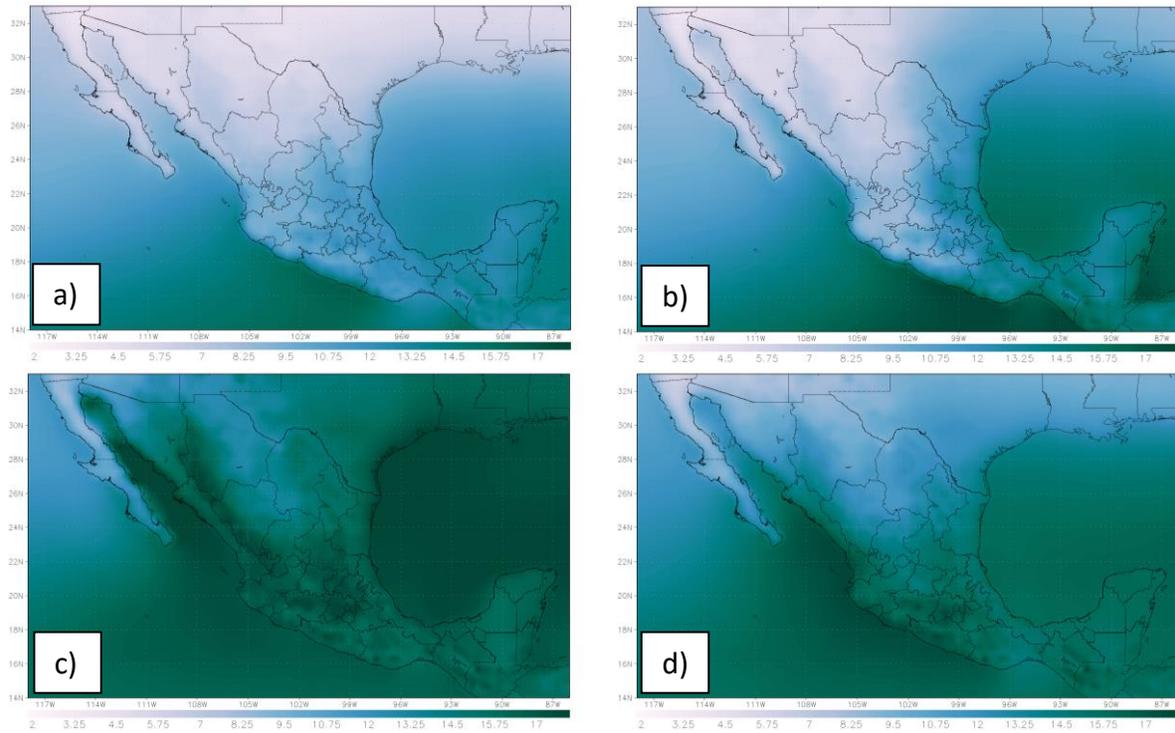


Figura 2.3: Distribución espacial de la humedad específica ( $q_e$ ) en México [ $\text{gr Kg}^{-1}$ ] para meses representativos de cada estación. a) Invierno (ENE) b) Primavera (ABR) c) Verano (JUL) d) Otoño (OCT). Recuperada de Tejeda (2018)

## 3 Modelo WRF

### 3.1 Descripción del modelo WRF

El modelo Weather Research and Forecasting (WRF) es un modelo de predicción numérica del tiempo, y un sistema de simulación atmosférica que fue diseñado como una colaboración de diversas instituciones de los Estados Unidos: el Centro Nacional de Investigaciones Atmosféricas (NCAR por sus siglas en inglés), la Administración Nacional Atmosférica y Oceánica (NOAA por sus siglas en inglés), la Agencia de Meteorología de la Fuerza Aérea, adscrita al Departamento de Defensa (AFWA por sus siglas en inglés), el Laboratorio Naval de Investigación (NRL por sus siglas en inglés), el Centro de Análisis y Predicción de Tormentas (CAPS por sus siglas en inglés), la Universidad de Oklahoma y la Administración Federal de Aviación (FAA por sus siglas en inglés); con el objetivo de que fuese un modelo de uso para predicción operacional del tiempo atmosférico y también utilizarse para la investigación científica (Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D., Duda, M. G., ... Powers, 2008). La primera versión del modelo estuvo disponible públicamente a finales del año 2000.

El modelo WRF se encuentra en constante desarrollo puesto que cada año se publican dos nuevas versiones que incluyen mejoras en las parametrizaciones, principalmente. La versión más reciente (abril 2020) del modelo es la 4.2.

Este modelo cuenta con múltiples núcleos dinámicos, tiene un sistema de asimilación de datos 3D-VAR y permite realizar las simulaciones en paralelo computacional. Además, puede adaptarse para trabajar en distintas escalas espaciales que van desde cientos de metros hasta miles de kilómetros<sup>2</sup>.

En el presente estudio se utiliza la versión 3.6.1 que cuenta con 4 módulos (Fig. 3.1) y se describen a continuación.

---

<sup>2</sup> [http://www.hpcadvisorycouncil.com/pdf/WRF\\_v3.8%20Installation\\_Best\\_Practices.pdf](http://www.hpcadvisorycouncil.com/pdf/WRF_v3.8%20Installation_Best_Practices.pdf) Consultada el 25/04/2019

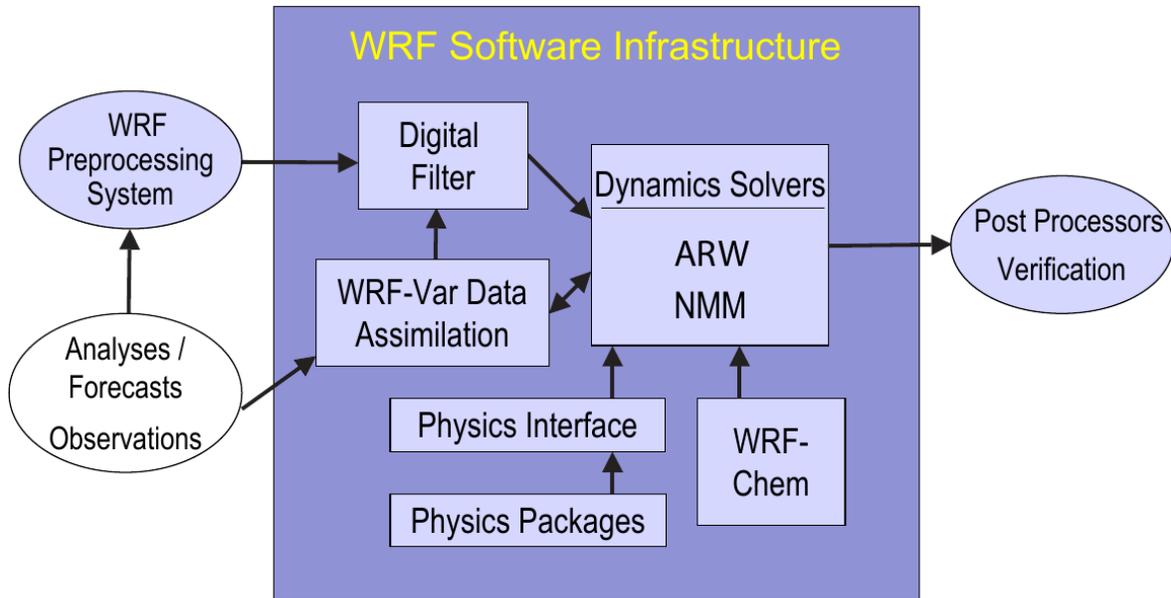


Figura 3.1: Esquema de funcionamiento del WRF-ARW. (Fuente: Skamarock et al., 2008)

### WRF Pre-processing System (WPS)

Es una serie de programas que toman datos de terreno y meteorológicos, prepara los dominios, extrae las variables que se utilizan como condiciones iniciales y de frontera, e interpola los datos a los dominios definidos (Fig. 3.2).

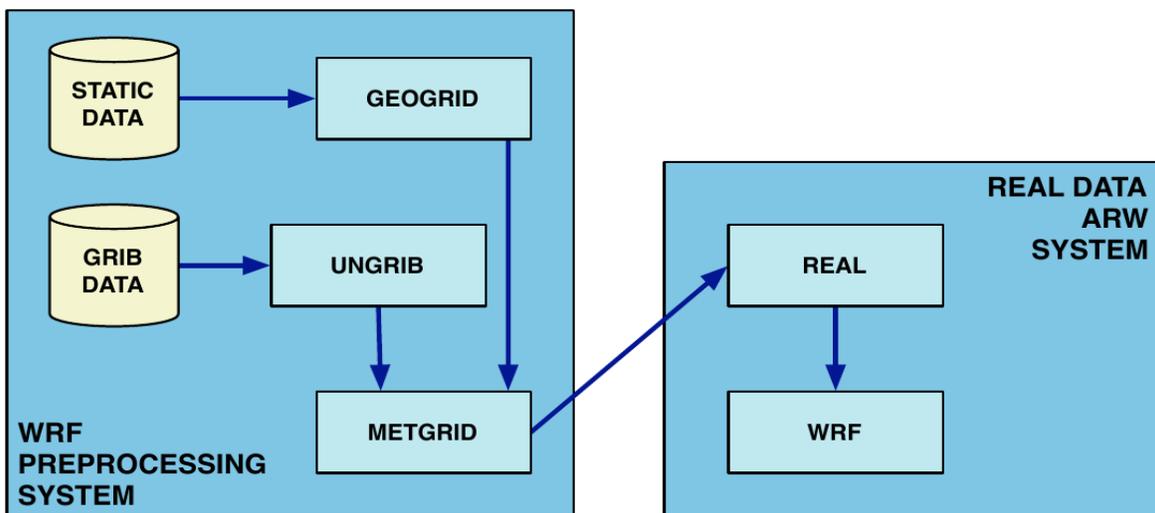


Figura 3.2: Diagrama esquemático del flujo de datos y componentes del WPS. (Fuente: Skamarock et al., 2008)

- **Geogrid.** En este programa se define la malla física que se utilizará, tipo de proyección, su localización en el globo, número de puntos de la malla, localización de las mallas anidadas y resolución de las mallas. El geogrid interpola horizontalmente los campos estáticos (altura de la topografía, tipo y uso de suelo, albedo, fracción de vegetación, parámetros urbanos, entre otros) a la malla definida.
- **Ungrib.** Es un decodificador de archivos GriB que realiza un análisis externo de los datos meteorológicos de escala global; toma los campos requeridos por el modelo y convierte a un formato binario propio del WPS.
- **Metgrid.** Este programa se encarga de interpolar horizontalmente los datos que fueron extraídos por el programa ungrib, a el (los) dominio(s) definido(s) por el geogrid.

Los archivos de salida del WPS proporcionan datos atmosféricos tridimensionales en las mallas predefinidas horizontalmente para las fracciones de tiempo en que se desea trabajar. Estos datos son posteriormente utilizados por el módulo ARW para casos reales (Fig. 3.3).

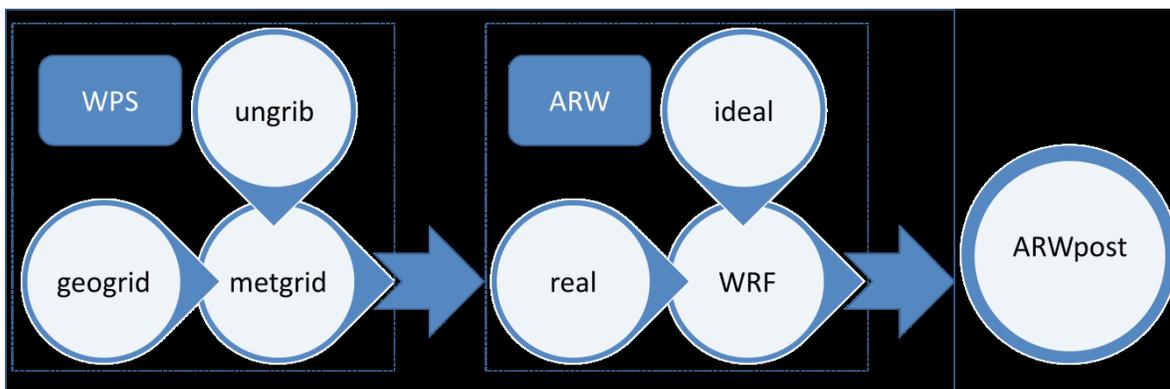


Figura 3.3: Módulos del modelo WRF

### **Advanced Research WRF (ARW)**

Este es el módulo principal del modelo WRF. Está conformado por tres programas:

- **Ideal.** Se utiliza para la ejecución de experimentos en casos idealizados (teóricos), por lo que no es necesario incorporar datos observados ni información de preprocesamiento.

- **Real.** Se utiliza para casos reales, en donde es necesario el uso de datos preprocesados generados por el módulo WPS como entradas del programa. Su función es realizar una interpolación vertical de las variables meteorológicas en coordenadas eta ( $\eta$ ), para que posteriormente las condiciones iniciales y de frontera ya preparadas ingresen al módulo de integración del modelo.
- **WRF.** Se encarga de realizar la integración numérica del modelo utilizando las condiciones iniciales y de frontera previamente preparadas por el programa real, incorporando los esquemas físicos de parametrización (microfísica, cumulus, radiación de onda corta y larga, capa límite planetaria, modelo de suelo y de arrastre en superficie, entre otros).

El núcleo dinámico ARW cuenta con múltiples características, algunas de ellas modificables, con las cuales realiza la integración numérica de las ecuaciones.

Existen diferentes maneras de post-procesar los datos generados por la integración del modelo y poder visualizar los campos obtenidos. Por ejemplo, mediante los programas NCL (NCAR Command Language), NCO (NetCDF Operators), CDO (Climate Data Operators), IDV (Integrated Data Viewer), VAPOR (Visualization and Analysis Platform for Ocean, Atmosphere, and Solar Researchers) ARWpost para desplegar salidas con GrADS (Gridded Analysis and Display System).

En el caso del presente estudio, fue utilizada la herramienta NCL, que es utilizada para calcular y graficar las salidas del modelo (en formato NetCDF).

### 3.1.1 Parametrizaciones físicas

En la atmósfera existen fenómenos que ocurren en una escala espaciotemporal muy pequeña, son muy complejos de resolver dinámicamente, o simplemente no existe a la fecha una manera dinámica para poder resolverlos. Los fenómenos como la turbulencia, los intercambios de momento, calor y vapor de agua, debido a que se dan en escalas espaciotemporales muy pequeñas, no pueden ser resueltos explícitamente por los modelos numéricos, pero puede tratar de determinarse su lugar y tiempo de ocurrencia y calcular su efecto promedio para cada una de las variables involucradas (viento, temperatura, vapor de agua, entre otras). A esto se

le llama parametrizar los procesos físicos, y se utiliza para estimar soluciones para procesos a escalas más pequeñas que la de la malla (Coiffier, 2011).

El modelo WRF posee una gama de esquemas de parametrizaciones físicas que se dividen en cinco categorías principales:

- **Microfísica.** Simula el intercambio de flujos dentro de la nube, flujos de vapor de agua, calor y humedad, da una solución implícita a la precipitación no convectiva. Los esquemas en el modelo son muy variados ya que van desde esquemas simplificados para experimentos idealizados (teóricos), hasta sofisticados esquemas multifase los cuales se emplean en estudios más complejos de los procesos microfísicos o experimentos reales.
- **Cúmulus.** Se encargan de simular el flujo de masa en fenómenos de mesoescala, resuelven la precipitación convectiva, las corrientes ascendentes y descendentes, el espesor de la nubosidad a escala de la malla, además de flujos de calor y humedad. Estas parametrizaciones se usan para mallas de más de 4 km de anchura de malla.
- **Física de superficie.** Se subdividen en esquemas de capa superficial y modelo de la superficie terrestre; van desde esquemas de modelos térmicos muy simples hasta los más complejos que incluyen cobertura vegetal, humedad del suelo, cubierta de nieve y hielo marino.

Los esquemas de capa superficial calculan la velocidad y los coeficientes de intercambio, los cuales permiten calcular los flujos de calor y humedad en superficie para los modelos de superficie terrestre y el estrés superficial en el esquema de capa límite planetaria. Regularmente cada esquema de capa superficial está ligado a uno de capa límite específico.

Los modelos de superficie terrestre (LSMs por su acrónimo en inglés) se encargan de calcular los flujos de calor y humedad en puntos sobre tierra, o sobre el hielo marino, a partir de los esquemas de información atmosférica provista por el esquema de capa superficial, forzamiento radiativo, precipitación forzada de los esquemas microfísica y cumulus, junto con

información interna sobre el estado de las variables y las propiedades de la superficie terrestre.

- **Física de la capa límite planetaria.** La capa límite planetaria (PBL por sus siglas en inglés) es responsable de los flujos verticales en escala de submalla, debido al transporte por remolinos en toda la capa. Cuando se activa un esquema de capa límite planetaria, el cálculo explícito de la difusión vertical se desactiva dejando que el esquema de capa límite planetaria realice los cálculos de este proceso. Además, este esquema se encarga de determinar los perfiles dentro de la capa de mezcla y la capa estable, ya que de esta manera calcula flujos de calor y momento horizontal en la atmósfera.
- **Radiación atmosférica.** Son encargados de proporcionar el calentamiento atmosférico debido a la divergencia del flujo radiativo y a la radiación de onda larga y corta para el balance de calor en el suelo. La radiación de onda larga incluye radiación infrarroja absorbida y emitida por gases atmosféricos y por la superficie. La radiación de onda corta incluye las longitudes de onda del espectro visible y sus circundantes, los cuales forman parte del espectro electromagnético.

### 3.1.2 Condiciones iniciales y de frontera

Esencialmente la modelación numérica es un problema de valores iniciales, los cuales se introducen en las ecuaciones. El estado de las variables dependientes debe ser especificado al inicio, previo a la integración numérica. Existen dos tipos de condiciones iniciales: estáticas y dinámicas. Las estáticas no proveen variables en movimiento como flujos verticales o circulaciones, ni transferencias de calor, momento, energía o masa, sino que son variables que pueden considerarse invariantes en el tiempo. Las dinámicas comúnmente provienen de un modelo de área mayor, que guía y asegura que las soluciones del modelo de área limitada sean parecidas a las del tiempo inicial del pronóstico (Warner, 2011).

En los modelos de área limitada, los valores de las variables dependientes deben especificarse en las fronteras laterales de las mallas computacionales, dentro de las mallas relativamente más gruesas de los modelos globales. Así, los problemas con

las condiciones de frontera deben tratarse con especial cuidado. Las condiciones de frontera deben considerar lo siguiente:

- Las condiciones meteorológicas deben extenderse de mallas más gruesas a las más finas sin que existan distorsiones significativas.
- Las ondas de inercia-gravedad deben propagarse a través de las fronteras, especialmente las de mayor longitud, las cuales están relacionadas con el ajuste geostrófico, ya que las de menor longitud pueden amortiguarse con el flujo de salida, pero no deben reflejarse.
- Las condiciones laterales de frontera no deben permitir retroalimentaciones dinámicas/numéricas artificiales entre las mallas que puedan producir una inestabilización del modelo y hacer que este no termine su integración de manera satisfactoria.

### 3.1.3 Datos ERA-Interim

El reanálisis ERA-Interim (Dee et al., 2011) es un producto generado por el Centro Europeo de Pronóstico Meteorológico a Mediano Plazo (ECMWF por sus siglas en inglés). Contiene datos de múltiples variables atmosféricas, de suelo y algunas oceánicas, entre las principales se encuentran: temperatura del aire, viento, precipitación, humedad, precipitación, altura geopotencial y temperatura de la superficie del mar. Este reanálisis toma una gran cantidad de datos observados que son filtrados por estrictos algoritmos de control de calidad y reconstruidos estadísticamente. Después los datos son interpolados a una malla uniforme mediante un modelo numérico que incorpora las ecuaciones de la dinámica atmosférica para producir una representación a largo plazo de las variables meteorológicas con cobertura global.

Contiene 125 variables y 37 niveles de presión (desde los 1000 hasta 100 hPa) con cobertura global en una malla longitud-latitud gaussiana de 512 x 256 puntos<sup>3</sup>. La disponibilidad temporal de los datos va del 1 de enero de 1979 al 10 de septiembre de 2019.

---

<sup>3</sup> <https://rda.ucar.edu/datasets/ds627.0/#!description> Consultada el 30/03/2020

### 3.1.4 Diseño de los experimentos numéricos

Se diseñaron múltiples experimentos numéricos con un solo dominio a 4 km de resolución, abarcando de 6.15 – 32.72° latitud norte y de 53.61 – 116.38° longitud oeste. Las características del dominio se muestran en la tabla 3.1:

Tabla 3.1: Características del dominio

<b>DOMINIOS</b>	<b>NÚMERO DE PUNTOS DE MALLA</b>		<b>RESOLUCIÓN</b>	<b>NIVELES</b>
<b>No.</b>	Puntos en X	Puntos en Y	km	no.
<b>1</b>	1513	688	4	51

La integración de los experimentos se realizó de forma mensual de inicio a fin del experimento con un periodo de *spin-off* de un día durante el periodo del 1 de junio – 30 de noviembre de 2015. El modelo fue configurado para que las salidas horarias. En la tabla 3.2 se muestran los esquemas de parametrización utilizados:

Tabla 3.2: Configuración física de los experimentos

<b>Referencia</b>	<b>No.</b>	<b>Esquema</b>
<b>WSM 6-Class</b>	6	mp_physics
<b>Rrtmg scheme</b>	4	ra_lw_physics
<b>Rrtmg scheme</b>	4	ra_sw_physics
<b>MM5 Monin-Obukhov scheme</b>	1	sf_sfclay_physics
<b>Noah land-surface model</b>	2	sf_surface_physics
<b>YSU scheme</b>	1	bl_pbl_physics
<b>Modifed Tiedtke scheme</b>	6	cu_physics

### 3.2 Evaluación estadística y calibración del modelo

Previamente a la utilización de un modelo con fines de investigación aplicada a fenómenos específicos, es estrictamente necesaria su evaluación con la finalidad de que este se encuentre bien calibrado para representar correctamente los fenómenos de interés. En este caso se generaron tres experimentos de prueba con distintas parametrizaciones de convección (Tabla 3.3).

