



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA**

**Estudio de Ciclones Tropicales que tocaron Tierra en Costas Mexicanas y su Relación con la Actividad Solar**

**TESIS**

Para optar por el grado de

**DOCTOR EN CIENCIAS**

**P R E S E N T A:**

**Marni Margarita Pazos Espejel**

Jurado:

DR. TOMAS GONZALEZ MORAN (PRESIDENTE)  
DR. ERNESTO CAETANO NETO (VOCAL)  
DRA. BLANCA EMMA MENDOZA ORTEGA (DIRECTORA DE TESIS)  
DR. LUIS GIMENO PRESA (SUPLENTE)  
DR. ANATOLY KOTSARENKO (SUMLENTE)

*Comité Tutorial:*

*DRA. BLANCA EMMA MENDOZA ORTEGA  
DR. TOMAS GONZALEZ MORAN  
DR. VICTOR MAGAÑA RUEDA*



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

# Índice general

<b>Introducción</b>	<b>2</b>
<b>1 Introducción</b>	<b>3</b>
<b>2 Actividad Solar y Ciclones Tropicales</b>	<b>7</b>
2.1 El Sol y la Actividad Geomagnética . . . . .	8
2.1.1 Características básicas del Sol. . . . .	8
2.1.2 Estructura . . . . .	8
2.1.3 La actividad solar. . . . .	10
2.1.4 La actividad geomagnética . . . . .	12
2.1.5 Interacción de la magnetosfera con el medio interplanetario . . . . .	15
2.1.6 Índices geomagnéticos. . . . .	17
2.2 Ciclones Tropicales . . . . .	20
2.2.1 Definición y estructura. . . . .	20
2.2.2 Ciclogénesis tropical . . . . .	20
<b>3 Reconstrucción de una serie de tiempo de ciclones tropicales que tocaron tierra en las costas del Pacífico Mexicano de los s.XVI al XX.</b>	<b>28</b>
3.1 Introducción . . . . .	28
3.2 Metodología . . . . .	29
3.3 Precipitación y relación con los ciclones tropicales. . . . .	30
3.4 Obtención de Datos. . . . .	30
3.4.1 Catálogo de Desastres Agrícolas en México . . . . .	32
3.4.2 Baja California Sur. . . . .	35
3.4.3 Jalisco . . . . .	38
3.4.4 Oaxaca . . . . .	39
3.4.5 Chiapas . . . . .	41
3.4.6 Sinaloa . . . . .	41
3.5 Análisis de Resultados . . . . .	43
3.5.1 Transformada de Ondeleta Continua . . . . .	43
3.5.2 Resultado del análisis espectral . . . . .	45
3.6 Discusión y conclusiones. . . . .	46
<b>4 Ciclo de 22 años en huracanes y su relación con la actividad geomagnética</b>	<b>49</b>

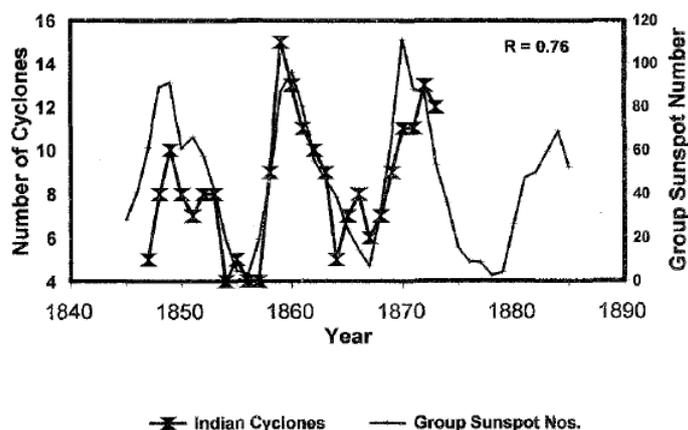
4.1	Introducción . . . . .	49
4.2	Datos . . . . .	50
4.3	Métodología . . . . .	50
4.4	Resultados y discusión . . . . .	51
4.5	Conclusiones. . . . .	56
<b>5</b>	<b>Conclusiones y Trabajo Futuro</b>	<b>59</b>
<b>6</b>	<b>Trabajo a Futuro</b>	<b>61</b>
<b>A</b>	<b>Clasificación Saffir-Simpson</b>	<b>63</b>
A.1	Categoría 1 . . . . .	63
A.2	Categoría 2 . . . . .	63
A.3	Categoría 3 . . . . .	64
A.4	Categoría 4 . . . . .	64
A.5	Categoría 5 . . . . .	65

# Capítulo 1

## Introducción

Las variaciones en la actividad solar observadas en el número de manchas solares, han sido estudiadas desde tiempos antiguos pero el efecto que puede tener en el clima, es aun controversial.

Desde aproximadamente el s. IV a. E. C., en la antigua Grecia, Teofrastus reportó un descubrimiento de Meton quien a través de examinar un registro de 20 años de manchas solares, llegó a la conclusión que cuando el sol tiene manchas, el tiempo tiende a ser más húmedo y lluvioso. Más adelante, en el s. XVII, existen también algunas referencias en los cambios en el Sol y su efecto en el estado del tiempo. Así, el tema ha estado en auge de manera intermitente por los últimos siglos. Una de las primeras publicaciones concernientes a la relación entre la actividad solar y el clima terrestre fue presentada con datos del Dr. Meldrum con el número de ciclones generados en la India de 1847 a 1873, los cuales fueron graficados junto con el número de manchas solares (Fig.1.1). La notable relación inspiró a continuar con las investigaciones sol-clima (Hoyt & Schatten, 1997).



**Figura 1.1:** Gráfica del número de ciclones en la India y número de manchas solares de 1847 a 1873.

A principios de la década de los 1990's, se combinaron varios factores para profundizar en la

investigación. La motivación principal fue la necesidad de entender las causas del calentamiento global y distinguir entre las causas naturales y antropogénicas del cambio climático, lo que ha llevado a los meteorólogos, aun a los escépticos de las relaciones sol-clima, a aceptar que se requiere un análisis objetivo del papel que puede jugar el Sol (Calisesi *et al.* , 2006).

En algunos estudios recientes, la señal solar se ha identificado en valores globales de presión a nivel del mar y en la temperatura de la superficie del mar, (Roy & Haigh, 2011). Kodera *et al.* (2008) encontraron que las tendencias de la presión a nivel del mar en el invierno del Hemisferio Norte puede relacionarse con los efectos de CO<sub>2</sub> modulado por la actividad solar con diferencias en los patrones de comportamiento dependiendo si el ciclo solar se encuentra en un máximo o en un mínimo. Anteriormente, en un estudio de Crooks & Gray (2005), se encontró un calentamiento de la estratosfera de latitudes bajas con una respuesta positiva al ciclo solar de 11 años, y una respuesta negativa al ciclo solar en latitudes altas en ambos hemisferios . Y finalmente, Velasco & Mendoza (2008), publicaron que la Oscilación Multidecenal del Atlántico, la Oscilación del Atlántico Norte, la Oscilación Decenal del Pacífico y el índice de la Oscilación del Sur, presentan una fuerte coherencia con la Radiación Solar Total alrededor de los 11 años. Estos trabajos son solo algunos ejemplos de investigaciones que se han llevado a cabo con datos globales y fenómenos de gran escala que se relacionan con la actividad solar.

En este trabajo se tiene especial interés en los ciclones tropicales (CT), ya que son un fenómeno climático importante no solo por su influencia en la circulación global sino por sus efectos sociales y económicos, y México es una de las regiones que recibe el impacto de ellos cada año. Los modelos recientes de predicción del tiempo y la información disponible en las imágenes de satélite, permiten observar la evolución de una tormenta y su trayectoria. Actualmente, es posible pronosticar con anticipación si un CT se convertirá en huracán y si llegará a territorio mexicano, según las condiciones que existan en ese momento. Hasta ahora se han considerado varios parámetros para saber si es posible que se forme un huracán o no, como la temperatura de la superficie del mar, la velocidad de los vientos, su dirección, etc., características que deben estar presentes al mismo tiempo para que se pueda formar un huracán. Considerar factores externos al sistema océano-atmósfera que afecten la formación de huracanes se ha empezado a hacer cada vez con mayor frecuencia. Uno de estos factores es la actividad solar. La finalidad de identificar el papel del Sol, es tener un modelo más completo de la formación del huracán y quizá será más fácil poder prevenir en el futuro situaciones como las provocadas por el huracán Gilberto (1988) que impactó las costas del Caribe y el Golfo de México y el huracán Paulina (1997) en las costas del Pacífico mexicano.

Como es sabido, el territorio mexicano se encuentra en una zona de trayectoria de CT lo que lo hace muy vulnerable a los huracanes. Las condiciones de temperatura en la superficie del mar, tanto en el Golfo de México, como en la costa del Pacífico son propicias para la ciclogénesis y la evolución del CT. Las regiones que más se ven afectadas en el Golfo de México son la Península de Yucatán y el estado de Tamaulipas. Del lado de la costa del Pacífico son la Península de Baja California, Sinaloa y Michoacán (Jáuregui, 2003).

En cuanto a la información disponible de actividad de CT, el Pacífico Oriental es la región más activa de CT, aunque se tienen datos más o menos confiables a partir de 1949. No así para el Atlántico que cuenta con información desde 1851. De aquí, se observó la necesidad de ampliar la información de CT en el Pacífico Oriental.

Cabe mencionar, que los datos realmente confiables son los obtenidos por medios satelitales, los cuales abarcan de los años setentas a la fecha. Anterior a esto, es muy probable que haya habido CT nunca registrados.

Todo lo anterior aunado al interés de investigar aspectos en que la actividad solar puede estar influenciando fenómenos climáticos, se realizaron dos investigaciones que componen la presente tesis.

Existen diversos trabajos previos para el caso de los ciclones tropicales (CT), que sugieren que la actividad solar puede estar influenciando su formación o desarrollo (p. ej. Elsner & Kavlakov (2001); Pérez-Peraza *et al.* (2008); Mendoza & Pazos (2009)). En particular, en el trabajo de Mendoza y Pazos (2009), se encontró que existe una correlación estadísticamente significativa entre la ocurrencia de CT y el ciclo de 11 años de actividad solar, dependiente de la fase de este ciclo. El indicador de la actividad solar que muestra claramente esta correlación es la actividad geomagnética a través del índice Dst. Esta investigación se explica con detalle en el capítulo 4. Por otro lado, otros trabajos sugieren que la radiación solar total también puede afectar la generación de CT a través de su impacto directo en la temperatura superficial del mar (p. ej. Hodges & Elsner (2010)).

Para poner en contexto la actividad solar y los CT, en el capítulo 2 se presenta una breve descripción del Sol, sus características y efectos en el medio interplanetario y cómo es que la actividad solar interactúa con la Tierra, desde el punto de vista espacial. En seguida, se describen a los ciclones tropicales, su estructura, desarrollo y la ciclogénesis en particular para los Océanos Atlántico y Pacífico Oriental, ya que los CT formados en estas zonas son los que afectan México.

La primera investigación de esta tesis se describe en el capítulo 3 y se enfoca en la actividad de CT que han tocado tierra en las costas del Pacífico Mexicano con el objetivo de documentar las tendencias de largo plazo en la actividad de CT en el Pacífico Oriental, dado que no ha recibido la misma atención con respecto a otras cuencas. Sin embargo, dado que la identificación se basa en reportes históricos, que en su mayoría se refieren a CT que tocaron tierra. El análisis y series de tiempo propuestas solamente se refieren a estos eventos, incluyendo los datos instrumentales posteriores a 1949.

Para identificar los CT que afectaron las costas del Pacífico mexicano (CPM) previos a 1950, se consultaron archivos históricos en varios estados costeros del Pacífico mexicano, lo cual permitió construir un catálogo de eventos relacionados con tormentas intensas y posibles CT que tocaron las CPM. Hasta el momento no se ha realizado una investigación de eventos históricos en el Pacífico Oriental en el periodo comprendido entre 1536 y 1948. Utilizando la escala Saffir-Simpson y la climatología de la región como criterio para evaluar cada evento, se encontraron 85 posibles CT. Con estos eventos y los datos instrumentales se construyó la serie de tiempo de CT que tocaron tierra entre 1701 y 2010. El análisis espectral de esta serie de tiempo, permite establecer periodicidades de  $\sim 2.6$ , 4, 5, 12, 16, 37 y 100 años, que coincide con algunos fenómenos climáticos de gran escala así como también con la actividad solar. En particular, la periodicidad de  $\sim 12$  años es la más significativa en este estudio.

La segunda investigación se muestra en el capítulo 4, y consiste en un estudio en el cual se realiza un análisis espectral en series de CT con categoría de huracán en los océanos Atlántico y Pacífico oriental. Se encontraron periodicidades que coinciden con el ciclo de manchas solares y ciclos solares magnéticos. Después, para establecer la posibilidad de que estas periodicidades

puedan estar asociadas con la actividad solar, se hicieron correlaciones entre la ocurrencia de huracanes y diferentes fenómenos relacionados a la actividad solar, tales como la radiación solar total, el flujo de rayos cósmicos y el índice Dst de actividad geomagnética. Los resultados indican que la correlación más significativa se encuentra entre huracanes del Atlántico y el Pacífico, con el índice Dst. Y es importante resaltar que ambos océanos presentan correlaciones significativamente mayores entre huracanes-Dst durante la parte ascendente de un ciclo solar non y la parte descendente de un ciclo solar par.

Esto indica la existencia de un ciclo de 22 años y también la naturaleza de dicha periodicidad. Además, se evidencia que los huracanes en el Atlántico presenta un comportamiento diferente a la de los huracanes en el Pacífico en relación con las perturbaciones de actividad solar consideradas. En especial al hacer el análisis con el índice geomagnético Dst, existe una anticorrelación entre los huracanes de ambas cuencas.

El capítulo 5 presenta un resumen de los resultados de ambas investigaciones y una propuesta de trabajo futuro, ya que es necesario trabajar en una propuesta del posible mecanismo físico involucrado para poder establecer la existencia de la relación entre la actividad solar y los CT, más allá de los resultados estadísticos.

Finalmente, se espera que los resultados obtenidos en las dos investigaciones arriba mencionadas sean de utilidad en la investigación de la ciclogénesis en el Pacífico oriental y en el mejor entendimiento del fenómeno de los CT y del efecto que puede ocasionar la actividad solar en ellos.

## Capítulo 2

# Actividad Solar y Ciclones Tropicales

Se ha mencionado anteriormente sobre la especulación en cuanto a los resultados de diversos estudios que muestran correlaciones que parecen indicar que ciertos fenómenos externos a la Tierra pueden tener algún tipo de relación con la ocurrencia de ciclones tropicales (CT) y si tales correlaciones pueden sentar la base de estudios más profundos para conocer posibles precursores de la actividad de CT. Para darle a estos resultados un mayor significado, se han llevado a cabo análisis espectrales de las diferentes series de tiempo para delimitar con más precisión la existencia de las relaciones potenciales (Perez-Peraza *et al.* , 2011).

La relación entre fenómenos meteorológicos y el clima espacial ha sido investigada en varios reportes, por más de 200 años. Los trabajos recientes muestran que las perturbaciones asociadas a la actividad solar pueden tener una relación con la formación de fenómenos meteorológicos (e.g. Pap & (Eds.) (2004)) y referencias contenidas; Kavlakov (2005); Mendoza *et al.* (2007); Camp & Tung (2007); Svensmark (2007); Velasco & Mendoza (2008); Dobrica *et al.* (2008). Dentro de los eventos meteorológicos, los CT han atraído mucha atención debido a los efectos devastadores que producen al tocar zonas habitadas por el hombre. Recientes estudios concernientes a la actividad solar y CT, muestran una correlación significativa entre los cambios en la intensidad de CT en el Atlántico norte y el índice Kp de actividad geomagnética, pero no con rayos cósmicos (Elsner & Kavlakov, 2001; Kavlakov *et al.* , 2008). Otro trabajo sugiere que los picos y las tendencias de la actividad de CT de categorías 3, 4 y 5, en el Atlántico norte ocurren con radiación solar total (RST) más baja, i.e. baja actividad solar y viceversa, en varios períodos entre 1739 y 2005 (Nyberg *et al.* , 2007). Ivanov (2006) estudió la posibilidad de que el huracán Katrina tuviera una relación con la actividad geomagnética, ya que hubo una coincidencia de actividad geomagnética durante la formación y desarrollo de este CT.

