

TESIS DEFENDIDA POR  
**Julio Nemorio Martínez Sánchez**  
Y APROBADA POR EL SIGUIENTE COMITÉ

---

*Tereza Cavazos*  

---

Dra. María Tereza Cavazos Pérez  
*Director del Comité*

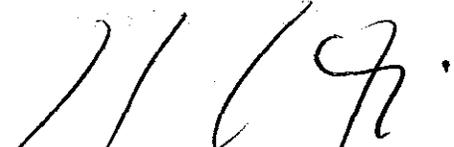
---

Dr. Edgar Gerardo Pavía López  
*Miembro del Comité*

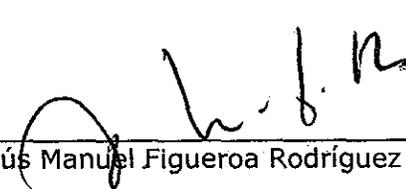
---

Dr. Juan Carlos Herguera García  
*Miembro del Comité*

---

Dr. Modesto Ortiz Figueroa  
*Miembro del Comité*

---

Dr. Jesús Manuel Figueroa Rodríguez  
*Coordinador del programa de posgrado  
en Oceanografía Física*

---

Dr. David Hilario Covarrubias Rosales  
*Director de Estudios de Posgrado*

01 de diciembre de 2011

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y DE EDUCACIÓN SUPERIOR  
DE ENSENADA**



---

**PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS  
EN OCEANOGRAFÍA FÍSICA**

---

**Variabilidad de los Huracanes en el Pacífico Oriental**

TESIS

que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de  
MAESTRO EN CIENCIAS

Presenta:

Julio Nemorio Martínez Sánchez

Ensenada, Baja California, México, diciembre de 2011

---

**RESUMEN** de la tesis de **Julio Nemorio Martínez Sánchez**, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de **MAESTRO EN CIENCIAS** en **OCEANOGRAFÍA FÍSICA** Ensenada, Baja California, México. Diciembre de 2011.

### **Variabilidad de los Huracanes en el Pacífico Oriental**

Resumen aprobado por:

  
Dra. María Tereza Cavazos Pérez

Director de Tesis

En esta tesis se estudian las características sinópticas asociadas a la formación e intensificación de huracanes en el Área Principal de Ciclogénesis (APC) del Pacífico Oriental tropical de mayo a noviembre (1970-2010) mediante compuestos diarios y estacionales usando datos del re-análisis de NCEP/NCAR. Se analizan las condiciones promedio asociadas a la ciclogénesis e intensificación de los huracanes intensos (HUR4-5) y los menos intensos (HUR1-3), así como su posible relación con las fases de El Niño/Oscilación del Sur (ENOS).

La APC muestra una tendencia de 0.57 °C significativa al 95 % en la temperatura superficial del mar (TSM) durante los meses más activos (Jul-Sep) del periodo analizado. Durante los días de origen y máxima intensidad de todos los huracanes (de mayo a noviembre), se observa en promedio un patrón de mayor calentamiento superficial del océano durante los HUR4-5 que durante los HUR1-3; sin embargo, el corte vertical del viento (CV) zonal entre 850-200 mb en promedio es favorable para los dos grupos de huracanes. Los valores estacionales (Jul-Sep) más favorables de TSM y CV para la formación e intensificación de huracanes son de 28.1-28.7°C y 3-7 m/s, respectivamente. Los HUR4-5 tienen mayor duración (10.2 días) y trayectorias más extensas que los HUR1-3 (7.1 días). En la década de los 90 se registró un aumento significativo en el número de HUR4-5, lo cual es consistente con lo ocurrido a escala global.

A escala interanual, los eventos Neutrales se caracterizan por el mayor número de huracanes en todas las categorías. Comparando las fases del ENOS (El Niño, Neutral y La Niña), se observa que durante la temporada de máxima actividad de huracanes (Jul-Sep), en eventos de El Niño hay una disminución del corte vertical del viento zonal y una mayor expansión de la alberca de agua cálida del Pacífico Oriental tropical. Sin embargo, la frecuencia de HUR4-5 es muy similar en eventos Neutrales y El Niño, mientras que es mínima durante La Niña. El reto que surge para el futuro es determinar por qué generalmente la temporada de huracanes es más activa durante eventos Neutrales que durante eventos de El Niño.

**Palabras Clave:** Huracanes, Pacífico Oriental tropical, ENOS, México.

**ABSTRACT** of the thesis presented by **Julio Nemorio Martínez Sánchez** as a partial requirement to obtain the **MASTER OF SCIENCE** degree in **PHYSICAL OCEANOGRAPHY**. Ensenada, Baja California, México. December. 2011.

### **Hurricane variability in the Eastern Pacific**

In this thesis the synoptic features associated with the formation and intensification of hurricanes in the principal area of cyclogenesis (PAC) in the eastern tropical Pacific are analyzed during May-Nov of 1970-2010 using daily and seasonal composites from the NCEP/NCAR reanalysis dataset. We examine the average daily conditions during cyclogenesis and intensification of intense (HUR4-5) and less intense (HUR1-3) hurricanes and their possible relationship to the phases of the El Niño/Southern Oscillation (ENSO).

The PAC shows a statistically significant (95%) trend of 0.57 °C in sea surface temperature (SST) during the most active months (Jul-Sep) of the study period. During the days of origin and maximum intensity of all hurricanes (May-Nov) there is a pattern of more increased ocean surface warming during the HUR4-5 than during HUR1-3, however the zonal vertical wind shear (WS) at 850-200 mb is in average favorable in the two groups. The most favorable seasonal (Jul-Sep) values of SST and WS for the formation and intensification of hurricanes are 28.1-28.7 °C and 3-7 m/s, respectively. The HUR4-5 last longer (10.2 days) and have longer trajectories than the HUR1-3 (7.1 days). The 1990s saw a significant increase of HUR4-5, consistent with what happened at global scales.

At interannual timescales, Neutral events are characterized by the largest frequency of hurricanes in all categories. Comparing the ENSO phases (El Niño, Neutral and La Niña), it is observed that during the peak hurricane season (Jul-Sep) of El Niño events there are lower WS values and a greater expansion of the warm pool in the PAC region than during Neutral and La Niña events. However, the frequency of HUR4-5 is very similar in Neutral and El Niño events, whereas it is minimal during La Niña. The challenge that arises for future work is to determine why the hurricane season is generally more active (HUR1-5) during Neutral events than during El Niño events.

**Keywords:** Hurricanes, Eastern tropical Pacific, ENOS, Mexico.

## Dedicatorias

*A mis padres: Teté y Julio César.  
A mis hermanos: César y Yuliana.  
A Germán y Germán Jr.  
Gracias a todos por su apoyo y su cariño.*

## Agradecimientos

- A mi Directora de Tesis, la Dra. Tereza Cavazos, por todo el apoyo y paciencia brindados a lo largo de mi último año de estudios, durante el cual fue un placer trabajar a su lado.
  - A los miembros del Comité de Tesis: Edgar Pavía, Modesto Ortiz y Juan Carlos Herguera por todos sus comentarios y sugerencias, siempre esenciales para la elaboración de este trabajo.
  - A mis profesores, Oscar Velasco, Alejandro Parés, José Gómez, Manuel López, Guido Marinone, Paula Pérez, Julio Candela y Julio Sheinbaum por todas sus enseñanzas.
  - A todos mis compañeros de posgrado del Departamento de Oceanografía Física por su invaluable apoyo académico y su amistad brindada.
  - A mis compañeros y amigos Ramón Fuentes Franco, Erika Sandoval Hernández, Aldo Olivares, Alejandro Kurczyn, Renzo Witthembury Bianchi y Luis Erasmo Miranda Bojórquez.
  - Al CONACYT por el apoyo económico brindado a través de la beca 231765.
  - Al Posgrado en Oceanografía Física del CICESE por el apoyo económico brindado durante los meses de septiembre, octubre y noviembre del año en curso.
  - Al proyecto interno “Variabilidad del Monzón” del Departamento de Oceanografía Física del CICESE.
-

# CONTENIDO

|   | <b>Página</b> |
|---|---------------|
| <b>Resumen español</b> .....  | <b>i</b>      |
| <b>Resumen inglés</b> .....   | <b>ii</b>     |
| <b>Dedicatorias</b> .....   | <b>iii</b>    |
| <b>Agradecimientos</b> .....  | <b>iv</b>     |
| <b>Contenido</b> .....  | <b>v</b>      |
| <b>Lista de Figuras</b> .....   | <b>vii</b>    |
| <b>Lista de Tablas</b> .....  | <b>xi</b>     |
| <br>  |               |
| <b>I. INTRODUCCIÓN</b> .....  | <b>1</b>      |
| I.1 Justificación.....  | 1             |
| I.2 Hipótesis.....  | 3             |
| I.3 Objetivos.....  | 3             |
| I.4 Zona de estudio.....  | 4             |
| <br>  |               |
| <b>II. CICLONES TROPICALES DEL PACÍFICO ORIENTAL TROPICAL</b> .....   | <b>6</b>      |
| II.1 Ciclones tropicales.....   | 6             |
| II.2 Ciclones tropicales en el Pacífico Oriental tropical.....  | 9             |
| II.3 El Niño Oscilación del Sur (ENOS) y los ciclones tropicales.....   | 10            |
| II.4 Ciclones tropicales y calentamiento global.....  | 12            |
| <br>  |               |
| <b>III. DATOS Y METODOLOGÍA</b> .....   | <b>13</b>     |
| <br>  |               |
| <b>IV. RESULTADOS</b> .....   | <b>15</b>     |
| IV.1 Frecuencia e intensidad de huracanes en el área principal de<br>ciclogénesis del Pacífico Oriental tropical.....                 | 15            |
| IV.1.1 Huracanes que aterrizaron en México y variabilidad decadal.....  | 20            |
| IV.1.2 Precipitación derivada de huracanes en México.....   | 24            |
| IV.2 Condiciones termodinámicas y dinámicas a escala diaria durante<br>el paso de huracanes en el área principal de ciclogénesis..... | 27            |
| IV.3 Variabilidad interanual de los huracanes y su relación con el<br>fenómeno ENOS.....  | 33            |
| <br>  |               |
| <b>V. CONCLUSIONES</b> .....  | <b>45</b>     |
| <br>  |               |
| <b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....   | <b>48</b>     |

## LISTA DE FIGURAS

| <i>Figura</i> |   | <b>Página</b> |
|---------------|---|---------------|
| 1             | Área principal de ciclogénesis de ciclones tropicales en el Pacífico Oriental tropical durante May-Nov de 1970-2010 (rectángulo). Los puntos indican la posición de origen de los ciclones tropicales que alcanzaron categoría de huracán (HUR 1-5) y los círculos azul y rojo la posición promedio de origen y máxima intensidad, respectivamente. | 4             |
| 2             | Regiones principales de formación y trayectorias históricas de todos los ciclones tropicales (DT= depresión tropical; TT= tormenta tropical; y, huracanes categorías 1-5 según la escala Saffir-Simpson) observados entre 1851-2006.  | 6             |
| 3             | Trayectorias de los huracanes categorías 1-3 (HUR 1-3, en negro) y huracanes categorías 4-5 (HUR 4-5, en rojo) originados en el área principal de ciclogénesis del Pacífico Oriental tropical durante May-Nov de 1970-2010.   | 15            |
| 4             | Trayectoria y frecuencia total (N) de huracanes por categorías durante May-Nov 1970-2010 en la Cuenca del Pacífico Oriental. Se indican los meses de máxima ocurrencia y sus frecuencias respectivas entre paréntesis.  | 16            |
| 5             | Coordenadas de origen (arriba) y máxima intensidad (abajo) de HUR 1-3 (izquierda) y HUR 4-5 (derecha) en el área principal de ciclogénesis del Pacífico Oriental durante May-Nov de 1970-2010. Los puntos azules y rojos indican la posición promedio de origen y máxima intensidad, respectivamente.   | 17            |
| 6             | Ciclo estacional de la frecuencia de HUR 1-3 (gris) y HUR 4-5 (negro) en el área principal de ciclogénesis del Pacífico Oriental durante May-Nov de 1970-2010.  | 18            |

## LISTA DE FIGURAS (continuación)

| <i>Figura</i> |  | <b>Página</b> |
|---------------|--|---------------|
| 7             | Frecuencia anual de HUR 1-5 (superior), HUR 1-3 (centro) y HUR 4-5 (inferior) en el área principal de ciclogénesis del Pacífico Oriental en el período May-Nov de 1970-2010. Se muestra la media (línea sólida) y $\pm 1$ desviación estándar (líneas punteadas).  | 19            |
| 8             | Arriba: Primera posición registrada en tierra de los ciclones tropicales del Pacífico Oriental que aterrizaron en México durante May-Nov en 1970–2009. Se considera la categoría actual al momento de tocar tierra. Abajo: se muestran las trayectorias de los huracanes que aterrizaron de acuerdo a su categoría máxima alcanzada, HUR 1-3 (Izq.) y HUR 4-5 (Der.), aunque pudieron aterrizar con menor categoría. En rojo se indican los HUR 4-5 en la última década. | 21            |
| 9             | Frecuencia anual (May-Nov) de HUR 1-5 (línea continua) y promedio anual de la Oscilación Multidecadal del Atlántico (AMO, línea quebrada). La correlación (con retraso de 1 año de la AMO) es $r = -0.35$ y estadísticamente significativa al 95 %.  | 23            |
| 10            | Frecuencia anual (May-Nov) de HUR 1-5 (línea continua) y promedio anual de la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO, línea quebrada). $r = 0.28$ (con retraso de 1 año) y estadísticamente significativa al 95 %.   | 24            |
| 11            | Frecuencia (N) y precipitación acumulada (mm) promedio por huracán durante un día antes, el día que aterrizó y un día después, de los 71 HUR 1-5 que entraron a México por la costa del Pacífico en el período 1970-2010.  | 25            |
| 12            | Como en la figura anterior, en este caso para los HUR 1-3.   | 26            |
| 13            | Como en la figura anterior, en este caso para los HUR 4-5.   | 26            |
| 14            | Promedio de la temperatura superficial del mar (TSM, °C) durante May-Nov de 1970-2010 en el área principal de ciclogénesis del Pacífico Oriental. Sólo se grafican valores mayores a 26 °C.  | 27            |
| 15            | Promedio de TSM y corte del viento zonal (CV) entre 850 y 200 mb durante los meses de máxima frecuencia (Jul-Sep) en el área principal de ciclogénesis.  | 28            |

## LISTA DE FIGURAS (continuación)

| <i>Figura</i> |  | <i>Página</i> |
|---------------|--|---------------|
| 16            | Promedio de TSM (°C) en el día de ciclogénesis de los HUR 1-5 durante May-Nov en el periodo 1970-2010. Se indica la posición promedio de origen (azul) y máxima intensidad (negro) de todos los huracanes.   | 29            |
| 17            | Compuestos de anomalías de la TSM (°C) en el día de máxima intensidad de HUR 1-3 (arriba) y HUR 4-5 (abajo) durante May-Nov en el periodo 1970-2010. Los puntos azul y rojo indican la posición promedio de origen y máxima intensidad respectivamente. Anomalías con respecto al periodo 1970-2010. | 30            |
| 18            | Frecuencia anual de HUR 1-5 y su relación con la TSM promedio en el área principal de ciclogénesis durante Jul-Sep de 1970 a 2010.   | 31            |
| 19            | Promedio del CV zonal (m/s) de 850 a 200mb durante el día de máxima intensidad de los HUR 1-3 (izquierda) y HUR 4-5 (derecha) durante May-Nov. Los círculos rojos y negros indican la posición promedio de origen y máxima intensidad, respectivamente.  | 31            |
| 20            | Frecuencia anual de HUR 1-5 y su relación con el CV (m/s) promedio entre 850 y 200 mb en el área principal de ciclogénesis durante Jul-Sep de 1970 a 2010  | 32            |
| 21            | Anomalías del viento zonal a 850mb (m/s) durante el día de origen y máxima intensidad de los HUR 1-3 (Izq.) y HUR 4-5 (Der.). Se identifican las zonas de mayor circulación ciclónica (C) que coinciden con el día de máxima intensificación.  | 33            |
| 22            | Serie de tiempo del Oceanic Niño Index (ONI, °C) durante la temporada de huracanes (May-Nov) en el periodo 1970-2010.  | 34            |

## LISTA DE FIGURAS (continuación)

| <i>Figura</i> |   | <i>Página</i> |
|---------------|---|---------------|
| 23            | Frecuencia anual de HUR 1-3 (superior) y HUR 4-5 (inferior) en eventos La Niña, Neutral y El Niño. Se indica el promedio de la frecuencia (línea continua) y $\pm 1$ desviación estándar (línea quebrada).  | 35            |
| 24            | Posición de origen, máxima intensidad y porcentaje de frecuencia de HUR 1-3 (72 % en total; izquierda) y HUR 4-5 (28 % en total; derecha) en el área principal de ciclogénesis durante eventos La Niña (LN, superior), Neutral (N, centro) y El Niño (EN, inferior) en el periodo May-Nov 1970-2010. El círculo azul indica la posición promedio de ciclogénesis y el rojo el de máxima intensidad.   | 36            |
| 25            | Frecuencia anual de HUR 1-3 (superior) y HUR 4-5 (inferior) en relación a las anomalías promedio de la temperatura superficial del mar (TSMan Oceanic Niño Index) en la región Niño 3-4 para el periodo May-Nov de 1970-2010. Se consideran eventos La Niña, Neutral y El Niño cuando las TSMan son: $\leq -0.5^{\circ}\text{C}$ , entre $> -0.5^{\circ}\text{C}$ y $< 0.5$ , y $\geq 0.5^{\circ}\text{C}$ , respectivamente. Se indican en azul y rojo los años extremos con mayores (P95 %) y menores (P5 %) frecuencias de huracanes. Las líneas quebradas horizontales indican $\pm 1$ desviación estándar. | 37            |
| 26            | Trayectorias y frecuencia (N) de los HUR 1-3 (izquierda) y HUR 4-5 (derecha) durante eventos La Niña (superior), Neutrales (centro) y El Niño (inferior) en el periodo May-Nov 1970-2010.   | 38            |
| 27            | Presión a nivel del mar (mb) durante Jul-Sep en eventos La Niña (superior), Neutrales (centro), y El Niño (inferior) en el periodo 1970-2010.   | 41            |
| 28            | Compuestos del CV (izquierda; m/s) zonal entre 850 y 200 mb y la TSM (derecha; $^{\circ}\text{C}$ ) durante Jul-Sep en eventos La Niña (superior), Neutrales (centro), y El Niño (inferior) en el periodo 1970-2010. Se resaltan los valores de TSM y CV mayores o iguales a $28^{\circ}\text{C}$ y 9 m/s, respectivamente.   | 42            |