Tabla 3.3: Esquemas de parametrización de cumulus para verificación del modelo.

Referencia	No.	Esquema
<b>Modifed Tiedtke scheme</b>	6	cu_physics
<b>Simplified Arakawa-Schubert scheme</b>	4	
<b>Grell 3D ensemble scheme</b>	5	

Para la evaluación del modelo, se emplearon una serie de métricas estadísticas a fin de cuantificar el error generado por las simulaciones respecto de datos observados, las cuales se detallan en el Anexo 1 (Warner, 2011).

### 3.3 Datos observados

Para la validación y comprobación de las simulaciones producto del modelo contra observaciones se utilizaron datos de 13 Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMAS) de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) para el mes de julio de 2019 (Tabla 3.4). Se utilizó esta fecha debido a que eran los datos disponibles en la base de datos pública de la CONAGUA además coincidir con el verano meteorológico, por lo que, en teoría al calibrar el modelo para este tipo de condiciones, debería representarlas adecuadamente en cualquier año. Las EMAS están distribuidas en distintos puntos del dominio (Fig. 3.4). La evaluación considera variables de temperatura (Temp), humedad relativa (HR) y velocidad del viento (VelV) para la mayoría de las estaciones a excepción de la denominada “C. Usumacinta” que únicamente fue considerada para evaluar la Precipitación (Precip) debido a que fue la única con datos de precipitación confiables, además de existían irregularidades en los registros de Temperatura para esta estación. Los criterios de selección de las estaciones fueron, que no hubiera datos faltantes durante el periodo analizado evitando que estos fueran reconstruidos con técnicas estadísticas disminuyendo la posible incertidumbre, también se tomó en cuenta que no existieran datos inconsistentes. Adicionalmente se usaron datos de Precipitación Infrarroja con estaciones del Grupo de Peligros Climáticos (CHIRPS por sus siglas en inglés) a 0.05° de resolución horizontal (Funk et al., 2015) considerados como una base de datos observacional con la finalidad de comparar la distribución espacial de esta variable.

Tabla 3.4: Lista de las Estaciones Meteorológicas Automáticas.

<b>ESTACIÓN</b>	<b>LATITUD</b>	<b>LONGITUD</b>	<b>ALTITUD (m)</b>
<b>01. APAN</b>	19.728	-98.466	2486
<b>02. APATZINGAN</b>	19.083	-102.372	282
<b>03. CALAKMUL</b>	18.365	-89.893	28
<b>04. C.BIOLOG.IPN</b>	19.440	-99.171	2262
<b>05. C. USUMACINTA</b>	17.290	-91.229	123
<b>06. MATAMOROS</b>	25.886	-97.519	4
<b>07. PARAISO</b>	18.423	-93.156	4
<b>08. PINOTEPA</b>	16.350	-98.053	195
<b>09. RIO LAGARTOS</b>	21.571	-88.160	5
<b>10. SAN FERNANDO</b>	24.843	-98.158	45
<b>11. SAN LUCAS</b>	22.881	-109.927	224
<b>12. TIZAPAN</b>	20.169	-103.044	1503
<b>13. TLAJOMULCO</b>	20.442	-103.419	1566

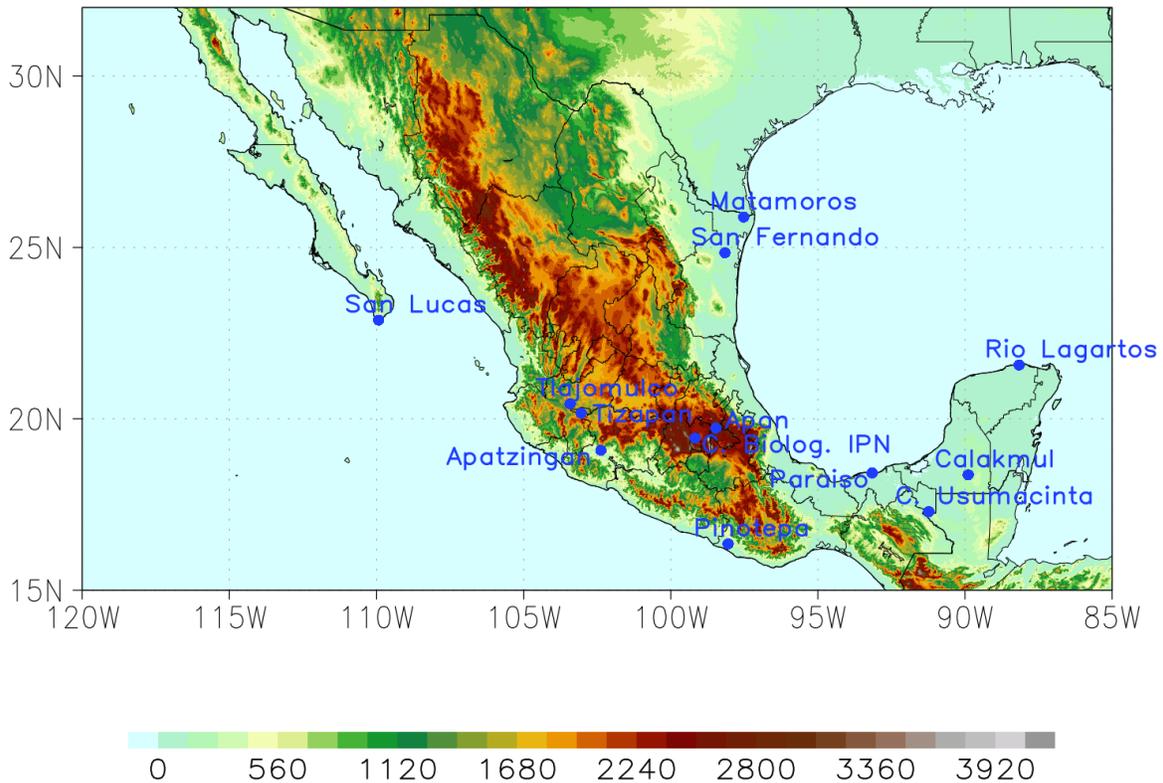


Figura 3.4: Distribución de las Estaciones Meteorológicas Automáticas

### 3.4 Resultados de la evaluación estadística del modelo

Los resultados de la evaluación estadística se presentan en las tablas (3.5 – 3.7) que se muestran a continuación, el mejor resultado para el BIAS se marca en verde, el mejor para el MAE en azul, para el Coeficiente de Correlación de Pearson (R) en amarillo y el RMSE en gris para cada experimento.

Tabla 3.5: Evaluación de la parametrización de Tiedke

Est.	Temperatura				Humedad Relativa				Velocidad del Viento			
	BIAS	MAE	R	RMSE	BIAS	MAE	R	RMSE	BIAS	MAE	R	RMSE
Calakmul	-1.21	1.71	0.94	1.98	2.60	6.65	0.92	8.93	15.72	15.72	0.34	16.07
Matamoros	0.47	1.52	0.82	2.01	-1.27	6.71	0.87	9.06	9.69	9.79	0.65	10.69
Paraíso	-0.21	1.01	0.88	1.36	-1.50	6.81	0.75	8.70	10.31	10.31	0.36	12.10
Pinotepa	-0.99	2.15	0.91	2.55	9.63	12.51	0.85	14.80	6.21	6.38	0.81	7.69
San Lucas	0.09	2.22	0.79	2.63	18.28	18.79	0.43	23.15	-0.65	8.43	0.56	9.99
Tizapan	-1.25	1.62	0.95	1.94	16.44	17.10	0.55	20.23	3.49	5.55	0.40	7.02
Tlajomulco	-1.44	2.16	0.95	2.53	12.47	12.74	0.84	15.51	2.63	4.45	0.65	5.99

Tabla 3.6: Evaluación de la parametrización de Arakawa - Schubert

Est.	Temperatura				Humedad Relativa				Velocidad del Viento			
	BIAS	MAE	R	RMSE	BIAS	MAE	R	RMSE	BIAS	MAE	R	RMSE
Apan	-0.68	2.86	0.92	3.46	13.24	16.78	0.74	21.43	-0.06	5.58	0.27	7.62
Biol. IPN.	-0.07	1.30	0.93	1.63	-2.18	14.03	0.64	16.66	1.53	5.51	0.08	6.71
Calakmul	-1.13	1.60	0.94	1.91	3.66	7.02	0.93	8.88	15.73	15.73	0.15	16.02
Matamoros	0.11	1.39	0.82	1.82	1.25	6.68	0.85	8.42	9.07	9.21	0.63	10.12
Paraíso	-0.16	1.11	0.86	1.41	-2.48	7.68	0.70	9.63	11.58	11.71	0.43	13.11
Pinotepa	-0.77	2.06	0.91	2.50	7.80	11.73	0.81	14.50	6.21	6.37	0.79	7.65
Tizapan	-0.93	1.51	0.94	1.88	16.11	16.72	0.61	19.51	2.65	5.11	0.36	6.52
Tlajomulco	-0.96	2.05	0.93	2.46	11.34	11.73	0.85	14.26	2.21	4.40	0.58	5.78

Tabla 3.7: Evaluación de la parametrización de Grell

Est.	Temperatura				Humedad Relativa				Velocidad del Viento			
	BIAS	MAE	R	RMSE	BIAS	MAE	R	RMSE	BIAS	MAE	R	RMSE
Apan	0.40	2.26	0.96	2.60	12.33	41.51	0.62	14.51	0.05	4.91	0.35	8.00
Apatzingan	0.91	3.92	0.82	3.17	12.70	17.13	0.65	18.69	0.55	7.06	0.28	7.95
Calakmul	0.01	1.24	0.95	1.69	4.04	7.03	0.93	7.80	7.32	13.21	0.55	9.42
Matamoros	0.04	2.22	0.89	2.62	1.17	6.24	0.80	9.63	8.02	9.13	0.68	11.74
Paraíso	-0.17	1.83	0.87	3.34	-2.40	9.04	0.72	9.79	10.69	16.79	0.31	11.75
Pinotepa	-0.97	3.99	0.82	3.92	7.22	14.99	0.80	16.72	5.27	6.60	0.80	8.13
Tizapan	0.38	5.83	0.62	6.72	8.43	16.71	0.65	17.59	5.98	8.80	0.73	9.83
Tlajomulco	-0.92	2.43	0.94	1.19	15.28	24.91	0.65	21.88	4.74	5.76	0.12	8.33

En el caso particular de la precipitación solo se evaluó para la estación de la Cuenca del Río Usumacinta (Tabla 3.8) debido a que en ninguna otra estación se encontraron datos suficientemente aceptables para poder ser considerados. Los resultados se presentan como una comparación entre las tres parametrizaciones. En verde se muestra el menor valor de BIAS, en azul para el menor error de MAE, para el Coeficiente de Correlación de Pearson (R) se marca el mayor valor en amarillo y para le RMSE el menor valor en gris.

Tabla 3.8: Evaluación estadística de la precipitación para la estación de la Cuenca del Río Usumacinta

C. Usumacinta					
Tiedke	Precip	Arakawa	Precip	Grell	Precip
BIAS	-0.0001261	BIAS	0.028	BIAS	0.15
MAE	0.039	MAE	0.064	MAE	0.394
R	0.066	R	0.137	R	0.02
RMSE	0.326	RMSE	0.341	RMSE	0.359

Para obtener una evaluación de la distribución espacial de la precipitación se utilizó el sesgo entre la precipitación simulada y la observada por CHIRPS. Los resultados se muestran en las figuras de la 3.5 a la 3.7, obteniendo la mejor aproximación con la parametrización de Tiedke (Fig. 3.7). Así mismo se realizó el cálculo de la Correlación de Pearson entre la precipitación simulada y CHIRPS obteniendo valores de 0.61 para Arakawa – Schubert, 0.67 para Grell y 0.68 para Tiedke, siendo esta última la que obtuvo una mayor correlación.

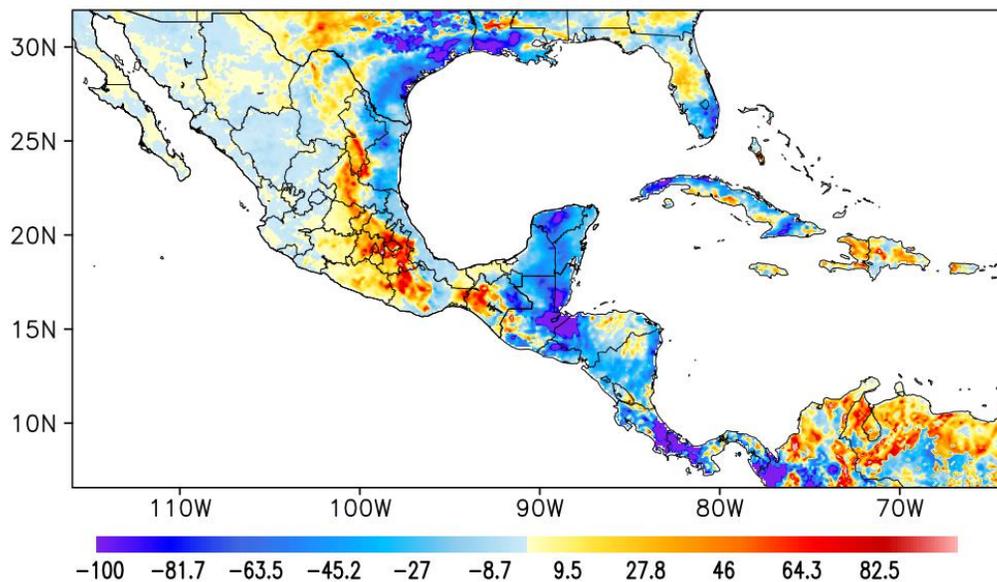


Figura 3.5: Sesgo entre precipitación simulada por WRF y CHIRPS para el experimento con la parametrización Arakawa - Schubert.

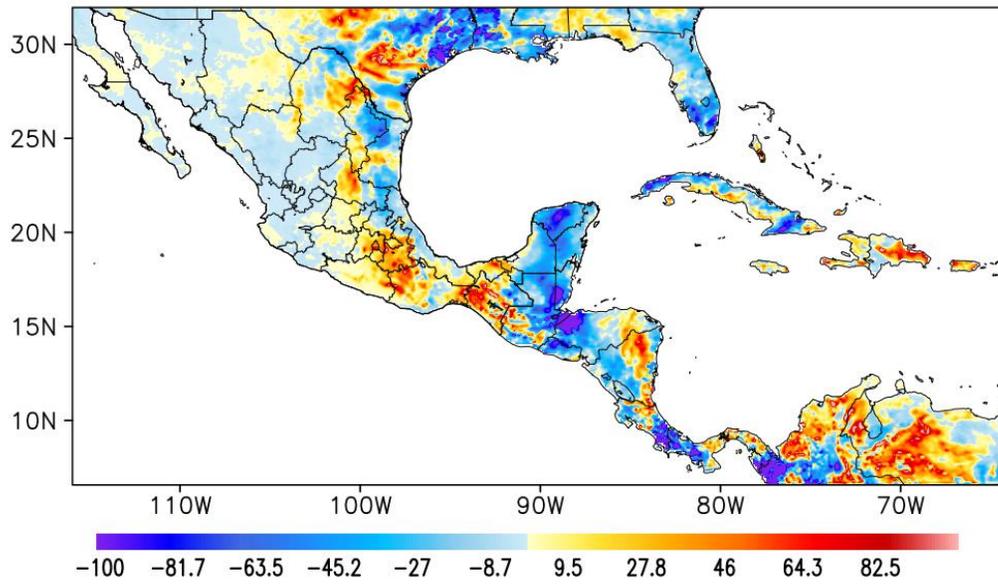


Figura 3.6: Igual que en 3.5 pero para el experimento con la parametrización Grell 3D

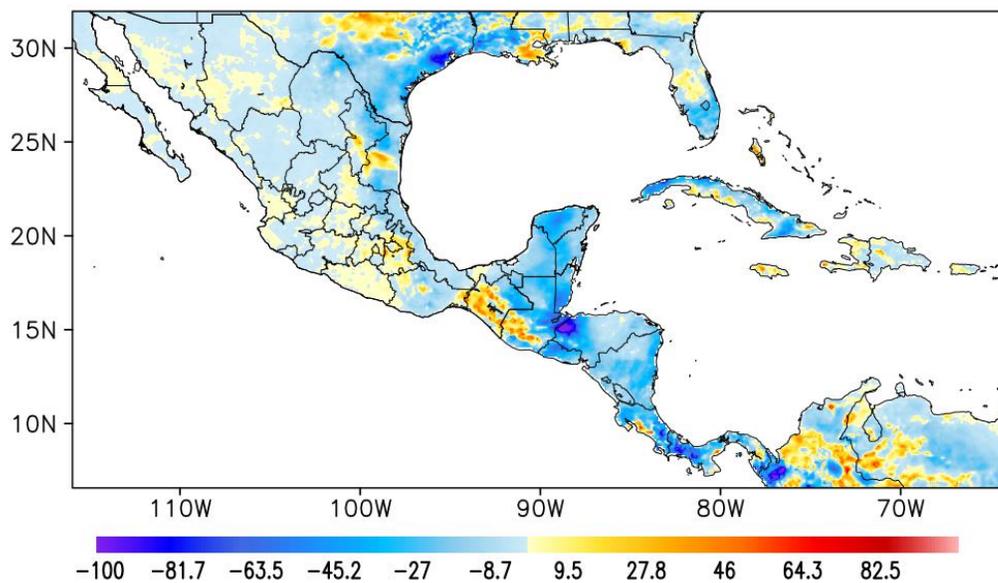


Figura 3.7: Igual que en 3.5 pero para el experimento con la parametrización de Tiedke

## 4 Resultados

Para contabilizar el número de ondas para el periodo de estudio (junio – noviembre de 2019) se realizó un análisis exhaustivo de las cartas sinópticas de superficie de la NOAA en intervalo de tres horas. A partir de estos datos se determinó la cantidad mensual de Ondas Tropicales que afectan México y se determinó el periodo de afectación de cada una de ellas. Posteriormente se realizaron simulaciones mensuales con el modelo WRF verificando la habilidad de este para reproducir la temporalidad y patrones espaciales de estos fenómenos en el área de estudio.

Con la finalidad de identificar más fácilmente los patrones espaciales de las Ondas Tropicales del Este se utilizaron distintas variables que fuesen útiles como trazadoras del fenómeno y pudieran representar las características dinámicas, térmicas y espaciales de este para con ello posteriormente analizarlas más a detalle cada onda particular y encontrar al menos una variable con la que se pueda delimitar una zona de influencia promedio de las ondas del este para el periodo de estudio. Las variables que se utilizaron para la representación de las Ondas del Este en la horizontal a 700 hPa. (G. Berry et al., 2007) fueron la Temperatura de Punto de Rocío, Temperatura Potencial Equivalente (Davison, 1999), humedad específica y vorticidad relativa. Estas variables también se analizaron en la vertical para verificar la estructura vertical de las Ondas Tropicales del Este. A continuación, en la sección 4.3 se muestra la comparación de un esquema teórico con los patrones obtenidos a partir de simulaciones numéricas, así como diagramas de Hovmöller que muestran el avance longitudinal del fenómeno en el tiempo y que permiten corroborar el número de ondas cuantifica. Adicionalmente se presenta un caso (periodo del 2 al 8 de julio de 2015) en la sección 4.4 donde se demarcan adecuadamente los argumentos teóricos asociados a las Ondas Tropicales del Este a partir de las distintas variables ya mencionadas.

### 4.1 Número de Ondas Tropicales

De acuerdo con datos del CENAPRED, la climatología mensual de Ondas Tropicales del Este (2006 – 2015) las ondas comienzan a manifestarse durante el mes de mayo, tienen un pico máximo en el número de sistemas que llegan a México

en julio y vuelven a un mínimo en octubre, con el que termina su ciclo anual, pero de acuerdo con lo observado a partir del análisis de cartas sinópticas de superficie de la NOAA, estas pueden extenderse hasta noviembre, tal es el caso del año 2015, que se analiza en el presente estudio, en que las ondas comenzaron a influir sobre México a partir de junio y la última se registró en noviembre (Fig. 4.1).