Concerniente a los CT en el Atlántico y el Pacífico que tocaron costas mexicanas, se ha encontrado que los rayos cósmicos, número de manchas solares e índices geomagnéticos presentan perturbaciones en periodos precedentes y subsecuentes a la aparición de CT (Pérez-Peraza *et al.* , 2008).

Partiendo de tales correlaciones, en esta tesis se han estudiado estas posibles relaciones utilizando también indicadores de la actividad solar y series de tiempo de CT. Por lo tanto, es necesario revisar los fenómenos por separado, para conocer mejor su naturaleza. En primer lugar se estudiarán las características del Sol y su actividad, como la fuente principal de los

fenómenos externos a la Tierra, y en segundo lugar, se presenta una sección relacionada a los CT.

## 2.1. El Sol y la Actividad Geomagnética

### 2.1.1. Características básicas del Sol.

El Sol es la fuente principal de energía de nuestra atmósfera y de la vida. Las características principales de nuestra estrella se presentan en la Tabla 2.1 (Zirin, 1988; Schrijver & Siscoe, 2010).

**Tabla 2.1:** Características del Sol.

Radio	$6.96 \times 10^8 \text{ m}$
Densidad promedio	$1.4 \text{ g/cm}^3$
Aceleración gravitacional	$274 \text{ m/s}^2$
Luminosidad	$3.83 \times 10^{26} \text{ W}$
Temperatura efectiva	5780 K
Distancia Sol-Tierra	$149.6 \times 10^6 \text{ km} = 1 \text{ Unidad Atrónomica (UA)}$
Periodo de rotación en el ecuador	25 días
Periodo de rotación cerca del polo	36 días

### 2.1.2. Estructura

La estructura interna del Sol se ha modelado en tres capas principales. En el centro se encuentra el núcleo, donde se llevan a cabo reacciones nucleares. Las temperaturas en esta región son del orden de 107 K y la presión del orden de 1 011 atmósferas. La energía generada en el núcleo es transportada al exterior primero por radiación a través de los fotones (rayos gamma), los cuales al interactuar con el material solar pueden tardar hasta un millón de años en llegar a la superficie. Y después por convección debido a la existencia de un gradiente de temperatura que cumple el criterio de Schwarzschild, así grandes celdas de circulación transportan el material hacia la fotosfera, que es la primera capa de la atmósfera solar.

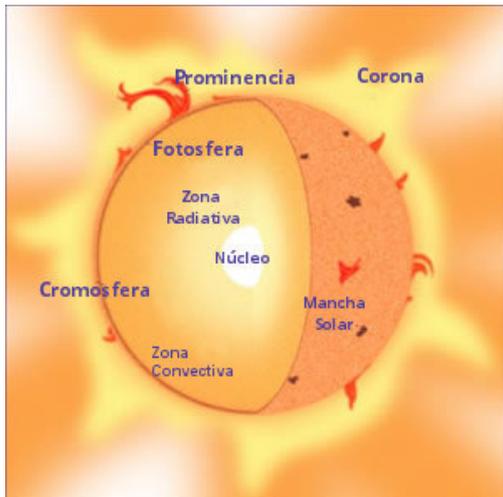
Los modelos solares indican que el núcleo, donde se convierte el hidrógeno en helio ocupa la tercera parte del radio solar. La región donde ocurre el transporte de energía por radiación o zona radiativa ocupa la siguiente tercera parte y la zona convectiva la tercera parte exterior. Cada capa tiene aproximadamente 200 000 km de espesor. Después se encuentra la atmósfera solar, que a su vez se divide en capas de acuerdo al gradiente de temperatura: la fotosfera, la cromosfera y la corona (ver Figuras 2.1 y 2.2). Se supone que el incremento de temperatura con la altura que se observa en la atmósfera solar, es debido a la disipación de ondas magnetohidrodinámicas y a la aniquilación de campos magnéticos de polaridad opuesta (Lang, 2009).

La fotosfera es la capa visible del Sol, de aproximadamente unos 100 km de espesor. Debido a su temperatura de aproximadamente 5 800 K, los fotones emiten en el espectro del visible.

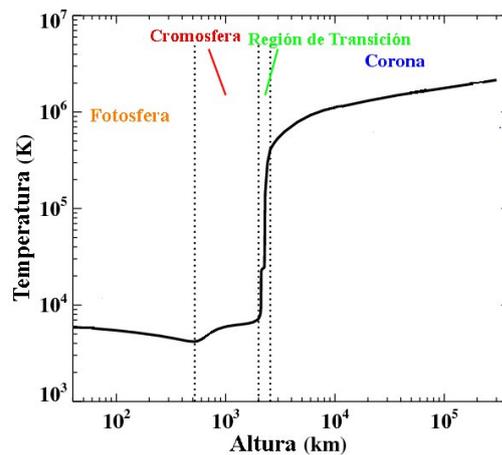
Fotografías de alta resolución muestran en la fotosfera un patrón de granos brillantes de forma poligonal separados por canales oscuros y estrechos. La distancia promedio de centro a centro de estos granos va de 1 400 a 2 000 km. Estos gránulos, son las cabezas de las celdas de la zona convectiva. En la fotosfera también se observan las manchas solares y las fáculas, estructuras oscuras y brillantes respectivamente, que conforman las llamadas regiones activas y que se caracterizan por campos magnéticos miles de veces mayores que los de sus alrededores (Hanslmeier, 2007).

A finales del siglo XIX, los observadores de eclipses notaron una luz roja que emanaba de una capa delgada arriba de la fotosfera, apenas visible al inicio y final de la totalidad del eclipse y le llamaron cromosfera. En esta capa la temperatura aumenta aproximadamente a 20 000 K. Debido a estas temperaturas el hidrógeno emite luz con tono rojizo, a las que se le denomina emisión  $\alpha$ . En la cromosfera se pueden observar regiones muy brillantes denominadas playas y un patrón que recuerda al pasto que se denomina espículas (Lang, 2009).

La corona es la región más externa del Sol y se extiende por todo el medio interplanetario, hasta los confines de la Heliosfera, que es el espacio dominado por nuestra estrella no sólo gravitacionalmente sino a través de partículas y campos (Zirin, 1988). Puede ser vista en los eclipses totales. La corona tiene una temperatura del orden de  $10^6$  K, por lo cual emite en rayos-X. Presenta regiones oscuras llamadas hoyos coronales, de donde emerge el viento solar y se considera que sus campos magnéticos se cierran en los confines de la Heliosfera, por lo que cerca del Sol se observan como campos abiertos. También se observan las regiones activas de manera muy brillante y cuyos campos magnéticos son cerrados. La apariencia de la corona, cambia con el ciclo solar. Durante el máximo se observa una estructura homogénea en todas direcciones, mientras que en el mínimo se notan algunas discontinuidades y estructuras que parecen pétalos. Esto se debe a la evolución de los hoyos coronales, durante el mínimo de actividad se encuentran en los polos, abarcan hasta latitudes medias y pueden durar pocos años, en el máximo de actividad solar son pequeños, y aparecen en latitudes bajas durando pocos días (Hanslmeier, 2007).



**Figura 2.1:** Estructura interna y atmosférica del Sol.



**Figura 2.2:** Cambio de temperatura con la distancia en la atmósfera solar.

### 2.1.3. La actividad solar.

La actividad solar se debe a la evolución de su campo magnético, que a su vez es producto de la existencia de la zona convectiva y la rotación diferencial del Sol.

Las manchas solares es uno de los indicadores más antiguos registrados por el hombre de la actividad solar. Los astrónomos chinos fueron los primeros en reportar manchas en el Sol desde el año 28 (Bicknell, 1968). En 1611 las manchas solares se observaron por primera vez por medio de un telescopio por cuatro personas: J. Goldsmid (Holanda), G. Galilei (Italia), Ch. Scheiner (Alemania) y Th. Harriot (Inglaterra). Goldsmid fue el primero en publicar sobre este tema, argumentando que el Sol debía rotar ya que las manchas se movían a través del disco. Tanto Scheiner como Galileo notaron que las manchas aparecen solo en zonas de bajas latitudes en ambos lados del ecuador y nunca en los polos. El siguiente descubrimiento significativo fue hecho por Schwabe quien registró la ocurrencia de manchas solares a lo largo de 43 años y reportó una periodicidad de aproximadamente 11 años; en 1851 apareció su publicación con la periodicidad de 11 años del promedio anual del número de manchas solares. En 1858, Rudolf Wolf obtuvo una serie del número de manchas solares al hacer una recopilación con datos antiguos usando los registros hechos por Galileo (Hanslmeier, 2007).

Durante el periodo de 1853 a 1861, Richard Carrington realizó un gran número de observaciones de manchas y reportó su variación con la latitud lo que más adelante fue confirmado por Wolf y Spörer. El cambio en la posición de las manchas es producido por la rotación diferencial del Sol, la cual dedujo Carrington al observar que un punto en el ecuador rotaba más rápidamente respecto de latitudes altas. Las primeras manchas aparecen cerca de los  $40^\circ$  de latitud Norte y Sur, y las últimas cerca del ecuador. A esta variación en la latitud se le conoce como Ley de Spörer.

En 1848, Wolf definió el número relativo de manchas como:

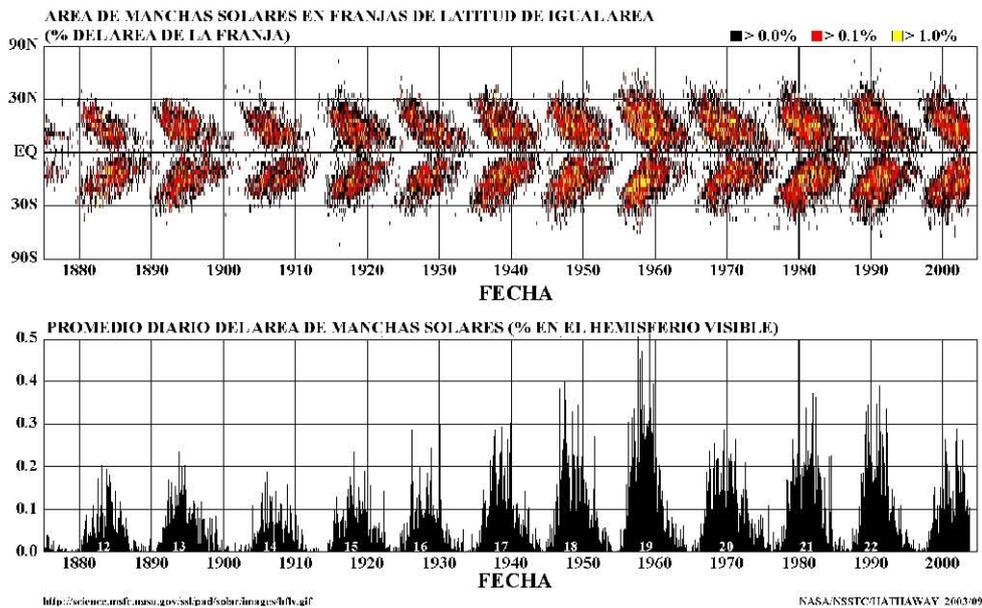
$$R_Z = K(10g + f) \quad (2.1)$$

Donde,  $g$  es el número de grupos de manchas,  $f$  es el número individual de manchas y  $K$  es un coeficiente de reducción personal que representa la confiabilidad del observador y su equipo. Cuando Wolf fue designado director del Observatorio de Zurich en 1855, instituyó el cálculo diario de  $R_Z$  el cual se sigue realizando hasta la fecha. En la Figura 2.3 se muestra el registro de manchas solares de 1880 a 2008.

Las manchas solares consisten de una región central oscura llamada umbra, rodeada por una región menos oscura llamada penumbra formada por filamentos claros y oscuros, los diámetros de las manchas pueden llegar hasta los 40 000 Km. Las manchas solares se producen debido a que el campo magnético del Sol tiene la propiedad de no estar distribuido uniformemente sino que se concentra en cuerdas o tubos de flujo que aparecen en la superficie del Sol entre  $\sim 40^\circ$  y  $5^\circ$  de latitud. La apariencia oscura es debida a que el material de la mancha es más frío que el de sus alrededores, el enfriamiento es causado por la presencia de un campo muy intenso en los tubos de flujo que forman la mancha y que inhibe la convección (Lang, 2009).

Además de la variación en el número  $R_Z$ , se tienen otros indicadores que siguen al ciclo de 11 años de manchas solares, mencionaremos sólo algunos de ellos:

## AREA DEL PROMEDIO DIARIO DE MANCHAS SOLARES EN ROTACIONES SOLARES INDIVIDUALES



**Figura 2.3:** Variación del número y posición de las manchas solares con el tiempo.

- Regiones activas: En estas regiones ocurren fenómenos explosivos tales como eyecciones de masa coronal, ráfagas o prominencias eruptivas. Las ráfagas consisten principalmente en la emisión en una amplia gama de longitudes de onda y además aceleran partículas, generalmente, no duran más de 10 minutos. Las eyecciones son principalmente expulsiones de grandes masas de material coronal y también aceleran partículas. Las prominencias eruptivas también expulsan material solar pero no en la proporción en que lo hacen las eyecciones.
- La intensidad de emisiones de CaII: Es una línea de emisión en la atmósfera solar de iones de calcio (Ca). Los átomos de calcio son ionizados, por lo que al perder un electrón son designados Ca II. Estos emiten radiación con longitudes de onda de 393.4 nm y 396.8 nm y se conocen como líneas H y K de calcio.

En la Tierra, hay también manifestaciones de la actividad solar, por ejemplo:

- La incidencia de auroras: Las auroras son emisiones de luz causadas por colisiones entre partículas provenientes del viento solar y el nitrógeno y oxígeno de la atmósfera terrestre. Las partículas del viento solar se aceleran a través del proceso de reconexión magnética en la cola de la magnetosfera terrestre. El número de auroras sigue al ciclo de manchas solares.
- El flujo de rayos cósmicos: Los rayos cósmicos galácticos (RCG) son partículas muy energéticas que provienen de fuera de la Heliosfera, que consisten en protones, electrones y

núcleos ionizados con velocidades cercanas a la velocidad de la luz. Estas partículas cargadas, son deflectadas por las líneas del campo magnético galáctico, solar o terrestre. El 90 % de los RCG son protones, 9 % son partículas alfa (Helio ionizado) y el 1 % restante está formado por diversos elementos. La mayoría de los RCG son acelerados por las ondas de choque en los remanentes de las supernovas, los procesos de aceleración pueden durar varios miles de años hasta que las partículas adquieren suficiente energía como para convertirse en rayos cósmicos. El Sol también genera partículas solares energéticas, los llamados rayos cósmicos solares, éstas salen del Sol aceleradas en ráfagas o eyecciones de masa coronal. Estas partículas tienen baja energía comparadas con los RCG. La evolución temporal del flujo de RCG es aproximadamente inversa al de las manchas solares.

- o La radiación solar total (RST): es la cantidad promedio de energía emitida por el Sol en todas las longitudes de onda que incide verticalmente por segundo por unidad de área alcanzando el tope de la atmósfera terrestre a una distancia de 1 UA. La RST también sigue al ciclo de manchas solares de 11 años y su variación se debe principalmente al juego entre las manchas solares y las fáculas (Hanslmeier, 2007; Hargreaves, 1992).