## LISTA DE FIGURAS (continuación)

| <i>Figura</i> |  | <i>Página</i> |
|---------------|--|---------------|
| 29            | Frecuencia anual (May-Nov) de HUR 1-5 y su relación con los valores promedio de la TSM (izquierda; °C) y CV (derecha; m/s) durante Jul-Sep en el área principal de ciclogénesis en eventos La Niña (superior), Neutrales (centro) y El Niño (inferior). Datos de CV hasta el 2007. | 43            |

---

## LISTA DE TABLAS

| Tabla |   | Página |
|-------|---|--------|
| I     | Escala de huracanes Saffir-Simpson.   | 7      |
| II    | Características promedio de los HUR1-5, HUR1-3 Y HUR 4-5 que se formaron en el área principal de ciclogénesis del Pacífico Oriental en el período de May-Nov 1970-2010.                           | 20     |
| III   | Frecuencia decadal y bidecadal de HUR 1-3, HUR 4-5 y HUR 1-5 en el Pacífico Oriental en el período May-Nov de 1970-2009; en paréntesis se muestra la frecuencia de los que aterrizaron en México. | 23     |
| IV    | Características promedio de posición y duración de HUR 1-5 durante eventos ENOS.  | 38     |

# Capítulo I

---

## INTRODUCCIÓN

---

### I.1 Justificación

El Pacífico Oriental tropical es una de las zonas de ciclogénesis más activas a nivel global (Camargo et al., 2008; Corbosiero, 2009). Sin embargo, el conocimiento que se tiene sobre la variabilidad de los ciclones tropicales en el Pacífico Oriental es, en general, mucho menor que el de la cuenca del Atlántico Norte, posiblemente porque rara vez impactan a los Estados Unidos (Collins y Mason, 2000; Ralph y Gough, 2009; Corbosiero, 2009). Lo anterior contribuye a que se tenga menor conocimiento acerca de la variabilidad de los forzamientos dinámicos y termodinámicos involucrados en la evolución de un huracán en la región de estudio y, por lo tanto, en su predictibilidad a escala estacional.

Los huracanes son ciclones tropicales que tienen vientos máximos mayores a 118 km/h y son influenciados por una variedad de factores físicos, tales como temperatura superficial del mar (TSM), corte vertical del viento zonal (CV), humedad y estabilidad atmosférica (Gray, 1968). Los huracanes sólo se pueden formar en áreas con TSM mayor a 26.5 °C (Gray, 1968), y se sabe que el CV tiene una correlación negativa con la intensidad de los huracanes durante su ciclo de vida (Gray 1968; DeMaria y Kaplan, 1994).

Dada la persistencia estacional de las anomalías de la TSM y el CV en el Pacífico Oriental tropical durante las diferentes fases del fenómeno El Niño-Oscilación del Sur (ENOS), es de gran importancia investigar la posible relación de los eventos El

Niño, La Niña y Neutrales en la predictibilidad de la frecuencia e intensidad de huracanes en la región a escala interanual. En la cuenca del Atlántico diversos autores observan una correlación significativa entre el ENOS y los huracanes, con un aumento en la frecuencia e intensidad durante eventos La Niña y una disminución durante eventos El Niño (e.g., Gray, 1984; Shapiro, 1987; Goldenberg y Shapiro, 1996; Bove et al., 1998; Wilson, 1999). De acuerdo a la literatura actual, el ENOS parece tener una influencia pequeña (muy variable) en la frecuencia de huracanes en el Pacífico Oriental, sin embargo, se han observado huracanes más intensos durante sus fases cálidas (Chu, 2004).

Vadillo et al., (2007) mencionan que los impactos más devastadores asociados a huracanes se deben a las altas precipitaciones, que en ocasiones alcanzan los 400 mm/día en zonas costeras del Pacífico Oriental. Un claro ejemplo es el Huracán Pauline que en 1997 (año de El Niño) afectó principalmente las costas de Guerrero y produjo lluvias intensas de 120 mm en una hora y una lluvia total de 411 mm en 13 horas en el puerto de Acapulco (Lugo e Inbar, 2002).

Por otra parte, hay evidencias físicas de que el clima actual se encuentra en un proceso de rápido calentamiento debido tanto a la variabilidad natural como a actividades antropogénicas (Karl y Trenberth 2003; IPCC, 2007). Es muy posible que este proceso continúe y además se intensifique (IPCC, 2007) afectando de manera directa o indirecta las características y la dinámica de los huracanes. A escala global se ha observado desde la década de los 70 un aumento de 0.5 °C en la TSM (Agudelo y Curry, 2004; Webster et al., 2005) y en la década de los 90 también se observó un aumento en la frecuencia de los huracanes más intensos, de categorías 4 y 5 (Webster et al., 2005); por lo tanto, existe la preocupación de si los huracanes podrían intensificarse con el calentamiento global (e.g., Pielke et al., 2005; Trenberth, 2005; Webster et al., 2005; Emanuel et al., 2008).

A continuación se presentan la hipótesis, los objetivos y la zona de estudio. En los Capítulos 2 y 3 se muestran los antecedentes y la metodología utilizada, respectivamente. Los resultados obtenidos para la región de estudio se exponen en el Capítulo 4. Finalmente, se presentan las conclusiones en el Capítulo 5.

## **1.2 Hipótesis**

La pregunta científica que se intenta responder en este trabajo es: ¿Cuáles son las características dinámicas y termodinámicas que diferencian a los huracanes intensos (HUR 4-5) de los débiles (HUR 1-3) en el Pacífico Oriental tropical? A partir de lo anterior se formulan las siguientes hipótesis:

1. A mayores temperaturas superficiales del mar, los huracanes son más intensos.
2. La fase cálida del ENOS (El Niño) se asocia con un incremento de huracanes intensos (HUR 4-5) debido a un aumento de la TSM y una disminución en el corte del viento en la zona principal de ciclogénesis del Pacífico Oriental.

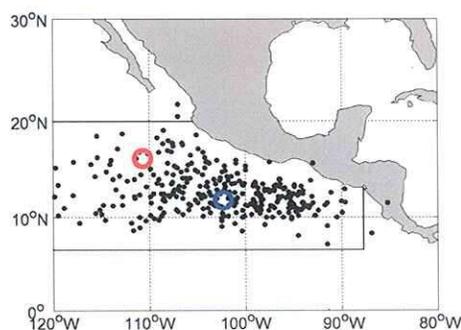
## **1.3 Objetivos**

1. Investigar la variabilidad de los huracanes a escala estacional e interanual en la cuenca del Pacífico Oriental tropical y determinar la diferencia entre los huracanes intensos (HUR 4-5) y los débiles (HUR 1-3) mediante el análisis estadístico de algunas variables dinámicas y termodinámicas.
2. Analizar la influencia de las fases del ENOS en la intensidad, frecuencia, duración y trayectoria de huracanes.
3. Evaluar la precipitación asociada a huracanes en la costa occidental de México.

## I.4 Zona de Estudio

A nivel oceánico, la región del Pacífico Oriental tropical se localiza entre los giros subtropicales del norte y sur del Pacífico (Fiedler y Talley, 2006). Esta región se caracteriza por tener varias fuentes disponibles de calor dentro del sistema océano-atmósfera (Amador et al., 2006). Los procesos dinámicos y atmosféricos de la zona están asociados a la distribución zonal de momento y de fuentes de calor asociadas a corrientes en chorro de niveles bajos (Amador 1998), grandes regiones de albercas cálidas (Wang y Enfield, 2001), y formación y desarrollo de ciclones tropicales (Gray, 1968; Farfán y Zehnder, 1997).

En este trabajo se define el área principal de ciclogénesis ( $90^{\circ}\text{W}$  a  $120^{\circ}\text{W}$ ; ver Fig. 1) del Pacífico Oriental tropical, como el área donde se originan el 90 % de los huracanes de la región. A nivel global, es la segunda zona más activa de formación y desarrollo de huracanes y la más activa por unidad de área a nivel global (Molinari et al., 2000; Camargo et al., 2008; Corbosiero, 2009). La Fig. 1 muestra la región de estudio con la localización de origen de los HUR 1-5 durante 1970-2010, así como las posiciones promedio de origen y máxima intensidad.



**Figura 1.** Área principal de ciclogénesis de ciclones tropicales en el Pacífico Oriental tropical durante May-Nov de 1970-2010 (rectángulo). Los puntos indican la posición de origen de los ciclones tropicales que alcanzaron categoría de huracán (HUR 1-5) y los círculos azul y rojo la posición promedio de origen y máxima intensidad, respectivamente.

Romero-Vadillo et al., (2007) mencionan que los huracanes que se forman en el Pacífico Oriental tropical generalmente ocurren sobre zonas de TSM  $> 27^{\circ}\text{C}$ , justo afuera de la zona ecuatorial. Por otro lado, Collins y Mason (2000) identifican dos regiones de formación y desarrollo de huracanes en el Pacífico Oriental. Dichas regiones se caracterizan principalmente por una correlación distinta entre la TSM y los huracanes. La región este (al este de  $116^{\circ}\text{W}$  en la Fig. 1) es más cálida, lo cual favorece a que los huracanes tengan mayor duración, mientras que en la región oeste (al oeste de  $116^{\circ}\text{W}$  y hasta  $180^{\circ}\text{W}$ ) se presentan huracanes de mayor intensidad, posiblemente porque los huracanes ya están más desarrollados cuando pasan sobre esa región. Además, Ralph y Gough (2009) muestran un aumento en la TSM de  $0.03^{\circ}\text{C/año}$  y  $0.02^{\circ}\text{C/año}$  ( $0.96^{\circ}\text{C}$  y  $0.64^{\circ}\text{C}$  para el período 1971-2002) en las zonas oeste y este, y concluyen que la TSM juega un papel importante en la formación e intensidad de los huracanes en ambas regiones, aunque reconocen que existen otros factores involucrados.

## Capítulo II

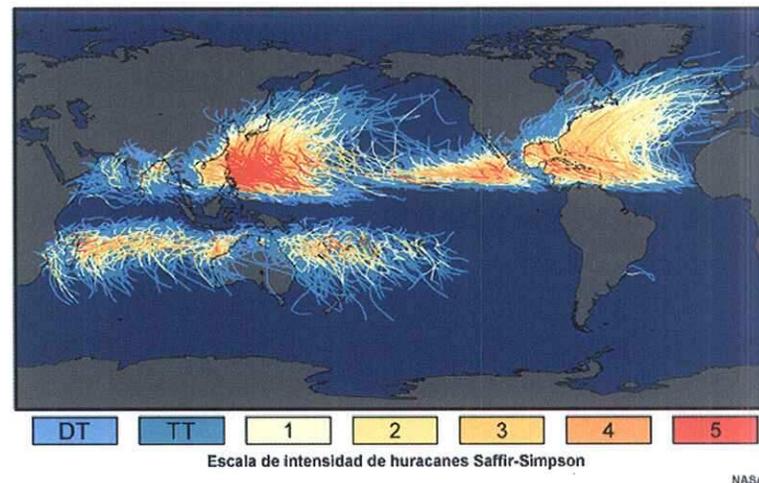
---

### CICLONES TROPICALES DEL PACÍFICO ORIENTAL

---

#### I.1 Ciclones tropicales

Los ciclones tropicales son sistemas sinópticos de baja presión no frontales de núcleo cálido que se desarrollan principalmente sobre regiones oceánicas tropicales cálidas; se caracterizan principalmente por presentar actividad convectiva bien organizada y circulación ciclónica del viento en superficie bien definida (Frank, 1977; Holland, 1993).



**Figura 2. Regiones principales de formación y trayectorias históricas de todos los ciclones tropicales (DT= depresión tropical; TT= tormenta tropical; y, huracanes categorías 1-5 según la escala Saffir-Simpson) observados entre 1851-2006.**

Existen ocho cuencas o zonas principales de formación de ciclones tropicales, que se muestran en la Fig. 2. Los ciclones tropicales se dividen en depresiones tropicales (DT: vientos máximos < 61 km/h), tormentas tropicales (TT: vientos

máximos > 61 km/h y < 119 km/h) y ciclones tropicales intensos (vientos máximos > a 119 km/h; ver Tabla 1). Estos últimos se conocen como huracanes en las cuencas del Pacífico Oriental y el Atlántico Norte y se clasifican de acuerdo a la escala Saffir-Simpson (Tabla I). La escala, realizada en 1971, se basa en la intensidad de los vientos máximos sostenidos y la mínima presión registrada en el ojo del huracán.

**Tabla I. Escala de huracanes Saffir-Simpson.**

| <b>Categoría</b> | <b>Viento máximo (km/h)</b> | <b>Presión atmosférica (mb)</b> |
|------------------|-----------------------------|---------------------------------|
| <b>1</b>         | 119-153                     | > 980                           |
| <b>2</b>         | 154-177                     | 979-965                         |
| <b>3</b>         | 178-209                     | 964-945                         |
| <b>4</b>         | 210-249                     | 944-920                         |
| <b>5</b>         | > 250                       | < 920                           |

Los flujos de calor existentes en el sistema océano-atmósfera son la principal fuente de energía de los huracanes (Schade, 2000). El océano es de vital importancia ya que provee la energía necesaria para establecer y mantener una fuerte actividad convectiva (Byers, 1944; Palmén, 1948; Riehl, 1954; Miller, 1958; Malkus y Riehl, 1960). Una capa superficial del océano suficientemente cálida puede afectar significativamente la intensidad de un huracán (Bosart et al., 2000).

Existe un conjunto de condiciones dinámicas y termodinámicas necesarias en la formación y desarrollo de un huracán (Gray, 1968; Gray, 1984; Emanuel, 2005; Holland, 1997; Knutson y Tuleya, 2004; Webster et al., 2005; Camargo et al., 2007;). Las variables termodinámicas involucran una TSM mayor de 26.5 °C en al menos 50 m de profundidad, presencia de inestabilidad convectiva y humedad relativa  $\geq 40$  % en niveles bajos de la atmósfera (800-700 mb) (e.g., Palmén, 1948; Gray, 1968). Las condiciones dinámicas favorables son el efecto de la vorticidad planetaria (a una distancia de ~500 km del ecuador, como lo sugieren

las trayectorias en la Fig. 2), la presencia de un sistema de baja presión con vorticidad positiva a 925 mb y un corte vertical del viento zonal débil ( $CV < 8$  m/s/650mb) entre 850 y 200 mb (e.g., Gray, 1979; McBride y Zehr, 1981). Es necesario que exista una interacción entre estas variables dinámicas y termodinámicas para que logre originarse, desarrollarse y mantenerse un huracán (Gray 1979; McBride y Zehr, 1981).

Emanuel (2006), menciona que los factores que controlan la intensidad de los huracanes parecen ser muy diferentes de aquéllos que rigen su frecuencia. Lo anterior se puede ver reflejado en el hecho de que durante algunas temporadas se tiene una frecuencia muy baja de huracanes, aunque algunos pueden convertirse en huracanes intensos.

La TSM es un factor limitante en el desarrollo e intensificación de los huracanes (Whitney y Hogbood, 1997; Zeng et al., 2007) porque determina la cantidad disponible de calor latente y sensible, y ayuda a la conversión de una depresión tropical de núcleo frío a un sistema de núcleo caliente (Miller, 1958; Malkus y Riehl, 1960); es decir, ayuda a que se genere una baja térmica de bajos niveles. En zonas de mayor TSM, los huracanes son capaces de mantener su organización e intensidad debido a una fuerte actividad convectiva cerca de la superficie (Kimberlain y Elsner, 1998). Además, los cambios en la actividad de los huracanes se vinculan con fluctuaciones en la TSM a escala interanual (ENOS) e interdecadal (Shapiro y Goldenberg, 1998; Goldenberg et al., 2001)

El CV del viento zonal entre 850 y 200 mb puede favorecer o inhibir los procesos de ciclogénesis e intensificación (e.g., DeMaria, 1996; Whitney y Hogbood, 1997; Pielke y Landsea, 1999; Frank y Ritchie, 2001; Goldenberg et al., 2001; Emanuel y Nolan, 2004). Se ha demostrado que un CV fuerte ( $>8$  m/s) inhibe el desarrollo de ciclones tropicales (e.g., Pielke y Landsea, 1999; Goldenberg et al., 2001; Emanuel y Nolan, 2004; Camargo et al., 2007) y puede llegar a disminuir la

intensidad de los huracanes. En algunos casos, un CV mayor a 20 m/s puede debilitar un huracán muy intenso en menos de un día ya que disipa la energía proveniente del sistema océano-atmósfera necesaria para mantener la intensidad del huracán (e.g., Zehr, 1992; DeMaria, 1996; Frank y Ritchie, 2001). Sin embargo, en el Pacífico Occidental se han reportado casos de huracanes intensos que se mantienen e incluso se intensifican con un CV de 12.5 m/s (Zeng et al., 2007) cuando transitan hacia latitudes subtropicales; esto ocurre posiblemente cuando coinciden con el paso de vaguadas de latitudes medias las cuales requieren de CV fuertes para mantener condiciones baroclínicas (e.g. Vega y Binkley 1994; Bracken y Bosart 2000; Hart y Evans, 2000).