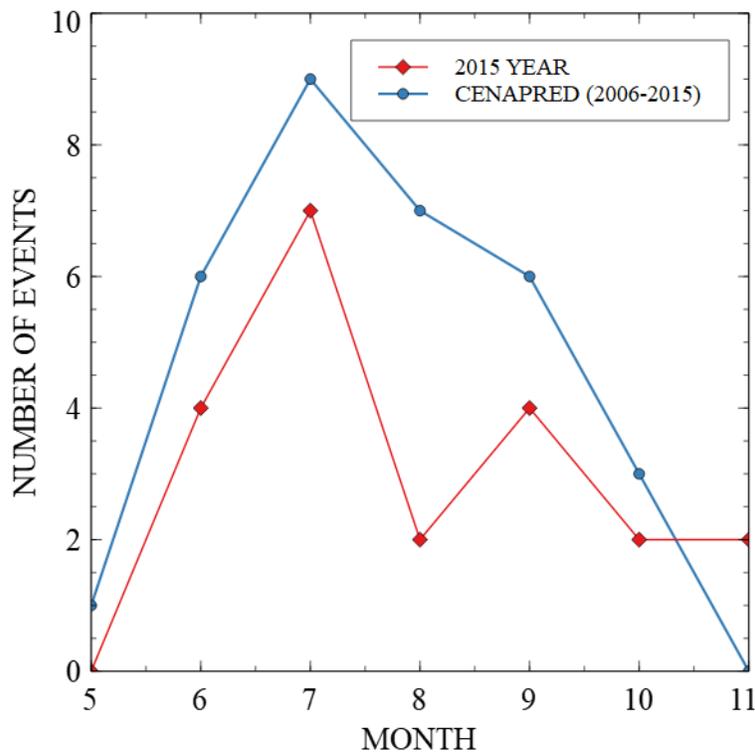


Figura 4.1: Variabilidad mensual de Ondas Tropicales que entraron a México durante el periodo 2006 - 2015 (azul) y en el año 2015 (rojo)

Así mismo para el año de estudio, el CENAPRED reporta que entraron a México un total de 44 Ondas Tropicales, de las cuales a partir del Análisis de Cartas Sinópticas trihorarias de la NOAA, solo pudieron registrarse 21 en el periodo junio – noviembre de 2015. Este año según el CENAPRED es considerado como uno de los picos máximos en el número de Ondas del Este, superando por mucho a la media histórica que es de 32, pero derivado del análisis exhaustivo y detallado de observaciones (cartas sinópticas) nos damos cuenta de que la cantidad de Ondas Tropicales que entraron a México fue inferior a la media. Muy probablemente esta discrepancia pudo ocurrir debido a que fue asumido de forma errónea por parte del organismo, que todas las ondas de un periodo entraron al menos parcialmente a la

república mexicana, de esta manera incluso pudieron contabilizar Ondas Tropicales que no hayan tocado el país. Otra posible explicación es que, por la baja cantidad de datos observados en México, Centroamérica y el Caribe, las cartas sinópticas cuentan con menor cantidad de información, por lo que pueden no estar capturando ondas débiles.

En la tabla siguiente (Tabla 4.1) se muestra la cantidad de ondas mensuales derivado del análisis de las cartas sinópticas de la NOAA para el periodo junio – noviembre de 2015, así como las fechas de inicio a fin y cantidad de días en que tuvieron influencia sobre la república mexicana.

Tabla 4.1: Tabla de duración temporal para cada caso particular de Onda Tropical en el periodo junio – noviembre de 2015

<b>JUNIO</b>	<b>Día inicial</b>	<b>Hora Inicial</b>	<b>Día Final</b>	<b>Hora Final</b>	<b>Días</b>
<b>Caso 1</b>	15	13	16	19	1.25
<b>Caso 2</b>	18	16	21	18	3.08
<b>Caso 3</b>	23	11	28	21	5.41
<b>Caso 4</b>	29	06	01-JUL	19	2.54
<b>JULIO</b>	<b>Día inicial</b>	<b>Hora Inicial</b>	<b>Día Final</b>	<b>Hora Final</b>	<b>Días</b>
<b>Caso 1</b>	03	21	04	22	1.04
<b>Caso 2</b>	04	17	05	13	0.83
<b>Caso 3</b>	06	09	07	15	1.25
<b>Caso 4</b>	11	09	12	20	1.46
<b>Caso 5</b>	15	13	19	07	3.75
<b>Caso 6</b>	20	23	23	16	2.71
<b>Caso 7</b>	25	13	29	17	4.16
<b>AGOSTO</b>	<b>Día inicial</b>	<b>Hora Inicial</b>	<b>Día Final</b>	<b>Hora Final</b>	<b>Días</b>
<b>Caso 1</b>	02	06	05	15	3.37
<b>Caso 2</b>	16	19	23	11	6.66
<b>SEPTIEMBRE</b>	<b>Día inicial</b>	<b>Hora Inicial</b>	<b>Día Final</b>	<b>Hora Final</b>	<b>Días</b>
<b>Caso 1</b>	01	19	03	21	2.083
<b>Caso 2</b>	09	20	10	21	1.04
<b>Caso 3</b>	16	09	17	15	1.25
<b>Caso 4</b>	18	16	20	06	1.58
<b>OCTUBRE</b>	<b>Día inicial</b>	<b>Hora Inicial</b>	<b>Día Final</b>	<b>Hora Final</b>	<b>Días</b>
<b>Caso 1</b>	15	13	17	15	2.08

<b>Caso 2</b>	22	15	28	11	5.83
<b>NOVIEMBRE</b>	<b>Día inicial</b>	<b>Hora Inicial</b>	<b>Día Final</b>	<b>Hora Final</b>	<b>Días</b>
<b>Caso 1</b>	06	19	09	07	2.50
<b>Caso 2</b>	14	07	15	23	1.67

#### **4.2 Condiciones sinópticas predominantes**

Las Ondas Tropicales del Este, al ser sistemas de Baja Presión, su trayectoria es modulada por los cambios y variaciones de los grandes anticiclones a escala interanual, esto determina a su vez en qué medida las ondas pueden viajar en latitudes más al norte o más al sur dependiendo de estos grandes sistemas.

El Servicio Meteorológico Nacional del México (SMN) proporciona información sobre factores que intervienen en el clima, esto lo hace de forma mensual y anual en los llamados “Reportes del Clima en México”. Debido a la importancia que el Anticiclón del Atlántico Norte (NASH) tiene en el clima de México a causa de que suele modular las trayectorias de Ondas Tropicales del Este y de los Ciclones Tropicales, el SMN lo mantiene en monitoreo continuo durante el verano meteorológico.

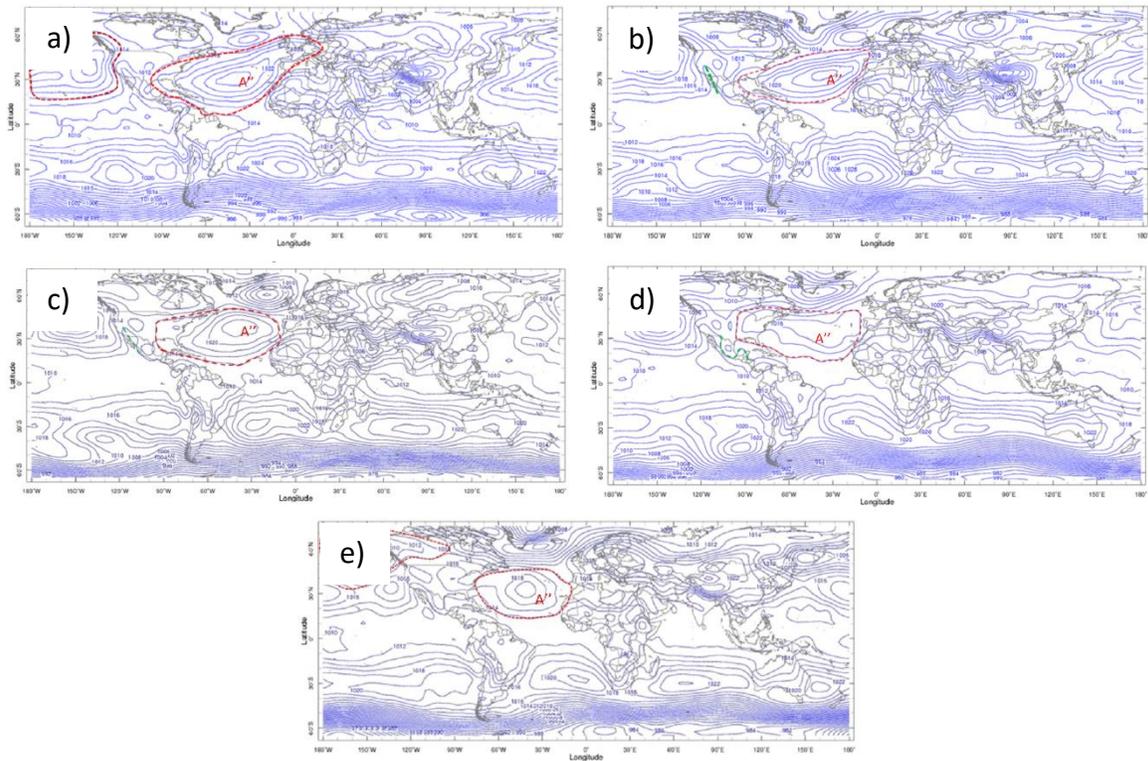


Figura 4.2: Posición del Anticiclón del Atlántico Norte (A'') en 2015 para: a) junio, b) julio, c) agosto d) septiembre y e) octubre de 2015

Durante los meses de junio a agosto de 2015 (Fig. 4.2 a – c), la circulación del Anticiclón del Atlántico Norte se extendió desde los 10° - 50° N propiciando el desplazamiento del núcleo de las Ondas Tropicales del Este sobre el Sur y Sureste de México principalmente el junio y julio, mientras que para septiembre el reforzamiento de la circulación anticiclónica produjo que dicho núcleo viajara más al sur fuera de México. Estas condiciones permitieron el reforzamiento de la sequía en el norte del país (CONAGUA, 2016c) (CONAGUA, 2016b)(CONAGUA, 2016a).

Para septiembre (Fig. 4.2 d) el Anticiclón del Atlántico Norte tuvo un progresivo debilitamiento favoreciendo que el núcleo de las Ondas Tropicales viajara cerca de los 15°N (CONAGUA, 2016e) aportando humedad hacia la república, sin embargo, esto no tuvo un impacto excesivamente anómalo en la humedad muy probablemente debido a la interacción con el Jet de Bajos Niveles del Caribe (CLLJ). Pese a esto, los acumulados de precipitación así mismo comenzaron a aumentar ligeramente.

En octubre (Fig. 4.2 e) el Anticiclón del Atlántico norte continuó debilitándose disminuyendo su extensión y desplazándose hacia el norte permitiendo así que el núcleo de las Ondas Tropicales del Este se propagara cerca de los 20°N interaccionando con la convección local e incrementando el transporte de humedad de océano a continente (CONAGUA, 2016d). Producto de esto, hubo un incremento en los acumulados de precipitación sobre el Sureste, Oriente y Noreste de México.

### 4.3 Estructura horizontal y vertical de las Ondas Tropicales del Este

La estructura tanto horizontal como vertical de las Ondas del Este ha sido ya ampliamente documentada, como se ha mostrado en el subcapítulo 1.2 del presente trabajo, pero esto se ha realizado en su desplazamiento sobre el Atlántico tropical y principalmente el mar abierto. Por ello, el objetivo de esta sección es mostrar la estructura de las Ondas Tropicales del Este una vez que estas se encuentran interaccionando sobre la zona del Caribe, Golfo de México y áreas continentales mexicanas. Así mismo se identificarán algunos patrones clásicos de las Ondas del Este, tales como las características dinámicas y termodinámicas típicas, como el viento horizontal y vertical, su periodicidad y humedad específica.

En una onda del este típica, la mayor curvatura y zona más energética se encuentra a los 700 hPa, tal como se comentó en el capítulo de antecedentes. A continuación, se presenta el caso de una onda de gran extensión simulada sobre el Caribe en comparación con el diagrama ideal del fenómeno (Fig. 4.3).

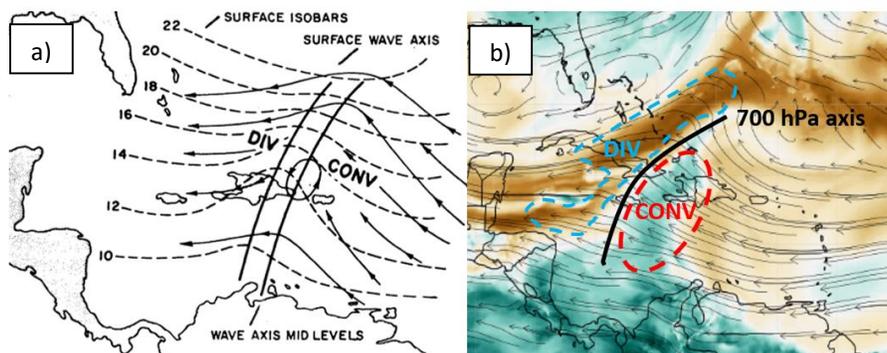


Figura 4.3: a) Esquema ideal de una OT (Tomado de Carlson & Lee, 1978). Isobaras de superficie (líneas punteadas), distribución de divergencia (DIV) y convergencia (CONV) en superficie, eje de la onda en superficie y en altura (líneas continuas) y líneas de corriente de 3000 4000 m. b) Esquema ideal reconstruido a partir del modelo WRF. Distribución de convergencia (CONV rojo) y Divergencia (DIV azul), eje de la onda en 700 hPa (línea continua negra) y líneas de corriente a 700 hPa

La simulación reproduce de forma muy precisa el flujo de viento, el eje de la Onda aproximado a partir de la humedad específica y la distribución de las zonas de convergencia y divergencia igualmente extrapoladas a partir de la distribución espacial de la humedad específica debido a su particular característica como trazador de este tipo de fenómenos.

En cuanto a la vertical, se compara el diagrama vertical transversal idealizado con una sección transversal que corta a una Onda Tropical en su sección central generada a partir de una simulación del modelo WRF (Fig. 4.4).

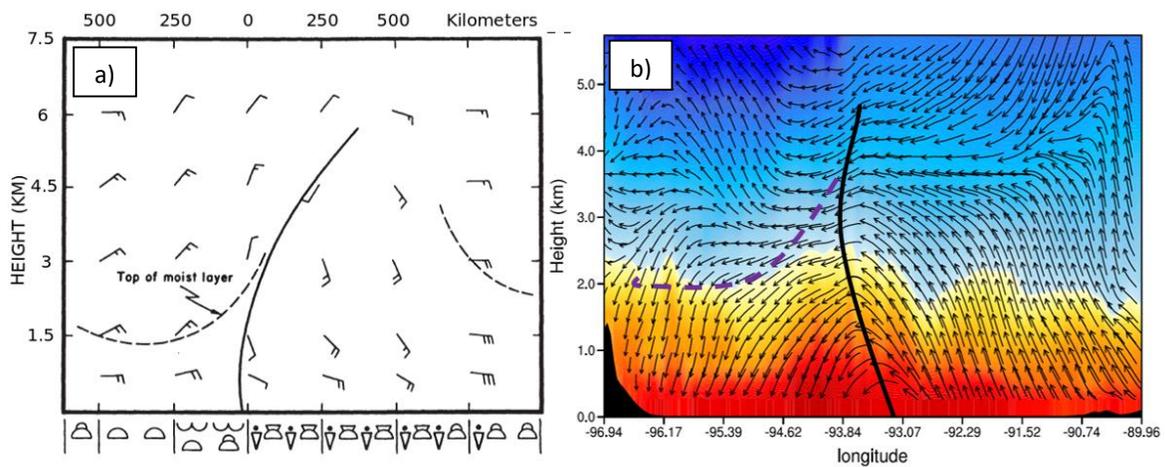


Figura 4.4: a) Diagrama ideal de una OT (Tomado de Carlson & Lee, 1978) en la vertical de 0 a 7.5 km. b) Sección transversal de una Onda Tropical sobre el Golfo de México. La línea continua negra representa el eje de la onda.

Otro aspecto importante de este tipo de oscilaciones es que al ser ondas tienen un periodo, este varía dependiendo del mes y la cantidad de eventos ocurran. Para poder caracterizar esta variable se realizaron diagramas de Hovmöller probando por distintas latitudes ( $15^\circ$ ,  $17.5^\circ$ ,  $18^\circ$  y  $21^\circ$  N) siempre cuidando el intervalo en que se encuentra México. Tras un breve análisis se eligió  $18^\circ$  N debido a que las ondas que llegan a México con mayor intensidad se marcan más claramente en esa latitud, esto debido a que, a causa de la fuerza de Coriolis, en esta zona las ondas que impactan el país viajan ligeramente más al norte. El periodo típico ronda los 3 – 4 días entre ondas, sin embargo, durante su temporada pico anual, este puede llegar a decrecer hasta 2 días entre ondas (Fig. 4.5 a) y tiende a ser mayor en los meses en que suceden menor cantidad de eventos, tal es el caso de agosto, octubre y

noviembre (Fig. 4.5 b-d) en que el periodo puede decaer hasta intervalos de 6 a 8 días. Derivado de estas observaciones puede establecerse que el periodo de las Ondas Tropicales del Este en el occidente de la cuenca del Atlántico es de 4 más/menos 2 días.

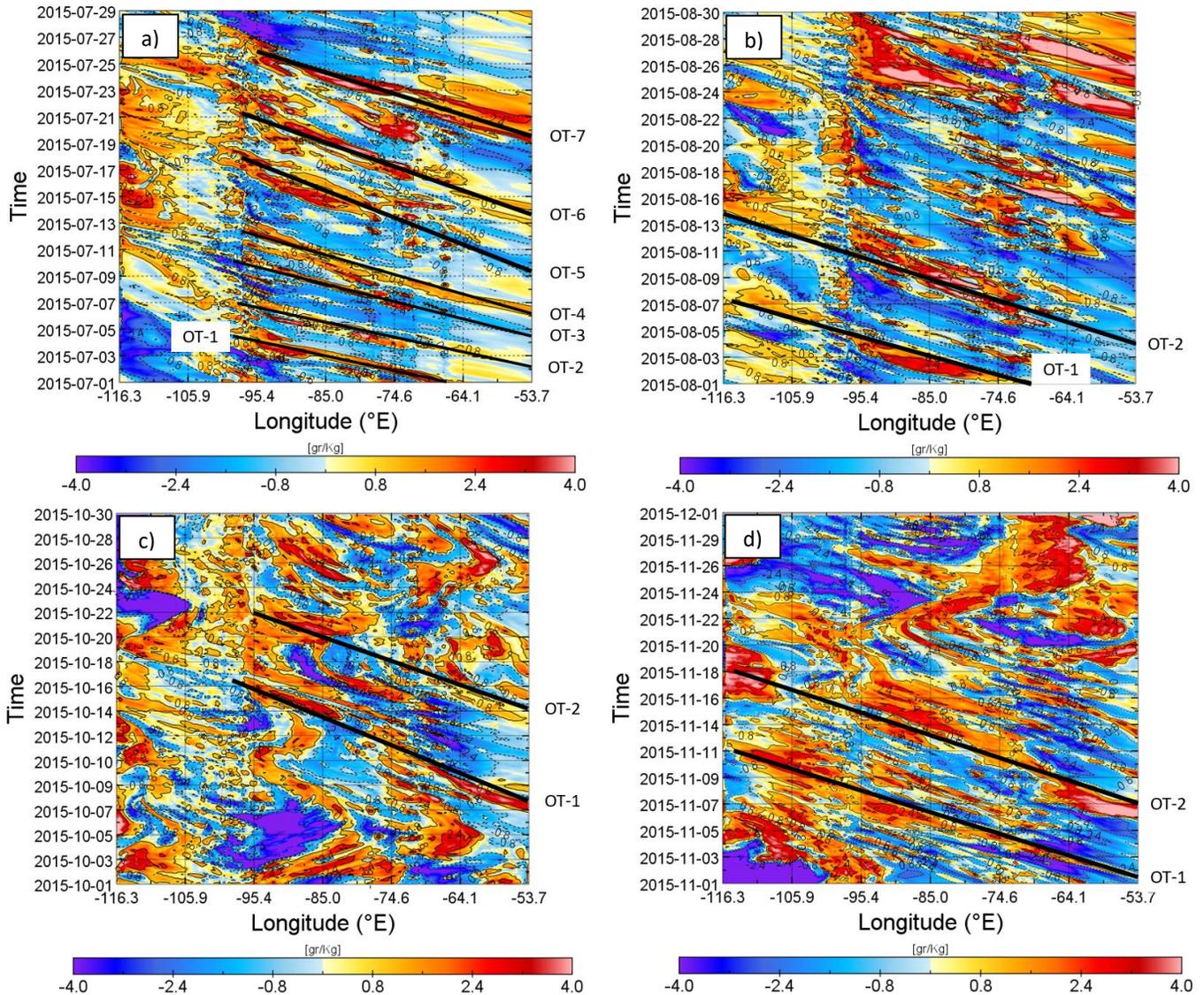


Figura 4.5: Diagramas de Hovmöller de la anomalía de humedad específica a una latitud de 18° N para los meses: a) Julio, b) Agosto, c) Octubre, d) Noviembre.

#### 4.4 Análisis Previo a la entrada de una Onda Tropical

Para el análisis previo a la entrada de una Onda Tropical se toma la fecha del 2 de julio de 2020 a las 7Z. Hacia el país comienzan a notarse los efectos de la parte anterior al sistema, lo que tiende a producir ambientes estables y secos en niveles bajos a lo largo de la zona principalmente afectada por este tipo de fenómenos, que son el sureste, oriente y noreste de México. Los patrones secos a menudo se asocian con aire descendente de niveles superiores hacia niveles inferiores de la atmósfera y es consistente con la teoría de las Ondas Tropicales del Este en las que, debido a su estructura, al este del eje de esta existe ascenso de aire por convección y al oeste subsidencia.

Este patrón de subsidencia puede apreciarse en las variables que se asocian principalmente a la humedad y la termodinámica del sistema, como la temperatura de punto de rocío ( $Td$ ), Humedad Específica ( $qe$ ) y Temperatura Potencial Equivalente ( $\theta_e$ ).