#### **2.1.4. La actividad geomagnética**

La actividad geomagnética es el producto de la interacción entre el viento solar y la magnetosfera de la tierra, la cual presenta perturbaciones cuando el viento solar supermagnetosónico, interactúa con el campo magnético terrestre formando un frente de choque donde se desacelera, deflecta y calienta el plasma. El viento solar controla tanto el tamaño de la magnetosfera como el flujo de energía en la misma. Las perturbaciones del viento solar en la magnetosfera, afectan no solo los sistemas espaciales colocados en órbita por el ser humano, sino también aquellos en la atmósfera baja y en la superficie de la Tierra (Moldwin, 2008).

##### **El viento solar.**

El flujo de material proveniente del Sol, se conoce como viento solar. Es un plasma compuesto por electrones e iones que sale radialmente del Sol en todas direcciones con velocidades supermagnetosónicas. La alta temperatura de la corona solar, produce una presión hacia el exterior lo que permite la expansión en regiones abiertas de flujo magnético, permeando a la Heliosfera de este flujo. El viento solar debido a su alta conductividad arrastra consigo el campo magnético solar, como el campo está anclado al Sol, la rotación del Sol dobla y tuerce al campo magnético en una forma de espiral respecto del plano ecuatorial del Sol.

Desde principios de la década de los 1960's, los instrumentos de medición de plasma y campo magnético en las naves espaciales mostraron un flujo continuo de plasma proveniente del Sol. A 1 UA, el viento solar tiene en promedio una velocidad de  $\sim 400$  km/s y una densidad de  $\sim 7$  partículas/cm<sup>3</sup>, consiste principalmente de electrones y una fracción menor de protones ( $\sim 3 - 5\%$ ). El plasma tiene integrado un campo magnético con intensidad de  $\sim 10$  nT.

Cerca del máximo de actividad solar, hay eventos en los que el viento solar llega a tener velocidades mayores a 600 km/s y en ocasiones hasta de 1 000 km/s. Aproximadamente el 90 % de estos eventos de alta velocidad en el máximo solar están asociados a eyecciones de masa

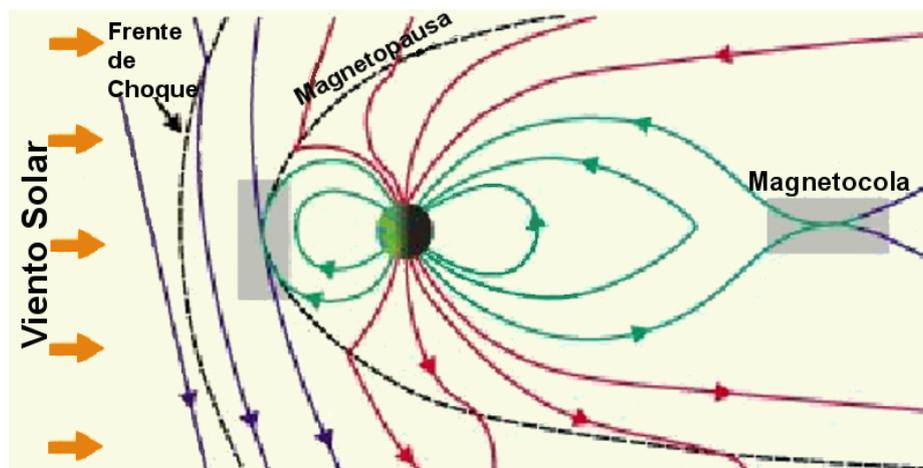
coronal que viajan por el medio interplanetario. Dado que la diferencia en el velocidad de flujo entre la corriente más rápida y la más lenta es mayor a la velocidad magnetosónica ( $\sim 60$  km/s), se forma un choque al frente de la corriente de alta velocidad (Moldwin, 2008; Bothmer & Daglis, 2007).

### La magnetosfera

La magnetosfera es la cavidad formada por el campo magnético terrestre que protege a la Tierra del viento solar. El tamaño y la forma de esta cavidad está controlada por tres componentes de la presión del viento solar: la presión dinámica asociada a su velocidad, la presión cinética asociada a su temperatura y la presión de su campo magnético (o campo magnético interplanetario) (Moldwin, 2008).

El campo magnético terrestre es un campo aproximadamente dipolar generado por un proceso de dínamo debido a la circulación del núcleo metálico líquido de la Tierra. El dipolo tiene una inclinación de  $10^\circ$  respecto al eje de rotación terrestre y emerge de un hemisferio con cierta dirección (polo norte magnético) apuntando hacia el otro hemisferio (polo sur magnético). El campo es más intenso en los polos que en el ecuador y decae rápidamente con la distancia; la intensidad del campo en el ecuador decrece como el cubo de la distancia (Bothmer & Daglis, 2007).

La magnetosfera se compone de diferentes partes (ver Figuras 2.4 y 2.5):

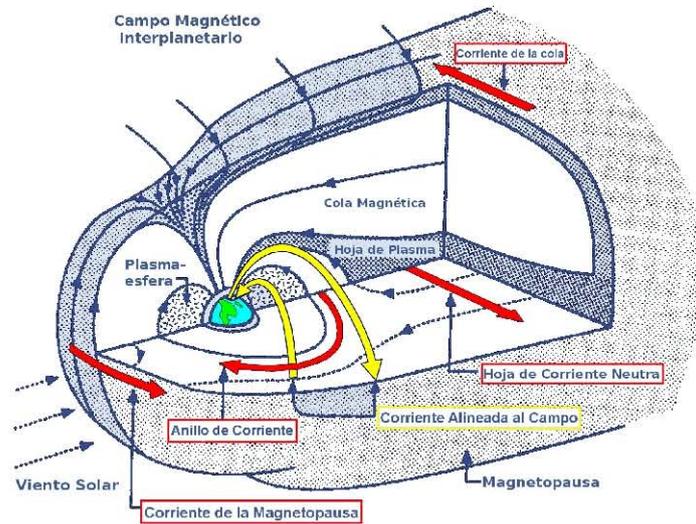


**Figura 2.4:** Se muestra una sección de corte de la magnetosfera en el meridiano medio día- media noche, con el norte en la parte superior y el Sol a la izquierda.

- El frente de choque: La región donde el viento solar supermagnetosónico interactúa con la magnetosfera.
- Magnetofunda: Es la región entre el frente de choque y la magnetopausa. Aquí, la energía cinética de las partículas se convierte en energía térmica por lo cual el plasma se calienta y se vuelve muy turbulento.

- **Magnetopausa:** Es una región con muy poco espesor que separa al medio interplanetario de la magnetosfera. El límite de la magnetopausa está determinada por el balance entre la presión del viento solar y la presión magnética de la magnetosfera. Tiene entre 10 y 12 radios terrestres (RT) del lado del Sol. La intensidad de la presión del viento solar se debe principalmente a la velocidad del viento solar. Conforme se incrementa la presión del viento solar, la magnetopausa se mueve hacia la Tierra. Cuando la presión del viento solar decrece, la magnetosfera entera se expande.
- **Magnetocola:** En la región noche el viento solar deforma el campo magnético dipolar estirándolo y generando una cola. Las líneas de campo llegan a distancias de  $\sim 3000$  RT. Aquí ocurren frecuentemente fenómenos de reconexión.
- **Hoja de Plasma:** Se encuentra dividiendo la región de la cola en dos lóbulos con campos magnéticos opuestos.
- **Plasmaesfera:** Región de forma toroidal alrededor de la Tierra compuesta de plasma frío y denso, principalmente hidrógeno y helio, con una apreciable cantidad de oxígeno, cuyas partículas tienen la energía necesaria para escapar de la ionosfera, que es la parte ionizada de la atmósfera terrestre. Puede verse como una extensión de la ionosfera. Hay también un límite pronunciado en la plasmaesfera, llamado plasmopausa, dentro de la cual se encuentran líneas de campo magnético que rotan junto con la Tierra y donde la densidad del plasma decae un orden de magnitud.
- **Cinturones de radiación de Van Allen:** Se encuentran frecuentemente superpuestos a la plasmaesfera y al anillo de corriente. Fueron descubiertos en 1958 por James Van Allen y colaboradores. Se caracteriza por contener partículas de altas energías atrapadas en la magnetosfera que alcanzan energías relativistas y por consiguiente contienen una gran cantidad de energía cinética. El cinturón interno que consiste de protones y electrones, se extiende de 400 a 12 000 km sobre la Tierra y el cinturón exterior, compuesto principalmente por electrones energéticos, va de 12 000 a 60 000 km. La región entre ambos cinturones, generalmente se mantiene libre de partículas energéticas por mecanismos que aumentan la pérdida de partículas hacia la ionosfera (Hanslmeier, 2007).
- **Anillo de corriente:** Es la región donde las partículas cargadas producen una corriente eléctrica que rodea la Tierra. La Figura 1.5 muestra un esquema de la magnetosfera mostrando el meridiano medio día – media noche y el plano ecuatorial. Las líneas sólidas indican las direcciones de las diferentes corrientes que fluyen en la magnetosfera. Dada la forma y la intensidad del dipolo magnético de la Tierra, los iones energéticos fluyen de media noche al lado en que se oculta el Sol y los electrones energéticos fluyen en la dirección opuesta. Esta diferencia en la dirección de los flujos de iones cargados positivamente y electrones cargados negativamente da lugar a una corriente eléctrica que forma el anillo de corriente alrededor de la Tierra. Esta corriente a su vez, da lugar a un campo magnético que apunta en la dirección opuesta al campo dipolar terrestre. Por lo tanto, el anillo de corriente genera un decremento en la intensidad del campo magnético terrestre medido en la superficie. Se utilizan instrumentos cerca del ecuador que constantemente

miden la intensidad de este campo magnético. Cuando el anillo de corriente se intensifica abruptamente, se puede ver un rápido decremento en la intensidad del campo magnético terrestre (Bothmer & Daglis, 2007; Hargreaves, 1992).



**Figura 2.5:** Corrientes alineadas al campo que conectan el anillo de corriente y la hoja de plasma a la ionosfera (Bothmer & Daglis, 2007).

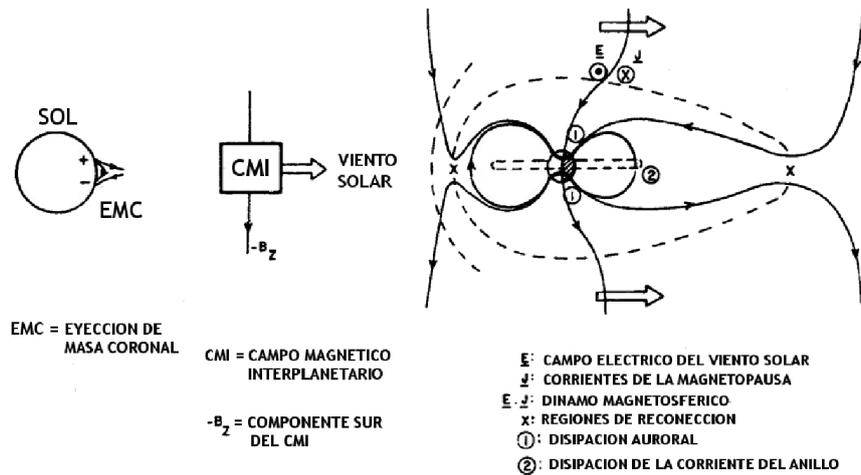
### 2.1.5. Interacción de la magnetosfera con el medio interplanetario

Dentro de la magnetosfera la dinámica de las partículas cargadas (plasma) está determinada por la configuración del campo magnético de la Tierra, que deja de asemejarse a un dipolo entre más lejos se encuentra de la Tierra debido a la interacción con el viento solar. La interacción entre el campo magnético de la Tierra y el del viento solar es semejante al de una roca en un río. El viento solar (el río) encuentra la magnetosfera de la Tierra (la roca) como un obstáculo y lo rodea, dejando detrás una estela. Debido a que el viento solar es supermagnetosónico, se forma una onda de choque río arriba o en el lado día de la magnetosfera llamada el frente de choque, el cual desacelera el viento solar y lo deflecta alrededor de la magnetosfera (ver Figura 2.4).

#### Reconexión magnética

La reconexión magnética en la magnetopausa se cree que juega un papel principal en el acoplamiento viento solar – magnetosfera. La reconexión va acompañada de cambios en la topología magnética de gran escala, que además generan transferencia de masa, energía y momento del viento solar a la magnetosfera. La reconexión magnética es el mecanismo principal durante el incremento en la actividad geomagnética.

Cuando dos plasmas diferentes entran en contacto, en el marco de referencia de la magneto-hidrodinámica, estos pueden ser separados por diferentes tipos de discontinuidades. En el caso del lado día de la magnetosfera terrestre, el plasma de viento solar chocado submagnetosónico en la magnetofunda entra en la magnetosfera por el proceso de reconexión. Este proceso requiere invalidar la condición del campo congelado en una región localizada llamada región de difusión. Entonces, se producen campos magnéticos dirigidos opuestamente a ambos lados de la hoja de corriente (ver Figura 2.6)(Suess & Tsurutani, 1998).



**Figura 2.6:** Interacción del campo magnético interplanetario cuando su componente  $B_z$  apunta en dirección sur, propiciando el proceso de reconexión con las líneas del campo magnético terrestre. (Suess & Tsurutani, 1998).

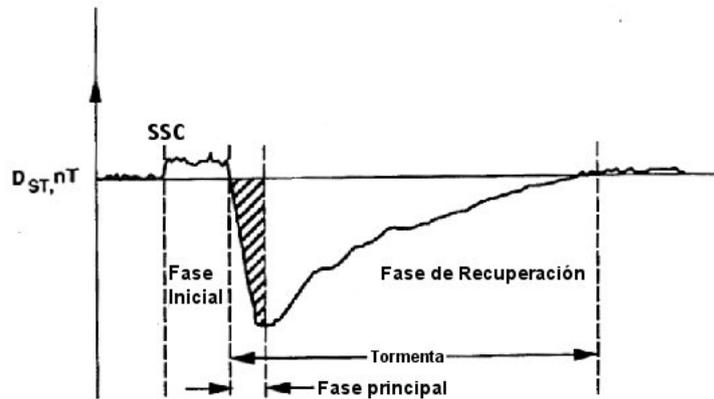
El plasma del viento solar, primariamente entra en la magnetosfera a través de reconexión magnética por la magnetocola, como se muestra en la Figura 1.6. Cuando el campo magnético interplanetario (IMF) tiene una dirección opuesta a los campos magnetosféricos, puede darse la interconexión y el viento solar arrastra estos campos hacia atrás en la región de la cola donde se reconectan una vez más. Cuando la reconexión magnética en el lado día es particularmente intensa, la reconexión en el lado noche es también intensa y el plasma es llevado dentro de la atmósfera interna del lado noche.

Conforme las partículas energéticas convergen dentro del lado noche de la magnetosfera de la Tierra, son también sujetas a fuerzas debidas a la curvatura y el gradiente de los campos magnéticos y a fuerzas debidas a los efectos del giroradio de las partículas, con el efecto neto de la deriva de los protones en dirección opuesta a la de los electrones que como se mencionó anteriormente, forman el anillo de corriente. El decremento de la intensidad del campo magnético de la Tierra es debido a que la corriente es de tipo diamagnética. El incremento en la corriente del anillo indicando la perturbación geomagnética, es conocido como tormenta magnética. La energía total de las partículas en la corriente del anillo (medidas por la intensidad de la perturbación del campo diamagnético) es una medida de la intensidad de la tormenta (Suess & Tsurutani, 1998).

## Tormentas magnéticas.

La característica principal de una tormenta magnética es el fuerte decremento en la intensidad de la componente horizontal del campo magnético de la Tierra y su recuperación subsecuente. El decremento en la intensidad es debido al incremento en la población de partículas atrapadas en la magnetosfera (Gonzalez *et al.* (1994)). Las causas de estas perturbaciones del campo geomagnético son las eyecciones de masa coronal (principalmente durante el máximo de actividad solar) y las regiones co-rotantes de alta velocidad (principalmente durante el mínimo de actividad solar).