## **II.2 Ciclones tropicales en el Pacífico Oriental tropical**

Los ciclones tropicales del Pacífico Oriental tropical se generan principalmente por ondas del este provenientes del Atlántico que se propagan a través del Mar Caribe, Centroamérica y la región de estudio (e.g., Avila y Pasch, 1992; Molinari et al., 1997). Otros mecanismos de generación involucran desprendimientos de remolinos o vórtices de meso-escala en la Zona de Convergencia Intertropical, efectos de la orografía del continente, intrusiones de aire seco troposférico (Fink y Vincent, 2001; Wang y Magnusdottir, 2006) y la vaguada monzónica.

La temporada de ciclones tropicales en la región de estudio comienza oficialmente el 15 de mayo y termina el 30 de noviembre, siendo septiembre el mes más activo (e.g., Larson et al., 2005; Camargo et al., 2008). Esta región tiene un promedio anual de 8.8 huracanes y 7.4 tormentas tropicales (Romero-Vadillo et al., 2007).

En el Pacífico Oriental, la mayoría de los ciclones tropicales tienen trayectorias hacia el noroeste y pocas veces pasan de los 30°N en el Pacífico Oriental (Fig. 2). En ocasiones afectan la región semiárida del noroeste del país, siendo los meses de mayor frecuencia agosto, septiembre y octubre, y contribuyen con cerca del 20

% de la precipitación de verano, aunque algunos ciclones pueden contribuir con cerca del 95% de la precipitación total (Díaz et al., 2008; Corbosiero et al., 2009), especialmente en Baja California Sur (Englehart et al., 2008).

Cerca del 40% de todos los ciclones tropicales que se forman en el Pacífico Oriental tropical afectan a las costas mexicanas, siendo Baja California Sur el estado con mayor probabilidad de impacto (Jáuregui, 2003). El impacto de estos fenómenos puede ser devastador para algunas regiones. Sin embargo, debido al clima desértico y semiárido y a las precipitaciones escasas del noroeste de México, los ciclones tropicales son una fuente importante de precipitación para toda esta zona, favorecen el llenado de presas, y las lluvias remanentes son buenas para la agricultura de temporal (Cavazos et al., 2008).

### **II.3 Niño oscilación del sur (ENOS) y los ciclones tropicales**

El fenómeno ENOS es una fluctuación interanual en el sistema océano-atmósfera caracterizado por un cambio en la circulación zonal de la celda de Walker y en la circulación meridional de la celda de Hadley en la región tropical del Océano Pacífico (Philander, 1989).

El ENOS presenta una fase cálida (El Niño), una fase de transición (Neutral) y una fase fría (La Niña) que resultan de interacciones entre la superficie del océano y la atmósfera en el Pacífico tropical. El Niño y La Niña se caracterizan principalmente por cambios en la TSM a lo largo del Pacífico ecuatorial, localizándose una alberca de agua cálida en el Pacífico Oriental que se expande durante eventos El Niño, pero que se debilita y puede desaparecer hasta generar una alberca de agua fría en eventos La Niña. Durante la fase neutral del ENOS, los patrones de TSM se acercan mucho a las condiciones promedio de la región. La variabilidad del ENOS en el Pacífico Oriental tropical se centra a lo largo del ecuador y está estrechamente relacionada con el comportamiento de la alberca de

agua caliente del Hemisferio Occidental (WHWP, por sus siglas en inglés) (Wang y Fiedler, 2006). La WHWP se define como la región con TSM superior a 28.5 °C (Wang y Enfield, 2001). A su vez, la variabilidad del ENOS y de la WHWP están asociadas con la circulación oceánica (Kessler, 2006) y forzamientos atmosféricos de la región (Amador et al., 2006).

La relación entre la actividad de los ciclones tropicales y ENOS ha sido explorada por un gran número de autores desde los años ochenta, especialmente para la cuenca del Atlántico Norte (e.g. Gray, 1984; Goldenberg y Shapiro, 1996; Kimberlain, 1999; Chu, 2004; Pielke et al., 1999; Saunders et al., 2000; Larson et al., 2004; Vadillo, et al., 2007; Bove et al., 2008). Se sabe que durante años de El Niño disminuye la frecuencia de ciclones tropicales en el Atlántico debido a un aumento del CV y lo opuesto ocurre durante La Niña (Gray, 1984; Shapiro, 1987; Goldenberg y Shapiro, 1996). Además, se ha documentado que cuando se presentan temporadas de ciclones tropicales muy activas en el Atlántico, se observan períodos menos activos en el Pacífico Oriental y viceversa (Elsner y Kara 1999); esto ha sido relacionado con la Oscilación Multidecadal del Atlántico (AMO; Goldenberg et al. 2001).

A diferencia del Atlántico, la influencia de las condiciones asociadas a El Niño y La Niña sobre los ciclones tropicales de la cuenca del Pacífico Oriental presenta mayor variabilidad (Tang y Neelin, 2004) y aún no se determinan las causas de por qué sucede esto; de tal forma que la predictibilidad estacional e interanual de los huracanes en el Pacífico es aún un tema sin resolver. En esta tesis se abordará la posible relación entre las fases del ENOS y la frecuencia e intensidad de los huracanes (HUR 1-3 y HUR 4-5).

## II.4 Ciclones tropicales y calentamiento global

Algunos autores (e.g., Emanuel 2005; Elsner et al., 2008) identifican un incremento en la frecuencia e intensidad de ciclones tropicales desde la década de los 70s a nivel global y lo relacionan principalmente con aumentos en la TSM. Webster et al. (2005) documentan un aumento significativo de 0.5°C en la TSM a nivel global en el período 1970-2004. La teoría predice un aumento del 5% en la intensidad de los vientos por cada aumento de un 1°C en la TSM (Emanuel, 1987). Los modelos dinámicos confirman esta teoría, pero muestran aumentos de magnitudes más pequeñas (Knutson y Tuleya, 2004). Sin embargo, como ya se mencionó antes, la TSM no es la única variable que controla la intensidad de un huracán ya que éste es el resultado de una compleja interacción entre la dinámica interna del sistema y los factores ambientales que rodean a la tormenta y los vientos atmosféricos que afectan la dirección en latitudes más altas (Whitney y Hogbood, 1997; Michaels et al., 2006).

Vecchi y Soden (2007) indican que en general los modelos climáticos globales predicen un aumento del CV y de la TSM sobre el Atlántico Norte, lo cual disminuiría la actividad de los ciclones tropicales en esa cuenca bajo condiciones de calentamiento global. Sin embargo, Emanuel (2006) encontró que la razón de calentamiento podría ser mayor que la razón del incremento del CV, de tal forma que aún no es claro cuál será la respuesta de los huracanes bajo condiciones de calentamiento global.

La motivación de este trabajo reside en identificar cuáles son las condiciones dinámicas y termodinámicas más favorables, tanto a escala diaria como estacional, para la frecuencia e intensificación de huracanes, así como conocer qué relación existe entre el fenómeno del ENOS y la frecuencia, intensidad y trayectorias de los huracanes (HUR 1-5) en el área principal de ciclogénesis del Pacífico Oriental.

## Capítulo III

---

### DATOS Y METODOLOGÍA

---

La información sobre huracanes para el área de estudio se obtuvo de la base de datos Hurricane Best Track Dataset (HURDAT) del Centro Nacional de Huracanes (NHC) y del Centro de Predicción Tropical (TPC) de Estados Unidos para la temporada de huracanes (May-Nov) durante 1970-2010. La base de datos contiene información cada 6 horas incluyendo fecha y hora, posición del ojo (latitud y longitud), dirección del viento ( $^{\circ}$ ), viento máximo sostenido (km/h), presión en el ojo del huracán (mb) y categoría (según la escala Saffir-Simpson). En esta tesis, solo se consideran datos a partir de 1970 cuando se comenzó a utilizar la técnica de Dvorak basada en observaciones de satélite para estimar la intensidad de los ciclones tropicales (Whitney y Hogbood, 1997; Cavazos et al., 2008).

Para analizar la posible relación de los huracanes con el ENOS, se utilizó el Índice Oceánico El Niño (ONI; NOAA/CPC y NOAA/ESRL/PSD; [http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis\\_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml](http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml)), el cual se basa en promedios trimestrales sucesivos de anomalías de TSM en la región Niño 3.4 ( $5^{\circ}\text{N}$ - $5^{\circ}\text{S}$ ,  $120^{\circ}\text{W}$ - $170^{\circ}\text{W}$ ).

En la cuenca del Atlántico se ha encontrado que la Oscilación Multidecadal del Atlántico (AMO; Enfield et al., 2001) se correlaciona positiva y significativamente con la frecuencia decadal de ciclones tropicales en esa región, y se sabe que en periodos decadales de máxima frecuencia de ciclones tropicales en el Atlántico se observa un decremento en el Pacífico (Elsner y Kara 1999). Aunque el periodo analizado en este trabajo solo incluye 41 años de datos, se decidió utilizar el

índice anual de la AMO (<http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/timeseries/AMO/>) y también de la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO; Mantual et al. 1997; <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/correlation/pdo.data>) para investigar su posible relación con la frecuencia de huracanes en el Pacífico Oriental. Para el cálculo de las tendencias y significancia en la frecuencia de huracanes y la TSM y el CV se llevó a cabo un método de ajuste de mínimos cuadrados utilizado por Pavía et al. (2009). Las tendencias se consideraron estadísticamente significativas al 95 % ( $p < 0.05$ ).

En la primera parte de la tesis se realizó un análisis descriptivo y estadístico identificando las posiciones de origen y máxima intensidad, trayectoria, intensidad, frecuencia, y duración de los HUR 1-5, HUR 1-3 y HUR 4-5 durante todo el periodo analizado y durante los eventos ENOS. Se calcularon el ciclo estacional, frecuencia anual, frecuencia decadal, así como la duración promedio (días/año) de cada grupo de huracanes y los meses de máxima ocurrencia para cada categoría.

En la segunda parte, con datos del NCEP/Reanalysis (Kalnay et al., 1996; Kistler et al., 2001, <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/composites/day/>) se analizaron compuestos espaciales de TSM, CV (850-200 mb), vector de viento a 850 mb y presión a nivel del mar durante los días de origen ( $t = 0$ ) y de máxima intensidad ( $t = \text{máx int}$ ) de los HUR 1-3 y HUR 4-5. Un análisis similar se hizo a escala estacional (<http://www.esrl.noaa.gov/psd/cgi-bin/data/composites/printpage.pl>) durante los meses de mayor frecuencia de huracanes (Jul-Sep) en eventos El Niño, La Niña y Neutral.

Finalmente, se determinó la precipitación acumulada derivada de los huracanes que aterrizaron en México ( $t = 3d$ , centrados en el día de aterrizaje en costas mexicanas) y de los HUR 1-3 y HUR 4-5 durante eventos ENOS utilizando la base de datos Unified US-Mexico Precipitation del Climate Prediction Center de Estados Unidos (malla de  $1^\circ \times 1^\circ$ ) para el periodo de 1948-2010 (Cheng et al., 2008).

## Capítulo IV

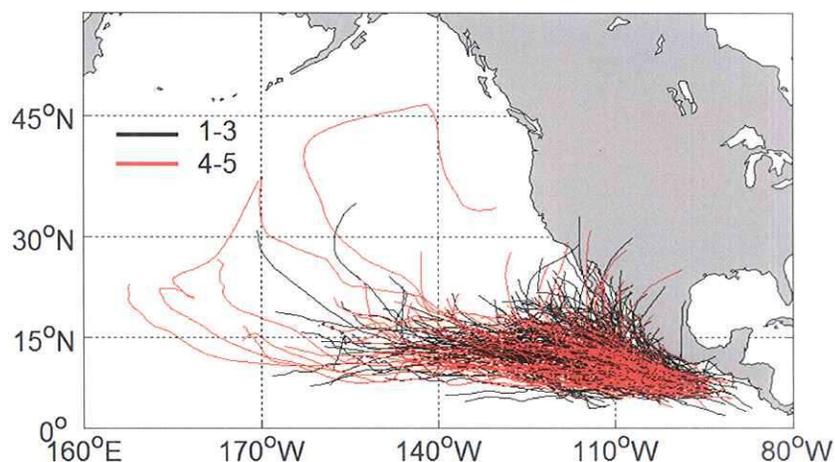
---

### RESULTADOS

---

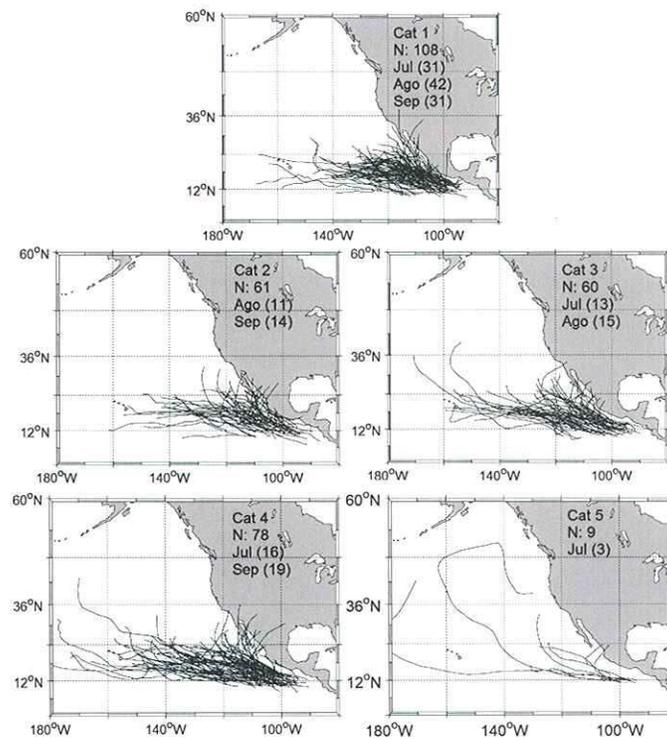
#### IV.1 Frecuencia e intensidad de huracanes en el área principal de ciclogénesis del Pacífico Oriental tropical

Como ya se mencionó antes, cerca del 90% de los huracanes de la cuenca del Pacífico Oriental tropical tiene su origen dentro del área principal de ciclogénesis (APC) (Figs. 1 y 3). En total se presentaron 309 huracanes en el período de estudio (1970-2010), de los cuales 225 corresponden a las categorías 1-3 (HUR 1-3) y 84 a las categorías 4-5 (HUR 4-5).



**Figura 3.** Trayectorias de los huracanes categorías 1-3 (HUR 1-3, en negro) y huracanes categorías 4-5 (HUR 4-5, en rojo) originados en el área principal de ciclogénesis del Pacífico Oriental tropical durante May-Nov de 1970-2010.

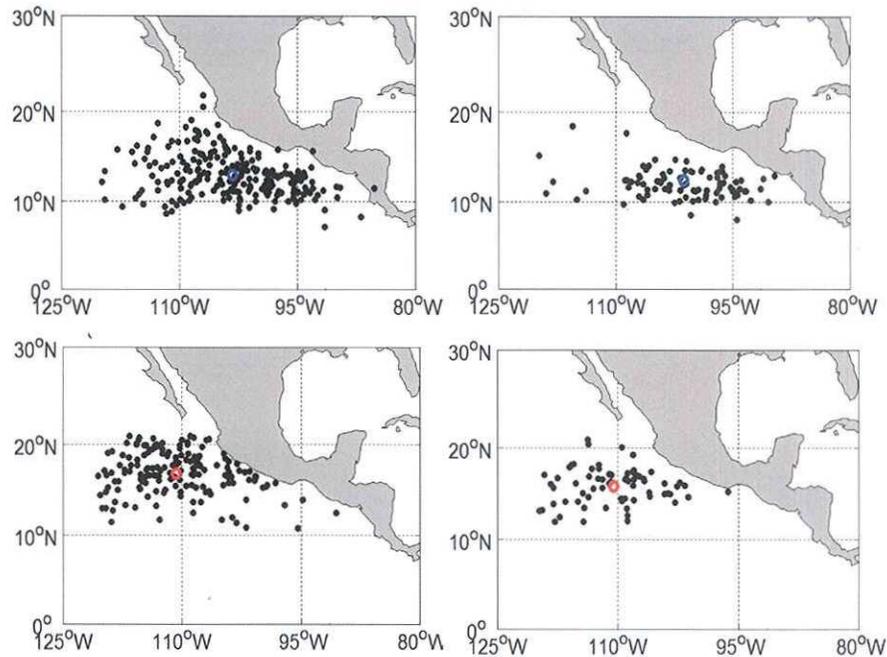
Los HUR 1-3 presentan trayectorias al norte de 5°N y pocas veces se desplazan más allá de 170°W y al norte de 30°N (Fig. 3 y 4). Por otro lado, los HUR 4-5 tienen trayectorias que se extienden hasta la región del Pacífico Central y zonas de latitudes medias, incluso viajando más allá de la zona del anticiclón del Pacífico Norte; también es común que los HUR 1-3 y los HUR 4-5 se recurven algunas veces hacia el noreste impactando territorio mexicano y hasta el suroeste de Estados Unidos (Figs. 3 y 4), especialmente cuando hay alguna vaguada a lo largo del suroeste de Estados Unidos y el norte de México (Romero-Vadillo et al., 2006).