En la imagen (Fig. 4.6 a) se muestra delimitado en colores azul intenso a morados la configuración asociada al patrón de subsidencia seco en la variable  $Td$ . La  $qe$  también muestra valores bajos hacia la zona delimitada por cafés más oscuros (Fig. 4.6 b) que es coincidente con la zona de subsidencia de la Onda Tropical. Este patrón también es bien delimitado por la  $\theta_e$  que muestra un patrón claramente delimitado en color azul intenso que indica aire relativamente más frío y seco en la parte subsidente (Fig. 4.6 c). La vorticidad relativa muestra valores bajos (vorticidad negativa) en la zona correspondiente al oeste del eje de la onda, lo que es consistente con las variables anteriores denotando estabilidad en la zona y descenso de aire relativamente más frío y seco.

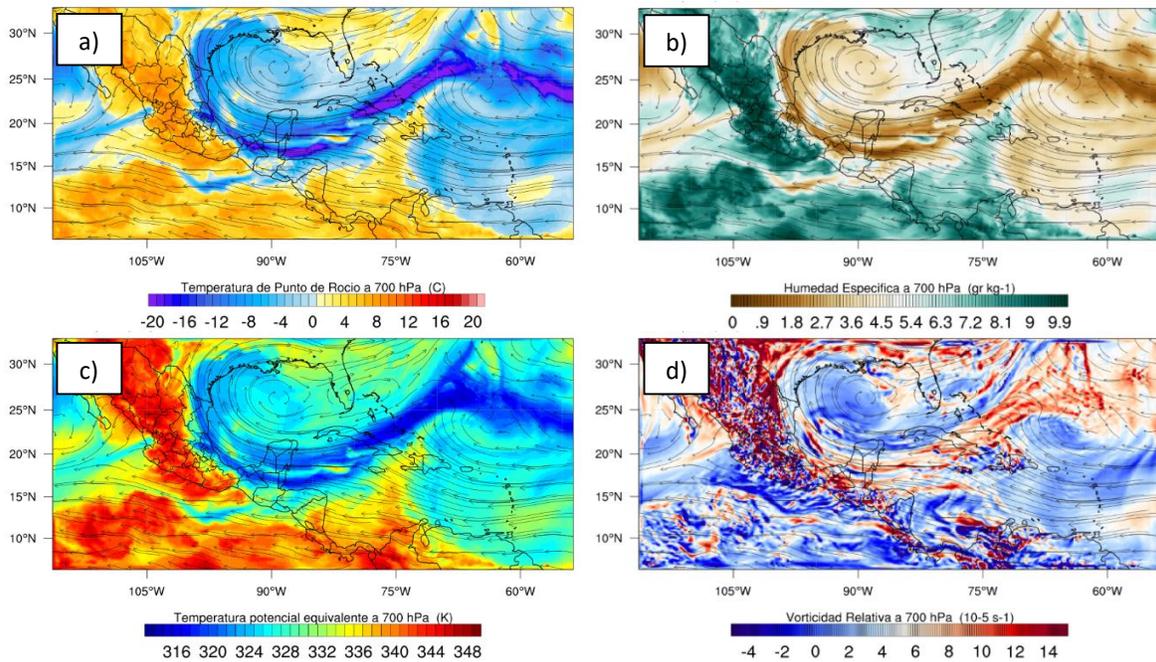


Figura 4.6: a) Temperatura de punto de rocío a 700 hPa ( $^{\circ}\text{C}$ ) para el 02/07/2015 a las 07Z. b) Humedad Específica a 700 hPa ( $\text{gr kg}^{-1}$ ). c) Temperatura Potencial Equivalente a 700 hPa (K). d) Vorticidad Relativa a 700 hPa ( $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ).

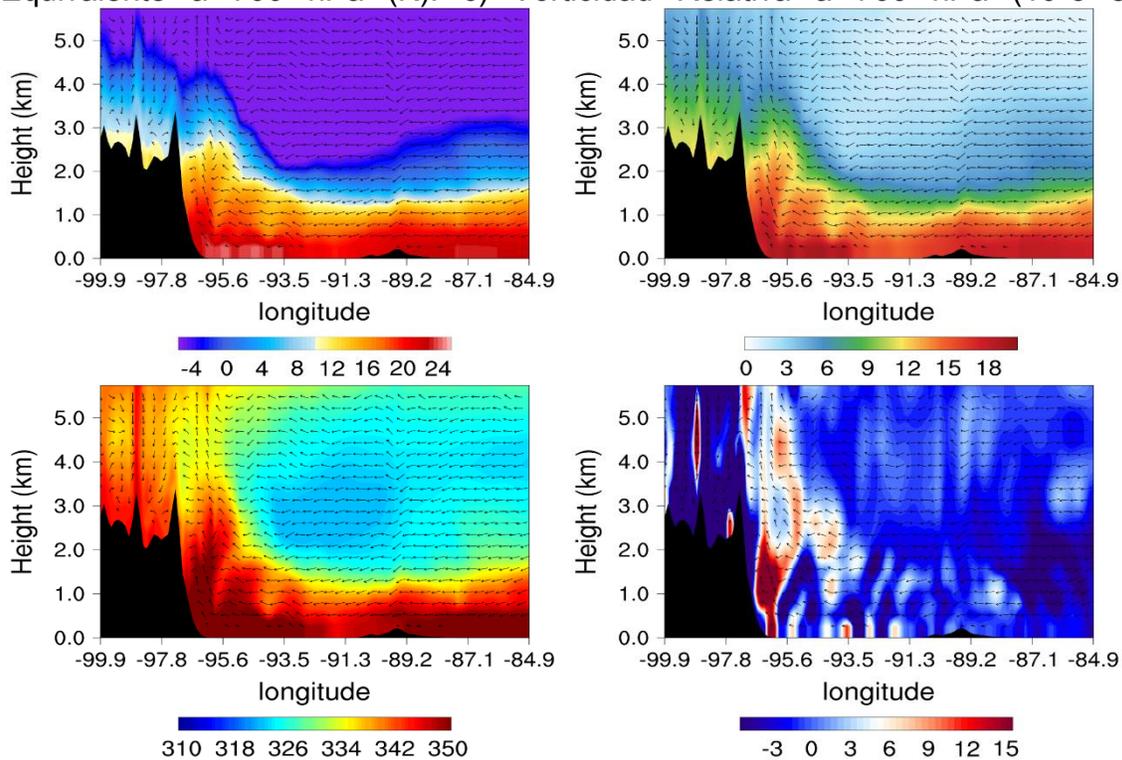


Figura 4.7: Secciones verticales desde superficie a 6 Km sobre  $19^{\circ}\text{N}$  y  $85 - 100^{\circ}\text{W}$  para el 01/07/2015 a las 05Z de: a) Temperatura de punto de rocío ( $^{\circ}\text{C}$ ), b) Humedad específica ( $\text{gr Kg}^{-1}$ ), c) Temperatura potencial equivalente (K), d) Vorticidad relativa ( $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ).

Sobre la zona del Golfo de México y el Caribe Mexicano previo al paso de una Onda Tropical (01 de julio de 2020 a las 05Z) las condiciones prevalecen estables, la temperatura de punto de rocío (Fig. 4.7 a) y la temperatura potencial equivalente (Fig. 4.7 c), así como la humedad específica (Fig. 4.7 b) se mantienen máximas en alturas cercanas a la superficie. Esto que indica que la humedad no está siendo transportada desde la superficie hacia niveles medios y altos a excepción de la zona donde la Sierra Madre Oriental colinda con el Golfo de México. En esa zona, las masas de aire se aceleran verticalmente a causa de la interacción con la orografía, muestra de eso es que la componente vertical de la vorticidad relativa (Fig. 4.7 d) indica valores máximos en esta zona, mientras que el resto de la región presenta valores negativos de esta variable.

#### **4.5 Análisis de la Onda Tropical sobre México**

Una vez que la Onda Tropical ha avanzado hacia continente y se encuentra sobre México (5 de julio de 2015 a las 02Z para el caso de los planos horizontales), interactuando con el Golfo de México y gran parte de las regiones Oriente, Centro – Sur, Centro – Norte, suroeste y noreste. Las variables con las que se puede apreciar de mejor forma la zona de influencia horizontal de la Onda Tropical son las relacionadas con las características termodinámicas, es decir las dependientes del calor y la humedad (temperatura de punto de rocío, humedad específica y temperatura potencial equivalente). En estas se aprecia la distribución de la masa de aire cálido y húmedo que trae consigo la Onda Tropical. Las regiones principalmente afectadas son el Oriente, Suroeste, Centro – Sur y Centro - Norte (Fig. 4.8 a-c). La vorticidad relativa por su parte es un trazador fiable de la Onda Tropical mientras esta se encuentra en océano abierto, mientras que, sobre continente y especialmente sobre México, con su escarpada orografía, esta variable tiende a presentar grandes variaciones en espacios horizontales cortos. A pesar de esto, continúa siendo un buen trazador de la Onda Tropical sobre el Golfo de México, donde se puede apreciar la zona de vorticidad positiva asociada a convección, así como la zona de vorticidad negativa que se asocia a la subsidencia (Fig. 4.8 d).

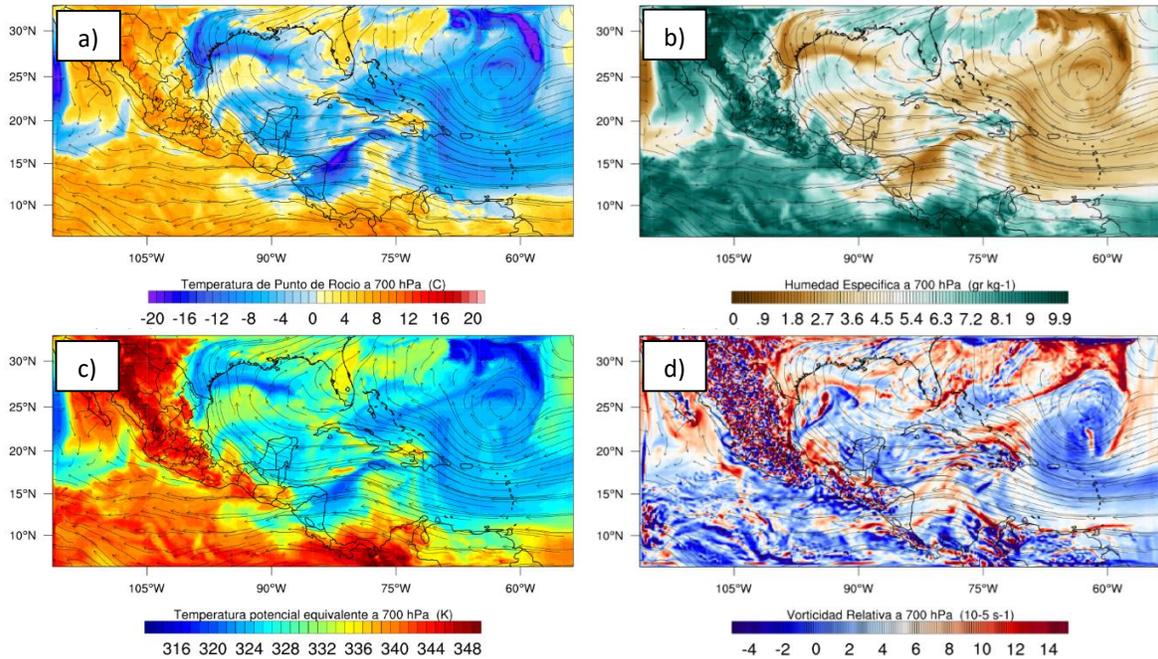


Figura 4.8: a) Temperatura de punto de rocío a 700 hPa ( $^{\circ}\text{C}$ ) para el 05/07/2015 a las 02Z. b) Humedad Específica a 700 hPa ( $\text{gr kg}^{-1}$ ). c) Temperatura Potencial Equivalente a 700 hPa (K). c) Vorticidad Relativa a 700 hPa ( $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ).

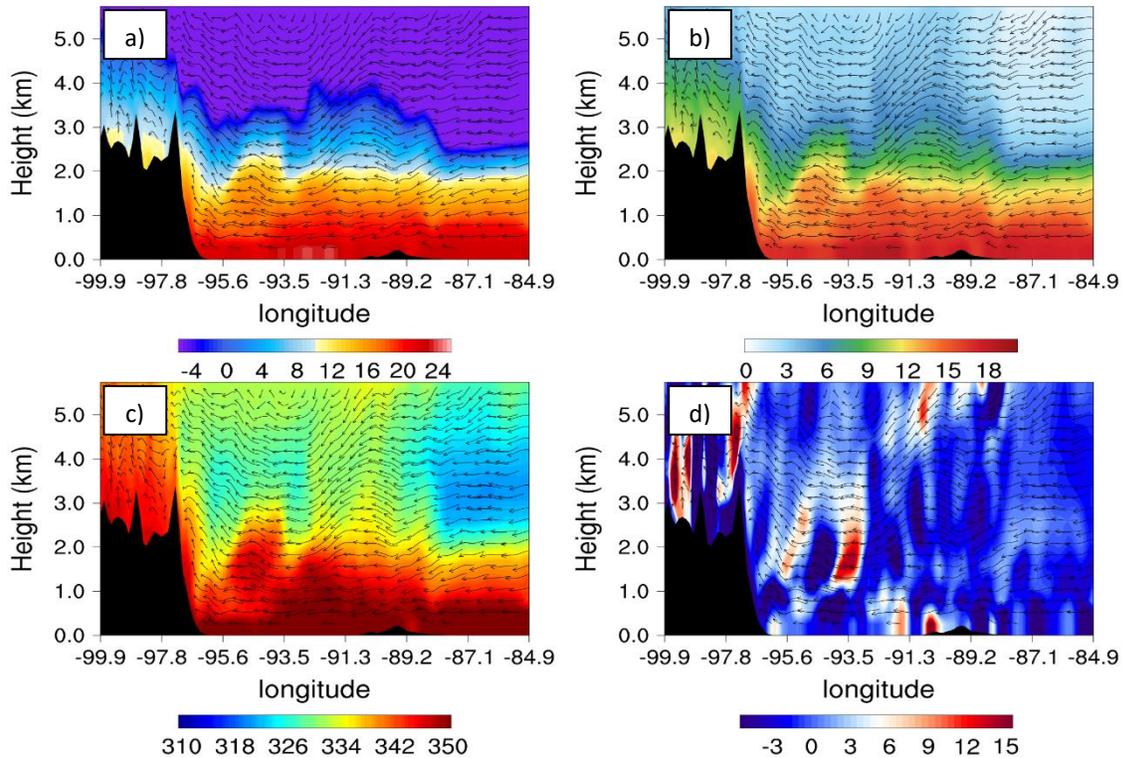


Figura 4.9: Secciones verticales desde superficie a 6 Km sobre  $19^{\circ}\text{N}$  y  $85 - 100^{\circ}\text{W}$  para el 06/07/2015 a las 02Z de: a) Temperatura de punto de rocío ( $^{\circ}\text{C}$ ). b) Humedad

específica ( $\text{gr kg}^{-1}$ ). c) Temperatura Potencial Equivalente (K). d) Vorticidad Relativa respecto del eje zonal ( $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ).

A fin de comparar la evolución temporal en la vertical de las características de una Onda Tropical se obtuvieron cortes transversales para la misma sección que en el subcapítulo anterior. En el análisis previo al paso de una Onda Tropical se presentaban condiciones de relativa estabilidad en donde no se presentaba convección ni transporte de vapor de agua desde superficie hacia altura sobre la porción marítima en el corte transversal y el transporte se daba únicamente por forzamientos mecánicos. Al paso de una onda Tropical (6 de julio de 2015 a las 02Z para los cortes transversales), debido a sus propiedades dinámicas y termodinámicas, hacia el este produce convección eficiente que transporta humedad hacia niveles medios de la atmósfera, por lo que su calor latente es alto, mientras tanto al oeste se produce subsidencia del viento generando estabilidad. Adicionalmente es relevante agregar que el comportamiento ondulatorio del fenómeno es evidente en los vectores de viento (Figs. 4.9 a – c). En cuanto a la vorticidad es muy notoria la zona de máximos asociados a la convección en la Onda Tropical al este del eje de la onda seguida de una zona con valores negativos de vorticidad asociada a subsidencia (Fig. 4.9 d). También son notorios máximos y mínimos de vorticidad asociados al ascenso y descenso mecánico de las masas de aire en las zonas montañosas debido a la interacción con la orografía. Estos ascensos y descensos de viento también producen transporte de vapor de agua y calor en la vertical a partir de calentamiento por expansión de las masas de aire (Figs. 4.9 a y b).

#### **4.6 Análisis posterior al paso de una Onda Tropical**

Posterior al paso de la Onda Tropical (8 de julio de 2015 a las 17Z para los casos horizontales) lo que intenta mostrarse es que en los patrones espaciales ya no se aprecia alguna señal relacionada al fenómeno, si no que más bien parecen obedecer a condiciones locales – regionales. Los valores de humedad específica, temperatura de punto de rocío y temperatura potencial equivalente disminuyen, esto debido a la disminución de calor latente asociado a la condensación inherente a este tipo de fenómenos. Los valores de humedad sobre el centro del país

prevalecen elevados, al igual que los de las variables relacionadas con el vapor de agua ( $Td$  y  $\theta_e$ ), mientras que, sobre las costas, la respuesta tanto de la entrada como del decaimiento del fenómeno tienen una respuesta mucho más rápida (Fig. 4.10). La respuesta tardía hacia zonas más continentales del país podría deberse principalmente a la orografía escarpada de las Sierras Madre Oriental, Occidental, del Sur, de Chiapas y la Faja Volcánica Transmexicana que interaccionan con el vapor de agua generando procesos de compresión y expansión de las masas de aire por ascenso y descenso, siendo cada vez más dominantes los procesos de mesoescala y escala regional. Por estas razones puede inferirse que al entrar en zonas orográficamente complejas el comportamiento ondulatorio del fenómeno decae para disiparse agotando su energía en procesos de menor escala. Así mismo, el represamiento de estas masas a consecuencia de la orografía hace posible el sostenimiento de la humedad y el calor asociado a las Ondas Tropicales durante periodos más largos de tiempo, proceso similar al que ocurre con las masas de aire asociadas a los Frentes Fríos que están asociados a núcleos de alta presión en su parte posterior. En las zonas cercanas a la costa, pese a que el mar tiene una mayor capacidad calorífica, las zonas costeras son más susceptibles a los cambios abruptos provocados por este tipo de fenómenos. Además, en este periodo posterior al paso de la Onda Tropical, los patrones espaciales de las variables aquí presentadas muestran un comportamiento influido por factores más bien de escala local – regional.

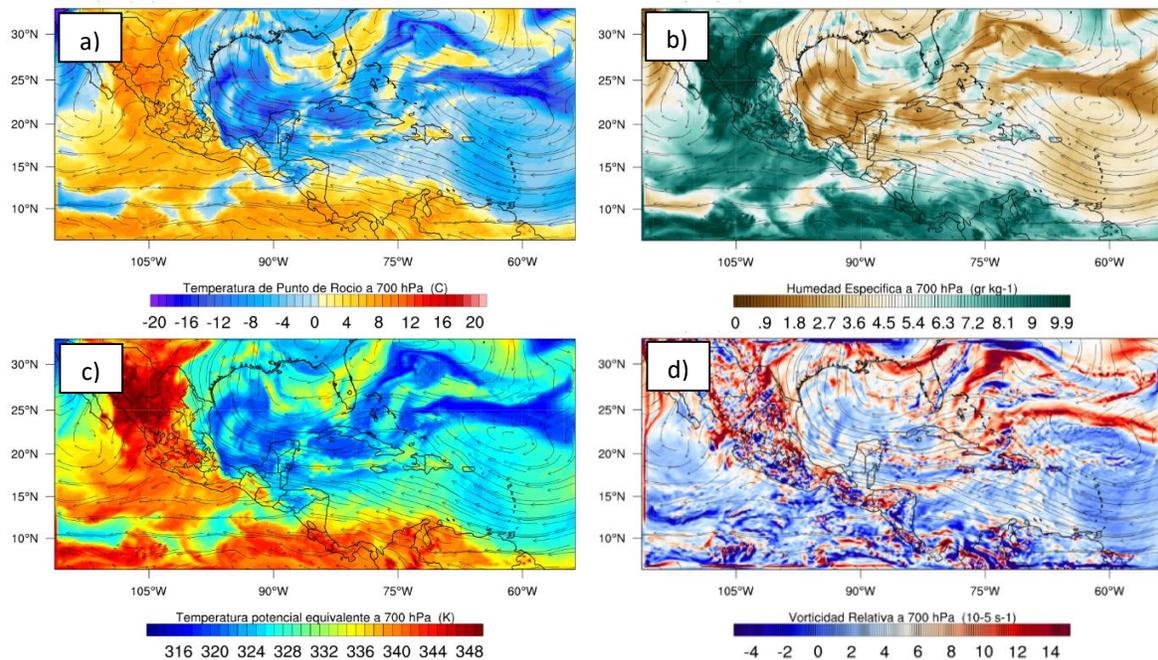


Figura 4.10: a) Temperatura de punto de rocío a 700 hPa ( $^{\circ}\text{C}$ ) para el 08/07/2015 a las 17Z. b) Humedad Específica a 700 hPa ( $\text{gr kg}^{-1}$ ). c) Temperatura Potencial Equivalente a 700 hPa (K). d) Vorticidad Relativa a 700 hPa ( $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ).