La Figura 2.7 muestra el campo promedio sobre las estaciones en tierra cerca del ecuador, la ordenada es el cambio en la componente horizontal del campo magnético de la tierra y la abscisa es el tiempo. Como se indica en la figura, hay tres fases en una tormenta geomagnética, la fase inicial, donde la componente horizontal se incrementa a valores positivos de hasta decenas de nT, una fase principal que puede tener magnitudes negativas de cientos de nT y una fase de recuperación donde el campo gradualmente vuelve a su nivel normal. Las escalas de tiempo de las tres fases son variables. La fase inicial puede durar de minutos a varias horas, la fase principal de media hora a varias horas y la recuperación de decenas de horas a una semana. El índice de Tiempo de Perturbación de la Tormenta (Dst, por sus siglas en inglés), mide la desviación o el cambio en el campo magnético de la Tierra de su valor normal en tiempo quieto. Cuando este índice se vuelve negativo, indica el decremento en la intensidad del campo magnético de la Tierra debido al incremento de la intensidad del anillo de corriente (Suess & Tsurutani, 1998).



**Figura 2.7:** Gráfica de un perfil idealizado del índice Dst. Se observa un pequeño incremento en la intensidad durante la fase inicial a partir del comienzo súbito de la tormenta (SSC) y es seguido por la fase principal y una fase de recuperación.

### 2.1.6. Índices geomagnéticos.

Los índices geomagnéticos, surgen de la necesidad de la comunidad científica de investigar fenómenos de la interacción del Sol con el ambiente de la Tierra.

Las variaciones geomagnéticas tienen dos características especiales: 1) No son afectadas por condiciones meteorológicas 2) Pueden observarse a grandes distancias del sistema de corriente que la genera en la atmósfera superior y en la magnetosfera, en particular pueden medirse en superficie.

Las perturbaciones geomagnéticas pueden ser monitoreadas en observatorios con base en tierra que registran las tres componentes del campo magnético (Mayaud, 1980).

### **Índice Kp**

El índice global Kp, se obtiene del valor promedio de los niveles de perturbación de la componente horizontal del campo magnético (H) que se observa en 13 estaciones subaurorales.

Los niveles de perturbación locales se determinan por la medida del rango entre el valor más alto y el valor más bajo en un intervalo de 3 h para H. Primero, es necesario remover el patrón de la variación de un día quieto y el rango se convierte en un índice local K tomando valores de 0 a 9, de acuerdo a una escala cuasilogarítmica que es específica de cada estación (Menvielle & Berthelier, 1991).

### **Índice aa**

El índice aa se deriva de dos estaciones antípodas, de los 8 datos de K registrados cada 3 horas (<http://www.ukssdc.ac.uk/Help/aa.html>, Mayaud (1980)). El índice aa es el promedio de los valores del norte y del sur. Su valor representa el nivel de actividad en la latitud magnética de 50° ([http://isgi.cetp.ipsl.fr/des\\_aa.htm](http://isgi.cetp.ipsl.fr/des_aa.htm)).

### **El índice Dst**

De todos los índices geomagnéticos, el índice Dst tiene la ventaja de poder monitorear y registrar con la mayor exactitud el fenómeno para el cual fue designado, que es el de estudiar las variaciones en el anillo de corriente ecuatorial. Esto se debe a la gran simplicidad de las variaciones magnéticas causadas por el anillo de corriente: son casi axisimétricas y no dependen de la longitud o el tiempo local. El índice Dst es el registro puro del fenómeno y puede escogerse cualquier tasa de muestreo.

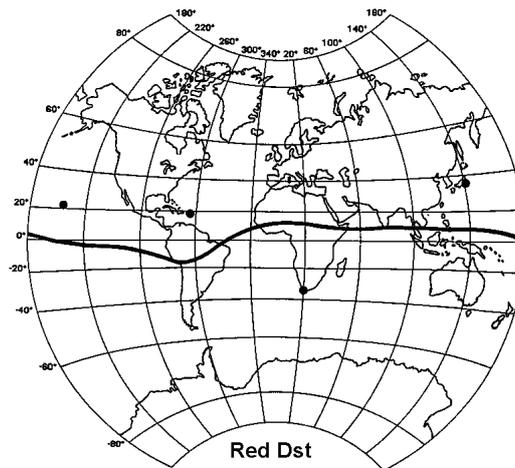
Existe dificultad para eliminar apropiadamente las otras variaciones temporales; además, las variaciones seculares que cambian de un observatorio a otro, interfiere si se desea mantener la homogeneidad de las series a lo largo de los años.

Los intentos preliminares, se ocuparon de las variaciones transitorias de dos formas diferentes. Sugiura y Hendricks (1967) intentaron tomar en cuenta las variaciones seculares en forma definitiva para las series largas. En la reunión de Madrid (1969), la IAGA adoptó el índice Dst como lo desarrollaron Sugiura y colaboradores. El nombre del índice, fue justificado por Sugiura, diciendo que es conveniente analizar la variación D de la tormenta en dos partes, Dst y Ds. Dado un instante de tiempo, Dst es el promedio de D sobre todas las longitudes. Ds se define como  $D - Dst$ . Para una tormenta bien definida, Dst y Ds pueden determinarse como función del tiempo de la tormenta, medida desde el inicio de la tormenta. Sin embargo, la determinación de Dst no se limita al tiempo de la tormenta magnética sino que puede extenderse a periodos de

menor actividad geomagnética o incluso momentos magnéticamente quietos. De hecho, el Dst, puede determinarse continuamente como función del tiempo universal sin importar la ocurrencia de tormentas magnéticas (Mayaud, 1980).

### Derivación del índice Dst.

Para la derivación del índice Dst, se utilizan cuatro observatorios: Hermanus, Kakioka, Honolulu y San Juan (Figura 2.8). Estos observatorios son adecuados por estar a distancia suficiente lejanas de los electrojets auroral y ecuatorial (línea negra en la Figura 2.8) y están distribuidos lo más uniformemente posible en longitud.



**Figura 2.8:** Localización de los observatorios de Hermanus, Kakioka, Honolulu y San Juan. La línea negra representa el electrojet ecuatorial.

Para cada observatorio, los valores anuales promedio de  $H$ , calculados a partir de los 5 días más quietos de cada mes, forman la base de datos inicial. Los valores finales de Dst se determinan después de cada año de calendario, y por ello los valores promedio anuales están disponibles solo hasta que concluye el año para el cual se calcula el Dst. La base de referencia se expresa por series de potencia en el tiempo y los coeficientes cuadráticos son determinados por el método de mínimos cuadrados, usando las medias anuales para el año en curso y los 4 años anteriores. Entonces, la línea de referencia, en base  $H$  está expresada como:

$$H_{base}(\tau) = A + B\tau + C\tau^2 \quad (2.2)$$

Donde  $\tau$  es el tiempo en años medidos desde una época de referencia.

De la expansión polinomial determinada en 2.2, se calcula el valor de referencia al final del año en curso. Como segundo paso, este valor se incluye como un dato adicional en el ajuste polinomial. El valor de referencia  $H_{base}(T)$  calculado a partir de 2.2 para cada hora UT del año en curso se toma del valor  $H$  observado, se puede expresar como sigue:

$$\Delta H(T) = H_{obs} - H_{base}(T) \quad (2.3)$$

Las desviaciones  $\Delta H(T)$  forman la base de datos de las siguientes derivaciones para cada observatorio (<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst/dir/dst2/onDstindex.html>).

## **2.2. Ciclones Tropicales**

En México, los ciclones tropicales (CT) son de gran interés ya que cada año afectan las costas del Pacífico, del Golfo de México y del Caribe. Comúnmente se estudia a los CT por su frecuencia o número, intensidad, tamaño y duración. En particular, aquellos CT que tocan tierra son de especial importancia por el daño que ocasionan los vientos, las inundaciones y la marea de tormenta asociados a ellos. Además, es necesario tener en cuenta los factores humanos, es decir, la vulnerabilidad social y su capacidad de recuperación. Existe un gran número de poblaciones a lo largo de las costas mexicanas, muchas de ellas son ciudades importantes para el desarrollo económico y con una población considerable, de forma que los CT que tocan tierra, pueden llegar a tener efectos devastadores.

### **2.2.1. Definición y estructura.**

Un ciclón tropical (CT) es un área que se caracteriza por un área de baja presión de aire en la superficie, generando un incremento en la velocidad del viento y lluvia, sin ningún frente asociado, que se desarrolla en aguas tropicales y tiene una circulación organizada.

Los CT son sistemas de escala sinóptica, es decir, que son áreas de varios cientos de kilómetros por lo que giran por el efecto de la fuerza de Coriolis. En los niveles bajos de la atmósfera, giran en sentido antihorario (hacia la izquierda) en el hemisferio norte y en sentido horario (hacia la derecha) en el hemisferio sur, lo cual produce las variaciones de sus bandas espirales. En los CT el viento fluye hacia adentro en sentido ciclónico en los niveles inferiores, asciende en espiral en las zonas de convección profunda que son la pared del ojo central o las bandas de lluvia en espiral, y sale en espiral en la parte alta por debajo de la tropopausa (Figura 2.9).

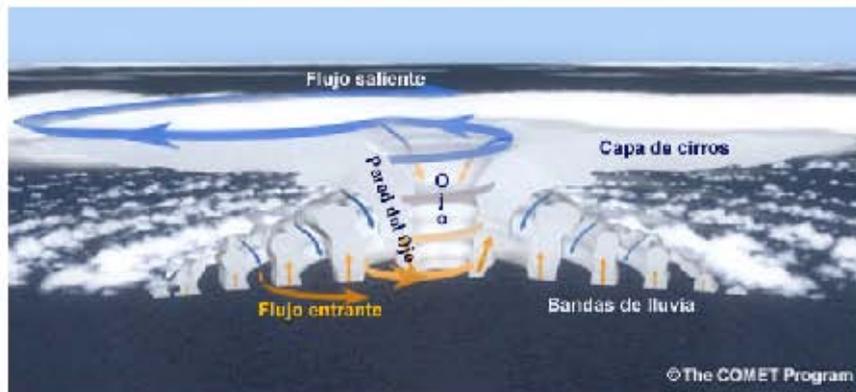
En el centro de las tormentas maduras, cuando ha alcanzado su mayor desarrollo, hay una región despejada que se conoce como el ojo, la cual es relativamente tranquila, con vientos lentos y presión de superficie más baja. La banda organizada de tormentas que rodea al ojo es la pared del ojo y en el costado interno de este anillo de tormentas es donde se presentan los vientos de mayor intensidad (Figura 2.1) (Allaby, 2007, 2003).

En el apéndice A se explica la clasificación de los ciclones tropicales en base a la velocidad que alcanzan los vientos de superficie.

### **2.2.2. Ciclogénesis tropical**

De acuerdo con Gray (1968) las condiciones para la formación de un ciclón tropical son las siguientes:

1. Suficiente energía térmica oceánica, lo que implica una temperatura superficial del mar superior a  $26^{\circ}$  C en una profundidad de al menos 60 m.



**Figura 2.9:** Estructura del ciclón tropical.

2. Aumento en la humedad relativa de la troposfera media (700hPa). Los niveles medios sin humedad no permiten que continúe el desarrollo de la actividad de la tormenta.
3. Inestabilidad condicional. Cuando la atmósfera se enfría lo suficientemente rápido con la altura, es potencialmente inestable para generar convección.
4. Aumento en la vorticidad relativa en la troposfera baja. La vorticidad relativa es la medida local de la rotación del viento. Es necesaria una perturbación pre-existente cerca de la superficie con vorticidad suficiente y convergencia. Para que los CT se desarrollen, se requiere un sistema débilmente organizado con un giro importante y flujo de bajo nivel.
5. Cizalla vertical débil en los vientos horizontales en el lugar del génesis. La cizalla debe tener valores menores a 10 m/s entre la superficie y la troposfera superior. La cizalla vertical del viento es la magnitud del cambio del viento con la altura. Los valores grandes de cizalla interrumpen el CT incipiente y previene la génesis, o bien, si un CT se ha formado, la cizalla grande puede destruirlo interfiriendo con la organización y la convección profunda alrededor del centro del ciclón.
6. Desplazamiento de al menos 5° de latitud lejos del ecuador, esto es una distancia de al menos 500 km. Para la ciclogénesis, es necesaria una fuerza de Coriolis no despreciable para que ocurra un balance en el gradiente de los vientos. Sin la fuerza de Coriolis, no se puede mantener la baja presión de la perturbación.

En resumen, los CT se forman en ambientes que presentan incremento en la vorticidad, humedad y convección profunda, cizalla reducida y una capa profunda de temperaturas cálidas en la superficie del mar. Las características transitorias como las ondas tropicales o las perturbaciones baroclínicas pueden perturbar el ambiente proveyendo regiones favorables.

La formación de los CT involucra numerosos procesos que ocurren en escala sinóptica. La evolución termodinámica y cinética durante la formación se divide frecuentemente en una secuencia de eventos que representan los estados fundamentales de todo el proceso de formación.

Basándose en el trabajo de Emanuel (2003), el término génesis se aplica generalmente a los sistemas que sufren una transición a partir de una perturbación que no está regida por los flujos de superficie, como las ondas del orden de 1000 km frecuentemente observadas en los trópicos, a un ciclón más simétrico con núcleo caliente, con un centro de baja presión en la superficie. Desde los primeros estudios, se ha reconocido que todos los CT se originan a partir de una perturbación independiente.

El sitio y el momento del desarrollo de los CT dependen de varios factores. Por el incremento temporal en la convergencia y vorticidad de bajo nivel, la ausencia de cizalla y la perturbación pre-existente de escala sinóptica (onda del este), se crea el ambiente en el cual la perturbación se transforma en un ciclón tropical.

Las ondas tropicales planetarias, proveen oportunidades de aproximadamente una semana de duración para la ciclogénesis tropical, siempre y cuando corresponda a intervalos en los cuales se suprime la cizalla en esta región.

Las ondas africanas del este, son responsables de iniciar la ciclogénesis tropical en el océano Pacífico Norte y el Atlántico Norte. Se forman sobre el continente Africano durante la estación de monzón. Las ondas del este son perturbaciones bien definidas con periodos de apenas 3-4 días y de una escala espacial de 1000 km (Figura 2.10). Ocurren como ondas con máxima amplitud cerca del nivel del Jet africano del Este. Se mueven hacia el oeste a velocidades de 7-8 m/s. Estas ondas son una vaguada (región de baja presión relativa) invertida con movimiento en dirección oeste en los vientos del este tropicales atravesando el Océano Atlántico. Las ondas del este duran de 1 a 2 semanas antes de desaparecer y se encuentran especialmente marcadas en la región del Caribe. Cuando las ondas del este se intensifican, se convierten en perturbaciones tropicales. Una perturbación tropical es una tormenta tropical incipiente.



**Figura 2.10:** Desplazamiento de las ondas del este en el océano Atlántico, que viajan de las costas de África al Mar Caribe. El eje de la vaguada indica la zona de subsidencia, la cual produce las regiones de convección.

Una vez que la perturbación se forma y la convección sostenida se desarrolla, ésta puede volverse más organizada bajo ciertas condiciones. Si la perturbación se desplaza o permanece sobre aguas cálidas y si los vientos de alto nivel permanecen débiles, la perturbación entonces se vuelve más organizada formando una depresión.

Las perturbaciones tropicales se definen como nubosidad organizada y patrones de viento en un rango de amplitud de 100 km a 600 km y se conserva por un día o más. Las velocidades del viento pueden ser muy débiles. La organización distintiva y de patrones de nubes separados como puede observarse en las fotos de satélite dentro de los vientos alisios se consideran perturbaciones tropicales (Gray, 1968).

En el Atlántico norte, las tormentas tropicales generalmente se desarrollan a 10° de latitud de la posición inicial donde la perturbación (cambiar por perturbaciones) es detectada. La distancia puede variar de 10° a 70° de longitud para que la perturbación inicial se forme sobre o fuera de la costa oeste de África a la mitad de la temporada de huracanes.