**Figura 4. Trayectoria y frecuencia total (N) de huracanes por categorías durante May-Nov 1970-2010 en la Cuenca del Pacífico Oriental. Se indican los meses de máxima ocurrencia y sus frecuencias respectivas entre paréntesis.**

La Fig. 4 muestra las trayectorias de los huracanes por categoría identificando los meses correspondientes a las máximas frecuencias. Se observa que los meses más activos para los HUR 1-3 son julio, agosto y septiembre (Jul-Sep), mientras

que los HUR 4-5 se presentan con mayor frecuencia durante julio y septiembre (Figs. 4 y 6). En este trabajo se considera un mes muy activo cuando un mes registró más del 15% del total de huracanes en una categoría.

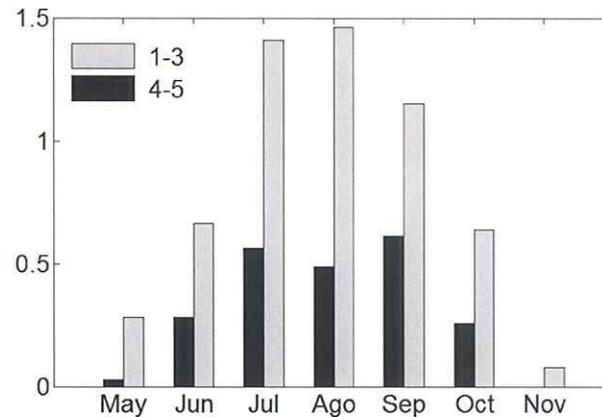


**Figura 5. Coordenadas de origen (arriba) y máxima intensidad (abajo) de HUR 1-3 (izquierda) y HUR 4-5 (derecha) en el área principal de ciclogénesis del Pacífico Oriental durante May-Nov de 1970-2010. Los puntos azules y rojos indican la posición promedio de origen y máxima intensidad, respectivamente.**

En general, los HUR 1-3 y HUR 4-5 se originaron en zonas alejadas de la costa y del ecuador, entre 104 °W y 12°N, alcanzando en promedio su máxima intensidad entre 112 °W y 16°N (Fig. 5). Se nota que los HUR 1-3 tienen en promedio un porcentaje más alto de huracanes que se forman más cerca de la costa y el área de ciclogénesis es mucho más amplia que la de los HUR 4-5.

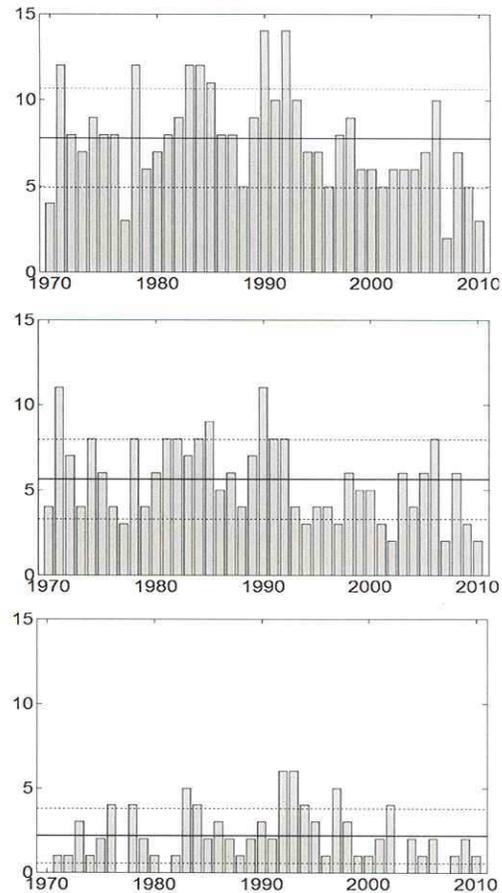
La frecuencia promedio anual de los HUR 1-5, HUR 1-3 y HUR 4-5 fue de 7.9, 5.7 y 2.2, respectivamente (líneas sólidas en la Fig. 7). La frecuencia anual de los HUR 1-5 presenta una tendencia significativa de -0.074/año significativa al 95 %,

consistente con la tendencia de los HUR 1-3, mientras que los HUR 4-5 tienen una tendencia positiva aunque no significativa.



**Figura 6. Ciclo estacional de la frecuencia de HUR 1-3 (gris) y HUR 4-5 (negro) en el área principal de ciclogénesis del Pacífico Oriental durante May-Nov de 1970-2010.**

En la Fig. 7 se ve que en general el periodo 1970-1989 fue más activo (más años con HUR 1-5 arriba de la media) que el 1990-2009. A pesar de esta diferencia, la década de los 90s presentó un número anómalo de HUR 4-5 (el doble de las otras décadas 4 años arriba de una desviación estándar), consistente con lo observado a escala global (Webster et al., 2005). Como se verá en la Sección IV.3, 3 de los años anómalos de los HUR 4-5 fueron años de El Niño fuerte (1993, 1994 y 1997). Después de los 90s se ve una clara reducción de HUR 1-5.



**Figura 7. Frecuencia anual de HUR 1-5 (superior), HUR 1-3 (centro) y HUR 4-5 (inferior) en el área principal de ciclogénesis del Pacífico Oriental en el período May-Nov de 1970-2010. Se muestra la media (línea sólida) y  $\pm 1$  desviación estándar (líneas punteadas).**

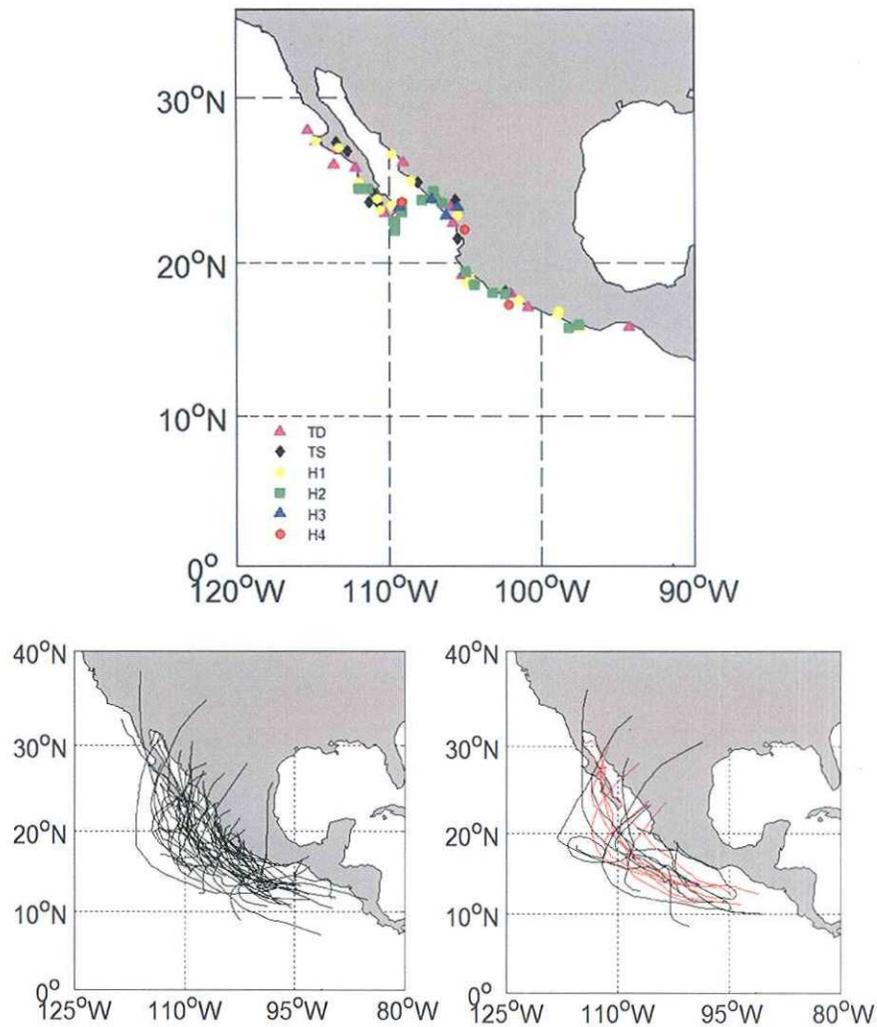
Por último, los HUR 4-5 tienen un promedio mayor de duración (10.1 días/año) que los HUR 1-3 que duran 7 días/año. La Tabla II muestra el resumen estadístico de las características principales de los huracanes en el área principal de ciclogénesis (posición de origen y máxima intensidad, frecuencia anual, duración promedio y meses de máxima frecuencia).

**Tabla II. Características promedio de los HUR1-5, HUR1-3 Y HUR 4-5 que se formaron en el área principal de ciclogénesis del Pacífico Oriental en el período de May-Nov 1970-2010.**

| Categoría                     | 1-5                    | 1-3                    | 4-5                    |
|-------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| Posición de origen            | <b>12.4°N, 103.5°W</b> | <b>12.9°N, 103.3°W</b> | <b>11.9°N, 103.8°W</b> |
| Posición de máxima intensidad | <b>15.9°N, 110.5°W</b> | <b>15.9°N, 110.5°W</b> | <b>16°N, 110.6°W</b>   |
| Frecuencia anual              | <b>7.9</b>             | <b>5.7</b>             | <b>2.2</b>             |
| Duración promedio             | <b>8.6 d</b>           | <b>7 d</b>             | <b>10.2 d</b>          |
| Meses de máxima frecuencia    | <b>Jul-Sep</b>         | <b>Jul, Ago</b>        | <b>Jul, Sep</b>        |

#### **IV.1.1 Huracanes que aterrizan en México y variabilidad decadal**

Considerando la intensidad al momento de tocar tierra, se registran un total de 40 HUR 1-3 y 3 HUR 4-5 del Pacífico Oriental que aterrizaron en México de 1970 a 2010 (Fig. 8), siendo septiembre el mes de mayor frecuencia de aterrizajes, consistente con Romero-Vadillo et al., (2007). En general, los huracanes que se originan en zonas cercanas a la costa tienen mayor posibilidad de adquirir una trayectoria hacia el norte y este (Corbosiero et al., 2009). Se observa que los HUR 1-3 tocan tierra a lo largo de toda la costa mexicana, desde Chiapas hasta Baja California y llegan a entrar al suroeste de Estados Unidos. Por otro lado, los HUR 4-5 tocan tierra principalmente en Baja California, Nayarit, Sinaloa y Guerrero.



**Figura 8. Arriba: Primera posición registrada en tierra de los ciclones tropicales del Pacífico Oriental que aterrizaron en México durante May-Nov en 1970–2009. Se considera la categoría actual al momento de tocar tierra. Abajo: se muestran las trayectorias de los huracanes que aterrizaron de acuerdo a su categoría máxima alcanzada, HUR 1-3 (Izq.) y HUR 4-5 (Der.), aunque pudieron aterrizar con menor categoría. En rojo se indican los HUR 4-5 en la última década.**

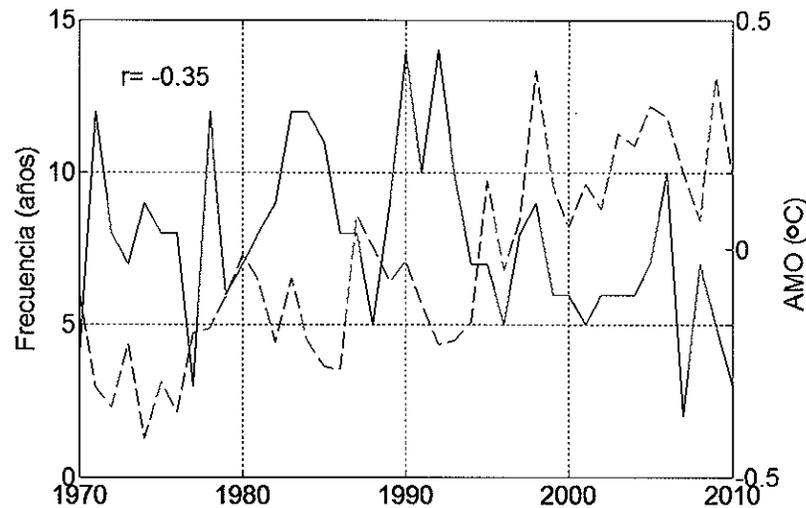
La Tabla III muestra la frecuencia total y promedio de huracanes por década en el área principal de ciclogénesis. Se observa que durante la década de 1980-1989 se presentó la mayor frecuencia de HUR 1-3 (69). Sin embargo, la década 1990-1999 se caracterizó por tener una mayor frecuencia de HUR 1-5 (89), así como un mayor número de HUR 4-5 (34) con respecto a las otras décadas (aproximadamente el doble), consistente con lo observado a nivel mundial

(Webster et al., 2005). Durante la década de 1990-1999 se tuvo la mayor frecuencia de HUR 1-3 que aterrizaron en México (12), mientras que el máximo de los HUR 4-5 que aterrizaron ocurrió en el período 1970-1979 (2). Si se consideran cambios bidecadales, se observa que los HUR 4-5 aumentaron paulatinamente y significativamente con respecto a las bidecadas anteriores (Tabla 3). En contraste, la bidecada 1990-2009 muestra una reducción significativa de HUR 1-5, en particular de los HUR 1-3.

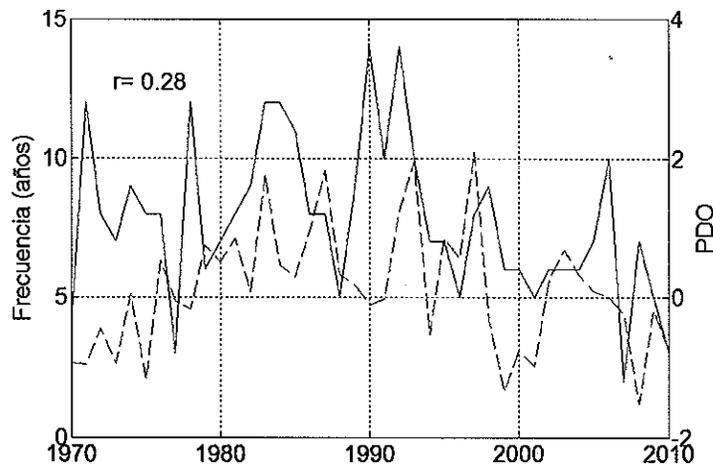
Como ya se mencionó antes, en el Atlántico los cambios decadales en la frecuencia de huracanes se han asociado significativamente con los cambios de fase de la AMO con mayor frecuencia de huracanes durante las fases cálidas (Goldenberg et al. 2001). Para este análisis solo se cuenta con 41 años de datos de frecuencia de huracanes y se reconoce que no son suficientes para establecer una correlación decadal significativa con la AMO o con la PDO; sin embargo, se presentan los resultados como un análisis preliminar. La AMO cambió a una fase positiva en 1995, periodo en el que se empieza a ver una tendencia negativa en la frecuencia anual de los HUR 1-5 (Fig. 9); se observa una correlación de -0.35 estadísticamente significativa al 95% entre ambas variables, cuando se considera un desfase de un año en la AMO. La correlación entre la frecuencia de HUR 1-5 y la PDO, también con un desfase de 1 año es 0.28, estadísticamente significativa al 95 %. De tal forma que el decremento de HUR 1-5 en la última bidecada podría estar asociado parcialmente a la fase negativa de la AMO a través de su influencia en el tamaño de la alberca de agua cálida en el Atlántico (más grande).