En la vertical se aprecian valores altos de las variables relacionadas a la humedad y temperatura ( $T_d$ ,  $q_e$  y  $\theta_e$ ) presentan máximos únicamente en los niveles bajos de la atmósfera y hasta niveles medios en la rampa orográfica que constituye la Sierra Madre Oriental de a barlovento del Golfo de México. Esto sucede debido al ascenso de las masas de aire a causa de la orografía. Lo mismo sucede con la vorticidad relativa, existen valores negativos sobre el Golfo de México y Península de Yucatán, mientras hacia la barrera montañosa se encuentran los valores máximos. Las secciones transversales concuerdan con los mapas horizontales de las distintas variables, siendo consistentes con valores bajos de " $T_d$ ", " $q_e$ " y " $\theta_e$ ", así como la vorticidad relativa con valores negativos predominantemente (Fig. 4.11 a – d) indican la presencia de una fuerte estabilidad que implican condiciones relativamente secas (Fig. 4.11 b).

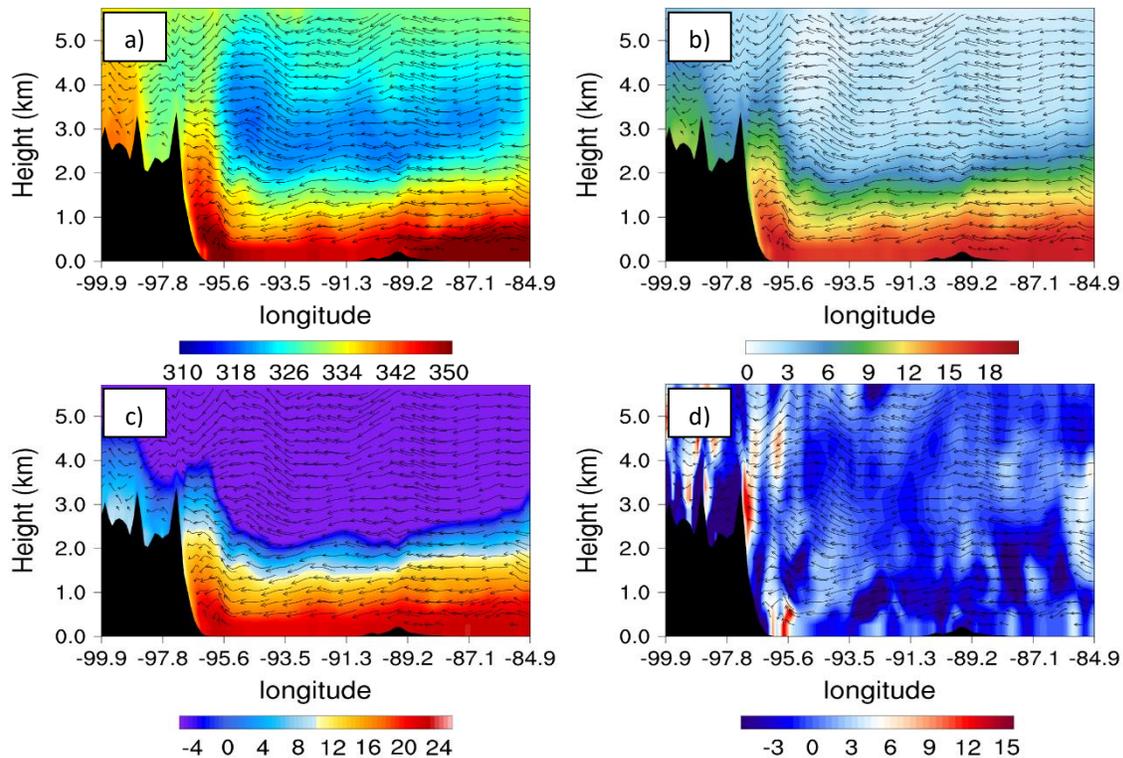


Figura 4.11: Secciones verticales desde superficie a 6 Km sobre 19 °N y 85 - 100 °W para el 08/07/2015 a las 13Z de a) Temperatura de punto de rocío (°C). b) Humedad específica (gr kg<sup>-1</sup>). c) Temperatura Potencial Equivalente (K). d) Vorticidad Relativa respecto del eje zonal (10<sup>-5</sup> s<sup>-1</sup>).

#### 4.7 Anomalías máximas de humedad específica

A partir del análisis de distintas variables tanto de origen dinámico como termodinámico se encontró que la humedad específica es un excelente trazador de la Onda Tropical del Este, debido al gran contenido de vapor de agua que se asocia a dichos sistemas. Sobre el océano tropical, la humedad en niveles bajos es alta, a consecuencia de la evaporación, por lo que la humedad y el calor asociados a la Onda Tropical pueden no ser tan evidentes tras varios días de interacción entre la masa de aire asociada a la Onda Tropical del Este y la superficie del mar. Por esta razón es que para determinar de mejor manera la región de influencia del fenómeno, se utilizaron las anomalías horarias respecto del promedio mensual de la humedad específica ( $q_e$ ) al nivel de 700 hPa que es el más relevante para las Ondas Tropicales del Este. Lo que resalta en valores positivos la zona de convección de la onda tropical donde existen valores mayores de humedad que el promedio mensual y valores negativos en la zona de subsidencia.

Una vez obtenidas las anomalías, se identificó el periodo en que cada evento de onda se encontraba afectando a la república mexicana y se obtuvo el máximo de “*qe*” en dicho periodo para cada punto de la malla con la finalidad de resaltar la influencia de la parte húmeda de la Onda Tropical sobre el país. Para obtener el comportamiento mensual se realizaron los promedios considerando todas las matrices de máximos de cada evento para cada mes en particular (Fig. 4.14 a – f).

A fin de obtener la zona promedio total de influencia del fenómeno sobre México se realizó el promedio temporal de la máxima anomalía de humedad específica considerando todos los eventos de Onda Tropical para todos los meses de estudio (junio-noviembre). Posteriormente se filtró la parte aparentemente más húmeda (mayor a 2 *gr/kg* de la máxima anomalía) y a partir de ese valor umbral se dibujó el área principalmente afectada de forma objetiva transformando el área sombreada en un polígono de influencia (Fig. 4.13).

Cabe mencionar que, aunque en las figuras se muestra completo el territorio mexicano y en algunas el Mar Caribe, la zona de influencia delimitada a través del análisis de todos los casos de Ondas Tropicales para el periodo de estudio es mostrada en la figura 4.12 en forma de sombreado de patrón en líneas blancas.

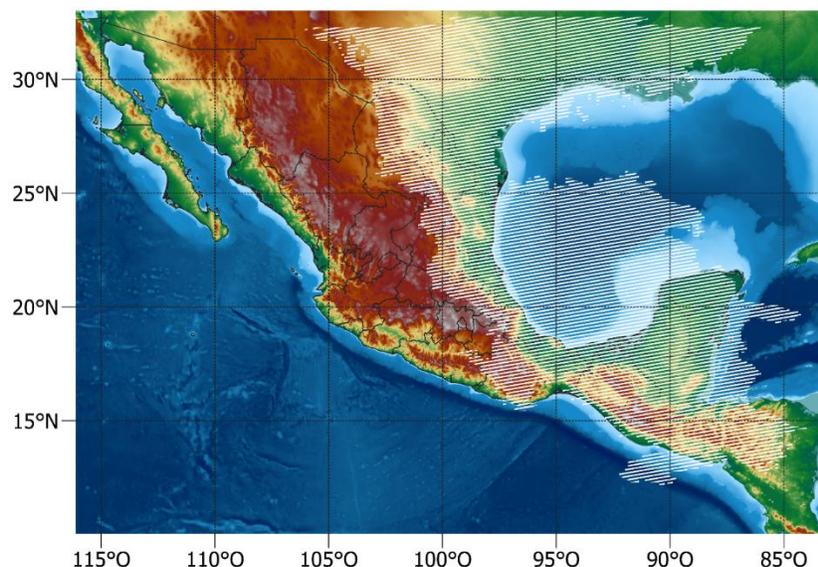


Figura 4.12: Zona de influencia de las Ondas Tropicales del Este en México (sombreado en patrón de líneas blancas).

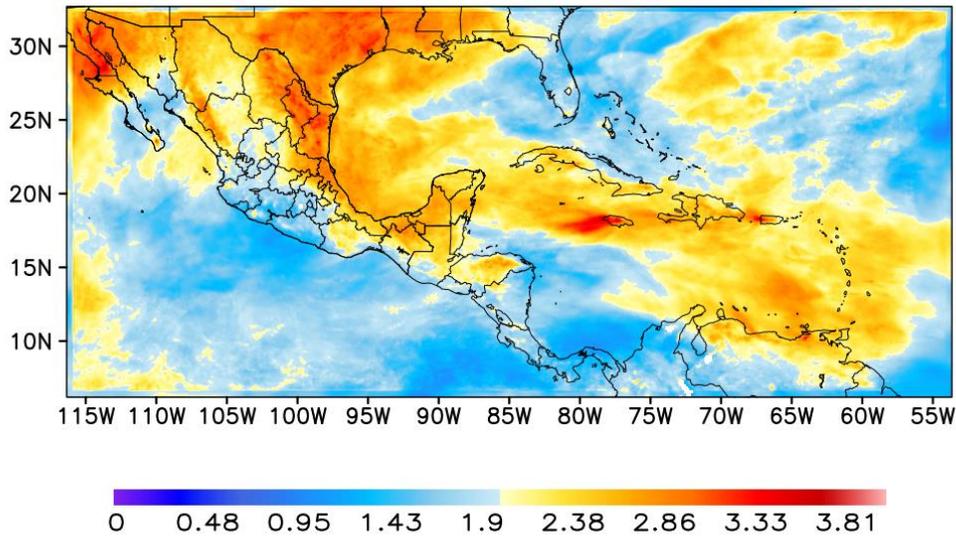


Figura 4.13: Promedio temporal del Máximo de la Anomalía de Humedad específica para casos de Onda Tropical [ $\text{gr Kg}^{-1}$ ] en el periodo junio - noviembre 2015

Del promedio máximo de la anomalía de humedad específica para cada mes puede destacarse que la mayor cantidad de Ondas Tropicales del Este se dan durante julio para el año de estudio (Fig. 4.14 b) con un acumulado de 7. Los meses en donde es notoria una mayor influencia en general de estos sistemas son julio y octubre (Figs. 4.14 b y e), y en menor medida junio y noviembre (Figs. 4.14 a y f), siendo agosto y septiembre (Figs. 4.14 c y d) los meses en que menos se observó influencia durante 2015.

La influencia de las Ondas Tropicales en el territorio mexicano para el periodo de estudio varía dependiendo del mes, fundamentalmente de la cantidad de Ondas Tropicales y la región que estas afectan. Durante el mes de junio se obtuvo que las zonas con mayor influencia de Ondas Tropicales fueron el Noreste y Sureste de México, en menor medida se podría considerar la región Oriente.

En el mes de julio, gran parte de la porción oriental de México se ven afectada por las Ondas Tropicales del Este, las regiones sureste oriente, centro norte y una sección de la zona sur (Fig. 4.14 b). En el occidente, noreste y sur su influencia se ve claramente delimitada por las sierras Madre Oriental y del Sur respectivamente. Constituye el pico máximo de Ondas Tropicales en el periodo de estudio (siete).

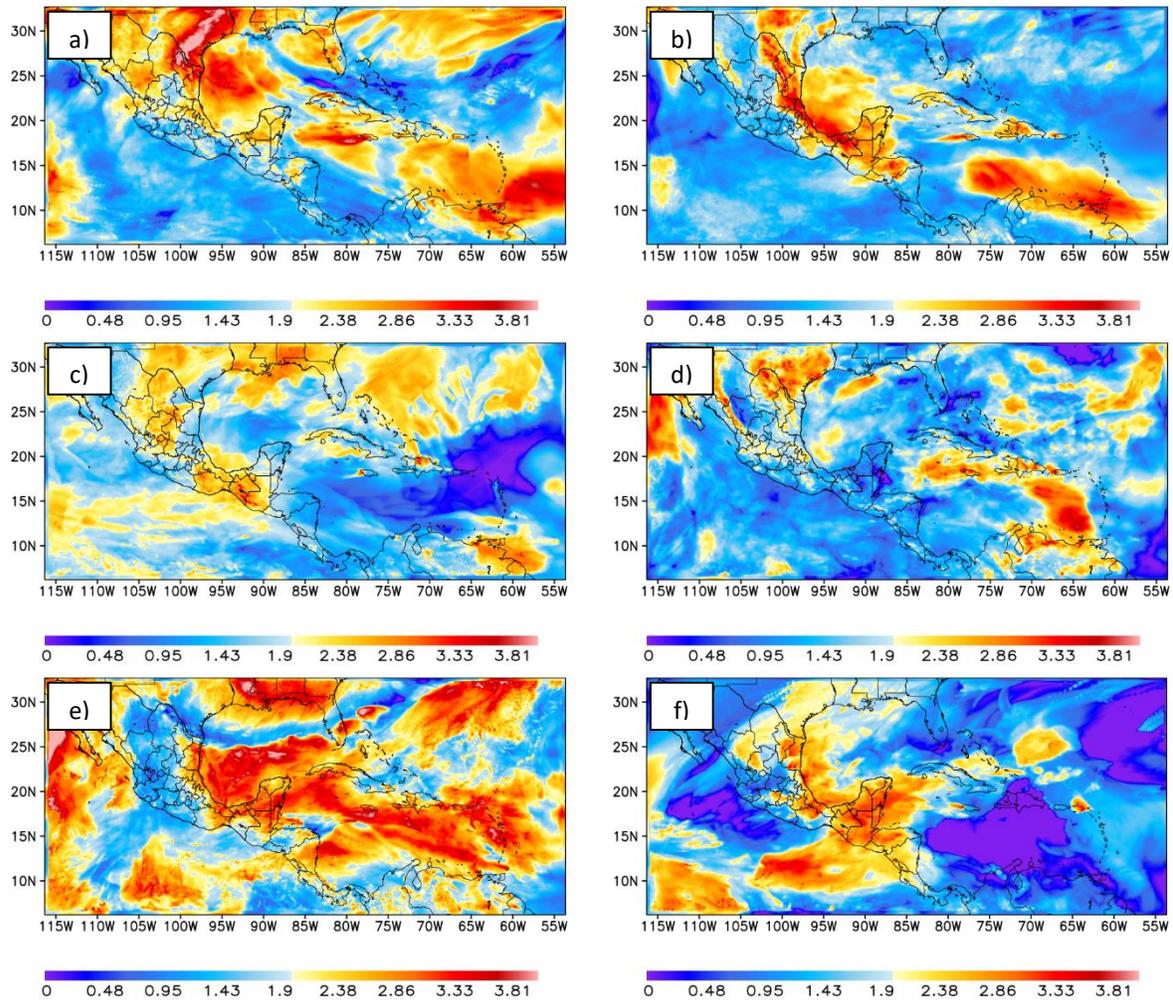


Figura 4.14: Promedio temporal del Máximo de la Anomalia de Humedad específica para casos de Onda Tropical [gr Kg-1]. a) junio. b) julio. c) agosto. d) septiembre. e) octubre. f) noviembre.

Para agosto la cantidad de Ondas Tropicales descendió a casi la mitad (cuatro) de las que se presentaron en el mes anterior (siete). Por lo que es notoria una anomalía relativamente menor que se mantuvo únicamente sobre el sur, parte del sureste y la porción sur de la región oriente de México (Fig. 4.14 c).

Durante septiembre disminuye la cantidad de ondas tropicales que entraron al país, constituyendo un pico mínimo (dos) y con ello también su distribución espacial abarcando solo una pequeña porción del Golfo de México y en continente sobre pequeñas secciones al este de la región oriente y sur de México (Fig. 4.14 d).

En octubre (Fig. 4.14 e) comienzan a aumentar nuevamente las Ondas Tropicales que entran a territorio mexicano respecto a las del mes anterior. La zona de influencia es amplia y abarca las regiones sureste, sur, oriente, centro-norte y noreste de México, así como gran parte de la porción marítima del Golfo de México. Hacia el oeste, la humedad e influencia del sistema tropical se ve limitada por la Sierra Madre Oriental.

Para noviembre nuevamente existe un mínimo de Ondas Tropicales (dos), pero su zona de influencia se extiende en un área amplia desde la el norte de la región sur, el sureste, oriente, centro-sur y noreste de México (Fig. 4.14 f). En este periodo los sistemas invernales comienzan a interactuar más intensamente con los sistemas tropicales, debido a que comienzan a tener mayor predominancia.

A partir del promedio de todos los eventos de onda (Fig. 4.13) puede obtenerse una perspectiva anual y una zona de influencia general para el periodo de estudio. Obsérvese que la zona de influencia de las Ondas Tropicales del Este sobre México abarca principalmente las regiones sureste, sur, oriente centro-norte y noreste, así como la mayor parte del Golfo de México.

#### **4.8 Anomalías de Temperatura Promedio**

Con la finalidad de determinar el efecto de las Ondas Tropicales del Este en la temperatura se siguió un procedimiento similar que par la humedad específica (*qe*), pero en lugar de utilizar la anomalía máxima se utilizó la anomalía del promedio de temperatura de los días en que la Onda Tropical se mantuvo sobre México con respecto del promedio mensual de cada uno de los meses en consideración (junio – noviembre). Para obtener el área total de influencia de las Ondas Tropicales sobre esta variable, se realizó el promedio de lo obtenido para cada uno de los meses del año.

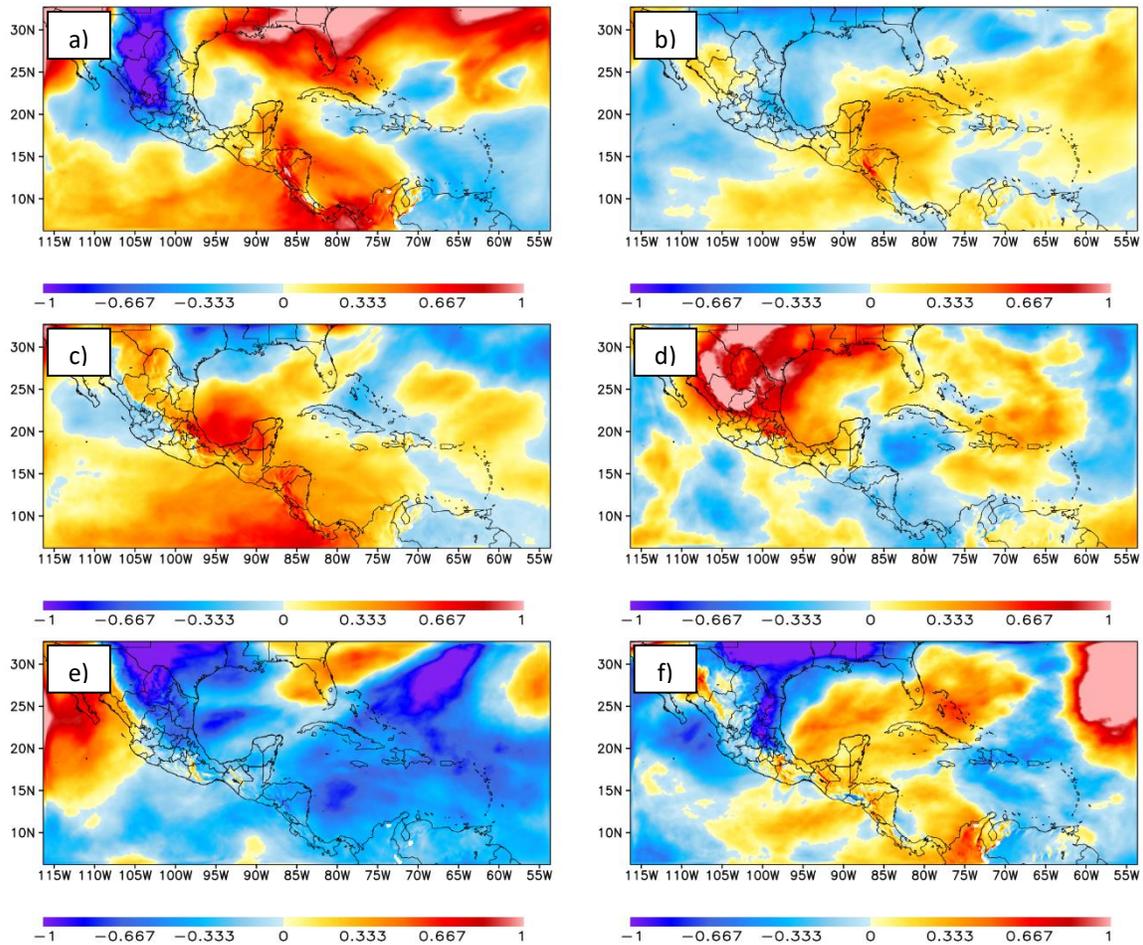


Figura 4.15: Anomalia de temperatura promedio para casos de Onda Tropical [ $^{\circ}\text{C}$ ]. a) junio. b) julio. c) agosto. d) septiembre. e) octubre. f) noviembre.

Durante los meses de junio y julio (Figs. 4.15 a y b) la mayor influencia térmica en periodos de Ondas Tropicales, se presenta sobre el sureste y una porción del sur de México, por lo que no muestra una asociación directa con la humedad específica (Fig. 4.15 a y b).

En el mes de agosto (Fig. 4.15 c) de presenta un máximo térmico durante los días en que existe presencia de Onda Tropical sobre México, pero este no es consistente con la humedad específica asociada a la Onda Tropical del Este (Fig. 4.15 c), por lo que es notorio que no hay asociación de esta anomalía positiva de la temperatura con las Ondas Tropicales, más bien podría ser asociado a la Sequía de Medio Verano (MSD) (Magaña et al., 1999). En el presente trabajo no se planea abordar

temas relacionados con esta última debido a que no es el objetivo primordial del mismo.