La generación de ciclones ocurre en dos etapas. La etapa 1 ocurre cuando un complejo convectivo de escala media produce un vórtice de escala media y la 2, ocurre cuando una segunda formación de convección en el vórtice inicia el proceso de intensificación de la baja de presión central y el incremento de vientos arremolinados.

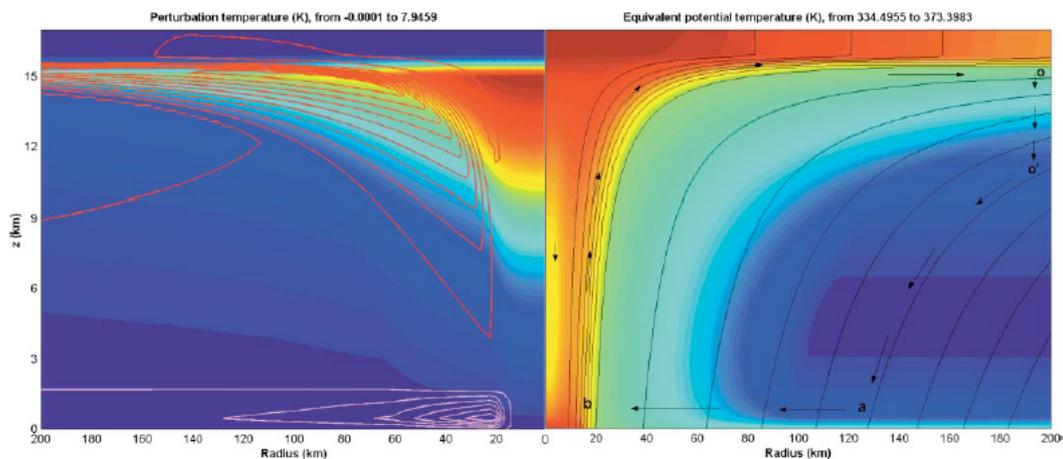
El problema principal en el génesis es la transformación de la perturbación existente en un sistema que opera por la retroalimentación entre los flujos de entalpía de superficie y el viento de superficie. En experimentos numéricos, se ha visto claramente que una condición necesaria para el génesis es la formación de una columna del orden de los 100 km de ancho de aire casi saturado en el núcleo del sistema, de manera que la convección acumulada que se eleva en esta columna de aire no produce corrientes descendentes de baja entropía debidas a la lluvia en evaporación. Cualquier influencia ambiental que interrumpa la formación de la columna saturada, previene el génesis y debilita cualquier sistema existente lo que explica por qué la cizalla vertical es hostil para el génesis. Observaciones detalladas sugieren que para el desarrollo de la columna la saturación es alcanzada por la evaporación de la lluvia de nubes estratiformes asociadas a la convección acumulada y la advección descendente del momento angular es necesaria para el génesis subsecuente (Emanuel, 2003).

Conforme se calienta el núcleo de la tormenta, en respuesta al calor y la humedad del aire de entrada, las superficies de presión se elevan a la atmósfera superior, induciendo una fuerza de gradiente de presión hacia el exterior del sistema. La divergencia en la troposfera alta, en cambio, induce un flujo que causa que la presión a nivel del mar caiga. El gradiente radial de presión a nivel del mar produce un flujo de aire de la capa límite hacia el interior, adquiriendo rotación por la acción de la fuerza de Coriolis. Los flujos de calor latente y sensible de la superficie del océano incrementa en respuesta al incremento en la velocidad de los vientos de superficie. Los flujos con mayor fuerza producen un calentamiento mayor en el interior de la tormenta, forzando a una mayor divergencia en el nivel superior y así sucesivamente (Wallace & P.V., 2006).

De acuerdo con Emanuel (2003) la fuente básica de energía en los CT es la transferencia de energía del océano. El ciclón tropical maduro puede idealizarse como un flujo estable y axisimétrico cuya energía es muy similar a una máquina de Carnot (Figura 2.11) donde el aire forma una espiral interna desde la región externa hacia el centro de la tormenta sufriendo una caída de presión mientras la entropía se incrementa debido tanto a la transferencia de entalpía

de la superficie del océano como a la disipación de energía cinética en la capa límite de la atmósfera. Al mismo tiempo, su momento angular decrece por la fricción del torque con la superficie del mar. En la pared del ojo, el flujo se vuelve ascendente y siguiendo superficies de entropía y momento angular constantes conforme asciende hacia presiones más bajas (Figura 2.11, punto b), esta pierna es casi adiabática y libre de torque de fricción. En las tormentas reales, el aire que fluye cercano a la parte superior de la tormenta experimenta fuertes cambios con el ambiente, por lo que el ciclo de energía en realidad está abierto. El aire desciende en el ambiente distante, representado por  $o$  y  $o'$  en la Figura 2.11, donde la entropía adquirida en la pierna del flujo de entrada se pierde por radiación electromagnética al espacio y gana momento angular al mezclarse con el ambiente. Esta pierna es casi isotérmica, aunque sí ocurre algo de disipación de energía cinética, pero es despreciable a menos que la tormenta sea muy extensa. El ciclo se cierra por la pierna de conservación de momento angular entre los puntos  $o'$  y  $a$ ; aunque la entropía se pierde y se gana durante esta pierna, la fuente de entropía irreversible es producida por la mezcla de humedad y aire seco y prácticamente no queda disponible para la producción de energía cinética.

De esta manera, como el ciclo de Carnot, el ciclo de energía de una ciclón tropical es de expansión isotérmica, expansión adiabática, compresión isotérmica y compresión adiabática. En el caso del CT es utilizado para la disipación turbulenta en la capa límite atmosférica de la tormenta, donde se convierte nuevamente en calor. Dado que esta conversión ocurre en la temperatura más alta del sistema, el CT recicla algo de este calor a la parte frontal del ciclo de Carnot (Emanuel, 2003).



**Figura 2.11:** El ciclón tropical maduro puede idealizarse como un flujo estable y axisimétrico cuya energía es muy similar a una máquina de Carnot.

De lo anterior, se puede decir en resumen que el agua cálida es una de las claves más importantes, ya que el agua da la potencia al CT. Conforme el vapor de agua se eleva se enfría, condensándose y formando nubes. En el proceso de condensación, se libera calor. Este calor calienta la atmósfera haciendo el aire más ligero mientras continúa elevándose en la atmósfera.

Conforme lo hace, mayor cantidad de aire se mueve cerca de la superficie para tomar su lugar, lo cual se refleja en los fuertes vientos que caracteriza la tormenta. Por lo tanto, una vez que el ojo de la tormenta se mueve hacia tierra se debilitará rápidamente ya que la tormenta deja de recibir la humedad y calor necesario que el océano provee. La falta de humedad y calor impide que el CT siga produciendo tormentas cerca del centro de la tormenta. Sin esta convección, la tormenta disminuye rápidamente.

La mayoría de los CT se forman en la banda global de actividad de tormentas conocida como la Zona Intertropical de Convergencia, o vaguada monzónica.

De algunos estudios, el génesis en la vaguada monzónica ha sido dominante en la formación del 42-44 % de las tormentas formadas en el Pacífico Oriental tropical. La influencia de la zona de confluencia es otro factor dominante en la ciclogénesis tropical regional con el 29-34 % de las tormentas que se formaron allí. El génesis en la zona de confluencia puede estar separado de 5-7 días. Este génesis repetido en la zona de confluencia fue atribuido al flujo de bajo nivel pre-condicionado, es decir, un incremento en la convergencia de humedad tropical, por la tormenta en maduración conforme se va moviendo. En cada caso, la zona de confluencia es una región crítica para la ciclogénesis tropical (Longshore, 2008; Allaby, 2007).

El interés de este trabajo se centra solamente en la ciclogénesis en los océanos Pacífico Oriental y Atlántico.

### Atlántico Norte

La descripción de la ciclogénesis por las ondas del este anteriormente mencionada, corresponde a la ciclogénesis en el Atlántico.

La temporada de ciclones oficialmente comienza el 1 de junio y termina el 30 de noviembre. La gran mayoría de los CT ocurren generalmente de agosto a octubre. En promedio se nombran unas 11 tormentas de las cuales 6 se desarrollan como huracanes y solo dos llegan a ser de categoría 3 o mayor (NOAA). La Figura 2.12, muestra las trayectorias de los ciclones tropicales en el Atlántico de 1851 a 2005.

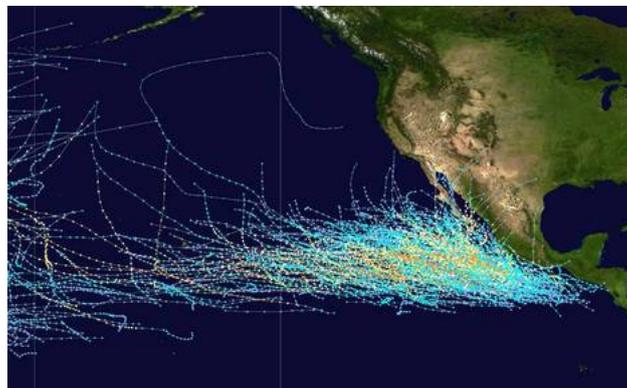


**Figura 2.12:** Trayectorias de todos los CT conocidos en el Océano Atlántico Norte de 1851 a 2005 (Nilfanion/Maps).

La mayoría de los CT que se forman en esta área no llegan a tener la categoría de huracán. Es la presencia de factores baroclínicos, es decir, perturbaciones en latitudes medias, lo que contribuye frecuentemente al origen y desarrollo de los CT en las latitudes tropicales, especialmente en el Golfo de México y el Mar Caribe occidental, frecuentemente sus trayectorias llegan a extenderse a latitudes extratropicales. Otros factores climáticos que influyen en la ciclogénesis en esta región, son El Niño, la Oscilación del Atlántico Norte y la temperatura de superficie del Atlántico (Elsner, 1999).

### **Pacífico tropical oriental**

Esta región muestra patrones de frecuencia anual similares a los de la cuenca del Atlántico norte, y la estación activa va de Mayo a Noviembre. Las distribuciones de frecuencia de ciclones muestra un máximo en el Pacífico tropical oriental (PTO) cerca de los 110° W y al sur de 20° N (<http://www.nhc.noaa.gov/>). La Figura 2.13 muestra las trayectorias de los CT en el PTO entre los años de 1980 y 2005.



**Figura 2.13:** Trayectorias de todos los CT conocidos en el Océano Pacífico oriental de 1980 a 2005 (Nilfanion/Maps).

Por medio de los análisis satelitales, se ha estudiado la relación entre la frecuencia de ciclones y eventos de El Niño, y se ha encontrado una clara evidencia del incremento en la frecuencia e intensidad de huracanes durante los años de El Niño, lo cual se asocia al potencial máximo de la intensidad del CT con la temperatura del océano. Durante La Niña, la frecuencia y la intensidad de los CT disminuye (Gray, 1993; Kessler, 2006).

La precipitación asociada con la actividad convectiva de los CT, modifica la densidad de la termoclina (Sanford *et al.*, 1987), esta es la capa intermedia entre la capa de mezcla (o aguas superficiales) y las aguas profundas (AMS, 2000). La convección constituye una fuerte interacción océano-atmósfera que determina la distribución de propiedades atmosféricas tales como el flujo de calor latente y humedad en la región, y tiene efectos importantes a escalas cortas y estacionales en la dinámica del PTO. Además los vientos en esta región están fuertemente influenciados por la topografía continental de América central (Kessler, 2006).

El área de formación de ciclones en el PTO, es relativamente pequeña en comparación con

otras regiones de ciclogénesis, ya que provee cerca del 17 % global del total del desarrollo de tormentas tropicales, con un promedio de 14 tormentas por año (Amador *et al.* , 2006).

La ciclogénesis en el PTO ha sido relacionada con la propagación de las ondas del este. Molinari *et al.* (1997) analizaron la relación entre la ciclogénesis y la vorticidad potencial en el PTO. Ellos argumentaron que el gradiente meridional de la vorticidad potencial, el calor convectivo y la ciclogénesis varían en la escala de tiempo de la Oscilación Madden-Julian (MJO por sus siglas en inglés). Esta oscilación es uno de los eventos más largos con una duración de 30-90 días en la atmósfera tropical. La MJO es un acoplamiento entre la circulación atmosférica tropical y la convección profunda de gran escala y es un patrón que se mantiene en movimiento, propagándose hacia el este a una velocidad de entre 4 a 8 m/s y se observa principalmente en el océano Índico y el océano Pacífico. Se manifiesta como lluvias anómalas y se vuelve más evidente conforme se adentra en las aguas cálidas del Pacífico central. El patrón de lluvias deja de ser perceptible cuando se mueve en las aguas más frías del Pacífico oriental y ocasionalmente reaparece con amplitud más baja sobre el Atlántico tropical.

Los vientos del este sobre el Pacífico oriental se sustituyen por vientos del oeste desarrollándose una vorticidad ciclónica de bajo nivel. En los estudios de caso se han rastreado desde la costa oeste de África ondas que alcanzaron el Golfo de México y el Pacífico oriental y se amplificaron dentro de la envoltura convectiva de la MJO. La fase convectiva de la MJO es importante en la amplificación de estas ondas, que culminan con el desarrollo de los CT. Se presenta también un cambio de signo del gradiente de vorticidad potencial, más intenso en el oeste del Caribe y en el Pacífico oriental.

Se sugiere también que la región del PTO es por sí misma un estado básico inestable, y por lo tanto provee condiciones favorables para la generación de ondas atmosféricas. Durante las transiciones de cálido a frío de las fase del ENSO, los sistemas tropicales cruzan a través de la topografía de Centroamérica y del sur de México más frecuentemente que en años normales. Por otro lado, los flujos de calor en la superficie y la convección profunda en el Pacífico pueden proveer una intensificación adicional de vorticidad que puede estar asociado también al chorro de bajo nivel que cruza América Central. La ciclogénesis puede desarrollarse en áreas particulares del monzón, convección o interacciones con los campos de vorticidad potencial superior.

Sobre el PTO, los ciclones generalmente se mueven con los vientos del este predominantes, pero si curvan en dirección al norte dentro de los vientos del oeste de bajo nivel, estos encuentran una temperatura de la superficie del mar baja y se debilitan. En general, los CT en esta área presentan velocidades de propagación relativamente bajas de alrededor de 5 m/s, ya que la velocidad media en el Atlántico y en el Pacífico occidental es de 20 m/s, y el máximo de vientos ocurre mientras están dentro de los vientos del este (Amador *et al.* , 2006).

## Capítulo 3

# Reconstrucción de una serie de tiempo de ciclones tropicales que tocaron tierra en las costas del Pacífico Mexicano de los s.XVI al XX.

### 3.1. Introducción

Un número importante de estudios en el océano Atlántico han permitido establecer un registro histórico de CT, con información desde el siglo XV (p. ej. García-Herrera *et al.* (2005, 2007); Ludlum (1963)). Sin embargo, para el caso del océano Pacífico, el registro más confiable y reciente comienza en 1949 con la base de datos de la NOAA/HURDAT (<http://www.aoml.noaa.gov/hrd/hurdat/>).

Jauregui (2003), mostró que entre 1949 y 2003, 65 huracanes tocaron tierra en las costas del Pacífico Mexicano (cPM) mientras que en el Golfo de México, solo 57. Este estudio indica también los estados que con mayor frecuencia son impactados por CT a lo largo de la cPM: Baja California Sur, Sinaloa y Michoacán, lo cual coincide con los datos publicado en 1997 por el Centro Nacional de Desastres (CENAPRED:<http://www.cenapred.gob.mx/es/Investigacion/RHidrometeorologicos/FenomenosMeteorologicos/CiclonesTropicales/>).