**Tabla III. Frecuencia decadal y bidecadal de HUR 1-3, HUR 4-5 y HUR 1-5 en el Pacífico Oriental en el período May-Nov de 1970-2009; en paréntesis se muestra la frecuencia de los que aterrizaron en México.**

| Periodo          | 1-3             | 4-5           | 1-5             |
|------------------|-----------------|---------------|-----------------|
| 1970-1979        | 59 (10)         | 18 (2)        | 77 (12)         |
| 1980-1989        | 69 (11)         | 17 (0)        | 86 (11)         |
| 1990-1999        | 55 (12)         | 34 (0)        | 89 (12)         |
| 2000-2009        | 42 (7)          | 15 (1)        | 57 (8)          |
| <b>1970-1989</b> | <b>128 (21)</b> | <b>35 (2)</b> | <b>163 (23)</b> |
| <b>1980-1999</b> | <b>124 (23)</b> | <b>51 (0)</b> | <b>175 (23)</b> |
| <b>1990-2009</b> | <b>97 (19)</b>  | <b>49 (1)</b> | <b>146 (20)</b> |
| Total por década | 225 (40)        | 84 (3)        | 309 (43)        |



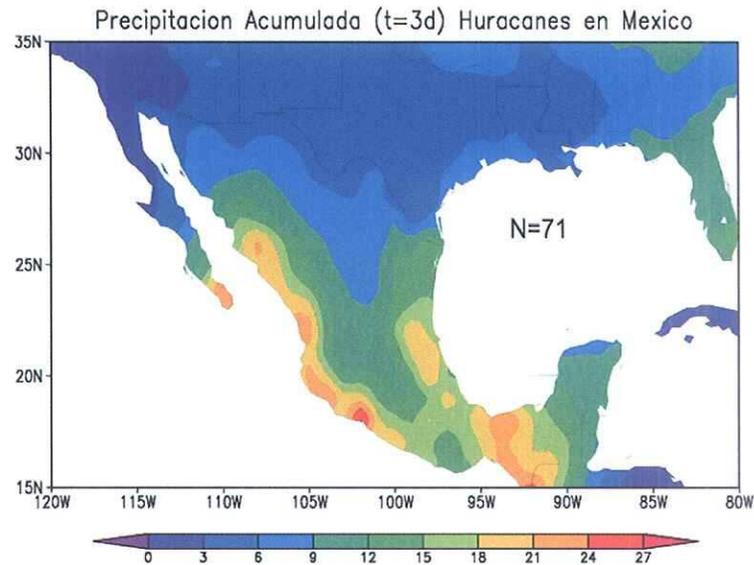
**Figura 9. Frecuencia anual (May-Nov) de HUR1-5 (línea continua) y promedio anual de la Oscilación Multidecadal del Atlántico (AMO, línea quebrada). La correlación (con retraso de 1 año de la AMO) es  $r = -0.35$  y estadísticamente significativa al 95 %.**



**Figura 10. Frecuencia anual (May-Nov) de HUR 1-5 (línea continua) y promedio anual de la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO, línea quebrada).  $r = 0.28$  (con retraso de un año), estadísticamente significativa al 95 %.**

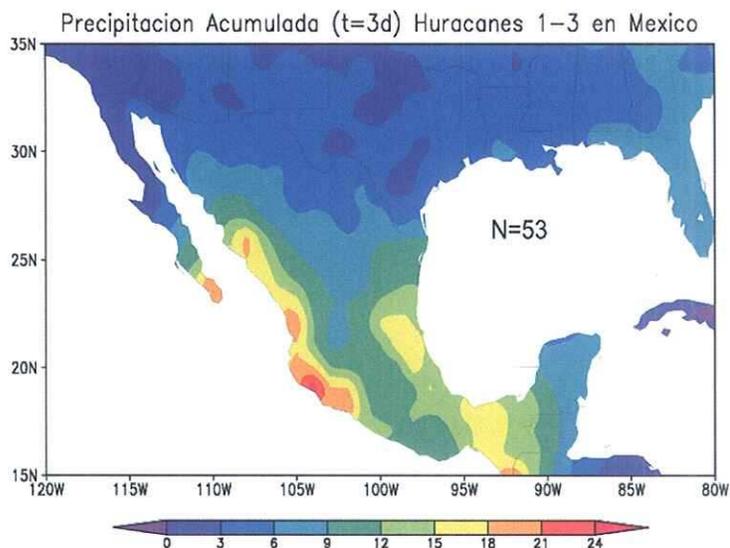
#### **IV.1.2 Precipitación derivada de huracanes en México**

Durante el período de estudio un total de 71 ciclones tropicales aterrizaron en México. La Fig. 11 muestra el compuesto de la precipitación acumulada (mm) en tres días por huracán de los huracanes que entraron a México. En el noroeste de México se observa un máximo de precipitación (24 mm) en la parte sur de la Península de Baja California y que va disminuyendo hacia el norte a lo largo de la península. Valores máximos similares también se presentan en las regiones del oeste de México (Sinaloa y Nayarit) y en las costas de Jalisco y Guerrero. Es importante hacer notar que las precipitaciones que se muestran son acumuladas promedio, las cuales tienden a subestimar lo que ocurre en un evento individual. Por lo tanto, el objetivo de las gráficas es mostrar las áreas típicamente afectadas, más que la intensidad del impacto.



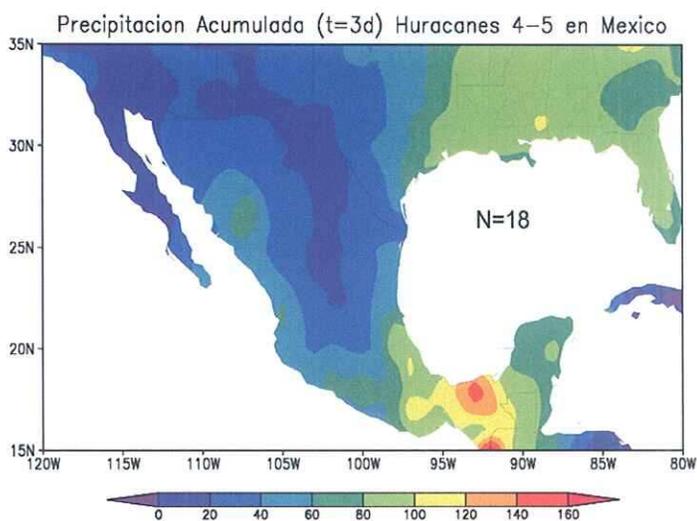
**Figura 11. Frecuencia (N) y precipitación acumulada (mm) promedio por huracán durante un día antes, el día que aterrizó y un día después, de los 71 HUR1-5 que entraron a México por la costa del Pacífico en el período 1970-2010.**

Las figuras 12 y 13 muestran la precipitación asociada a los HUR 1-3 y HUR 4-5 que entraron a México, respectivamente, de acuerdo a la máxima intensidad alcanzada por los huracanes durante su evolución. A pesar de que los HUR 4-5 que entran a México representan menos del 30 % del total, aportan más precipitación que los HUR 1-3 a lo largo de toda la zona donde tienen impacto. En la Fig. 13 se observa un máximo de precipitación en el estado de Tabasco, sin embargo, podría no estar asociado directamente al paso de huracanes del Pacífico Oriental por esa región, aunque si puede deberse a la influencia de la nubosidad de gran escala generada por los huracanes y por otro tipo de fenómenos meteorológicos (ondas, depresiones tropicales y convektividad de mesoescala).



**Figura 12.** Como en la figura anterior, en este caso para los HUR1-3.

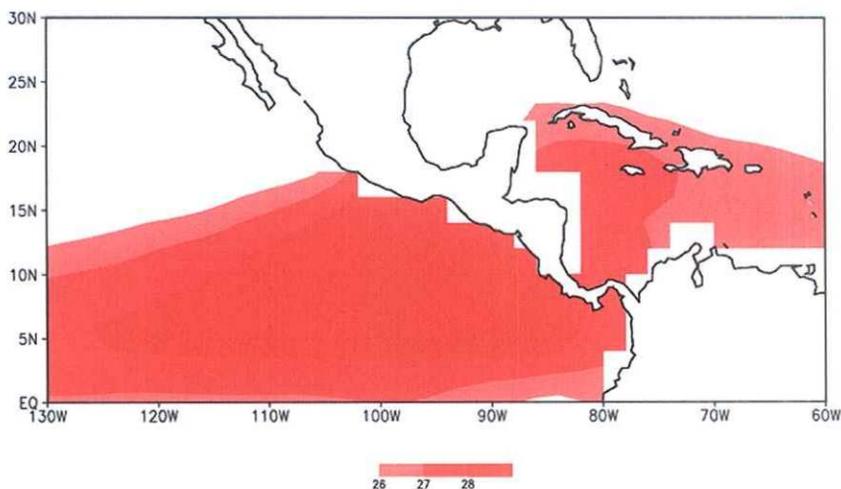
Lo anterior puede deberse a que los HUR 4-5 tienen mayor actividad convectiva y por lo tanto pueden presentar bandas espirales de precipitación más intensas y organizadas que los HUR 1-3; además, se desplazan más lentamente y por lo tanto tienen mayor tiempo de permanencia en la región donde impactan.



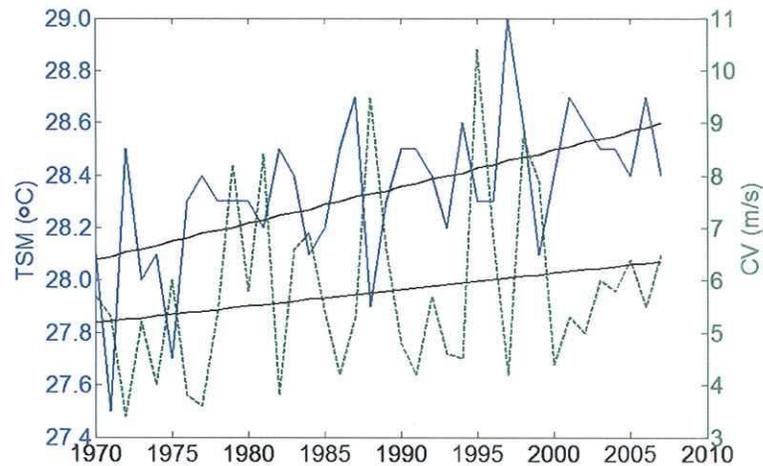
**Figura 13.** Como en la figura anterior, en este caso para los HUR4-5.

## IV.2 Condiciones termodinámicas y dinámicas a escala diaria durante el paso de huracanes en el Área Principal de Ciclogénesis

Durante la temporada de huracanes se observa una alberca de agua cálida (TSM  $> 28\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) que se extiende desde las costas del Pacífico Mexicano y de Centroamérica hasta más allá de los  $130^{\circ}\text{W}$ , abarcando el área principal de ciclogénesis del Pacífico Oriental (Fig. 14). La alberca se debilita hacia el norte, debido en parte a la presencia del anticiclón del Pacífico Norte y de la corriente fría de California, y hacia el sur en zonas cercanas al ecuador delimitada por una lengua de agua fría. Un calentamiento similar se presenta en la región del Golfo de México y el Mar Caribe. En los meses de mayor frecuencia de huracanes (Jul-Sep) se observan en promedio valores favorables de TSM y CV en la región de  $28.3\text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $5.7\text{ m/s}$ , con una tendencia anual de  $0.014\text{ }^{\circ}\text{C}$  (significativa al 95 %) y  $0.3\text{ m/s}$  (no significativa), respectivamente (Fig. 15) durante 1970-2010; es decir, un aumento significativo de  $0.57\text{ }^{\circ}\text{C}$  en la TSM durante los últimos 40 años, consistente con lo observado a escala global.

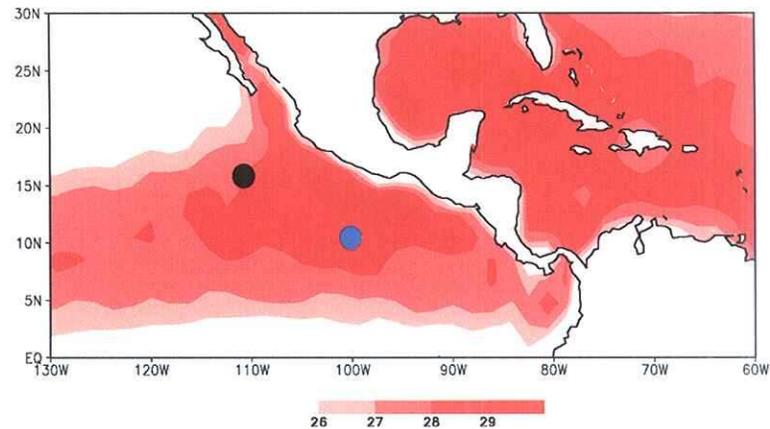


**Figura 14.** Promedio de la temperatura superficial del mar (TSM,  $^{\circ}\text{C}$ ) durante May-Nov de 1970-2010 en el área principal de ciclogénesis del Pacífico Oriental. Sólo se grafican valores mayores a  $26\text{ }^{\circ}\text{C}$ .



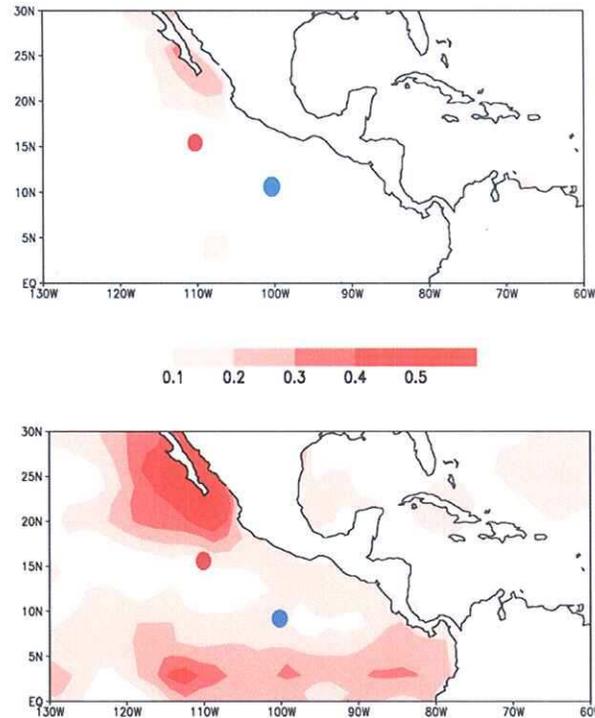
**Figura 15. Promedio de TSM y corte del viento zonal (CV) entre 850 y 200 mb durante los meses de máxima frecuencia (Jul-Sep) en el área principal de ciclogénesis. La TSM tiene una tendencia significativa (95%) de 0.57°C durante todo el periodo.**

En los días de origen y máxima intensidad de todos los huracanes se observan condiciones similares con la presencia de la alberca de agua cálida. La TSM promedio en el área principal de ciclogénesis de los días de origen y máxima intensidad de todos los huracanes (May-Nov) es de 27.1 y 27.2 °C para los HUR 1-3 y HUR 4-5, respectivamente. Sin embargo, el punto promedio de origen de los HUR 1-5 se localiza en la isoterma de 28.5 °C y el punto de máxima intensidad está muy cerca de la de 28 °C (Fig. 16).



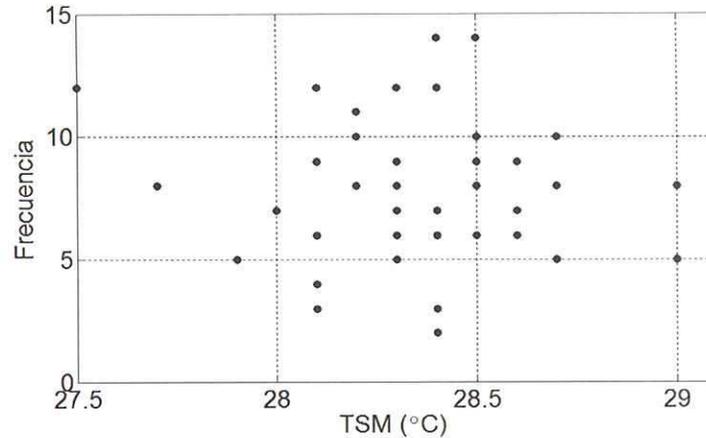
**Figura 16. Promedio de la TSM ( $^{\circ}\text{C}$ ) en el día de ciclogénesis de los HUR 1-5 durante May-Nov en el periodo 1970-2010. Se indica la posición promedio de origen (azul) y máxima intensidad (negro) de todos los huracanes.**

En cuanto al comportamiento de la TSM a gran escala de los HUR 1-3 y HUR 4-5 durante May-Nov, en la Fig. 17 se observa un mayor calentamiento en la región de estudio durante el paso de HUR 4-5. Durante el día de máxima intensidad de los HUR 4-5 se presentan anomalías en la región de entre 0.2 y 0.4  $^{\circ}\text{C}$ , mientras que en el caso de los HUR 1-3 las anomalías son muy cercanas a cero en casi toda la región. Un patrón similar se observa siete días antes del origen y durante el día de origen de los huracanes de ambos grupos. Este mayor calentamiento de la TSM durante los HUR 4-5 puede inducir a un hundimiento de 80 a 120 m de la termoclina (Shay y Goni, 1999) lo cual lleva a un mayor contenido oceánico de calor disponible para alimentar al huracán.



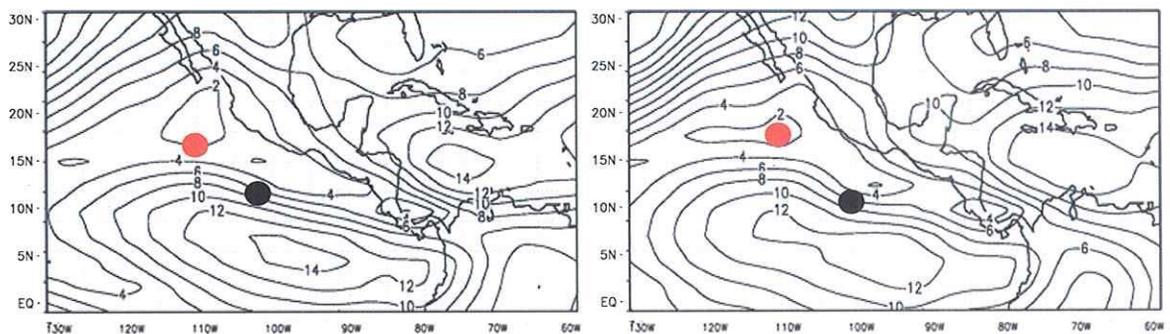
**Figura 17. Compuestos de anomalías de la TSM ( $^{\circ}\text{C}$ ) en el día de máxima intensidad de HUR 1-3 (arriba) y HUR 4-5 (abajo) durante May-Nov en el período 1970-2010. Los puntos azul y rojo indican la posición promedio de origen y máxima intensidad respectivamente. Anomalías con respecto al período 1970-2010.**

Un 71 % de los HUR 1-5 ocurren durante los meses de máxima intensidad (Jul-Sep), cuando hay valores promedio de la TSM entre 27.5 y 29  $^{\circ}\text{C}$  en el área principal de ciclogénesis (Fig. 18). Además, se observa que la mayor frecuencia de huracanes ( $> 10$  huracanes/año) ocurre entre 28 y 28.5  $^{\circ}\text{C}$ . No se registran huracanes con TSM promedio mayores a 29  $^{\circ}\text{C}$  en Jul-Sep, posiblemente porque en promedio las regiones del Pacífico con esas temperaturas son muy pequeñas.