En el mes de septiembre (Fig. 4.15 d) no se observa una relación lineal en el comportamiento entre la Temperatura y la Humedad Específica. En realidad, las variables parecen comportarse con una correspondencia inversa, debido a que el pico mínimo de Ondas Tropicales se da en este mes y a su vez se da una disminución de la humedad específica (Fig. 4.15 d), contrario a lo que sucede con la temperatura que tiene a aumentar sus valores durante este periodo.

Durante octubre sucede algo similar, mientras que la humedad específica sobre las regiones sureste, oriente, noreste, sur y centro-norte muestra anomalías positivas (Fig. 4.15 e), la temperatura presenta anomalías negativas en toda la zona, probablemente debido a la incursión de algún sistema invernal (Fig. 4.15 e).

Para noviembre se muestran anomalías positivas de la temperatura (Fig. 4.15 f) sobre una porción de la zona con valores positivos en las anomalías de humedad específica (4.14 f), aunque nuevamente no es una relación estrictamente lineal. Las anomalías negativas que se presentan pueden estar asociadas con sistemas extratropicales.

#### **4.9 Acumulados de precipitación para casos de Ondas Tropicales**

Para el caso de la precipitación se utilizan datos de CHIRPS, ya que esta base de datos ha demostrado ser bastante representativa de los patrones espaciales de la precipitación además de ser observacional y altamente confiable. Con la finalidad de realizar un análisis de consistencia de la base de datos en referencia a los datos de WRF se toman los meses de junio y julio de 2015 (Fig. 4.16 a y b) para comparar las series de tiempo en un punto específico representativo ubicado al noreste del estado de Veracruz, correspondiente al municipio de Naranjos ( $21.375241^{\circ}\text{N}$ ,  $97.675506^{\circ}\text{W}$ ). Los resultados de ambas fuentes son muy parecidos con WRF logrando representar de forma bastante adecuada los picos máximos de precipitación. En rasgos generales puede decirse que WRF consigue capturar adecuadamente los patrones de precipitación mostrados por CHIRPS de manera consistente.

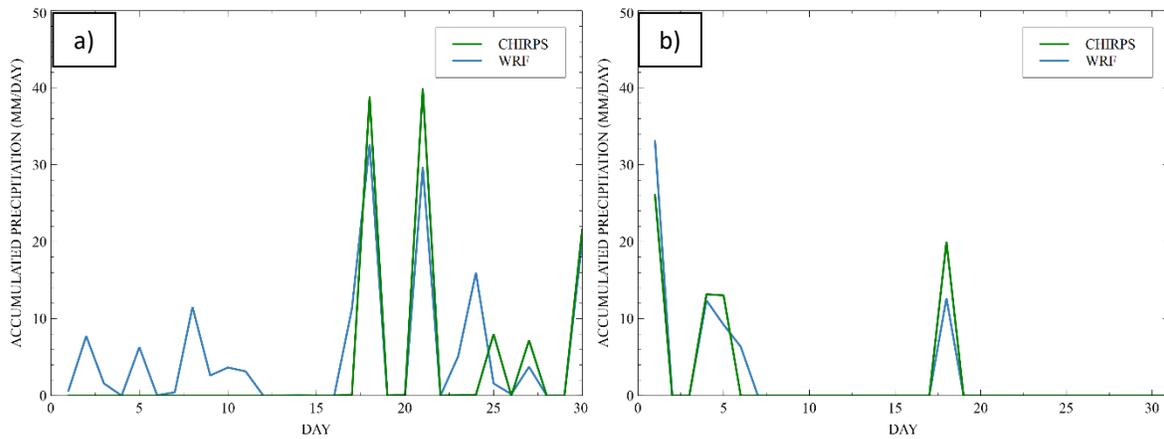


Figura 4.16: Serie de tiempo mensual de precipitación diaria para a) junio y b) julio

Continuando con el análisis de consistencia, pero a escala estacional, se toman los acumulados de precipitación mensual tanto de WRF como de CHIRPS (Fig. 4.17). A partir de esto es fácil darse cuenta que los patrones de ambas fuentes son muy parecidos, por lo que WRF logra representar adecuadamente la estacionalidad siendo consistente con los patrones máximos y mínimos de las observaciones de CHIRPS, con la única diferencia de que la simulación sobreestima ligeramente los datos observados.

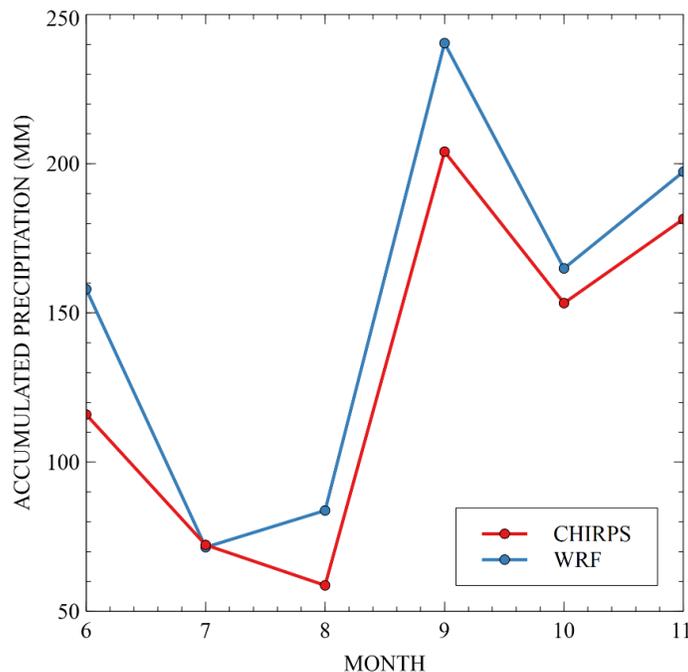


Figura 4.17: Precipitación acumulada mensual WRF en azul y CHIRPS en rojo

Como consecuencia de la alta concentración de humedad y calor que contienen las Ondas Tropicales del Este, además de su convección al este del eje de esta, se tiene el desarrollo de nubosidad que eventualmente se condensa y puede producir precipitaciones. Aunado a esto, el ascenso de la masa de aire húmedo al este del eje de la onda, al interactuar con la barrera orográfica que constituye principalmente la Sierra Madre Oriental se condensa generando un aumento de la nubosidad y por ende de las precipitaciones, que a su vez son más abundantes a barlovento de la cadena montañosa, aunque estas precipitaciones a causa de la abundante humedad, pueden extenderse hasta el centro del país. En esta sección se utilizaron datos de Precipitación Infrarroja con estaciones del Grupo de Extremos Climáticos (CHIRPS por sus siglas en inglés)(Funk et al., 2015) para calcular los acumulados mensuales de precipitación asociada a Ondas Tropicales.

Durante junio (Fig. 4.18 a) la precipitación asociada a Ondas Tropicales predomina principalmente sobre el Golfo de México, teniendo máximos a barlovento de la Sierra Madre Oriental, sobre todo hacia la porción norte de Puebla, la Zona Montañosa Central y Planicie Costera Sur de Veracruz, Norte de Oaxaca y el este de San Luis Potosí. Los acumulados llegan a superar los 200 mm únicamente debido a las Ondas Tropicales del Este.

Para el mes de julio (Fig. 4.18 b), que es el mes con mayor incidencia a escala climática de Ondas Tropicales del Este, los acumulados máximos de precipitación se presentan al noreste de la Sierra Madre del Sur entre los límites de Oaxaca, Puebla y Veracruz, abarcando porciones de la Zona Montañosa Central y la planicie costera sur de este último. Así mismo se presentan altos valores acumulados sobre el sur de Chiapas. Para este mes los valores máximos llegan a superar los 300 mm.

En el mes de Agosto (Fig. 4.18 c), las concentraciones de precipitación se ven notablemente disminuidas debido a la baja incidencia de Ondas del Este, además de la presencia de la Sequía de Medio Verano, que produce la supresión de la convección sobre el sureste de México y el Caribe, aunado a esto, se presentan tres puntos máximos de extensión espacial muy pequeña, uno sobre la Sierra Madre del

Sur, al norte de Oaxaca, otro sobre el Norte de Puebla y un último al este de San Luis Potosí, estos no superan los 150 mm.

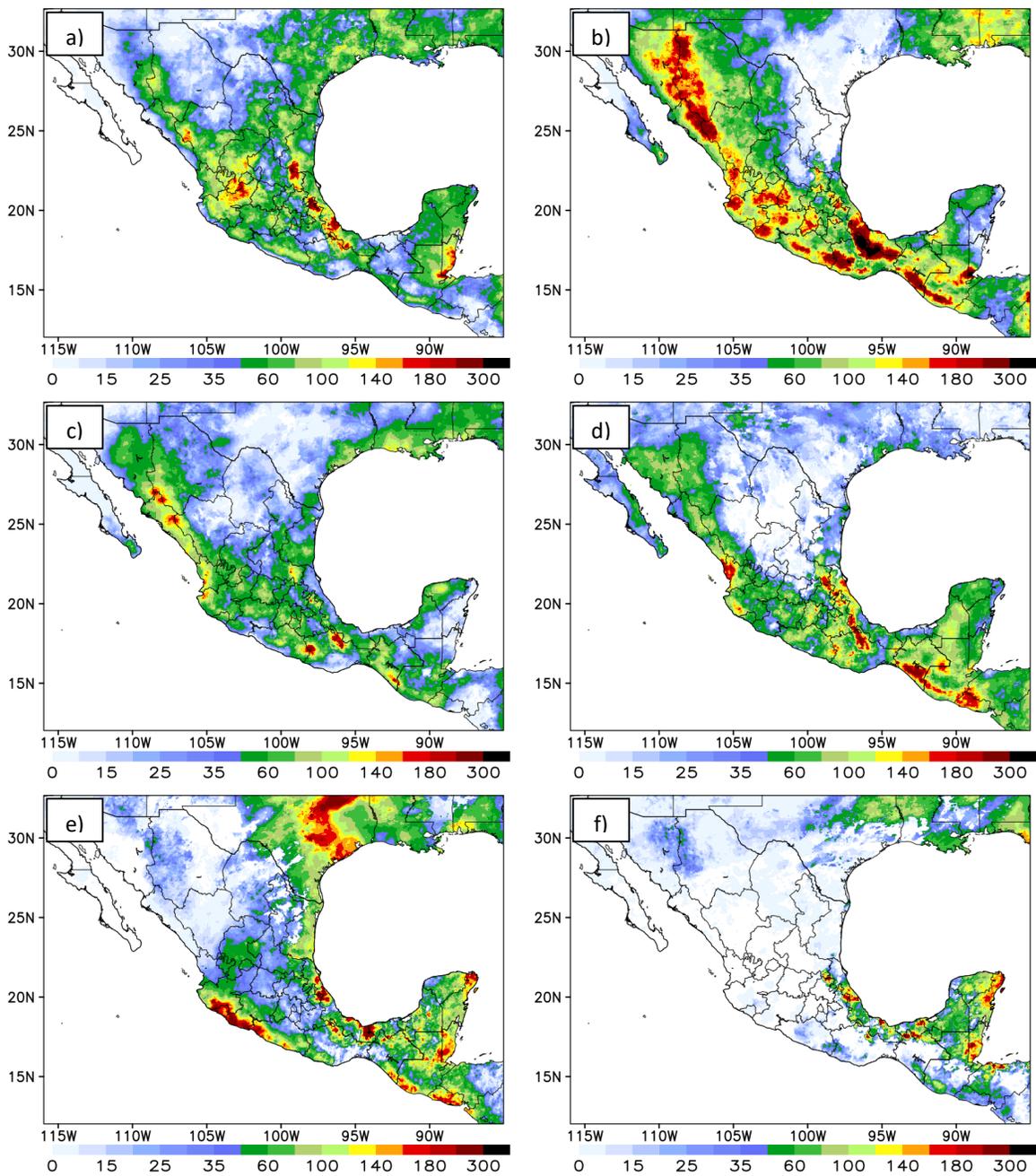


Figura 4.18: Precipitación mensual acumulada para casos de Ondas Tropicales. a) junio, b) julio, c) agosto, d) septiembre, e) octubre, f) noviembre

En septiembre (Fig. 4.18 d) comienzan a aumentar ligeramente los acumulados de precipitación en, aunque probablemente este incremento se deba también al crecimiento en la cantidad de sistemas convectivos de mesoescala al este de la Sierra Madre Oriental debido al ascenso de masas de aire húmedo por las laderas de esta.

Durante octubre (Fig. 4. e) la precipitación asociada a Ondas Tropicales predomina principalmente sobre el Golfo de México y Península de Yucatán, teniendo máximos a barlovento de la Sierra Madre Oriental, sobre todo hacia la Sierra Nororiental de Puebla, la Zona Montañosa Central, Planicie Costera Norte y Sur de Veracruz, Norte de Oaxaca y Quintana Roo en sus límites con Yucatán. Los acumulados llegan a superar los 200 mm únicamente debido a las Ondas Tropicales del Este.

Para noviembre los acumulados de precipitación se remiten únicamente a la región sureste y Golfo de México. Teniendo máximos sobre la Sierra Nororiental de Puebla, Tabasco, el norte d Quintana Roo, los límites entre Hidalgo, San Luis Potosí y Veracruz. De este último también se presentan máximos en la Zona Montañosa Central y el sur. Ya en este mes, la cantidad de Ondas Tropicales ha disminuido considerablemente y en algunos años no se presentan Ondas del Este en dicho periodo.

## 5 Discusión

### 5.1 Contribución de las Ondas Tropicales a la Precipitación Estacional

Es de gran relevancia para este estudio el poder estimar la contribución estacional que tienen las Ondas Tropicales del Este a la climatología de la precipitación en México. Ha sido documentado ya que sobre Centroamérica y el Caribe, la correlación de la precipitación asociada a Ondas del Este contra la precipitación estacional tiene un valor de 0.63 (Dominguez et al., 2020), por ello en este trabajo se calculó el porcentaje de precipitación que aportan las ondas tropicales a la climatología de la república mexicana a partir de datos CHIRPS.

Para la parte estacional (Fig. 5.1), en las zonas mayormente afectadas por las Ondas Tropicales, tales como el Sureste, Oriente, Centro – Norte y Noreste de México se tienen contribuciones a escala estacional de entre 30 y 60% de forma predominante, con algunos máximos de 80% sobre las Sierras Norte y Nororiental de Puebla, la porción central del estado de Veracruz, el norte del estado de Yucatán, secciones al norte del estado de Hidalgo, el sur de Tamaulipas y las zonas Media y Huasteca de San Luis Potosí.

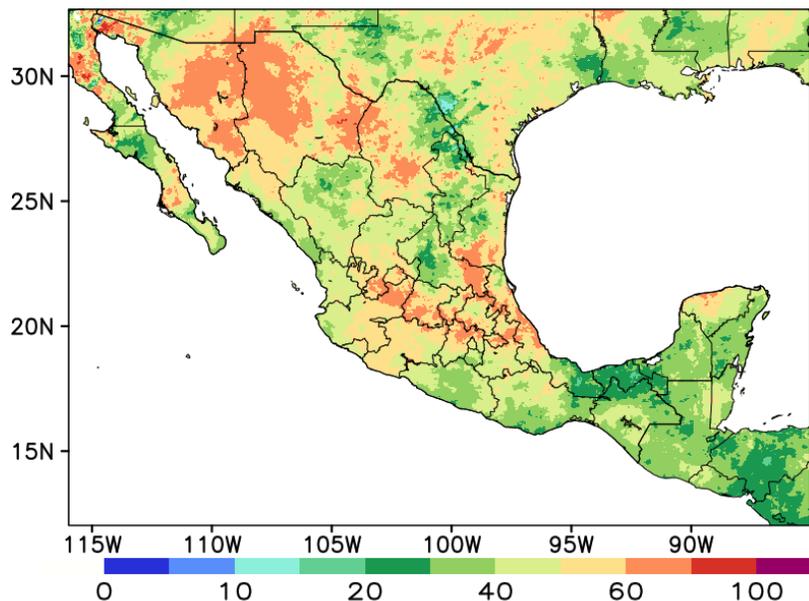


Figura 5.1: Contribución estacional de la precipitación asociada a Ondas Tropicales a la precipitación estacional [%] en el periodo junio - noviembre de 2015

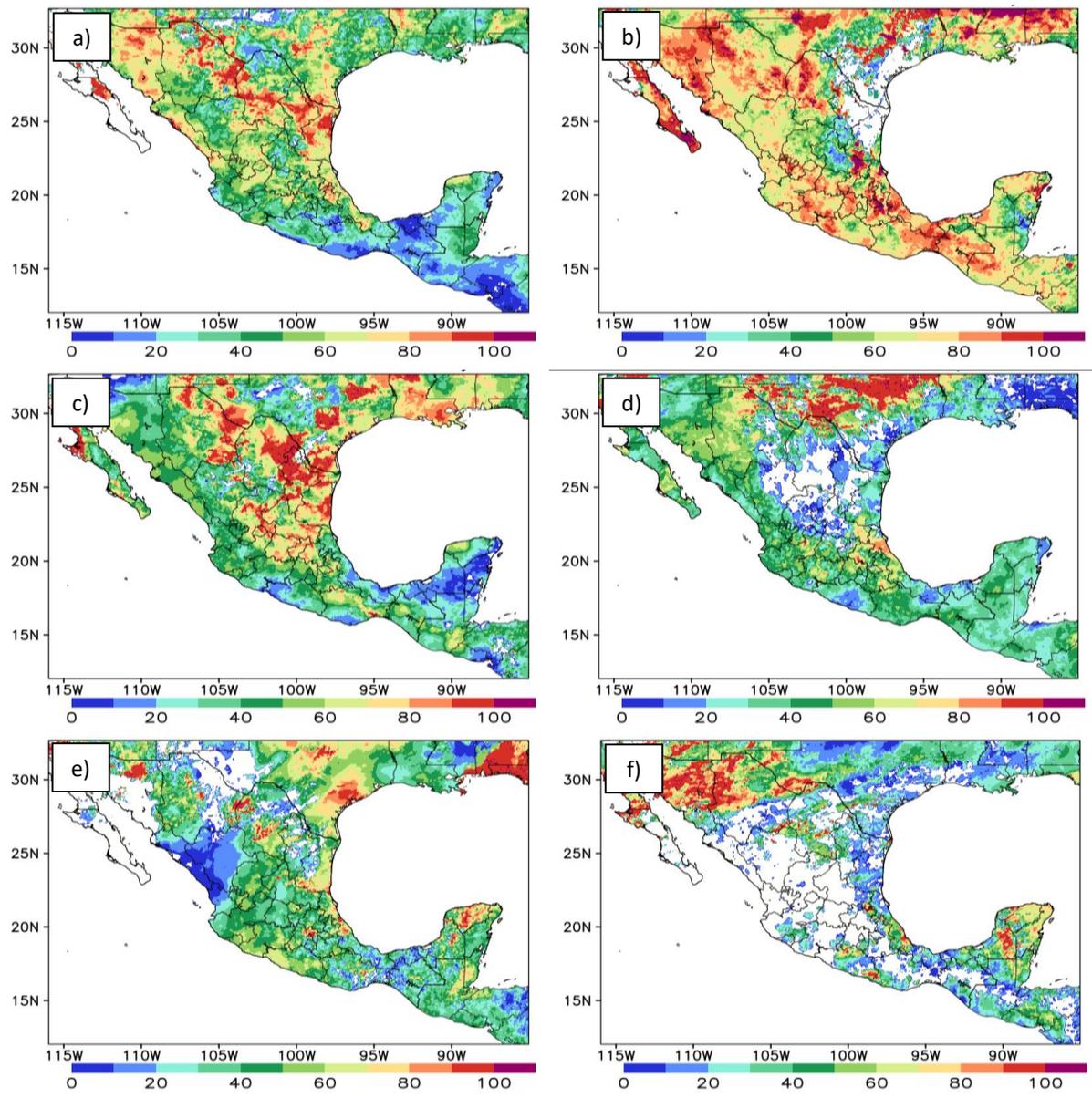


Figura 5.2: Contribución de las Ondas Tropicales a la precipitación mensual [%]. a) junio, b) julio, c) agosto, d) septiembre, e) octubre, f) noviembre.

En un principio se realizaron los cálculos para estimar el porcentaje de forma mensual (Fig. 5.2).

En junio (Fig. 5.2 a), la mayor contribución de las Ondas Tropicales del Este se da hacia las regiones Oriente y Noreste de México con valores que van desde 50 – 90 % de la precipitación de ese mes. La Península de Yucatán muestra valores

máximos de entre 60 y 70%, mientras que la zona de Tabasco y Chiapas tienen valores bajos de entre 10 y 20%.

Para julio (Fig. 5.2 b), debido a que es el pico máximo de ondas en el año, la contribución de estas a la precipitación mensual aumenta en toda la porción oriental del territorio mexicano. La mayor parte de las contribuciones en las regiones Oriente, Sureste, Centro – Norte, Centro – Sur y Sur de México tienen contribuciones de entre 60 – 90% predominantemente, con un pico del 100% sobre la Huasteca y Zona Media Potosinas para el año de estudio.

Durante el mes de agosto (Fig. 5.2 c), las contribuciones de las Ondas Tropicales disminuyen considerablemente sobre las regiones Sureste, Sur, Oriente y Centro – Sur, con valores que van de 10 a 50% con algunos picos de hasta 80% sobre las Sierras Norte y Nororiental del Puebla, así como pequeñas regiones al norte y este de Oaxaca. Esto principalmente se debe a la típica ocurrencia del mínimo de precipitación asociado con la Sequía de Medio Verano o Canícula en dicho mes.