Utilizando la base de datos de Huracanes de Unysis Weather para el océano Pacífico norte (<http://weather.unysis.com/hurricane/>), entre los años 1949 y 2010 se identificaron los CT que tocaron tierra (CTTT) en dicha cuenca. De la trayectoria de la tormenta que muestra la base de datos, se encontraron 447 CT originados en el océano Pacífico Oriental, de estos, 95 alcanzaron las cPM. Varios de ellos afectaron diferentes lugares de la costa a su paso. Partiendo de la información anterior, se calculó el porcentaje de ocurrencia para cada estado de la cPM. Los resultados se muestran en la Tabla 3.1. Es evidente que los estados de Baja California Sur, Sinaloa y Michoacán, tiene el mayor porcentaje de CTTT, lo cual está de acuerdo con el estudio realizado por Jauregui (2003).

**Tabla 3.1:** Número de CTTT entre los años 1949 y 2010 y el porcentaje de ocurrencia correspondiente .

<b>Estado</b>	<b>Número de CTTT</b>	<b>%</b>
Baja California Sur	41	43.16
Baja California Norte	9	9.47
Sonora	10	10.53
Sinaloa	31	32.63
Nayarit	8	8.42
Jalisco	9	9.47
Colima	10	10.53
Michoacan	18	18.95
Guerrero	12	12.63
Oaxaca	2	2.11
Chiapas	2	2.11
Total	95	100

Con el objetivo de extender la serie de tiempo de CTTT en la cPM, se examinaron archivos históricos de diferentes estados de la cPM, que son frecuentemente golpeados por este fenómeno. Esto permitió construir una serie de tiempo que fue analizada para encontrar sus periodicidades por el método de ondeletas.

### **3.2. Metodología**

Se han realizado algunas reconstrucciones de fenómenos meteorológicos a partir de registros históricos instrumentales de estaciones meteorológicas, así como de testimonios en periódicos y reportes de gobierno y de viajes de misioneros (García-Herrera *et al.* , 2005, 2007; Gallego *et al.* , 2007; Villanueva, 2002).

En la presente investigación también se recurrió al material arriba mencionado. Sin embargo, para establecer si los daños descritos en los archivos históricos y catálogos fueron causados probablemente por CT, se hizo una identificación a través de la descripción del evento utilizando los siguientes criterios:

- i) Se evaluaron los daños de acuerdo a la escala Saffir-Simpson. En esta escala, un huracán de categoría 1 es capaz de romper árboles y sacarlos de raíz, destruir construcciones frágiles y hacer volar techos que no estén bien asegurados, así como causar inundaciones y daños a la navegación (NOAA: <http://www.nhc.noaa.gov/aboutshws.shtml>).
- ii) Se consideró si los daños fueron en uno o en varios estados, pero dentro de la temporada de CT.
- iii) Se tomó en cuenta el clima de la localidad donde se reportó el evento.
- iv) Se comparó la precipitación y la ocurrencia de CT en esas localidades.

Desde 1921, el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) genera las cartas de las trayectorias anuales de tormentas que ocurren en el Atlántico y el Pacífico en México. Estas Cartas fueron muy útiles para identificar las trayectorias y lugares donde estos eventos tocaron tierra. Estos datos fueron utilizados también por Serra (1971); Englehart & Douglas (2001); Englehart *et al.* (2008) para estudiar la importancia de los CT en la cPM.

### **3.3. Precipitación y relación con los ciclones tropicales.**

Englehart & Douglas (2001) mostraron que una tormenta tropical asociada a lluvia, normalmente constituye ~20 - 60 % de la lluvia a lo largo de la cPM, y en casos más extremos puede contribuir ~25 - 30 % en la precipitación estacional total experimentada en el interior oeste de esas localidades.

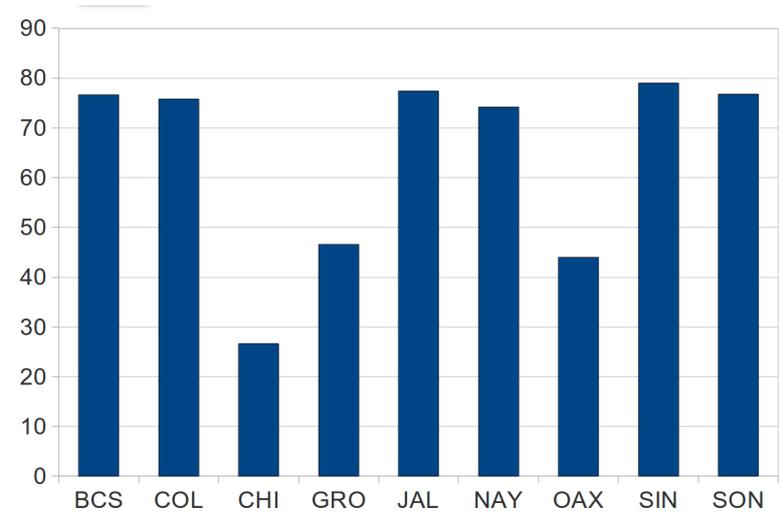
El índice de precipitación estándar (SPI, por sus siglas en inglés) está basado en la probabilidad de registrar una cierta cantidad de precipitación. Las probabilidades están estandarizadas, por lo que un índice cero corresponde a un cierto promedio de precipitación. El índice es negativo para sequías y positivo para condiciones húmedas. Conforme las condiciones húmedas o secas se vuelven más severas, el índice se vuelve más negativo o positivo (<http://lwf.ncdc.noaa.gov/oa/climate/research/prelim/drought/spi.html>).

Se utilizó el SPI para encontrar una relación entre aquellos CT cuya trayectoria fue cerca de la costa y la cantidad de precipitación durante la misma estación (Mayo-diciembre). El análisis se realizó entre 1949 y 2010, utilizando datos del Monitor de sequías en Norteamérica, los archivos de datos de SPI, NOAA y el Centro Nacional de Datos Climáticos de Estados Unidos, de estaciones cercanas a la localidad de los registros históricos que reportaron eventos relacionados a CT.

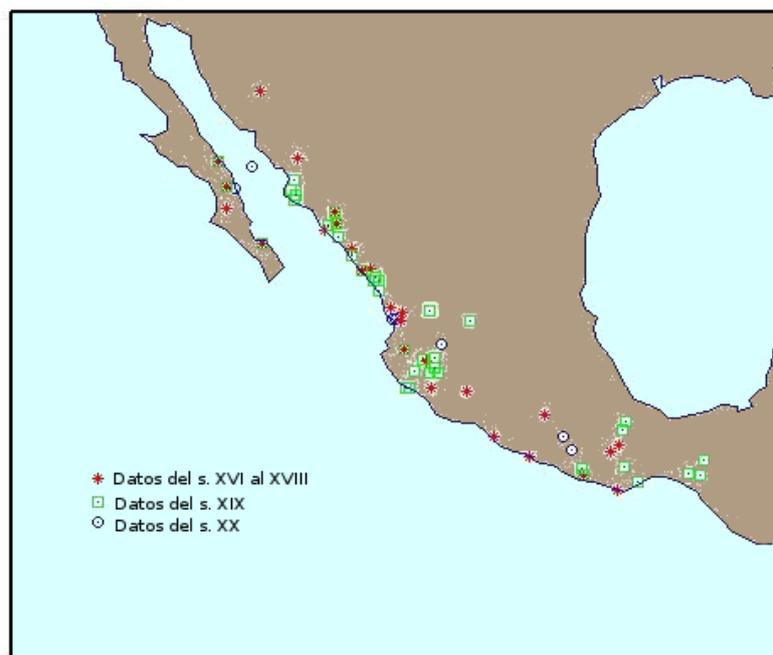
La hipótesis que se planteó fue que para la parte oeste de la cPM, un ciclón tropical (en lugar de CT) coincide con un SPI positivo y su ausencia con un SPI negativo. La Figura 3.1, muestra el porcentaje de coincidencia entre ciclón tropical (en lugar de TC) y SPI (o es CPI, si es CPI faltaría poner que significa) por estado. La coincidencia más baja fue para Chiapas, Oaxaca y Guerrero menores al 50 %, donde la temporada de lluvias es menos influenciada por la actividad de CT con respecto a los estados del noroeste de México (Latorre & Penilla, 1988; García-Oliva *et al.*, 1991).

### **3.4. Obtención de Datos.**

Localizando la posición geográfica de los lugares de las cPM donde se reportaron eventos en los archivos históricos, se generó el mapa en la Figura 3.2. Se clasificaron los sitios dependiendo la fecha del reporte, de manera que se pueden visualizar las regiones donde los reportes de posibles CT fueron más frecuentes, correspondiendo a los estados de Sinaloa y Jalisco principalmente. En las tablas se resume la descripción de los eventos, dándole mayor importancia a la parte que se refiere a los daños que puede causar un CT. Algunos eventos fueron reportados como ciclón o huracán, pero no contaban con descripción de los daños, en cuyo caso se utiliza la abreviatura S/D.



**Figura 3.1:** Porcentaje de coincidencia entre CT y SPI por estado: Baja California Sur (BCS), Colima (COL), Chiapas (CHI), Guerrero (GRO), Jalisco (JAL), Nayarit (Nay), Oaxaca (OAX), Sinaloa (SIN) y Sonora (SON).



**Figura 3.2:** En el mapa se muestran los lugares que reportaron eventos relacionados con CT. Los círculos indican datos entre los s. XVI y XVIII, los asteriscos para el s. XIX y los cuadros para el s. XX.

### 3.4.1. Catálogo de Desastres Agrícolas en México

El Catálogo Histórico de Desastres Agrícolas en México (CDAM), Volumen I de García-Acosta *et al.* (2003) y el Volumen II de Escobar (2004), describe los daños causados no solo por eventos meteorológicos, sino también por terremotos y otros fenómenos naturales a lo largo de todo el país entre los años 958 y 1900. Nosotros nos concentramos en los eventos meteorológicos.

Para esta investigación se tomó en cuenta únicamente la información de la costa oeste de México. En algunos casos, no se proporciona la fecha completa, pero la descripción de los daños da la posibilidad de identificar CT. Se encontró información de 38 tormentas intensas o CT potenciales que afectaron la cPM de 1537 a 1900. Solo 29 pudieron ser considerados CT y se muestran en la Tabla 3.2. La columna que corresponde a la descripción, contiene toda o parte de la transcripción literal de la fuente. Para los casos restantes la información no es suficiente, además, en dos de esos casos la fecha está fuera de la temporada de CT y para otros tres casos (años 1537, 1732, 1787) hubo terremotos al mismo tiempo por lo que no es fácil distinguir si los daños fueron causados por el CT o por el terremoto. También en este catálogo, para algunos eventos que en el propio catálogo están marcados como CT, los daños fueron causados por vientos muy intensos pero sin presencia de lluvia y además ocurrieron en regiones centrales del país, indicando que en aquellos tiempos, la palabra “huracán” era utilizada en general para eventos que presentaban fuertes vientos, dándole una ambigüedad al sentido de la palabra. Por esta razón, se consideraron solamente los eventos que describen los daños y no solo por tener asociado el término “huracán”.

**Tabla 3.2:** Eventos hidrometeorológicos con posible relación con huracanes que tocaron tierra en las costas del Pacífico Mexicano de 1537 a 1900 (tomado de García-Acosta *et al.* , 2003).

FECHA	LUGAR	DESCRIPCION GENERAL
1537	Tlapa, Gro.	“...sobre el poblado de Tlapa. El huracán azotaba los campos y las cabañas como un látigo gigantesco; los árboles caían arrancados de cuajo y arrastrados por la furia del vendaval; el granizo destrozaba sin piedad los sembrados de maíz. . .”
1573	Colima	“El año de 73, hubo en Colima un huracán el día 14 de noviembre que duró 3 horas; y al mismo tiempo tembló la tierra, de suerte que cayeron muchas casas y las iglesias.”
1609	Huaynamota, Jal.	“En el año del Señor de 1609 se presentó un huracán que arrancó la cubierta de la iglesia y arruinó muchas casas del pueblo.”.
1616	Xicayan, Gro.	“...el huracán que les destruyó sus casas y tierras y por la ida al dicho puerto que dejaron de sembrar y perecen de hambre.”
1652	San Cristóbal de las Casas, Chiapas	“Cuando la gran inundación ocurrió en 1652, en ciudad Real un huracán se abatió sobre el valle de San Cristóbal y causó enormes estragos en varias regiones de Chiapas.”
1722	Nayarit	“...Al impulso de un extraordinario huracán que se levantó, salían unas llamas verdinegras que parecía no tener otra materia que de azufre, tanto que movidos todos a admiración, obligó al referido padre Antonio Arias, a estar conjurando mucho tiempo toda aquella tierra.”

1731	Zultepec, Oax.	Causó notable daño el terrible huracán, que de las seis de la tarde a 11 de la noche se levantó el día 18 de junio, pero que en la iglesia parroquial ejecutó toda su furia, sacudiendo, maltratando y desquiciando su ligera techumbre.
1732	Acapulco, Gro	“Maremoto violento con Huracán y temblor catastrófico.”;“En febrero de 1732 se registraron ciclones, tempestades y temporales. Acapulco: catastrófico temblor con huracán y maremoto.”
1736	Nueva España	“...en 1736 se registran huracanes..”
1785	Guadalajara, Jal.	Fuertes lluvias, inundaciones, desbordamiento de ríos.
1787	Guerrero y Oaxaca	“Horrible huracán en Acapulco acompañado de fuertes temblores de tierra; se sale el mar de su centro y causa horribles destrozos en los campos y ganados, En Oaxaca los habitantes abandonan la ciudad.” 28 de marzo de 1787.
1794	Escuintla, Chis.	El poblado es arrastrado completamente, por este motivo más tarde se cambiará la cabecera a Tapachula.
1810	Acapulco, Gro.	Diecinueve de agosto de 1810. “Fuerte ciclón en Acapulco y toda la costa, que causó grandes daños”. Grande inundación en Acapulco. Destrucción a los barcos amarrados. Se destruyen 124 casas.”
1813	Acapulco, Gro	“El 13 de junio pelearon los elementos en contra de ellos y favor nuestro: se levantó un huracán tan grande, que les despedazó las dos lanchas, algunas canoas...”.
1831	Oaxaca	“En el departamento de Jamiltepec, los pueblos padecieron las mayores desgracias a causa de un violento huracán y temporal de aguas tan abundantes, que desmoronaron a muchos cerros, destruyeron porción de casa y aumentaron los arroyos y ríos porque saliendo de madre arrasaron con ricas sementeras de grana, algodón y simientes, y llenaron de piedras, arenas y fangos la mayor parte de sus terrenos. Hasta ahora ha podido saberse que 115 personas fueron víctimas y otras muchas contrajeron enfermedades; varias familias quedaron sin casas que habitar y pueblos enteros reducidos a la miseria y hambre... las aguas destruyeron una porción de las sementeras y frutales que sostenían a muchas familias, descompusieron los mejores terrenos, formaron de ellos inútiles barrancas y se llevaron los puentes de madera... cuya falta perjudicando a los pueblos mixes.”
1840	Guerrero	En esta fecha un huracán provocó que los pueblos de la prefectura de Acapulco perdieran sus cosechas. “En el huracán del 3 de noviembre de 1940, hizo tantos estragos que solo dejó en pie dos pequeñas casas, habiéndose salido de su madre los dos ríos arrasaron las huertas, pereciendo todo el ganado que encontraron a su paso.”
1848	Guerrero	“...Pueblo y hacienda sufrieron un huracán tan furioso, que quedaron destruidas casi todas las casas y labores.” En esta fecha, “...se experimentó en el pueblo de Petatlán y sus barrios un fuerte huracán y creciente del río, que derribó casi todos los edificios y destruyó los labores del campo, dejando a los vecinos en situación consiguiente a tan sensible suceso.” 20 de mayo.