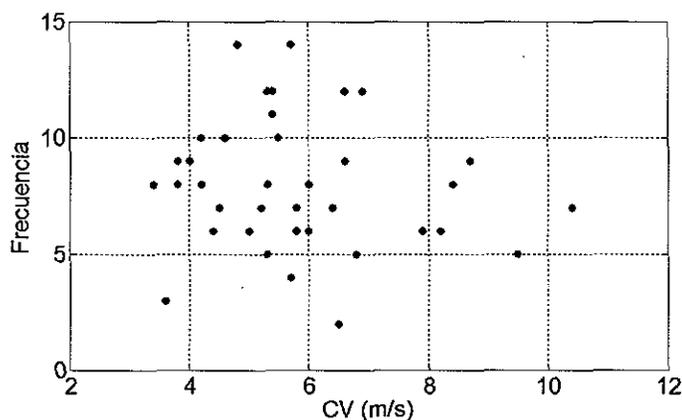
**Figura 18.** Frecuencia anual (May-Nov) de HUR 1-5 y su relación con la TSM promedio en el área principal de ciclogénesis durante Jul-Sep de 1970 a 2010.

En la parte sur del área principal de ciclogénesis se observan valores de CV de hasta 14 m/s (Fig. 19). Sin embargo, aunque se tienen valores de CV mayores a 10 m/s en los puntos promedio de ciclogénesis de los HUR 1-3 y HUR 4-5, el CV disminuye hacia el norte con valores menores a 6 m/s, donde se localizan las posiciones de máxima intensidad. En el Mar Caribe se observan valores de CV entre 10 y 14 m/s los cuales podrían inhibir la formación o intensificación de huracanes en esa región.



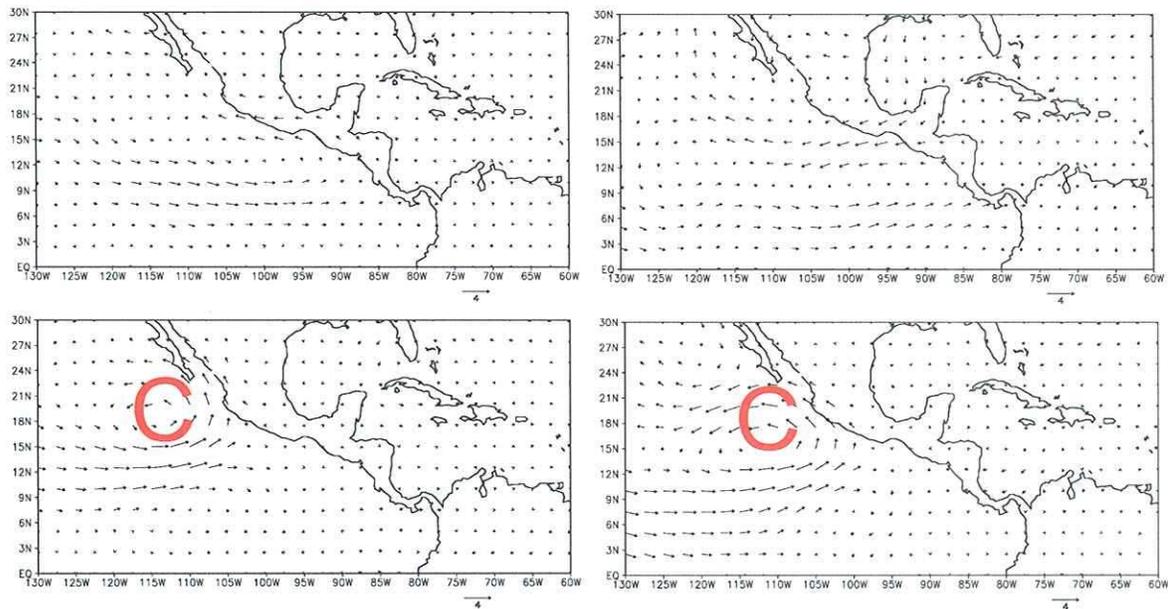
**Figura 19.** Promedio del CV zonal (m/s) de 850 a 200mb durante el día de máxima intensidad de los HUR 1-3 (izquierda) y HUR 4-5 (derecha) durante May-Nov. Los círculos rojos y negros indican la posición promedio de origen y máxima intensidad, respectivamente.

En la Fig. 20 se observa una mayor frecuencia de huracanes cuando se presentan valores de CV entre 4 y 7 m/s durante Jul-Sep, con estos valores puede haber más de 9 huracanes por temporada.



**Figura 20. Frecuencia anual (May-Nov) de HUR1-5 y su relación con el CV (m/s) promedio entre 850 y 200 mb en el área principal de ciclogénesis durante Jul-Sep de 1970 a 2010.**

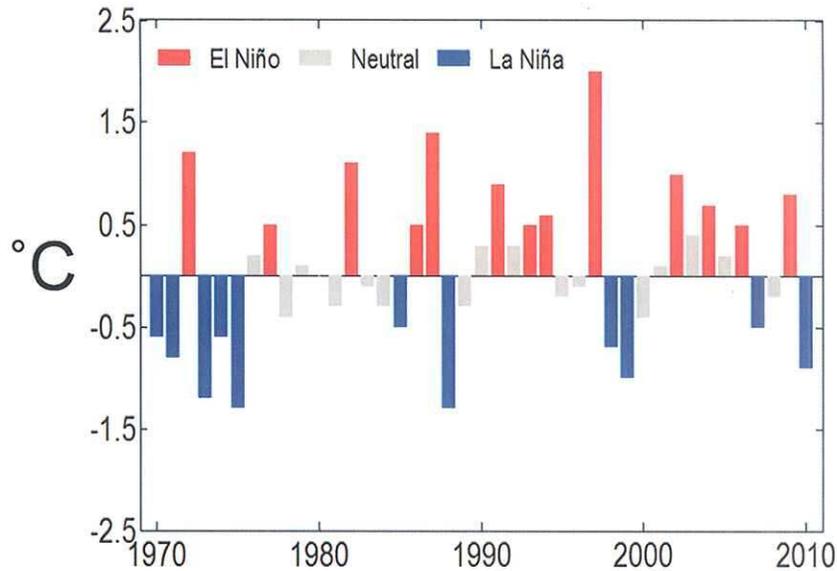
La Fig. 21 muestra anomalías del vector de viento a bajos niveles (850 mb); durante el día de origen se observan vientos intensos del oeste que convergen en la región de estudio y favorecen el desarrollo de una circulación ciclónica organizada en el día de máxima intensidad en ambos casos. A 200 mb, típicamente el límite vertical de un huracán, predomina una circulación anticiclónica (no se muestra) asociada a una divergencia de los vientos y necesaria para favorecer el proceso de intensificación.



**Figura 21. Anomalías del viento zonal a 850mb (m/s) durante el día de origen y máxima intensidad de los HUR 1-3 (Izq.) y HUR 4-5 (Der.) durante May-Nov. Se identifican las zonas de mayor circulación ciclónica (C) que coinciden con el día de máxima intensificación.**

### **IV.3 Variabilidad interanual de los huracanes y relación con el fenómeno ENOS**

En esta parte del análisis se utilizó el Oceanic Niño Index (ONI) definido como el promedio de las anomalías de la TSM de la región Niño 3.4 durante la temporada de huracanes (May-Nov). En total se registraron 13 eventos El Niño (EN), 11 La Niña (LN), y 17 Neutrales (N) de 1970 a 2010 (Fig. 22).

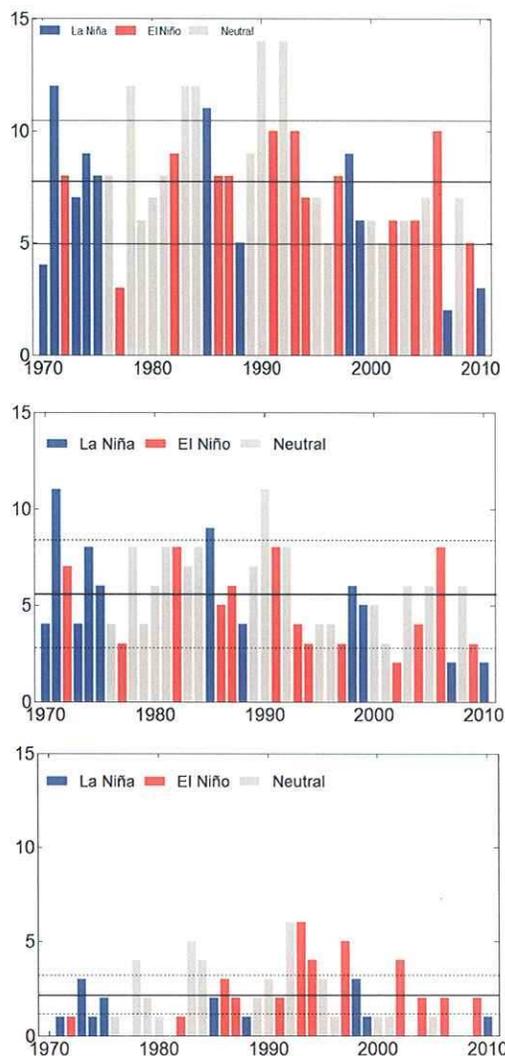


**Figura 22. Serie de tiempo del Oceanic Niño Index (ONI, °C) durante la temporada de huracanes (May-Nov) en el período 1970-2010.**

Las diferentes fases del ENOS pueden tener influencia en la posición promedio de origen, máxima intensidad, duración, frecuencia y trayectoria de los huracanes. En general puede observarse una variación interanual entre la intensidad y, en menor medida, la frecuencia de los HUR 1-5 y el fenómeno del ENOS (Fig. 23). La frecuencia e intensidad de los huracanes aumenta durante eventos EN y N en comparación con años LN (Figs. 23 y 24). Un 46 % del total de los HUR 1-5 ocurre durante eventos N, con un 33 % de HUR 1-3 y 13 % de HUR 4-5. Un comportamiento similar se observa en eventos EN con un 20 % y 11 % de HUR 1-3 y HUR 4-5, respectivamente. En contraste, durante LN se presenta un 19 % de HUR 1-3, pero sólo un 4 % de los HUR 4-5. En promedio todos los huracanes (HUR 1-5) tienen en promedio mayor duración en eventos EN (8.4 días) y N (8.1 días), que durante eventos LN (7.2 días).

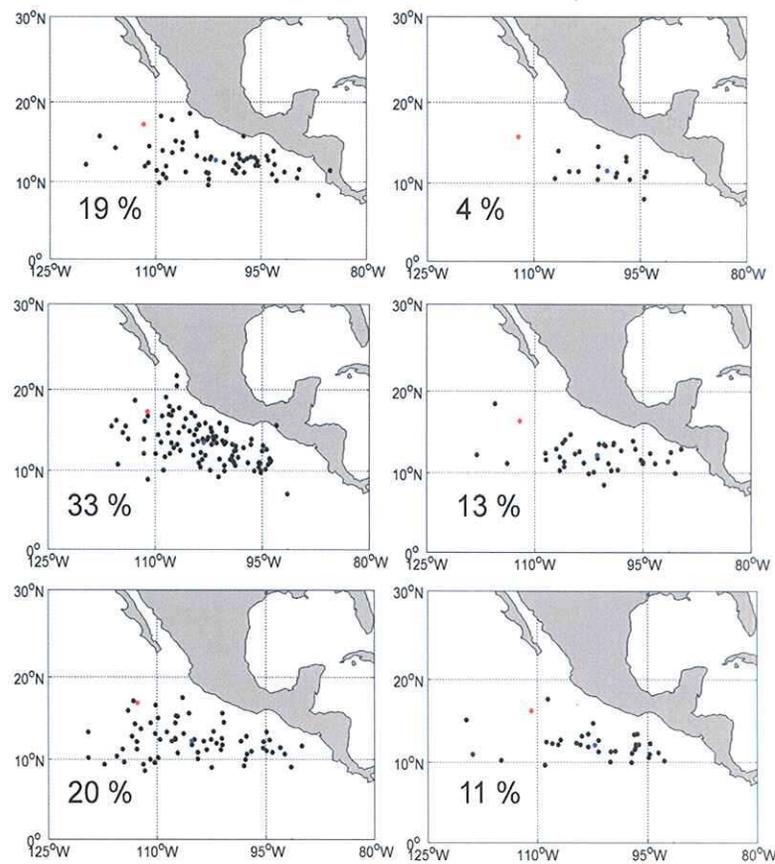
La posición de origen y máxima intensidad promedio de los HUR 1-3 y HUR 4-5 varía ligeramente en las diferentes fases del ENOS (Fig. 24). En promedio, los HUR 1-3 y HUR 4-5 tienen su origen entre 12-13°N y 100-103°W y su máxima

intensidad entre 110-113°W. La posición de máxima intensidad de los HUR 1-3 en eventos LN y N se localiza a 17.3°N y entre 111-113°W y es similar durante eventos EN. Los HUR 4-5 en eventos EN alcanzan su máxima intensidad ligeramente más al sur a 16.6°N y hacia el este a 111°W.

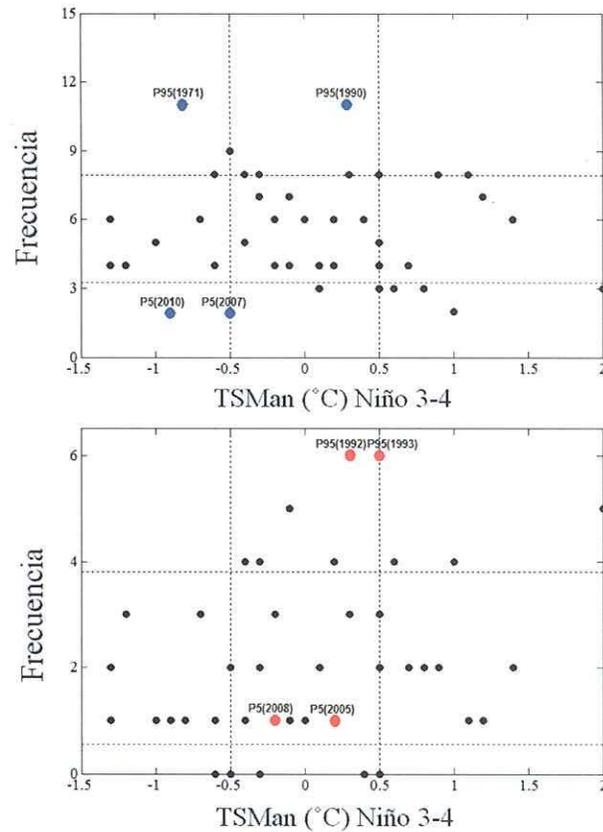


**Figura 23.** Frecuencia anual (May-Nov) de HUR 1-3 (superior) y HUR 4-5 (inferior) en eventos La Niña, Neutral y El Niño. Se indica el promedio de la frecuencia (línea continua) y  $\pm 1$  desviación estándar (línea quebrada).

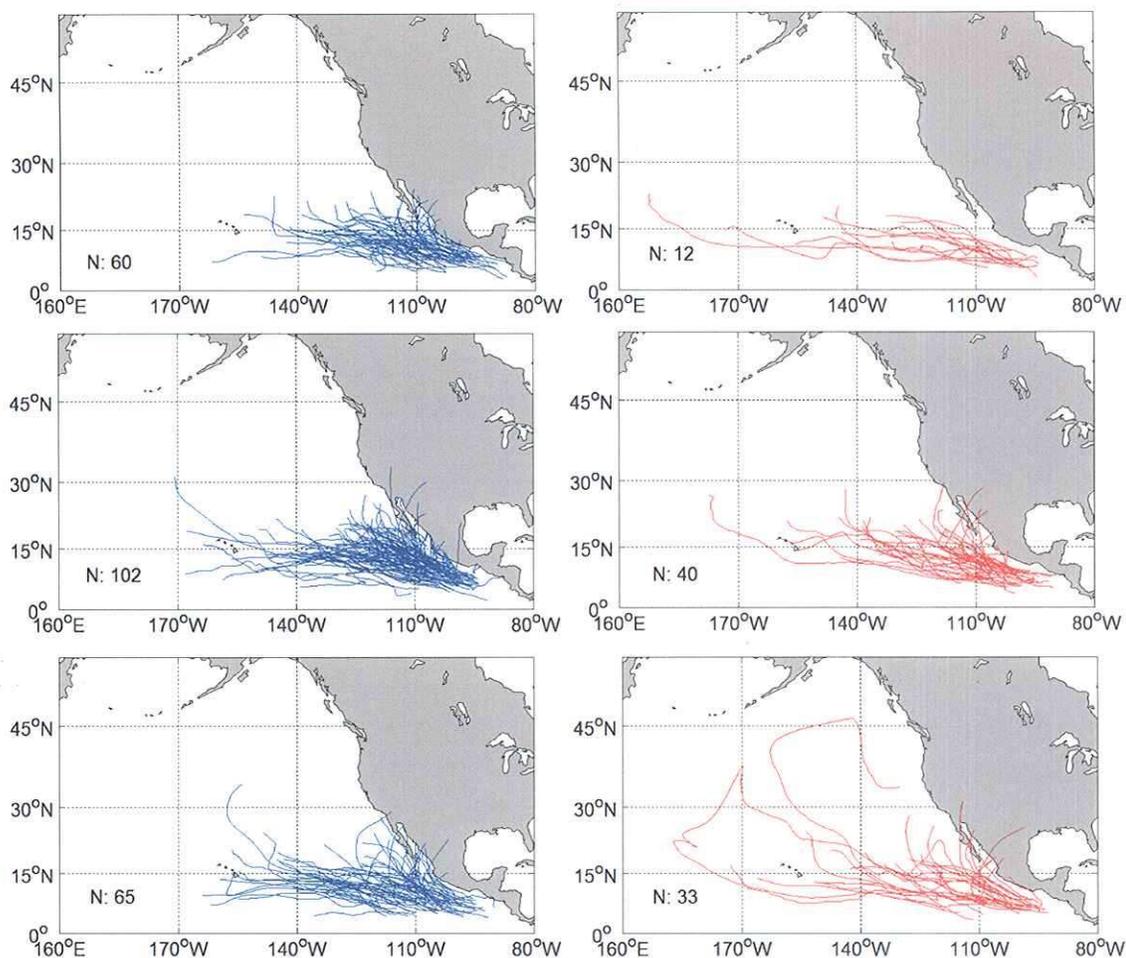
La Fig. 25 muestra que los años de mayor frecuencia de HUR1-3 (1971 y 1990) ocurrieron durante fases LN y N respectivamente, mientras que en la última década se registraron los años de menor frecuencia de HUR1-3 (2007 y 2010) también durante eventos N y LN. Por otro lado, los HUR4-5 tuvieron su mayor frecuencia en 1992 y 1993 durante un cambio de fase de N a EN y como en los HUR1-3, en años recientes también se registró la menor frecuencia de HUR4-5 (2005 y 2008). La Fig. 25 también muestra que la mayor frecuencia de HUR 4-5 (> 1 desviación estándar) ocurrió en eventos N y EN.