Septiembre (Fig. 5.2 d) continúa con un régimen parecido al de agosto, los porcentajes de contribución son predominantemente bajos, con valores de 20 – 50% sobre la mayor parte de la porción occidental del territorio mexicano, con un máximo de orden de 80% sobre el norte de Veracruz.

Los porcentajes vuelven a aumentar nuevamente en octubre (Fig. 5.2 e), teniendo predominantes de 60 a 70% en gran parte del este de México y máximos de hasta 90% sobre la Península de Yucatán, Noreste de Veracruz y sur de Tamaulipas.

En noviembre (Fig. 5.2 f) los porcentajes disminuyen en la mayor parte de la vertiente del Golfo de México, con valores de entre 10 y 30% de contribución, se mantienen en la Península de Yucatán entre 50 y 70% con máximos de 90%, estos máximos también se presentan sobre la porción costera central de Veracruz y el Sureste de San Luis Potosí.

## **5.2 Impacto de las Ondas Tropicales del Este a la vegetación**

Uno de los objetivos medulares de esta investigación es el tratar de cuantificar el impacto de las Ondas Tropicales del Este en México. Derivado de esto, se

obtuvieron los promedios mensuales de la anomalía máxima de la humedad específica para casos de ondas tropicales, como se ha expuesto ya en el capítulo de resultados. Una vez obtenida la zona de influencia de la humedad específica sobre el país, debido al comportamiento espacial mostrado, se infirió que la precipitación podría estar directamente relacionada con esta humedad y a su vez tendría un impacto en la vegetación.

De esta manera, se obtuvieron datos del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) derivados del “Espectrorradiómetro de imágenes de media resolución” (MODIS por sus siglas en inglés) presente en los satélites Terra y Aqua de la NASA. Estos datos permiten tener un panorama completamente objetivo y comparable con los datos del modelo WRF, su serie de datos disponible de 1999 al presente, para el producto NDVI se encuentra con una resolución máxima de 250 metros en mallas cuadradas latitud longitud, por lo que con algunas operaciones sencillas de remallado pueden ser comparadas directamente contra los datos generados por WRF y CHIRPS.

En nuestro caso, es de particular interés conocer la influencia de la humedad asociada a ondas tropicales en la vegetación densa (aquella con valores de NDVI superiores a 0.5), por ello se extrajeron los valores de la malla superiores a 0.5 y se reinterpolaron a la resolución del modelo (4 km).

A partir de la correlación matricial directa entre el NDVI y el promedio de la anomalía máxima de Humedad Específica para casos de Ondas Tropicales mensual, se obtuvieron los resultados que se muestran a continuación (Tabla 5.1), los mejores resultados se muestran resaltados en gris:

Tabla 5.1: Valores de correlación entre NDVI y anomalía máxima de Humedad Específica para casos de Onda Tropical.

MES	CORELACIÓN
JUN	0.73
JUL	0.81
AGO	0.81
SEP	0.7
OCT	0.76
NOV	0.74
PROMEDIO	0.79

El valor “PROMEDIO” se refiere la media de los valores mensuales de la anomalía máxima de humedad específica correlacionado contra el NDVI. Cabe mencionar que todos los valores de correlación tienen una significancia estadística del 99%.

Para la precipitación se llevó a cabo el mismo procedimiento a partir de los datos de CHIRPS. Los resultados obtenidos se muestran en la siguiente tabla (5.2). Los valores más altos se muestran resaltados en gris.

Tabla 5.2: Valores de correlación entre NDVI y Precipitación acumulada para casos de Onda Tropical.

MES	CORRELACIÓN
JUN	0.57
JUL	0.55
AGO	0.52
SEP	0.56
OCT	0.49
NOV	0.25
PROMEDIO	0.52

A partir de los resultados de ambas correlaciones, a pesar de la inferencia inicial de que la precipitación es la que actúa primordialmente sobre la vegetación nos damos cuenta que no es así, si no que la humedad tiene una mayor relación con la vegetación densa. De esta manera podemos deducir que la vegetación se ve mayormente influenciada por la humedad y que esta influencia no es sino por la sensibilidad de esta a procesos de origen termodinámico a escala microfísica, tal es el caso del rocío y la formación de nieblas y neblinas que están relacionadas con el sostenimiento de la vegetación.

Respecto de este sostenimiento, es posible hipotetizar que debido a estas causas de origen microfísico propiciadas por el arrastre de humedad asociado a las Ondas Tropicales del Este, es que a pesar de que existe un déficit de precipitación durante la Sequía de Medio Verano o Canícula, la vegetación no se ve severamente impactada por este fenómeno, ya que durante el periodo canicular estas ondas continúan arrastrando humedad en niveles bajos y medios hacia la república mexicana.

Con la finalidad de comparar gráficamente los patrones espaciales de la máxima anomalía de humedad específica asociada a Ondas Tropicales con la cobertura de vegetación densa. En principio se realiza para el mes de julio, que es uno de los meses que mayor correlación tienen con la vegetación (Fig. 5.3) y posteriormente para el promedio estacional (Fig. 5.4).

Como puede observarse en esta comparación visual para el mes de julio, la vegetación sobre las regiones oriente, sureste y noreste se acopla de forma muy cercana al comportamiento de la humedad específica asociada a Ondas del Este (Fig. 5.3) lo que apoya a la hipótesis de que la humedad contribuye en gran medida al sostenimiento de la vegetación sobre el oriente de México.

Para el promedio estacional la correlación decae ligeramente y es notorio a partir de la comparación visual, pero aun así continúa habiendo grandes similitudes en las distribuciones espaciales de ambas variables, principalmente sobre la porción oriental de México (Fig. 5.4).

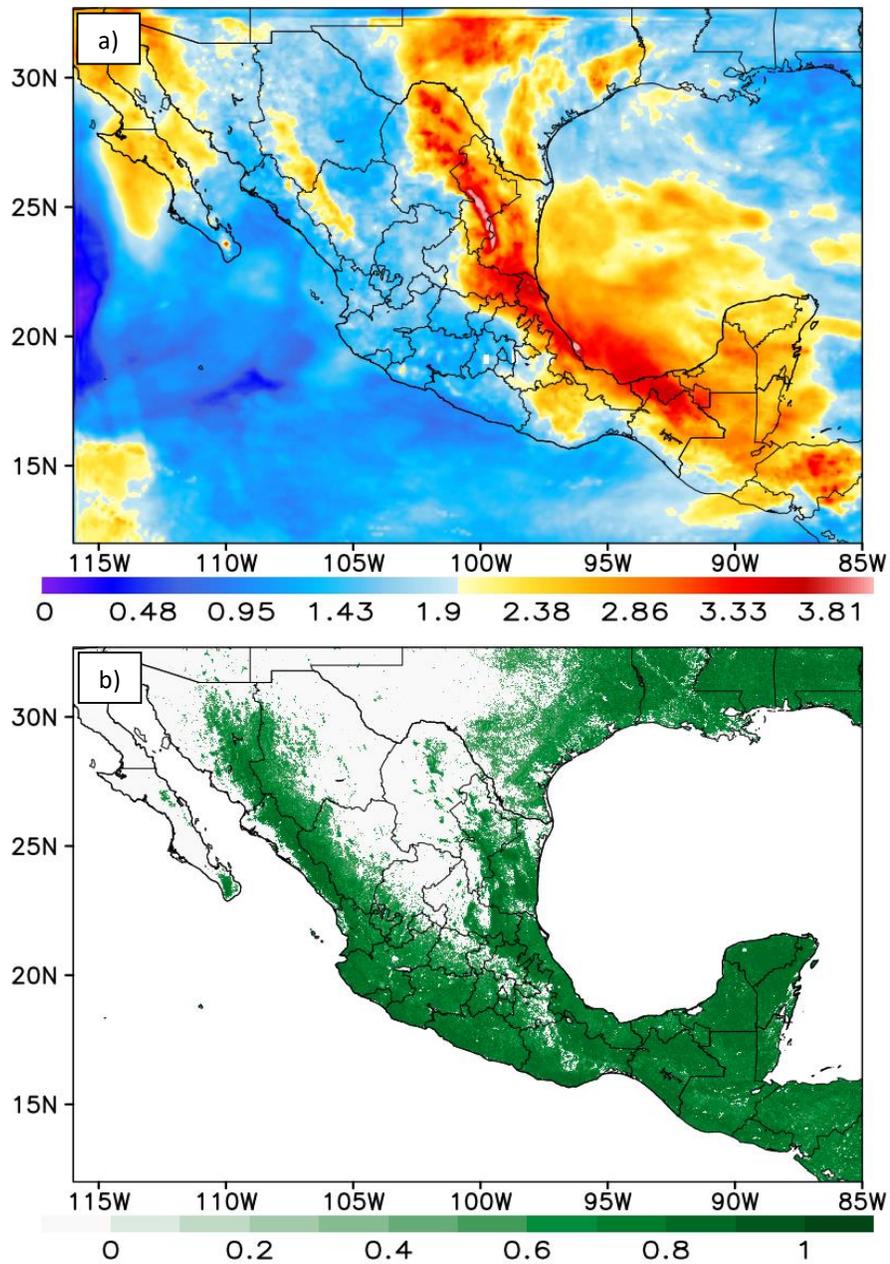


Figura 5.3: a) Promedio temporal del Máximo de la Anomalia de Humedad específica para casos de Ondas Tropicales [ $\text{gr Kg}^{-1}$ ] Julio 2015. b) NDVI mayor a 0.5 (vegetación densa) para 2015 a partir de datos del sensor MODIS.

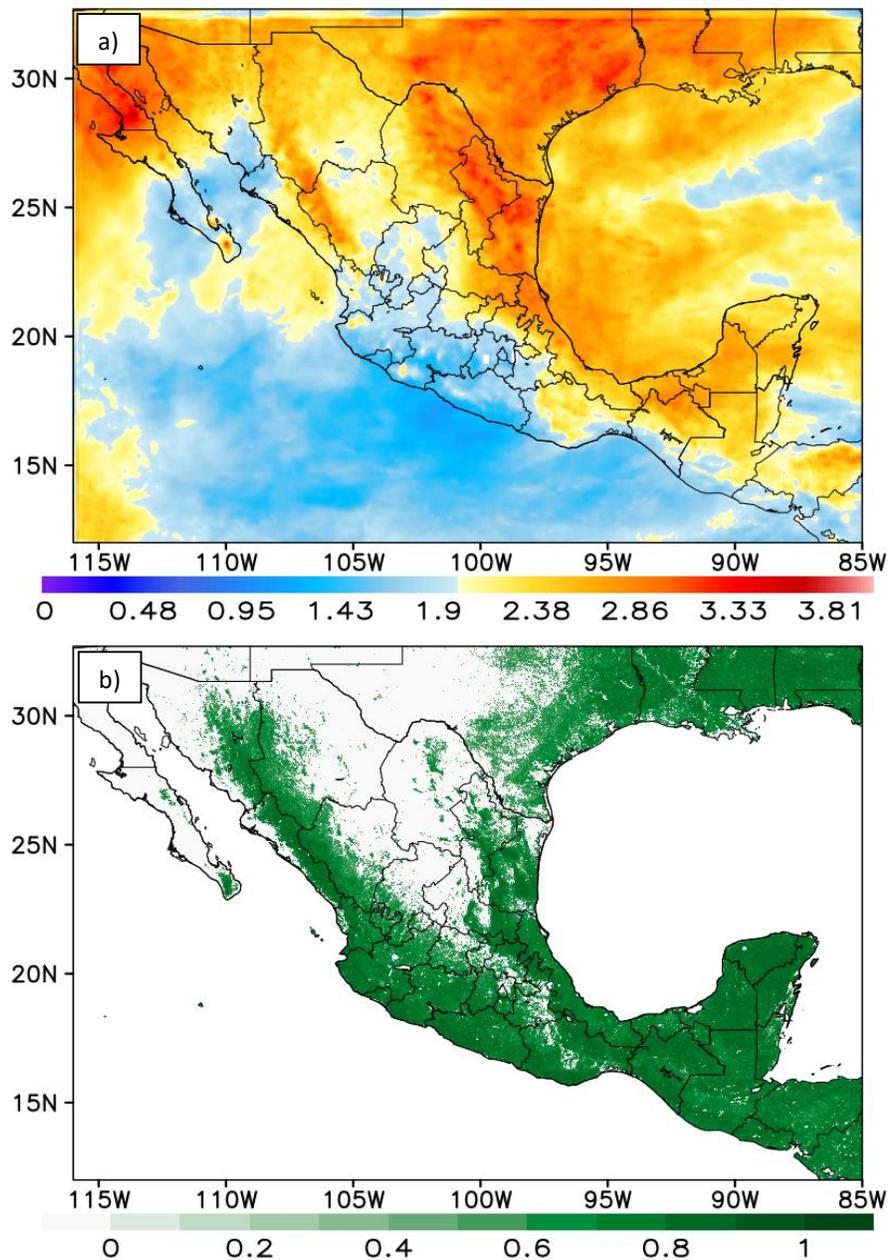


Figura 5.4: a) Promedio temporal de la Máxima Anomalía de Humedad específica para casos de Onda Tropical [gr Kg<sup>-1</sup>] periodo junio - noviembre 2015. b) NDVI mayor a 0.5 (vegetación densa) para 2015 a partir de datos del sensor MODIS.

### 5.3 Relación entre el CLLJ y el número mensual de Ondas

En su trayecto sobre el Océano Atlántico tropical, desde África hacia América, las Ondas Tropicales se desplazan sobre el mar Caribe. En dicha región, se manifiesta un fenómeno producido por el Anticiclón semipermanente del Atlántico Norte,

llamado Jet de Bajos niveles del Caribe (CLLJ) cuyo núcleo se encuentra aproximadamente a una altura de 925 hPa (12.5°N–17.5°N, 80°W–70°W). Esta corriente se ve ampliamente influenciada por El Niño (ENOS), modulando su intensificación y debilitamiento, que a su vez produce un incremento/decremento de los valores de cizalladura, lo que genera convección más eficiente o supresión de esta en los niveles medios de la atmósfera.

En las Ondas Tropicales del Este, la convección al este de la cresta de la onda es vital para el sostenimiento de la inestabilidad, por lo que, si al pasar por el Jet de Bajos Niveles del Caribe se encuentra con altos valores de cizalladura en niveles bajos (Wang, 2014), la interacción con este puede ser perjudicial para la convección asociada a la onda, constituyendo una barrera para las ondas que pasan hacia México y Centroamérica.

Con la finalidad de verificar la relación entre la cantidad de Ondas Tropicales del Este que llegan a México y el comportamiento del viento en la zona del Jet de Bajos Niveles del Caribe se realizó la correlación directa entre el número de Ondas Tropicales que llegaron a México por mes y el promedio de área de la magnitud (Tabla 5.3) y cizalladura (Tabla 5.4) del viento en la zona del Jet.

Tabla 5.3: Correlación de la cantidad mensual de ondas contra el promedio de área de la magnitud del viento mensual en distintos niveles (925 hPa, 850 hPa, 700 hPa, 500 hPa y a 10 m sobre la superficie)

MES	OT	MAG 925	MAG 850	MAG 700	MAG 500	MAG 10M
JUN	4	15.12	13.07	8.72	3.29	11.96
JUL	7	14.83	12.97	9.08	3.52	11.58
AGO	2	12.65	11.03	6.26	4.5	9.81
SEP	4	11.29	8.71	4.77	2.75	9.2
OCT	2	7.54	5.95	3.43	2.31	6.34
NOV	2	10.18	8.11	4.34	2.15	8.76
<b>CORRELACIÓN</b>		0.68	0.66	0.75	0.22	0.68

Para la magnitud del viento la mayor correlación se dio a nivel de 700 hPa, nivel en que típicamente se presenta la mayor influencia de las Ondas Tropicales del Este con una correlación de 0.75 al 95 % de significancia (Véase Anexo 1), mientras que para el resto de niveles se muestran correlaciones menores a 0.7 (Tabla 5.3), de

este resultado puede decirse que la magnitud del viento en 700 hPa en la zona del Jet de Bajos Niveles del Caribe en el verano meteorológico está directamente correlacionado con la cantidad de Ondas Tropicales del Este que llegan hacia México, lo que implicaría que un sistema no contrarresta al otro, si no que más bien interaccionan. Esa alta correlación en 700 hPa, también es consistente con que este es el nivel más energético de las ondas que viajan sobre el Caribe (Salinas P., 2006).

Tabla 5.4: Correlación de la cantidad mensual de Ondas Tropicales contra el promedio mensual de la cortante del viento entre distintos niveles

MES	OT	SHEAR 500-SUP	SHEAR 925 - 500	SHEAR 925 - 850
JUN	4	7.28	12.62	3.57
JUL	7	6.85	11.83	3.26
AGO	2	4.63	8.87	3.16
SEP	4	5.34	9.11	3.5
OCT	2	2.55	6.2	2.54
NOV	2	3.26	10.02	2.92
<b>CORRELACIÓN</b>		0.78	0.65	0.54

En cuanto a la Cizalladura, la mayor correlación entre la cantidad mensual de Ondas Tropicales y la cortante, se dio entre superficie y 500 hPa (Tabla 5.4) con un valor de 0.78 con una significancia del 95%. La capa comprendida entre superficie y 500 hPa es la capa en que dichas ondas suelen desplazarse de forma habitual, lo cual refuerza la teoría de que ambos sistemas interaccionan entre sí. De esta forma se muestra que la interacción dinámica entre ambos sistemas es estrecha y que la cantidad de ondas que llegan a México está ligada con este sistema prevalente en el Caribe.

#### **5.4 Correlación de la Cantidad anual de Ondas Tropicales contra índices del ENSO**

En el subcapítulo anterior se trató la Interacción del Jet de Bajos Niveles del Caribe con la cantidad de Ondas Tropicales que alcanzan la república mexicana, dicho sistema está altamente relacionado con El Niño (ENSO), su variabilidad interanual

y a escala climática es modulada por este fenómeno de gran escala (Wang, 2014). A su vez, el Jet de Bajos Niveles del Caribe (como fue mostrado anteriormente), está relacionado con el número mensual de Ondas Tropicales, por lo que es de gran interés para este estudio correlacionar la cantidad anual de Ondas Tropicales con algunos índices de El Niño que son utilizados para evaluar la intensidad de este sobre distintas zonas del Océano Pacífico. Los índices usados fueron los siguientes:

- Índice Multivariado del ENSO (MEI por sus siglas en inglés):  
Es un índice bimensual que se basa en la serie temporal de la primera Función Empírica Ortogonal (EOF) de las variables, Presión al Nivel del Mar, Temperatura de la Superficie del Mar, componentes U y V del viento superficial y Radiación de Onda Larga sobre el Pacífico Tropical (30 °S – 30 °N y 100 °E – 70 °W)<sup>4</sup>.
- Índice Oceánico de El Niño (ONI por sus siglas en inglés):  
Es el principal índice utilizado por la Administración Nacional Atmosférica y Oceánica de los Estados Unidos (NOAA) para el monitoreo de El Niño Oscilación del Sur. Para la realización de este índice se lleva a cabo un monitoreo de las Anomalías de la Temperatura Superficial del Mar durante tres meses en la parte central del Pacífico (región Niño 3.4) (Fig. 5.5). Cuando el índice sobrepasa +0.5 por tres meses consecutivos se declaran condiciones de “El Niño”, mientras que cuando el índice se encuentra por debajo de -0.5 se declaran condiciones de “La Niña”<sup>5</sup>.
- Índice Bivariado de El Niño Oscilación del Sur (BEST por sus siglas en inglés):  
Es una combinación de la Anomalía de la Temperatura de la Superficie del Mar y el índice de la Oscilación del Sur en la región Niño 3.4 (Fig. 5.5)<sup>6</sup>.
- Anomalía de la Temperatura Superficial del Mar en la región Niño 3 (Fig. 5.5).

---

<sup>4</sup> <https://psl.noaa.gov/enso/mei/> (Consultada el 28 de Julio de 2020)

<sup>5</sup> <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-variability-oceanic-ni%C3%B1o-index> (Consultada el 28 de Julio de 2020)

<sup>6</sup>

<https://psl.noaa.gov/people/cathy.smith/best/#:~:text=We%20are%20now%20using%20the,alone%20neglects%20explicit%20atmospheric%20processes> (Consultada el 28 de Julio de 2020)

- Anomalía de la Temperatura Superficial del Mar en la región Niño 1+2 (Fig. 5.5).
- Índice de Precipitación del ENSO:  
Se basa en obtener las anomalías de precipitación de dos áreas, una mayoritariamente oceánica en el Pacífico Oriental (10 °S - 10° N, 160° E - 100° W) y otra principalmente continental (10° S - 10° N, 90° E - 150° E) a partir los datos del Proyecto de Climatología de la Precipitación Global (GPCP por sus siglas en inglés) de la NOAA<sup>7</sup>.