1850	Baja California	El 4 de octubre informa el padre José Acosta que se presentó un temporal que duró cinco horas, derrumbando abundantes huertos de olivos.
1857	Sonora	“En Álamos hubo un fuerte huracán y una copiosa lluvia, los árboles más robustos fueron arrancados.” 1 de octubre.
1862	Oaxaca	“Un fuerte huracán y lluvias abundantes han causado la inundación de Tuxtepec.” 25 de noviembre. “Algunos nortes y la abundancia de lluvias han hecho que de pierdan algunas milpas en los pueblos de San Lucas Zoquiapan. . . (y otros).” 22 de noviembre.
1868	Baja California, Sonora y Sinaloa	16-18 de octubre. “El huracán hizo pedazos el pueblo de Mulegé. . . el arroyo hizo que se desbordara la presa, y ambas moles de agua inundaron los huertos y desembocando en el estero la corriente llevó los buques fondeados. . . En Álamos la ciudad quedó destruida. . . se vio completamente inundada. . . arrastrando la corriente cuanto encontró a su paso, casas, árboles. . . muchas personas quedaron sepultadas bajo los escombros. . . las pérdidas se estiman en más de 50 000 pesos.”
1870	Acapulco, Gro.	El viento hizo volar en la playa el pailebot veloz María y la goleta Esmeralda, que estaban anclados en la bahía; causó además perjuicios en casas” 30 de junio.
1872	Petatlán, Gro.	“Un horrible huracán que duró desde las cinco de la tarde hasta las 10 de la noche. . . el templo fue aniquilado, hubo 40 casas destruidas, y todas las sementeras por tierra.” 6 de diciembre.
1873	Oaxaca	“Los periódicos de México, dan la noticia de que los últimos días de diciembre, Oaxaca fue víctima de un huracán que produjo muchas desgracias y destruyó multitud de casas.” En Ixtlán hubo un huracán acompañado de una granizada que destruyó las casas y sementeras. . . Diciembre.
1880	Nayarit	18 de agosto “Muchos jcales echó al suelo y las milpas quedaron tendidas sobre la tierra”
1880	Guerrero	20 de agosto. Huracán en Acapulco, un vapor quedó varado.
1881	Colima	Una tempestad en Colima causó grandes estragos, principalmente en el puerto de Manzanillo en donde destruyó muchas fincas (y haciendas). . . se perdieron los palmares de aceite y los cafetales. También ocasionó pérdida en el ganado. La ciudad de Tamaulipas Camargo quedó inundada. 26-27 octubre.
1882	Baja California	A las seis de la tarde se desata un fuerte ciclón en el puerto de Cabo San Lucas, que cesa a las cinco y media de la mañana siguiente. Vuela el corredor de la aduana, la mayor parte de las casas del pueblo quedan destruidas; lo mismo el monte en radio de 15 millas. Ninguna desgracia personal que lamentar. La pérdidas se calculan en 18, 000 pesos. 18-19 octubre.
1883	Jalisco	Espantoso huracán en Mascota y algunos pueblos del cantón causó grandes pérdidas a los propietarios de fincas rústicas y urbanas. 12-14 de marzo.

1883	Apatzingán, Mich.	1o. de mayo. El huracán se llevó las casas de madera de los ranchos que encontró a su paso y destruyó igualmente las huertas de sandía y otros frutos, causando a los propietarios de éstas, lo mismo que a los ganados, pérdidas considerables.
1883	Sinaloa	A consecuencia de un fuerte ciclón en la brecha y Amole fueron destruidas más de las dos terceras partes de la población, en el rancho del Chino los animales se ahogaron y los sembrados se perdieron. . . En Mazatlán y contornos un fuerte ciclón causa la pérdida de 2 embarcaciones; en Culiacán se pierden los sembrados.” 2-3 octubre.
1883	Oaxaca	6-8 octubre. Los caminos de la región cafetera quedaron totalmente intransitables, por los grandes derrumbes de montañas. Las plantaciones de café sufrieron mucho. La cosecha ha perdido bastante pues el viento arrancó todo el café que estaba listo para recolección.
1883	Oaxaca	Noviembre. “Un fuerte huracán destruyó en Pochutla los sembrados de maíz y después cayó una lluvia torrencial que tuvo una duración de dos días y dos noches.”
1885	Nayarit	Después de una lluvia de 3 días, hubo pérdidas de consideración en las labores del maíz. 29 de octubre.
1895	Baja California, Colima y Nayarit	El puerto quedó destruido, se perdió la siembra
1896	Jalisco, Sinaloa y Oaxaca	Las sementeras destruidas, el nivel del agua alcanzó hasta 5 metros en algunos lugares.
1897	Sinaloa, Baja California y Sonora	Inundación en toda la región. Agosto y septiembre.
1900	Sinaloa	Septiembre. Postes fueron arrancados y varias casuchas derribadas.

### 3.4.2. Baja California Sur.

Baja California Sur es un estado localizado al noroeste de México en la Península de Baja California, entre 28° y 22° 52' de latitud norte y comprende 2 705.39 km de litorales (INEGI<sup>1</sup> [www.inegi.gob.mx/](http://www.inegi.gob.mx/)). De acuerdo con la Tabla 3.1, este estado tiene el más alto porcentaje de CTTT en la cPM (ver también Fuentes & Vázquez (1997); Jauregui (2003)).

En este estado, debido a la gran influencia de un centro de alta presión del norte del Pacífico, el clima que prevalece es cálido y seco con bajos niveles de precipitación (179 mm/año) (<http://mapserver.inegi.org.mx/geografia/espanol/estados/bcs/clim.cfm?c=444&e=03>). Sin embargo, en verano y en otoño, el sureste de la Península está influenciado por la actividad ciclónica del océano Pacífico tropical, con una contribución anual en la precipitación de hasta un 69 % (Latorre & Penilla, 1988; Salinas-Zavala *et al.* , 1990).

El Archivo Histórico Pablo L. Martínez en la ciudad de la Paz, Baja California Sur, contiene documentos históricos desde la segunda mitad del siglo XIX. Se consultaron diversas fuentes y se encontraron datos con eventos relacionados a CT desde 1882 a 1918. Algunos boletines oficiales, así como periódicos y reportes de gobierno, mencionan eventos en que por los daños y las

<sup>1</sup>Instituto Nacional de Estadística, Geografía e informática

fuertes lluvias podrían estar relacionados con CT. De cuadros pluviométricos, se obtuvo información de lluvias intensas durante la temporada de CT y la afectación en diversas localidades, que podrían indicar la trayectoria del CT.

Se utilizó también la tesis de maestría de Villanueva (2002), como fuente bibliográfica, la cual contiene datos de CT de 1827 a 1949. Sin embargo, en esta tesis se mencionan varios casos sin una buena descripción de los daños, por lo que sólo podrían catalogarse como tormentas intensas.

El libro “Historia de la Antigua y Baja California” escrito por Clavijero (1852), informa de los viajes durante el periodo de la conquista de España en México y los viajes misioneros de la orden de los Jesuitas en Baja California. Estas crónicas cuentan acerca de tormentas presentes en altamar y de los daños que ocurrieron principalmente a las naves, los fenómenos causantes en algunos casos probablemente eran CT. Algunas de las tormentas son denominadas “borrasca”, que se define como tormenta con fuertes vientos (diccionario de la Real Academia Española de la Lengua). La información obtenida en este libro va de 1702 a 1767. Los eventos que se mencionan durante 1717 y 1723, describen daños que coinciden con aquellos causados por huracanes según la escala Saffir-Simpson.

La Tabla 3.3 muestra la información de eventos históricos que afectaron Baja California Sur. El número total de eventos registrados de las fuentes consultadas es de 32. Algunos de ellos coinciden con datos encontrados en el CDAM, los cuales fueron en los años 1882, 1895 y 1897. De estos 32 eventos, 28 pueden ser considerados CT. Más aun, estos datos fueron comparados con las trayectorias de las cartas del SMN. Los eventos entre 1927 y 1949 están listados como “sin descripción”, excepto los eventos de 1939 y 1941, ya que para esos años existe al menos una trayectoria de tormenta que afectó la zona.

**Tabla 3.3:** Eventos registrados en Baja California Sur entre 1536 y 1948 relacionados con la posible presencia de un CT (acervo del Archivo Histórico Pablo L. Martínez).

FECHA	LUGAR	DESCRIPCION
1536	Mar de Cortés	llegó el día 1º de Mayo de 1536...Luego que abordó allí volvió tres navíos...pero cuando ya volvían cargados, fueron dispersados por una furiosa borrasca y solo uno pudo llegar.
1702	Mar de Cortés	Se embarcó en el puerto de Matanchel...En la travesía del golfo (de California) fueron arrebatos por una borrasca tan feroz, que parecía inevitable el naufragio, cesó repentinamente el viento y calmó la borrasca, consiguieron llegar al puerto de Loreto...el 28 de octubre de 1702.
1709	Mar de Cortés	El bastimiento San Javier que había salido de Loreto por septiembre de 1709...fue llevado por una borrasca a sesenta leguas de distancia del puerto de destino y quedó encallado en la arena.
1713	Mar de Cortés	...repentinamente los arrebató una borrasca hasta la costa opuesta de Sinaloa, y no pudiendo regir el bastimiento en medio de la violencia del viento y de las olas, naufragaron finalmente...(finales de 1713).

1717	Baja California Sur	En otoño del mismo año de 1717...sufrió esta península graves daños por un terrible huracán de tres días continuos, acompañado de fuertes aguaceros...Todas las casas e iglesias fabricadas de adobes fueron destruidas, los diques se rompieron...En los setenta años que los jesuitas permanecieron en aquella península, hubo muchos huracanes muy fuertes, pero ninguno comparable con este.
1721	Mar de Cortés	Se hicieron a la vela el 18 de agosto (de 1721)...cuando...fueron sorprendidos por una nueva borrasca acompañada de horrendos truenos y relámpagos...amenazados de un huracán que iba sobre ellos y apenas distaba unas dos millas.
1723	Loreto	En 1723...sobrevino un furioso huracán...Los indios se refugiaron en la iglesia, pero la violencia del huracán fue tal, que destruyó sobre ellos el edificio...
1767	Océano Pacífico	1767...El comisionado se embarcó en el puerto de Matanchel en tres buques pequeños...Los buques se dispersaron por una borrasca.
1828	Baja California Sur	Inundaciones y destrucción de viviendas.
1882	Baja California Sur	24-oct. Destrucción de viviendas y otras construcciones, vientos fuertes.
1887	Baja California Sur	Temporal. Destrucción de viviendas.
1894	Baja California Sur	S/D
1895	Baja California Sur	17-nov. Destrucción de viviendas, daños en las cosechas, inundación
1896	Comondú, La Paz, BCS	Temporal. Inundación, pérdida de cosechas, muerte de animales, destrucción de viviendas.
1897	Baja California Sur	22-ago. Lluvias y vientos fuertes.Daños en construcciones.
1900	Baja California Sur	Molinos y cercos caídos. Techos y enramadas dañados. Inundación
1904	Baja California Sur	3-sep. Destrucción de viviendas frágiles (jacales). Techos de una hacienda y viviendas derribados.Alumbrado público derribado. Árboles frutales derribados.
1907,	La Paz, BCS	13-15 oct. Torres telegráficas derribadas. Destrucción de viviendas. Destrucción de embarcaciones.Inundación.Pérdida de cosechas.
1907	La Paz, BCS	22-dic. Fuerte temporal.
1909	Mulegé, BCS	5-sep. Torres telegráficas derribadas. Destrucción de viviendas y comercios. Inundación. Pérdida de cosechas. Destrucción de huertos y árboles (Según testimonios fue mayor que el de 1907) Ciclón en Guerrero.
1911	Mulegé, La Paz BCS	3-4 oct.Destrucción de viviendas. Destrucción de los aparatos de la estación meteorológica en La Paz.

1918	Baja California Sur	15-sep. Destrucción de embarcaciones. Daños a la agricultura. Árboles derribados. Inundaciones. Destrucción de viviendas. Daño severo a construcciones grandes (Torre del reloj). Jardines públicos destruidos. Bodegas derrumbadas. Daños en las comunicaciones (torre de telégrafo), pérdidas humanas.
1939	Baja California Sur	Grandes daños en la región.
1941	Baja California Sur	Daños de consideración, inundaciones.
1943	Baja California Sur	S/D
1948	Baja California Sur	S/D

### 3.4.3. Jalisco

Jalisco se encuentra localizado en la región del centro occidental del país alrededor de 22° 45' y 18° 33' latitud norte, y cuenta con (cambié d por c) 341.93 km de litorales en el océano Pacífico (INEGI). El clima en la costa de Jalisco es sub-húmedo y cálido y comprende el 25 % de la superficie del estado. Al lado este de la costa, el clima que prevalece es semi-cálido en el 42 % de la superficie (<http://mapserver.inegi.org.mx/geografia/espanol/estados/jal/142clim.cfm?c=444&e=20>). Ambos climas están caracterizados por lluvias y tormentas en julio y agosto. El patrón de lluvias de esta región está afectado principalmente por la influencia de vientos alisios y CT (García-Oliva *et al.*, 1991).

En el archivo histórico de la ciudad de Guadalajara, se consultaron documentos en la división "Fomento-Desastres Naturales", cubriendo un periodo de 1860 a 1978, con un periodo de archivos faltantes de 1914 a 1924. Se encontraron eventos relacionados con la presencia de CT, tales como fuertes lluvias, inundaciones y sus consecuentes daños. Se escogieron 7 eventos que muy probablemente fueron debidos a CT y se encuentran en la Tabla 3.4 El evento registrado en agosto de 1932, fue comparado con la carta del SMN de ese año y existe una trayectoria de tormenta que afectó Jalisco en los mismo días. Debido al clima semiárido de la zona donde se reporta este evento, la lluvia no es abundante (850 mm de promedio anual) (<http://mapserver.inegi.gob.mx/geografia/espanol/estados/jal/precipit.cfm?c=444&e=14>), por lo que si un evento de lluvia se reportó, se puede asumir que un CT pudo estar presente. En el caso en que los eventos ocurrieron de manera consecutiva en diferentes localidades, se consideró como uno solo.

**Tabla 3.4:** Eventos registrados en Jalisco entre 1865 y 1932 relacionados con la posible presencia de un CT (acervo del Archivo Histórico del Estado de Jalisco).

FECHA	LUGAR	DESCRIPCION
1865	Mascota y alrededores	29-oct. Consejo de Gobierno: 3 días de lluvia abundante, viento, desbordamiento de ríos, inundaciones, destrucción de viviendas.
1881	Mazatlán, Concordia, San Lázaro	28-sep. Ciclón, destrucción de poblados enteros.

1906	Mascota	17-ago. Fuerte lluvia, desbordamientos.
1906	Bolaños	21-ago. Inundación.
1906	Cd. Guzmán	23-sep. Inundación, desbordamientos.
1906	San Gabriel	3-oct. Tromba, desbordamiento de ríos, inundación.
1906	Zacoalco	4-oct. Desbordamientos.
1910	Cihuatlán, Barra de Navidad	14-jul. Chubasco, árboles, techos y casas derribados.
1911	Encarnación Díaz, Lagos	8-jul. Lluvia torrencial prolongada, desbordamientos
1911	Bolaños, Chimaltitlán	12-jul. Trombas.
1911	San Gabriel	14-jul. Inundación.
1932	Teocotlán	20-jul. Fuerte ciclón, inundaciones, daños a cosechas, desbordamientos.
1932	Autlán	26-ago. Fuerte ciclón, derrumbes.
1932	Sayula, Mascota	27-ago. Desbordamientos, fuertes lluvias, derrumbes.

#### 3.4.4. Oaxaca

Oaxaca está localizado en el sur de México entre los 18° 42' y 15° 39' de latitud norte y tiene 598 km de litoral a lo largo de la cPM (Berumen, 2003).

El clima en la zona de la costa es sub-húmedo y cálido con lluvias en verano, y la precipitación anual va de 800 a 2000 mm. Al noroeste del estado, el clima es húmedo y cálido con lluvias abundantes en verano y precipitación anual entre 1500 y 3000 mm. El lado este está caracterizado por abundantes lluvias en verano y tiene una banda en la región norte-central donde llueve todo el año (<http://mapserver.inegi.org.mx/geografia/espanol/estados/oax/clim.cfm?c=444&e=03>).