**Figura 24.** Posición de origen, máxima intensidad y porcentaje de frecuencia de HUR 1-3 (72 % en total; izquierda) y HUR 4-5 (28 % en total; derecha) en el área principal de ciclogénesis durante eventos La Niña (LN, superior), Neutral (N, centro) y El Niño (EN, inferior) en el periodo May-Nov 1970-2010. El círculo azul indica la posición promedio de ciclogénesis y el rojo el de máxima intensidad.



**Figura 25.** Frecuencia anual de HUR 1-3 (superior) y HUR 4-5 (inferior) en relación a las anomalías promedio de la temperatura superficial del mar (TSMan Oceanic Niño Index) en la región Niño 3-4 para el período May-Nov de 1970-2010. Se consideran eventos La Niña, Neutral y El Niño cuando las TSMan son:  $\leq -0.5^{\circ}\text{C}$ , entre  $>-0.5^{\circ}\text{C}$  y  $<0.5$ , y  $\geq 0.5^{\circ}\text{C}$ , respectivamente. Se indican en azul y rojo los años extremos con mayores (P95 %) y menores (P5 %) frecuencias de huracanes. Las líneas quebradas horizontales indican  $\pm 1$  desviación estándar.



**Figura 26.** Trayectorias y frecuencia (N) de los HUR 1-3 (izquierda) y HUR 4-5 (derecha) durante eventos La Niña (superior), Neutrales (centro) y El Niño (inferior) en el periodo May-Nov 1970-2010.

**Tabla IV.** Características promedio de posición y duración de HUR 1-5 durante eventos ENOS.

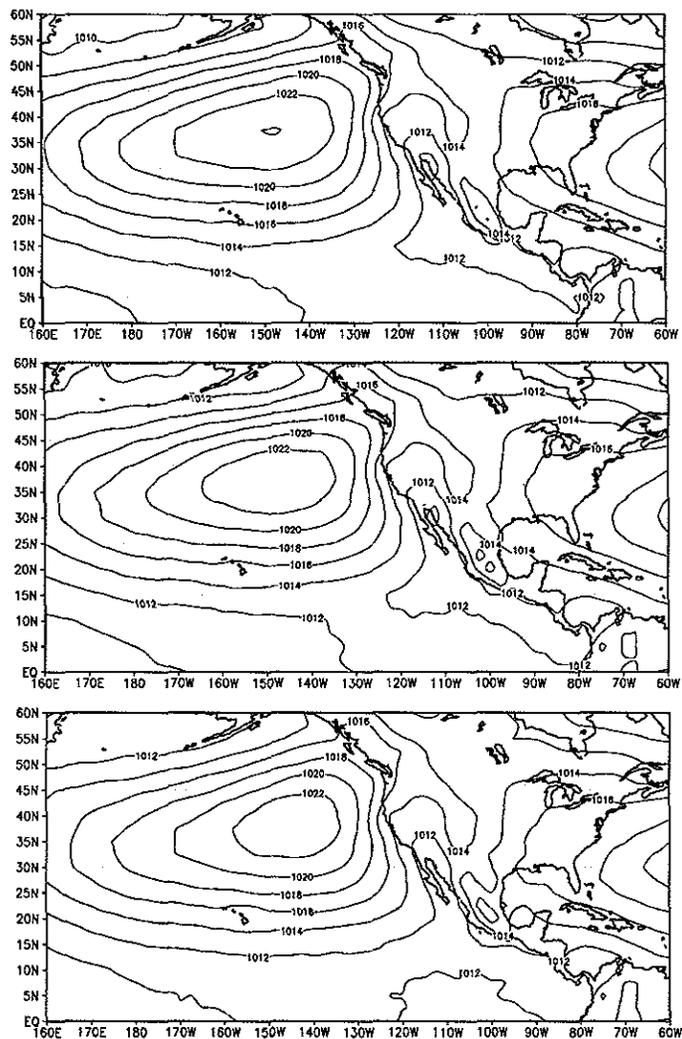
| Evento  | Posición de origen | Posición de máxima intensidad | Duración promedio (días) |
|---------|--------------------|-------------------------------|--------------------------|
| La Niña | 12.1°N, 100.5°W    | 17.2°N, 111.7°W               | 7.2                      |
| Neutral | 12.8°N, 102.2°W    | 17.3°N, 111.7°W               | 8.1                      |
| El Niño | 12.1°N, 103.6°W    | 16.6°N, 112.9°W               | 8.4                      |

Como se menciona anteriormente, los HUR 4-5 presentan trayectorias más extensas que los HUR 1-3, viajando a lo largo del Pacífico Oriental tropical en algunos casos más allá de 170 °W y por arriba de 30 °N (Fig. 26). En eventos LN, los HUR 1-3 tienen trayectorias confinadas entre los 5 y 25 °N probablemente debido a una intensificación y desplazamiento hacia el sur del anticiclón del Pacífico Norte (Fig. 28). Los HUR 4-5 en eventos LN están limitados a trayectorias zonales viajando hasta el Pacífico Central. Durante eventos LN la frecuencia total de huracanes se ve reducida considerablemente debido en parte a una contracción de la alberca de agua caliente del Pacífico Oriental tropical y a un aumento en los valores de CV sobre la región donde se originan los huracanes (Fig. 27). En contraste, en la cuenca del Atlántico la alberca de agua cálida es mucho más grande (isoterma de 28.5°C) durante LN, que durante los eventos N y EN, y el CV es menor durante LN, lo cual tendería a favorecer una mayor frecuencia huracanes en esa cuenca, como se ha documentado ampliamente (e.g., O'Brien et al. 1998). La Tabla IV muestra la posición promedio de origen y máxima intensidad, así como duración promedio de HUR1-5 durante los diferentes eventos ENOS.

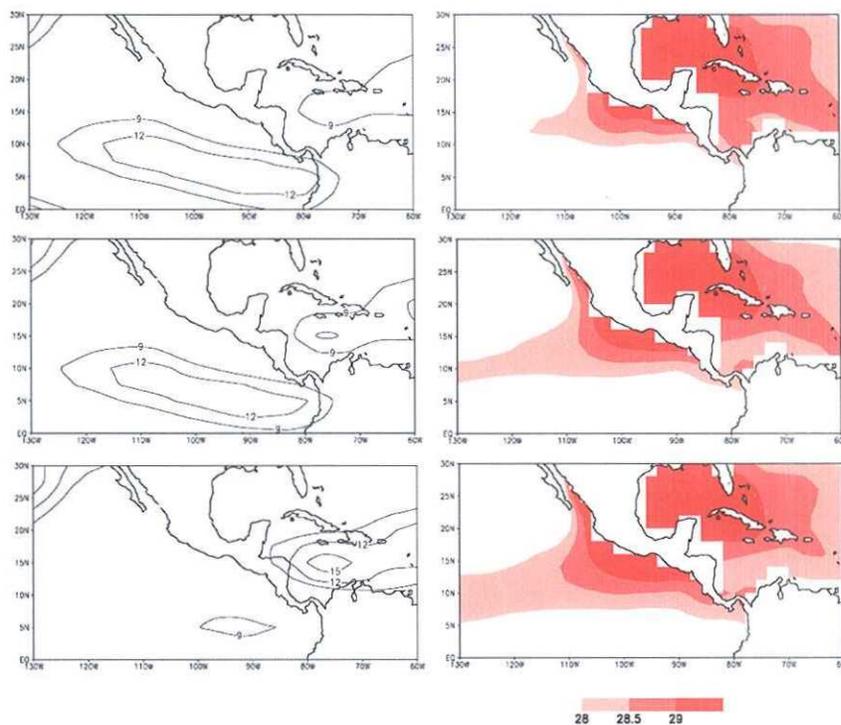
Por otro lado, el anticiclón del Pacífico Norte y la vaguada monzónica y el anticiclón del Atlántico Norte varían ligeramente durante las fases del ENOS. Se observa que durante EN la presión a nivel del mar en la zona de ciclogénesis (isobara de 1012) es más baja y más extensa que en eventos N y LN (Fig. 27). Lo anterior se debe a que durante eventos EN la alberca de agua cálida del Pacífico se expande más hacia el oeste y hacia el norte lo que debilita parcialmente al anticiclón del Pacífico Norte, mientras que del lado del Atlántico, la alberca se contrae (ver isoterma de 28.5 °C en la Fig. 28) y el anticiclón es ligeramente más fuerte que durante LN y N (Fig. 27). Durante LN, el Anticiclón del Atlántico Norte se debilita y el del Pacífico se intensifica (Fig. 27), mientras que la alberca de agua cálida del Pacífico se debilita y la del Atlántico se intensifica (Fig. 28). Durante

eventos N, las condiciones de la alberca de agua cálida y los anticiclones son intermedias entre LN y EN.

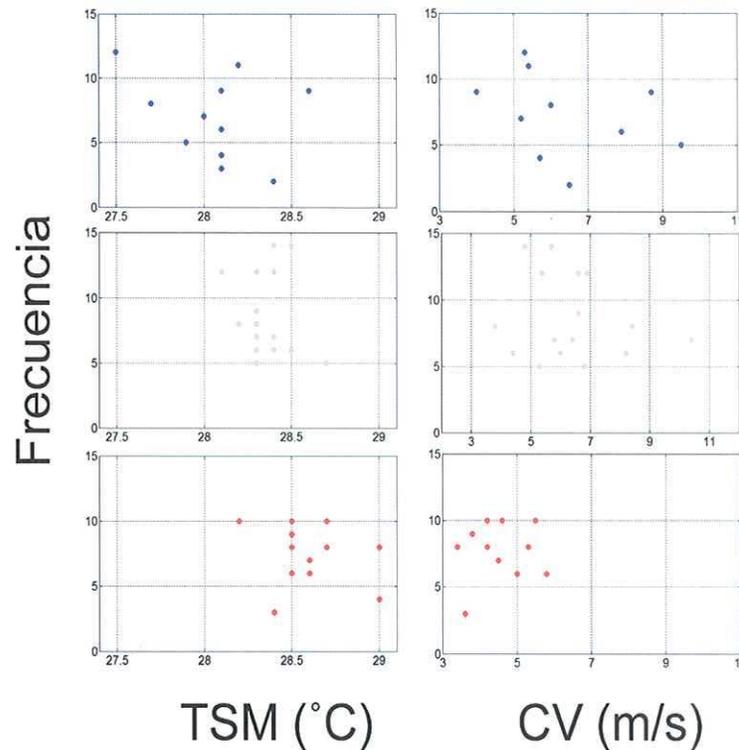
Por lo tanto, en eventos EN se presentan las trayectorias más extensas de todas, con huracanes que viajan hacia el Pacífico Central y hacia latitudes medias hasta  $45^{\circ}\text{N}$  para convertirse en ciclones extra tropicales. En eventos EN es cuando se observan las condiciones más favorables de TSM y CV en la cuenca del Pacífico y más desfavorables en el Mar Caribe. La alberca de agua caliente del Pacífico se expande hacia el oeste hasta unirse con la alberca de agua cálida del Pacífico Occidental para desarrollarse totalmente. En la región también se presentan valores de CV menores a 5 m/s, contrario a lo que sucede en el lado del Atlántico y Mar Caribe donde se observan valores de CV hasta de 16 m/s debido posiblemente a la intensificación de la corriente en chorro de bajos niveles del Caribe (y un anticiclón del Atlántico más fuerte) y de los vientos del oeste de altura como se ha documentado en la literatura (e.g., Amador et al., 2006) y que se sabe inhiben la formación de huracanes en esa región.



**Figura 27. Presión a nivel del mar (mb) durante Jul-Sep en eventos La Niña (superior), Neutrales (centro), y El Niño (inferior) en el periodo 1970-2010.**



**Figura 28.** Compuestos del CV (izquierda; m/s) zonal entre 850 y 200 mb y la TSM (derecha; °C) durante Jul-Sep en eventos La Niña (superior), Neutrales (centro), y El Niño (inferior) en el periodo 1970-2010. Se resaltan los valores de TSM y CV mayores o iguales a 28 °C y 9 m/s, respectivamente.



**Figura 29. Frecuencia anual (May-Nov) de HUR 1-5 y su relación con los valores promedio (Jul-Sep) de la TSM (izquierda; °C) y CV (derecha; m/s) en el área principal de ciclogénesis en eventos La Niña (superior), Neutrales (centro) y El Niño (inferior). Datos de CV hasta el 2007.**

La Fig. 29 muestra la frecuencia anual (May-Nov) de los HUR 1-5 y su relación con valores estacionales (Jul-Sep) TSM y el CV durante las diferentes fases del ENOS. Durante LN la mayor parte de los períodos Jul-Sep se encuentran por debajo de 28.5 °C y con valores de CV mayores a 5 m/s, aunque se observa un máximo de frecuencia a 27.5 °C. En eventos N la mayor frecuencia de HUR1-5 está entre los 28 y 28.5 °C, mientras que el CV se comporta de manera similar a eventos EN.

De la figura anterior podemos concluir que las condiciones estacionales (Jul-Sep) más favorables para una mayor frecuencia de huracanes (>8 huracanes por año;

arriba de la media de los HUR 1-5) es cuando se tienen valores de TSM entre 27.5 - 28.7 °C y de CV entre 3 - 8.5 m/s.

## Capítulo IV

---

### CONCLUSIONES

---

El objetivo de esta tesis es determinar las características dinámicas y termodinámicas que diferencian a los huracanes intensos (HUR 4-5) de los débiles (HUR 1-3) en el Pacífico Oriental. Además, analizar la influencia de las fases del ENOS en la intensidad, frecuencia, duración y trayectoria de huracanes en dicha región y evaluar la precipitación asociada a huracanes en la costa Pacífica mexicana.

La cuenca del Pacífico Oriental tropical es una de las cuencas de ciclogénesis más activas a nivel global. Dentro de esta región se localiza el área principal de ciclogénesis donde se forman el 90% de todos los huracanes de la zona. En el período de estudio (May-Nov 1970-2010) se registran un total de 225 huracanes categorías 1-3 (HUR 1-3) y 84 categorías 4-5 (HUR 4-5) con una frecuencia anual de 5.7 y 2.2 respectivamente. A pesar de que su frecuencia es menor, los HUR 4-5 tienen en promedio mayor duración (10.2 días) que los HUR 1-3 (7.1 días), así como trayectorias más extensas.

Por otro lado, se observa una tendencia de -2.96 significativa al 95 % en la frecuencia de los HUR 1-5, consistente con los HUR 1-3. Los HUR 4-5 muestran una tendencia positiva, aunque no significativa. Sin embargo, en la década de los 90 se registra un aumento significativo en el número de HUR 4-5 respecto a las otras décadas, lo cual es consistente con lo ocurrido a escala global.

A escala diaria, en los días de origen y máxima intensidad de los HUR 1-5 durante May-Nov se observa un mayor calentamiento superficial del océano durante el desarrollo de los huracanes más intensos (HUR 4-5) lo cual puede entenderse como un mayor contenido de calor oceánico en el sistema océano-atmósfera disponible para la intensificación de un huracán. Lo anterior concuerda con la hipótesis planteada originalmente y permite concluir que los HUR 4-5 se dan en presencia de TSM más altas que los HUR 1-3. Por otro lado, el corte del viento zonal (CV) entre 850-200 mb se presenta favorable durante el ciclo de vida de todos los huracanes.

En cuanto a la escala estacional, durante los meses más activos de la temporada de huracanes (Jul-Sep), se presenta una tendencia de 0.57 °C significativa al 95 % en la TSM durante 1970-2010. Lo anterior es consistente con diversos autores, los cuales mencionan un aumento significativo de la TSM tanto a nivel global (Webster et al., 2005), como dentro de la cuenca del Pacífico Oriental (Ralph y Gough, 2009). Durante Jul-Sep, los valores más favorables de TSM y CV para la formación e intensificación de huracanes son de 28.1-28.7°C y 3-7 m/s, respectivamente.