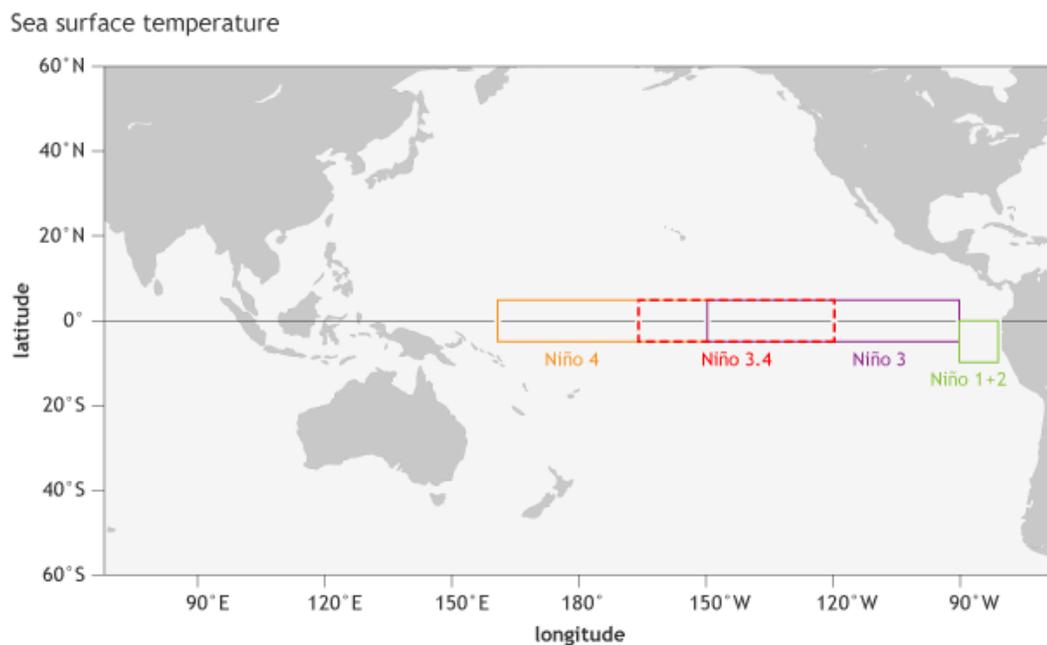


Figura 5.5: Regiones del ENSO

<sup>7</sup> <http://gpcp.umd.edu/espi.htm> (Consultada el 28 de Julio de 2020)

Los resultados de la correlación se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 5.5: Correlación entre cantidad anual de Ondas Tropicales e Índices ENSO

<b>AÑO</b>	<b>OT</b>	<b>MEI</b>	<b>NIÑO 3</b>	<b>NIÑO 1+2</b>	<b>ONI (3.4)</b>	<b>BEST</b>	<b>ESPI</b>
<b>2006</b>	45	0.09	0.31	0.72	0.17	0.32	0
<b>2007</b>	37	-0.7	-0.92	-1.37	-0.68	-0.3	-0.6
<b>2008</b>	37	-1.1	-0.16	0.48	-0.68	-0.92	-0.9
<b>2009</b>	37	0.07	0.49	0.54	0.43	0.39	0
<b>2010</b>	27	-1.1	-0.59	-1.2	-0.65	-0.43	-0.3
<b>2011</b>	18	-1.3	-0.54	-0.5	-0.79	-1.45	-0.8
<b>2012</b>	16	-0.3	0.16	-0.21	-0.06	-0.11	-0.4
<b>2013</b>	20	-0.5	-0.4	-0.9	-0.28	-0.43	-0.7
<b>2014</b>	36	0.02	0.31	0.74	0.18	0.37	0.35
<b>2015</b>	44	1.38	1.68	2.16	1.55	1.78	1.7
<b>CORR</b>		0.54	0.5	0.61	0.51	0.62	0.58

Los valores más alto de correlación entre la cantidad de Ondas Tropicales por año los índices de “El Niño” se obtienen con La Anomalia de la Temperatura superficial del mar en la región “Niño 1+2” y el BEST, es en principio lógico este resultado, debido a que la región “Niño 1+2” es la más próxima a las costas de Centro y Sudamérica sobre el Pacífico ecuatorial (Fig. 5.5), por lo cual es consistente que la dinámica del mar Caribe responda más eficientemente a los cambios de la superficie del mar en esta zona. Con respecto al BEST, es un índice que utiliza consideraciones más dinámicas, como lo es la Oscilación del Sur además de la Temperatura de la Superficie del Mar, por lo que, al tomar más información, puede representar de mejor manera los procesos dinámicos.

Los valores de 0.61 y 0.62 de correlación entre el número de Ondas Tropicales contra la Temperatura Superficial del Mar en la región Niño 1+2 y el BEST al 95% de confianza muestra una relación entre ambas variables. Considerando que ambos sistemas son dinámicos y cambiantes, este resultado es suficiente para afirmar su influencia en la cantidad de Ondas Africanas del Este, aunque no de forma directa.

## 6 Conclusiones

El modelo WRF a partir de las variables de humedad y sus anomalías, viento y temperatura potencial equivalente, logran capturar de forma precisa la trayectoria de las Ondas del Este, además de sus características físicas dinámicas tanto en la horizontal como en la vertical.

Las anomalías de humedad específica logran un trazado más preciso de las Ondas del Este, debido a que delimitan de forma adecuada el frente de onda al demarcar la parte convectiva y subsidente típicas del fenómeno.

Las anomalías máximas de humedad específica asociadas a casos de Ondas Tropicales logran delimitar adecuadamente la distribución espacial de la influencia del fenómeno sobre México. Los diagramas de Hovmöller de esta variable logran detectar el desplazamiento longitudinal en el tiempo de estas perturbaciones sobre el Atlántico occidental.

En la parte térmica, la temperatura por si sola no se relaciona de forma lineal con la humedad ni con la perturbación.

El presente trabajo, es el primero que logra una aproximación en la delimitación de la zona de influencia de las Ondas Tropicales del Este en México y calcula la contribución de estos fenómenos a la precipitación mensual y estacional en México utilizando modelos numéricos y datos observados.

A partir de relaciones entre el ENSO y la cantidad de Ondas Tropicales por Año, se muestra que esta última está bien correlacionada con el comportamiento de la Anomalía de la Temperatura Superficie del Mar en la Región Niño 1+2. Así mismo muestra buena asociación con índice Bivariado de El Niño – Oscilación del Sur (BEST) pudiendo ser una explicación a la variabilidad interanual de las Ondas del Este.

Se obtuvo una buena correlación de la cantidad mensual de Ondas Tropicales que llegan a México con la magnitud del viento a 700 hPa en la zona del Jet de Bajos niveles del Caribe (CLLJ), que es el nivel más energético de las Ondas del Este en

el oeste del Atlántico. Esto indica que las Ondas Tropicales que llegan a México tienen interacción con la zona del Jet a dicho nivel igualmente podría ser una explicación a la variabilidad interanual.

También se obtuvo una buena correlación de la cantidad mensual de Ondas Tropicales que alcanzan México y la cizalladura entre superficie y 500 hPa, por lo cual se infiere una interacción de las perturbaciones con la zona del Jet de Bajos Niveles del Caribe desde niveles bajos hasta niveles medios de la atmósfera.

La correlación del NDVI con el promedio de las anomalías de humedad específica para casos de OT, muestra una relación entre ambas variables en todos los meses del año, principalmente en julio y agosto, así como en el promedio anual. Esto nos indica una clara respuesta de la vegetación a la influencia de las OT, principalmente en los meses de verano.

La precipitación a su vez, muestra una relación con la vegetación, pero no es tan clara como lo es con la humedad específica, la precipitación muestra una mayor correlación en los meses de junio y septiembre, que son los picos máximos de precipitación en el año sobre el occidente, sur y sureste de México, lo cual consistente con la vegetación sobre esa región.

Por otra parte, la mayor correlación de la Vegetación con la humedad específica probablemente se deba a que la vegetación es sensible a otros procesos termodinámicos y microfísicos relacionados con la humedad, tales como la formación de rocío, nieblas y neblinas principalmente sobre la Sierra Madre Oriental, la Sierra Madre del Chiapas y las planicies costeras adyacentes al Golfo de México.

Una conclusión parcial es que la alta correlación entre la vegetación y la humedad durante los meses de julio y agosto (meses donde se presenta la Sequía de Medio Verano) proporciona una explicación coherente al hecho de que, aunque la precipitación disminuya sobre el oriente, sureste y sur de México, la vegetación no suele tener impactos profundos en su morfología durante esa época del año. Aunque para aseverar este resultado con mayor certeza es necesario estudiar la

respuesta de la vegetación a los fenómenos y procesos antes mencionados más a fondo.

Durante los meses de junio, julio y octubre, la precipitación aportada por las ondas tropicales constituye hasta 90 – 100% de su precipitación mensual respectiva para algunas regiones. Típicamente en la zona de influencia de las Ondas Tropicales del Este, el porcentaje de contribución de la precipitación asociada a ondas del este a la estacional para el año de estudio es de entre 30 y 60% con algunos máximos de 80% sobre zonas específicas (Véase capítulo 5.1).

# Anexos

## Anexo 1

### Correlación de Pearson

La correlación de Pearson proporciona una medida adimensional de la relación entre los datos simulados y observados. Los valores del coeficiente de correlación van de -1 a 1; un valor de -1 representa una perfecta correlación inversa, es decir las series de datos son inversamente proporcionales entre ellas; un valor de 1 corresponde a una perfecta correlación lineal, es decir los datos simulados y observados crecen o decrecen en la misma proporción; y un valor de 0 implica que los valores de las muestras de datos no están relacionados. El coeficiente tiene la expresión:

$$CORR = \frac{\sum_{k=1}^n (O_k - \bar{O}) \sum_{k=1}^n (x_k - \bar{x})}{[\sum_{k=1}^n (O_k - \bar{O})^2 \sum_{k=1}^n (x_k - \bar{x})^2]^{\frac{1}{2}}}$$

Donde:

$O_k$  es el valor observado

$\bar{O}$  es el valor medio de los datos observados

$x_k$  es el valor simulado

$\bar{x}$  es el valor medio de los datos simulados

$n$  es el número total de datos en la muestra

### Sesgo (BIAS)

El sesgo o error medio (ME por sus siglas en inglés) es la diferencia entre la media de los valores simulados y la media de las observaciones. Este error proporciona una medida de cuánto el modelo tiende a subestimar o sobrestimar los valores observados. Está representado por la siguiente ecuación:

$$ME = BIAS = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (x_k - O_k) = \bar{x} - \bar{O}$$

Donde:

$O_k$  es el valor de la variable observada

$\bar{O}$  es el valor medio de los datos observados

$x_k$  es el valor de la variable simulada

$\bar{x}$  es la media de los datos simulados

$n$  es el número total de datos en la muestra

**Error Absoluto Medio (MAE)**

Es la media aritmética de la diferencia absoluta entre pares de simulaciones y observaciones. Dicho de otra forma, es la magnitud promedio del error de las simulaciones. Por lo tanto, el MAE es cero si la simulación es perfecta, y se incrementa mientras la simulación es más discrepante de la observación, y está definido por la ecuación:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n |x_k - O_k|$$

Donde:

$O_k$  es el valor de la variable observada

$x_k$  es el valor de la variable simulada

$n$  es el número total de datos en la muestra

**Raíz Cuadrada del Error Cuadrático Medio (RMSE)**

Es la raíz cuadrada del promedio al cuadrado de la diferencia entre los pares de simulados y observados; dado que el error es elevado al cuadrado, éste es más sensible a grandes discrepancias. Se usa la raíz cuadrada con la finalidad de que el error tenga las mismas unidades que los valores simulados y observados. Está definido por la ecuación:

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (x_k - O_k)^2$$

Donde:

$O_k$  es el valor de la variable observada

$x_k$  es el valor de la variable simulada

$n$  es el número total de datos en la muestra

$$RMSE = \sqrt{MSE}$$

### Significancia de la correlación de Pearson

Se dice que una correlación es muy buena cuando es de uno, pero esto pasa muy pocas veces cuando se correlacionan dos variables distintas o valores de la misma variable, pero uno observado y el otro simulado como sucede en este estudio. La realidad es que no necesariamente la correlación debe ser de 1 o muy cercana a 1 para ser estadísticamente significativa, sino que esta depende de la cantidad de datos que se tenga en una serie de tiempo, es decir de los llamados grados de libertad. Para determinar si la correlación es estadísticamente significativa se utiliza una tabla (Tabla 3.2-2) que relaciona la correlación y los grados de libertad con niveles de significancia de 95% o 99% (Emery & Thompson, 2001). Los grados de libertad se calculan de la siguiente manera:

$$GL = \frac{N_{filas} - 1}{N_{columnas} - 1}$$

Tabla de coeficientes de correlación a niveles de significancia del 95% y 99%.

Grados de Libertad	5%	1%	Grados de Libertad	5%	1%
1	0.997	1.000	24	0.388	0.496
2	0.950	0.990	25	0.381	0.487
3	0.878	0.959	26	0.374	0.478
4	0.811	0.917	27	0.367	0.470
5	0.754	0.874	28	0.361	0.463
6	0.707	0.834	29	0.355	0.456
7	0.666	0.798	30	0.349	0.449
8	0.632	0.765	35	0.325	0.418
9	0.602	0.735	40	0.304	0.393
10	0.576	0.708	45	0.288	0.372
11	0.553	0.684	50	0.273	0.354
12	0.532	0.661	60	0.250	0.325
13	0.514	0.641	70	0.232	0.302
14	0.497	0.623	80	0.271	0.283
15	0.482	0.606	90	0.205	0.267
16	0.468	0.590	100	0.195	0.254
17	0.456	0.576	125	0.174	0.228
18	0.444	0.561	150	0.159	0.208
19	0.433	0.549	200	0.138	0.181
20	0.423	0.537	300	0.113	0.148
21	0.413	0.526	400	0.098	0.128

22	0.404	0.515	500	0.088	0.115
23	0.396	0.505	1000	0.062	0.081

## Bibliografía

- Arhens, D. C., & Henson, R. (2019). *Meteorology Today* (A. Platta (ed.); 12th ed.). Cengage.
- Bain, C. L., Williams, K. D., Milton, S. F., & Heming, J. T. (2014). Objective tracking of african easterly waves in met office models. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, *140*(678), 47–57. <https://doi.org/10.1002/qj.2110>
- Berry, G. J. (2004). Case study of an intense African easterly wave. *26th Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology*, 17–18.
- Berry, G. J., & Thorncroft, C. D. (2011). African Easterly Wave Dynamics in a Mesoscale Numerical Model: The Upscale Role of Convection. *Journal of the Atmospheric Sciences*, *69*(4), 1267–1283. <https://doi.org/10.1175/jas-d-11-099.1>
- Berry, G., Thorncroft, C., & Hewson, T. (2007). African Easterly Waves during 2004—Analysis Using Objective Techniques. *Monthly Weather Review*, *135*(4), 1251–1267. <https://doi.org/10.1175/mwr3343.1>
- Burpee, R. W. (1972). The Origin and Structure of Easterly Waves in the Lower Troposphere of North Africa. *Journal of the Atmospheric Sciences*, *29*(1), 77–90. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1972\)029<0077:TOASOE>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1972)029<0077:TOASOE>2.0.CO;2)
- Cerón-Hernández, J. P. (2017). *Climatología de ondas tropicales mediante el uso de una técnica de trazado automático, para la región del Atlántico tropical*. Universidad Veracruzana.
- Cho, H.-R., & Jenkins, M. A. (1987). The Thermal Structure of Tropical Easterly Waves. *Journal of the Atmospheric Sciences*, *44*(17), 2531–2539. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1987\)044<2531:TTSOTE>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1987)044<2531:TTSOTE>2.0.CO;2)
- Coiffier, J. (2011). *Fundamentals of Numerical Weather Prediction*. Cambridge University Press.
- CONAGUA. (2016a). Reporte del Clima en México, Agosto. *Servicio Meteorológico*

- Nacional*, 1–27. <http://www.accuweather.com/en/mx/mexico-weather>
- CONAGUA. (2016b). Reporte del Clima en México, Julio. *Servicio Meteorológico Nacional*, 1–27. <http://www.accuweather.com/en/mx/mexico-weather>
- CONAGUA. (2016c). Reporte del Clima en México, Junio. *Servicio Meteorológico Nacional*, 1–27. <http://www.accuweather.com/en/mx/mexico-weather>
- CONAGUA. (2016d). Reporte del Clima en México, Octubre. *Servicio Meteorológico Nacional*, 1–27. <http://www.accuweather.com/en/mx/mexico-weather>
- CONAGUA. (2016e). Reporte del Clima en México, Septiembre. *Servicio Meteorológico Nacional*, 1–27. <http://www.accuweather.com/en/mx/mexico-weather>
- Davison, M. (1999). *Tropical Waves: Characteristics and Model Depiction*. 29. <https://www.wpc.ncep.noaa.gov/international/training/tropicalwaves.old/sld001.htm>
- Dee, D. P., Uppala, S. M., Simmons, A. J., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., Andrae, U., Balmaseda, M. A., Balsamo, G., Bauer, P., Bechtold, P., Beljaars, A. C. M., Berg, L. Van De, Bidlot, J., Bormann, N., Delsol, C., Dragani, R., Fuentes, M., Geer, A. J., & Dee, D. P. (2011). *The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system*. *April*, 553–597. <https://doi.org/10.1002/qj.828>
- Diaz, M., & Ayyer, A. (2013). The Genesis of African Easterly Waves by Upstream Development. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 70(11), 3492–3512. <https://doi.org/10.1175/JAS-D-12-0342.1>
- Dominguez, C., Done, J. M., & Bruyère, C. L. (2020). Easterly wave contributions to seasonal rainfall over the tropical Americas in observations and a regional climate model. *Climate Dynamics*, 54(1), 191–209. <https://doi.org/10.1007/s00382-019-04996-7>
- Emery, W. J., & Thompson, R. E. (2001). *Data Analysis Methods in Physical Oceanography*. Elsevier B.V.

- Frank, N. L. (1967). “ *INVERTED V* ” *CLOUD EASTERLY WAVE?* 97(2).  
[https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1969\)097<0130:TVCPEW>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1969)097<0130:TVCPEW>2.3.CO;2)
- Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., Husak, G., Rowland, J., Harrison, L., Hoell, A., & Michaelsen, J. (2015). The climate hazards infrared precipitation with stations - A new environmental record for monitoring extremes. *Scientific Data*, 2, 1–21.  
<https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>
- García, E. (1964). *Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana)* (6th ed.). Universidad Nacional Autónoma de México.  
<https://doi.org/10.2307/j.ctv1xxv3n.2>
- Granados Ramírez, R., Reyna Trujillo, T., & Aguilar Sánchez, G. (2008). *Variación De La Precipitación, Efectos En La Agricultura Y Algunos Problemas Sociales En El Estado De Michoacan, Mexico*. April, Pag.2546-2561.
- Hall, N. M. J., Kiladis, G. N., & Thorncroft, C. D. (2006). Three-Dimensional Structure and Dynamics of African Easterly Waves. Part II: Dynamical Modes. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 63(9), 2231–2245.  
<https://doi.org/10.1175/JAS3742.1>
- Huffman, G. J., Adler, R. F., Bolvin, D. T., Gu, G., Nelkin, E. J., Bowman, K. P., Hong, Y., Stocker, E. F., & Wolff, D. B. (2007). The TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA): Quasi-global, multiyear, combined-sensor precipitation estimates at fine scales. *Journal of Hydrometeorology*, 8(1), 38–55.  
<https://doi.org/10.1175/JHM560.1>
- Kiladis, G. N., Thorncroft, C. D., & Hall, N. M. J. (2006). Three-dimensional structure and dynamics of African easterly waves. Part I: Observations. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 63(9), 2212–2230. <https://doi.org/10.1175/JAS3741.1>
- Magaña, V., Amador, J. A., & Medina, S. (1999). The Midsummer Drought over Mexico and Central America. *Journal of Climate*, 12(6), 1577–1588.  
[https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1999\)012<1577:TMDOMA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1999)012<1577:TMDOMA>2.0.CO;2)

- Maharaj. (1995). *Negative Tilted Waves*.
- Reed, R. J., Norquist, D. C., & Recker, E. E. (1977). The Structure and Properties of African Wave Disturbances as Observed During Phase III of GATE. *Monthly Weather Review*, 105(3), 317–333. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1977\)105<0317:TSAPOA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1977)105<0317:TSAPOA>2.0.CO;2)
- Riehl, H. (1945). Waves in the Easterlies. *University of Chicago Press*, 17, 79.
- Salinas P. (2006). Dinámica de Ondas del Este y su Interacción con el flujo medio en el Caribe . In *Tesis doctoral. UNAM*.
- Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D., Duda, M. G., ... Powers, J. G. (2008). A DESCRIPTION OF THE ADVANCED RESEARCH WRF VERSION 3. *University Corporation for Atmospheric Research*. <https://doi.org/10.5065/D68S4MVH>
- Tejeda, A. M. (2018). *La humedad en la atmósfera: bases físicas, instrumentos y aplicaciones*.
- Thompson, R. M., Payne, S. W., Recker, E. E., & Reed, R. J. (1979). Structure and Properties of Synoptic-Scale Wave Disturbances in the Intertropical Convergence Zone of the Eastern Atlantic. In *Journal of the Atmospheric Sciences* (Vol. 36, Issue 1, pp. 53–72). [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1979\)036<0053:saposs>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1979)036<0053:saposs>2.0.co;2)
- Thorncroft, C. D., Hall, N. M. J., & Kiladis, G. N. (2008). Three-dimensional structure and dynamics of African easterly waves. Part III: Genesis. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 65(11), 3596–3607. <https://doi.org/10.1175/2008JAS2575.1>
- Thorncroft, C., & Hodges, K. (2001). African easterly wave variability and its relationship to Atlantic tropical cyclone activity. *Journal of Climate*, 14(6), 1166–1179. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2001\)014<1166:AEWVAI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2001)014<1166:AEWVAI>2.0.CO;2)
- Wang, C. (2014). *Variability of the Caribbean Low-Level Jet and its relations to climate Variability of the Caribbean Low-Level Jet and its relations to climate*.

May. <https://doi.org/10.1007/s00382-007-0243-z>

Warner, T. (2011). *Numerical Weather and Climate Prediction* (1st ed.). Cambridge University Press.