Durante las diferentes fases del ENOS (EN, N y LN) se observa una mayor frecuencia de huracanes de todas las categorías durante la fase N (46%), y en segundo lugar durante la fase EN (31%). Se observa que durante eventos N y EN se observan trayectorias más extensas y una mayor duración promedio de los HUR 1-5 (8.1 y 8.4 días, respectivamente), mientras que durante LN los HUR 1-5 duran en promedio 7.1 días. La principal diferencia entre la fase fría (LN) y la cálida (EN) es que los eventos de LN se caracterizan por la menor frecuencia de huracanes intensos (HUR 4-5), solo un 4% del total. Sin embargo, la frecuencia de HUR 4-5 es muy similar en eventos Neutrales (13%) y El Niño (11%).

Lo anterior se debe en parte a una disminución en la TSM y una contracción de la alberca de agua cálida del Pacífico Oriental tropical ( $TSM > 28.5$  °C) y a un aumento en el CV durante LN, así como un anticiclón del Pacífico ligeramente más intenso que durante los eventos N y EN. Durante eventos N y EN comienza una transición con el desarrollo de la alberca de agua cálida de la región, un debilitamiento del CV y de anticiclón del Pacífico (aunque estos últimos son más notables durante eventos EN).

La frecuencia de huracanes está también relacionada con oscilaciones climáticas como la AMO y la PDO. En el caso de la AMO, durante una fase cálida se observa un decremento en la frecuencia de huracanes, mientras lo contrario ocurre durante una fase fría posiblemente debido a un calentamiento de la TSM en la región de estudio y un cambio en la circulación de los vientos.

A pesar de que la metodología utilizada subestima la precipitación total que podría presentar un evento individual, los campos de precipitación obtenidos permiten observar las zonas geográficas donde la precipitación derivada de huracanes tiene un mayor impacto. El análisis permite observar que la precipitación derivada de los HUR4-5 es mayor que en los HUR 1-3 a lo largo de toda la zona donde tienen impacto a pesar de que los primeros sólo representan un 30 % del total.

Por último, el reto que surge para el futuro es determinar por qué generalmente la temporada de huracanes es más activa durante eventos Neutrales que durante eventos de El Niño.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agudelo, P.A. and J.A. Curry. 2004. Analysis of spatial distribution in tropospheric temperature trends. *Geophys. Res. Lett.* 31 (22): 1-5.
- Amador, J.A., Alfaro, E.J., Lizano, O.G., Magaña, V.O., 2006. Atmospheric forcing of the Eastern tropical Pacific: A review. *Progress in Oceanography.* 69 (2-4): 101-142.
- Avila, L.A., and R.J. Pasch, 1992. Atlantic tropical systems of 1991. *Mon. Wea. Rev.* 120: 2688-2696.
- Bosart, L. F., C. S. Velden, W. E. Bracken, J. Molinari, and P. G. Black. 2000. Environmental influences on the rapid intensification of Hurricane Opal (1995) over the Gulf of Mexico. *Mon. Wea. Rev.* 128: 322–352
- Bove, M. C., J. B. Elsner, C. W. Landsea, X. Niu, and J. J. O'Brien. 1998: Effects of El Niño on U.S. landfalling hurricanes, revisited. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 79: 2477–2482.
- Bracken, E., and L. F. Bosart. 2000. The role of synoptic-scale flow during tropical cyclogenesis over the North Atlantic Ocean. *Mon. Wea. Rev.* 128: 353–376.
- Byers, H. R., 1944: *General Meteorology*. McGraw-Hill, New York, EUA. 645 pp.
- Camargo, S. J., A. G. Barnston, P. J. Klotzbach, and C. W. Landsea. 2007c: Seasonal tropical cyclone forecasts. *WMO Bull.* 56 (4): 297-309.
- Camargo, S. J., A. W. Robertson, A. G. Barnston, and M., Ghil. 2008. Clustering of eastern North Pacific tropical cyclonetracks: ENSO and MJO effects. *Geochemistry, Geophysics and Geosystems.* 9 (6): 1-23.
- Cavazos, T., C. Turrent, and D. P. Lettenmaier, 2008. Extreme precipitation trends associated with tropical cyclones in the core of the North American monsoon, *Geophys. Res. Lett.* 35 (21).
- Chen, M., W. Shi, P. Xie, V. B. S. Silva, V. E. Kousky, R. Wayne Higgins, and J. E. Janowiak. 2008. Assessing objective techniques for gauge-based analyses of global daily precipitation, *J. Geophys. Res.* 113, D04110.

- Chu, P.-S. 2004: ENSO and tropical cyclone activity. *Hurricanes and Typhoons, Past, Present and Future*, R. J. Murnane and K.-B. Liu, Eds., Columbia University Press, New York, EUA. 297–332.
  - Collins, J.M, and I.M., Mason. 2000. Local environmental conditions related to seasonal tropical cyclone activity in the Northeast Pacific basin. *Geophys. Res. Lett.* 27 (23): 3881-3884.
  - Corbosiero, K.L , M.J., Dickinson, and L.F., Bosart. 2009. The Contribution of Eastern North Pacific Tropical Cyclones to the Rainfall Climatology of the Southwest United States. *Monthly Weather Review.* 137 (8): 2415-2435.
  - DeMaria M., J. Kaplan, 1994a: Sea surface temperature and the maximum intensity of Atlantic tropical cyclones. *J. Climate.* 7: 1325-1334.
  - DeMaria, M. 1996: The effect of vertical shear on tropical cyclone intensity change: *J. Atmos. Sci.* 53: 2076-2087.
  - Díaz, S.C, Salinas-Zavala, C.A., y Hernandez-Vazquez, S. 2008. Variability of rainfall from tropical cyclones in northwestern México and its relation to SOI and PDO. *Atmósfera.* 21(2): 213-223.
  - Elsner, J. B., and A. B. Kara. 1999. *Hurricanes of the North Atlantic: Climate and Society.* Oxford University Press, Oxford, Gran Bretaña. 488 pp.
  - Elsner, J. B., J. P. Kossin and T. H. Jagger. 2008. The increasing intensity of the strongest tropical cyclones. *Nature.* 455: 92-95.
  - Emanuel, K.A. 1987. The dependence of hurricane intensity on climate. *Nature.* 326: 483-485.
  - Emanuel, K. A., and D. S. Nolan. 2004. Tropical cyclone activity and global climate. Preprints, 26th Conf. on Hurricanes and Tropical Meteorology, Miami, FL, Amer. Meteor. Soc. 240–241.
  - Emanuel, K. A. 2005. Increasing destructiveness of tropical cyclones over the past 30 years. *Nature.* 436: 686-688.
  - Emanuel, K. 2006: Climate and tropical cyclone activity: A new model downscaling approach. *J. Climate.* 19: 4797-4802.
  - Emanuel, K., R. Sundararajan, and J. Williams, 2008: Hurricanes and global warming: Results from downscaling IPCC AR4 simulations. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 89: 347-367.
-

- Englehart, P. J., M. D. Lewis, and A. V. Douglas. 2008. Defining the frequency of near-shore tropical cyclone activity in the eastern North Pacific from historical surface observations (1921–2005). *Geophys. Res. Lett.* 35 (3), L03706.
- Farfan, L. M., and J. A. Zehnder. 1997. Orographic influence on the synoptic-scale circulations associated with the genesis of Hurricane Guillermo (1991). *Mon. Wea. Rev.* 125: 2683–2698.
- Fiedler, P.C., Talley, L.D., 2006. Hydrography of the eastern tropical Pacific: A review. *Progress in Oceanography.* 69 (2–4): 143–180.
- Frank, W. M., 1977. The structure and energetics of the tropical cyclone I. Storm structure. *Mon. Wea. Rev.* 105: 1119-1135.
- Frank, W. M., and E. A. Ritchie, 2001. Effects of vertical wind shear on hurricane intensity and structure. *Mon. Wea. Rev.* 129: 2249-2269.
- Goldenberg, S.B. and L.J., Shapiro. 1996. Physical Mechanisms for the Association of El Niño and West African Rainfall with Atlantic Major Hurricane Activity" *Journal of Climate.* 9(6):1169-1187.
- Goldenberg, S. B., C. W. Landsea, A. M. Mestas-Nuñez, and W. M. Gray, 2001. The recent increase in Atlantic hurricane activity: Causes and implications. *Science.* 293: 474–479.
- Gray, W. M., 1968. A global view of the origin of tropical disturbances and storms. *Monthly Wea. Review.* 96: 669-700.
- Gray, W.M. 1979. "Hurricanes: Their formation, structure and likely role in the tropical circulation" *Meteorology Over Tropical Oceans.* D. B. Shaw (Ed.), Roy. Meteor. Soc., James Glaisher House, Grenville Place, Bracknell, Berkshire, Gran Bretaña. 155-218.
- Gray, W. M., 1984: Atlantic seasonal hurricane frequency. Part I: El Niño and 30 mb quasi-biennial oscillation influences. *Mon. Wea. Rev.*, 108, 587-595.
- Hart, R. E., J. L. Evans. 2001. A climatology of the extratropical transition of Atlantic tropical cyclones. *J. Climate.* 14: 546–564.
- Holland, G.J. 1993. "Ready Reckoner"- Chapter 9, *Global Guide to Tropical Cyclone Forecasting*, WMO/TC-No. 560, Report No. TCP-31, World Meteorological Organization; Geneva, Switzerland, pp. 3.1–3.46.

- Holland, G. J. 1997. The maximum potential intensity of tropical cyclones. *J. Atmos. Sci.* 54: 2519–2541.
  - Jáuregui, E. 2003. Climatology of landfalling hurricanes and tropical storms in Mexico. *Atmósfera*, 193-204.
  - Kalnay, E., M. Kanamitsu, R. Kistler, W. Collins, D. Deaven, L. Gandin, M. Iredell, S. Saha, G. White, J. Woollen, Y. Zhu, A. Leetmaa, B. Reynolds, M. Chelliah, W. Ebisuzaki, W. Higgins, J. Janowiak, K. C. Mo, C. Ropelewski, J. Wang, R. Jenne, and D. Joseph. 1996. The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 77: 437-470.
  - Karl, T. R. and, K. E., Trenberth. 2003. Modern Global Climate Change. *Science.* 302: 1719–1723.
  - Kessler, W.S., 2006. The circulation of the eastern tropical Pacific: A review. *Progress in Oceanography.* 69 (2-4): 181-217.
  - Kimberlain, T. B., and J. B., Elsner. 1998. The 1995 and 1996 North Atlantic hurricane seasons: A return of the tropical-only hurricane. *J. Climate.* 11: 2062–2069.
  - Kimberlain, T. B. 1999. The effects of ENSO on North Pacific and North Atlantic tropical cyclone activity. In *Preprints of the 23rd Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology*, 250–53. Boston: American Meteorological Society.
  - Kistler, R., E. Kalnay, W. Collins, S. Saha, G. White, J. Woollen, M. Chelliah, W. Ebisuzaki, M. Kanamitsu, V. Kousky, H. Van Der Dool, R. Janne & M. Fiorino. 2001. The NCEP-NCAR 50 year Reanalysis: Monthly Means CD-ROM and documentation. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 82 (2): 247-267.
  - Knutson, T. R., and R. E. Tuleya. 2004. Impact of CO<sub>2</sub>- induced warming on simulated hurricane intensity and precipitation: Sensitivity to the choice of climate model and convective parameterization. *J. Climate.* 17: 3477–3495.
  - Larson, J., Y. Zhou, and R. W. Higgins. 2005. Characteristics of landfalling tropical cyclones in the United States and Mexico: Climatology and interannual variability. *J. Climate.* 18: 1247–1262.
  - Lloyd J. Shapiro, and S. B., Goldenberg. 1998. Atlantic Sea Surface Temperatures and Tropical Cyclone Formation. *Journal of Climate.* 11 (4): 578-590.
-

- Lugo H. J., y M. Inbar. 2002. Desastres Naturales en América Latina. Fondo de Cultura Económica. México, D. F. 501 p.
  - Malkus, J. S. and H. Riehl. 1960: On the dynamics and energy transformations in steady-state hurricanes. *Tellus*. 12: 1-20.
  - Mantua, N.J. and S.R. Hare, Y. Zhang, J.M. Wallace, and R.C. Francis. 1997: A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production. *Bull. Amer. Meteor.* 78: 1069-1079.
  - McBride, J. L., and R. Zehr. 1981: Observational analysis of tropical cyclone formation. Part II: Comparison of nondeveloping versus developing systems. *J. Atmos. Sci.* 38: 1132-1151.
  - Michaels, P. J., P. C. Knappenberger, and R. E. Davis. 2006. Sea-surface temperatures and tropical cyclones in the Atlantic basin. *Geophys. Res. Lett.* 33, L09708.
  - Miller, B.I. 1958. On the maximum intensity of hurricanes. *J. Meteor.* 15: 184-195.
  - Molinari, J., D. Knight, M. Dickinson, D. Vollaro, and S. Skubis. 1997. Potential vorticity, easterly waves, and tropical cyclogenesis. *Mon. Wea. Rev.* 125: 2699-2708.
  - Molinari, J., D. Vollaro, S. Skubis, and M. Dickinson. 2000. Origins and mechanisms of eastern Pacific tropical cyclogenesis: A case study. *Mon. Wea. Rev.* 128: 125–139.
  - Palmén, E. 1948: On the formation and structure of tropical hurricanes. *Geophysica*. 3: 26-38.
  - Pavía, E. G., F. Graef, J. Reyes. 2009. Annual and seasonal surface air temperature trends in Mexico. *Int. J. Climatol.* 29 (9): 1324-1329.
  - Philander, G. 1989. El Niño and La Niña: *American Scientist*,. 77: 451–459.
  - Pielke, R. A., Jr., and C. W. Landsea. 1999. La Niña, El Niño, and Atlantic hurricane damages in the United States. *Bull. Amer. Meteor.* 80:2027–33.
  - Pielke Jr., R.A., Landsea, C., Mayfield, M., Laver, J. and Pasch, R. 2005. Hurricanes and global warming. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 86: 1571-1575.
-

- Ralph, T.U. and Gough, W.A. 2009. The influence of sea-surface temperatures on Eastern North Pacific tropical cyclone activity. *Theoretical and Applied Climatology* 95(3-4): 257-264.
  - Riehl, H. 1954. *Tropical Meteorology*. McGraw-Hill, New York, EUA, 392 pp.
  - Pielke, Jr., R.A. and Landsea, C.W., 1999. "La Niña and El Niño and Atlantic Hurricane Damages in the United States." *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 80: 2027-2033.
  - Romero-Vadillo, E., O. Zaytsev, and R. Morales-Pérez, 2007: Tropical cyclone statistics in the Northeastern Pacific. *Atmósfera*. 20: 197–213.
  - Saunders, M. A., R. E. Chandler, C. J. Merchant and F. P. Roberts. 2000. Atlantic hurricanes and NW Pacific typhoons: ENSO spatial impacts on occurrence and landfall. *Geophys. Res. Lett.* 27 (8): 1147-1150.
  - Schade, Lars R. 2000. Tropical Cyclone Intensity and Sea Surface Temperature. *J. Atmos. Sci.* 57: 3122–3130.
  - Shapiro, L. J. 1987. Month-to-month variability of the Atlantic tropical circulation and its relationship to tropical storm formation, *Mon. Wea. Rev.*, 115, 2598– 2614.
  - Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor and H. L. Miller (eds.)IPCC, 2007. Summary for Policymakers. En: *Climate Change 2007: The Physical Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, Gran Bretaña y Nueva York, EUA.
  - Tang, B. H. and J. D. Neelin. 2004. ENSO Influence on Atlantic Hurricanes via Tropospheric Warming. *Geophys. Res. Lett.* 31, L24204.
  - Trenberth, K., 2005: Uncertainty in hurricanes and global warming. *Science*. 308: 1753–1754.
  - Vecchi, G. A., and B. J. Soden. 2007. Increased tropical Atlantic wind shear in model projections of global warming. *Geophys. Res. Lett.* 34, L08702.
  - Vega, A. J., and M. S. Binkley. 1994. Tropical cyclone landfall in the United States 1960–1989. *Natl. Wea. Dig.* 19: 14–26.
-

- Vincent, D. G., and A. H. Fink. 2001. Tropical cyclone environments over the northeastern and northwestern Pacific based on ERA-15 analyses. *Mon. Wea. Rev.* 129: 1928–948.
  - Wang, C.C., and G. Magnusdottir. 2006. The ITCZ in the central and eastern Pacific on synoptic time scales. *Mon. Wea. Rev.* 134: 1405–1421.
  - Wang, C., Fiedler, P. 2006. ENSO variability in the Eastern tropical Pacific: A review. *Progress in Oceanography*. 69 (2-4): 239-266.
  - Wang, C., D. B. Enfield. 2001. The tropical Western Hemisphere warm pool. *Geophys. Res. Lett.*, 28: 635–1638.
  - Webster, P. J., G. J. Holland, J. A. Curry, and H.-R. Chang. 2005. Changes in tropical cyclone number, duration, and intensity in a warming environment. *Science*. 309: 1844–1846.
  - Whitney, L. D., and J. Hobgood. 1997. The relationship between sea surface temperature and maximum intensities of tropical cyclones in the eastern North Pacific, *J. Climate*. 10: 2921–2930.
  - Wilson, R. M. 1999: Statistical aspects of major (intense) hurricanes in the Atlantic basin during the past 49 hurricane seasons (1950–1998): Implications for the current season. *Geophys. Res. Lett.*, 26, 2957–2960.
  - Zehr, R.M., 1992: Tropical cyclogenesis in the Western North Pacific. NOAA Technical Report NESDIS 61, U. S. Department of Commerce, Washington, DC, EUA. 181 pp.
  - Zeng, Z-H., Y. Wang, and C-C. Wu. 2007. Environmental dynamical control of tropical cyclone intensity—An observational study. *Mon. Wea. Rev.* 135: 38–59.
-