En el Archivo General del Estado de Oaxaca, se consultaron documentos de 1900 a 1949, en la búsqueda de referencias de CT en las costas de Oaxaca, en reportes de gobierno, en el diario oficial del estado y documentos de la división de Fomento y Gobierno. De 8 eventos encontrados, 4 podrían ser considerados CT (Tabla 3.5). Los daños reportados en los 4 eventos excluidos, tienen escasa información lo que impidió relacionarlos con CT. Los eventos de 1926 y 1935, se compararon con las cartas del SMN en esos mismo años y en ambos casos, hubo una trayectoria de tormenta afectando la costa de Oaxaca, de acuerdo con las fechas registradas.

**Tabla 3.5:** Eventos registrados en Oaxaca entre 1902 y 1935 relacionados con la posible presencia de un CT.

FECHA	LUGAR	DESCRIPCION
1902	Jamiltepec	26-sep. Telegrama: "Srio de gobierno antenoche sopló huracán fortísimo acompañado agua dirección noreste, comenzó noche maximum fuerza ocho, 10 concluyendo 12 noche no hubo desgracias personales tal fuerza tuvo solo esta población derribó 29 cocoteros considerando los vecinos imposible derribarlos vientos muchas casas voláronse parte tejados algunas casas palma entre arboles.

		cayeron varios higos iguales encuentranse paseo Juárez ...muchos árboles gruesas ramas diámetro 40 centímetros quebradas completamente...”
1906	Tlacolula	12-abr. “...ayer a las cinco treinta de la tarde cayó tromba de agua en cerro Santo Domingo del Valle de cuyas vertientes formase río seco que atraviesa esta ciudad habiéndose desbordado este e invadiendo calle y casas...”
1906	Tlacolula	28-abr.“...entre tres y cuatro de la tarde, se desató un fuerte aguacero acompañado de granizo en el cerro de San marcos y el pueblo de S Juan Guelavia habiendo crecido de una manera sombrosa el rio que atraviesa dicha población e invadiendo algunas casas jacales y gran número de ganado menor. La granizada sorprendió en el campo a dos ancianos....falleciendo la misma noche, dicha granizada se extendió en un radio de 8 km...”
1906	Tlacolula	30-mayo. “...hoy dos tarde cayó en esta ciudad fuerte granizada duró 30 minutos sin causar pérdidas ni desgracias personales. Granizo alcanzó dimensiones de dos centímetros diámetro...”
1906	ETLA	Etla reporto en el Periódico Oficial que durante el mes de octubre de 1906 ” el tiempo se conservó nublado, caluroso y algunos días con fuertes vientos.”
1907	Pueblo de Tabaa, Villa Alta	15-jul“...el día 12 del mes próximo pasado, como a las cuatro y media de la tarde, descargó una manga de agua en el cerro de Yalepe....habiendo destruido dicha manga, las sembraduras que por ese lugar tenían los vecinos...”
1907	Tuxtepec, San Cristóbal, Valle Nacional.	28-may “Ayer a las 6 pm sopló fuerte viento huracanado en la zona de San Cristóbal valle nacional proveniente del norte derri- bando casi todas las instalaciones tabacaleras resultando dos personas lesionadas las líneas telegráficas y telefónicas quedaron interrumpidas...”
1907	Teotitlán del Valle	31-jul. “...el sábado 27 del corriente como a las 2 horas 30 minutos pm cayó....una fuerte granizada que duró más de 15 minutos. El granizo llegó a alcanzar hasta 15 milímetros de diámetro habiendo causado perjuicios solamente en una pequeña parte de sembrados de milpa.”
1911	Villa Alta (137)	20-may. Destrucción de la entrada de la estación meteorológica
1911	Yautepec (141)	23-ago. Daños en la estación meterológica.
1911	Ixtlan (166)	26-oct. Daños en la estación meteorológica.
1912	Cuicatlán	30-abr. Viento fuerte derribó caseta meteorológica.
1926	San Jerónimo Oaxaca	20-oct. Reporte de destrucción de terrenos cultivados, bombas, zanj as barrera (telegrama).
1935	Tlapanala, Santa María, Huamelula	23-jun.“...entre Tlapanala y Santa María está completamente arrasada línea motivo una tromba de agua caída días pasados, calculando informante que faltan como 25 postes y que Huamelula inundose completamente, ignorándose desgracias personales en aquellos lugares”.

### 3.4.5. Chiapas

Chiapas se encuentra en el sureste de México, con un litoral de 255.69 km (INEGI). Está localizado entre 17° 59' y 14° 32' de latitud norte. Desde la zona costera hasta el noroeste del estado, prevalece un clima sub-húmedo con lluvias en verano, presentando una precipitación de ~2000 mm anuales. Al norte de esta región, las lluvias son más abundantes (2000 a 3000 mm/año). La parte norte del estado es la más lluviosa con una precipitación anual entre 3000 y 4300 mm. En esta área las lluvias están presentes todo el año, debido a la humedad del Golfo de México (<http://mapserver.inegi.org.mx/geografia/espanol/estados/chis/climas.cfm?c=444&e=23>).

El archivo histórico de Chiapas, está al resguardo de la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas. Se consultaron documentos entre 1900 y 1949, buscando referencias de posibles CT en reportes de gobierno, boletines, periódicos, el periódico oficial del estado y en documentos del área de Fomento y Gobierno.

Se encontraron seis eventos, de los cuales tres fueron identificados como CT (ver Tabla 3.6). No se encontró ninguna trayectoria de tormenta en las cartas del SMN que pudiera relacionarse con los eventos registrados en este estado.

**Tabla 3.6:** Eventos registrados en Chiapas entre 1906 y 1945 relacionados con la posible presencia de un CT (Archivo Histórico de Chiapas)

FECHA	LUGAR	DESCRIPCION
1906	Valle de Cintalapa	oct-23. El Heraldo de Chiapas: Por lluvias casi se pierde cosecha de frijol.
1906	Tapachula	6-nov. Huracán en Tapachula: "...a fines del mes pasado sopló un terrible viento huracanado sobre la población de Tapachula ocasionando destrucción de viviendas..."
1907	La Sepultura	1-jun. Desde una construcción de carretera: "...me encuentro hoy quitando los grandes derrumbes que ocasionaron por tres días de lluvias que tuvimos la presente semana."
1907	Monte Bonito	20-jun. "...hubo algunos derrumbes ocasionados por las aguas desde la cumbre hasta monte bonito."
1907	Villa Flores	9-jul. "...fuertes aguaceros y fuertes vientos derriban postes y algunos árboles, que al caer despedazan la línea..."
1907	Chicoasén	20-ago. Fuerte tempestad daña aparato telefónico.
1907	San Andrés, Palenque	24-oct. "...derrumbes causados por los fuertes aguaceros del mes de septiembre...por la precipitación tan desigual el presente año...el año pasado las lluvias fueron más abundantes pero más uniformes..."
1923	Tuxtla Gutiérrez	Junio. Boletín de Agricultura y Fomento, Reporte Meteorológico de Tuxtla Gutiérrez: Presión mínima 712.13, día 5, hum. rel. máx. 88.0 día 23, nublado caluroso, tempestad dos días.
1945	San Cristóbal	1-ago. Horizontes, periódico quincenal: Inundaciones ligeras por lluvia.

### 3.4.6. Sinaloa

Sinaloa está localizado en la región noroeste de México y colinda al oeste con el océano Pacífico con 640.17 km de litorales. Su posición geográfica se encuentra entre 27° 07' y 22° 20'

de latitud norte (INEGI). De acuerdo con la Tabla 3.1, ocupa el segundo lugar en incidencia de CTTT en la cPM.

El clima en Sinaloa es principalmente cálido y la mayor parte de la costa es seca con un precipitación anual de 200 a 800 mm. El lado este del estado es principalmente templado con lluvias en verano y precipitación anual de 700 a 1500 mm ( <http://mapserver.inegi.org.mx/geografia/espanol/estados/sin/clim.cfm?c=444&e=03>).

Para conocer los CT históricos que afectaron las costas de Sinaloa se consultaron los siguientes fuentes: El Instituto La Crónica de Culiacán, que proveyó información de libros y otras publicaciones donde se reportaron desastres causados por CT; el Archivo Histórico de Sinaloa donde se consultaron reportes de gobierno; y la Confederación de Asociaciones de Agricultura de Sinaloa (CAADES) donde la oficina agro-meteorológica proporcionó una lista de los CT registrados por su personal.

Estos datos se compararon con las cartas del SMN. En los eventos reportados entre 1922 y 1943, todos estos estuvieron relacionados con una trayectoria de tormenta excepto por dos. Así, se identificaron 14 posibles CT que afectaron Sinaloa entre 1883 y 1943 (Tabla 3.7).

**Tabla 3.7:** Eventos registrados en Sinaloa entre 1883 y 1943 relacionados con la posible presencia de un CT (Archivo Histórico del Estado de Sinaloa, CAADES e Instituto La Crónica de Culiacán).

FECHA	LUGAR	DESCRIPCION
1883	Altata	Altata fue azotado por un ciclón que los costeños lo llamaron “El cordonazo de San Francisco.”
1896	Culiacán	El 18 de septiembre de 1896, se desataron a las 2:30 p.m. fuertes chubascos en la zona centro del estado de Sinaloa; dos horas más tarde se convirtió en huracán. Lo más deplorable sucedió en el viejo puerto de Altata, destruyendo más de las tres cuartas partes del poblado.
1917	Culiacán	El domingo 2 de septiembre se suscito en Culiacán una creciente espectacular en el río Tamazula; creciente que duró varios días.
1936	Rosario	Azota en El Rosario un ciclón que causo derrumbes y numerosas muertes. El ciclón fue un motivo para el cierre de la riquísima mina del Tajo, una de las más famosas del sur de Sinaloa.
1922	Dimas, La Cruz	Octubre 16. S/D.
1928	El Dorado, Culiacán	Septiembre 22. S/D.
1930	Mazatlán	Dos eventos en Mazatlán: El 11 de junio y el 7 de octubre. S/D.
1931	Mazatlán	Mayo 28. S/D.
1932	Sierra de Escuinapa	Agosto 29. S/D.
1934	Chametla, El Rosario	Octubre 17. S/D.
1936	Chametla, El Rosario	Septiembre 26. S/D.
1938	(1)Navolato, Culiacán (2) Teacapa, Escuinapa.	Dos eventos: (1) Junio 23, (2) Septiembre 30.

1939	El carrizo, Ahome	Octubre 26. S/D
1942	Topolobampo, Los Mochis	“En septiembre de 1942, un ciclón causó graves daños en la región norte, Topolobampo quedó devastado, hubo muertos y heridos, la ciudad de los Mochis quedó incomunicada.”
1943	Villa Unión, Mazatlán	Octubre 9-10 “...ocasionó daños tan extensos que algunos recuerdan que “en 1943, nos volteron al revés”. Más de cincuenta personas murieron por el huracán y al menos cien quedaron heridas.”

En la Tabla 3.8 se encuentra el resumen de toda la información obtenidos por estado, de las fuentes mencionadas en las secciones correspondientes.

**Tabla 3.8:** Número de eventos registrados en cada estado y número de posibles CT entre 1537 y 1945.

Estado	Periodo	Número de eventos	Posible CT
Baja California	1850-1948	32	19
Sinaloa	1868-1943	20	15
Jalisco	1609-1932	18	12
Oaxaca	1731-1935	15	10
Chiapas	1652-1945	11	2
Otros*	1537-1897	23	17
TOTAL		119	75
*Colima, Guerrero, Michoacan, Nayarit, Sonora.			

### 3.5. Análisis de Resultados

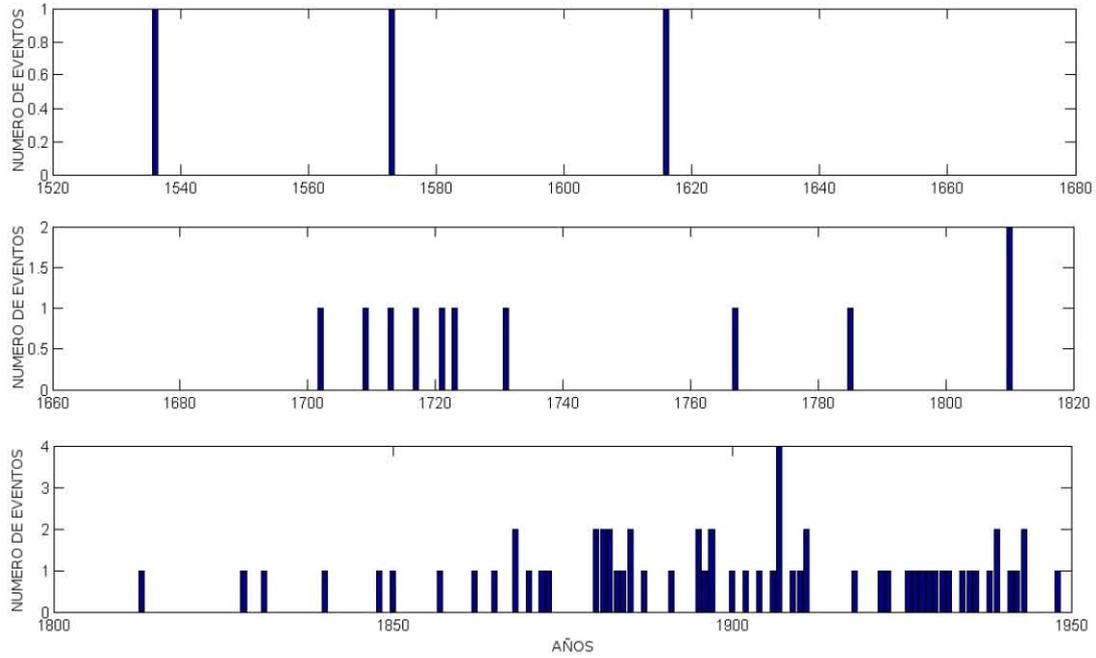
Con los datos históricos obtenidos, se construyó una serie de tiempo entre 1536 y 1948 (Figura 3.3), a esta serie se le aplicó un análisis espectral utilizando el método de ondeletas.

#### 3.5.1. Transformada de Ondeleta Continúa

La transformada de ondeleta continua (TOC) es una herramienta para analizar oscilaciones intermitentes, localizadas en una serie de tiempo.

Un ondeleta es una función con media cero y que está localizada tanto en el dominio del tiempo como en el de la frecuencia. A diferencia del análisis de Fourier, el cual solo revela las frecuencias principales, la ondeleta es capaz de indicar cuándo ocurren y cuál es su duración (Grinsted *et al.* , 2004).

La ondeleta fue diseñada originalmente para el estudio de señales no estacionarias que al ser un análisis tiempo-frecuencia, puede revelar las tendencias o las discontinuidades. Para poder estudiar una señal estacionaria, la TOC introduce una ventana variable. Además utiliza una región tiempo-escala, siendo una de sus ventajas que puede analizar una área localizada dentro de una señal mayor. La TOC puede expresarse como la función C en la ecuación 3.1.



**Figura 3.3:** Serie de tiempo con información de posibles CT ocurridos entre los años de 1537 y 1949.

$$C(escala, posicion) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)\Psi(escala, posicion, t)dt \quad (3.1)$$

Así, para analizar las variaciones locales de potencia dentro de la serie de tiempo de la Figura 3.3, dado que es no estacionaria y con múltiples periodicidades, se aplicó la TOC utilizando la función de Morlet (ec. 3.2) como  $\Psi$  en la ecuación 3.1 (Torrence & Compo, 1998). Esta función fue desarrollada específicamente para señales geofísicas y provee una buena resolución en el tiempo.

$$\Psi_0(\eta) = \pi^{-1/4} e^{i\omega_0\eta} e^{-\frac{1}{2}\eta^2} \quad (3.2)$$

Donde  $\omega_0$  es una frecuencia adimensional y  $\eta$  es el tiempo adimensional.

La idea principal detrás de la TOC es aplicar la ondeleta como un filtro pasa-banda a la serie de tiempo.

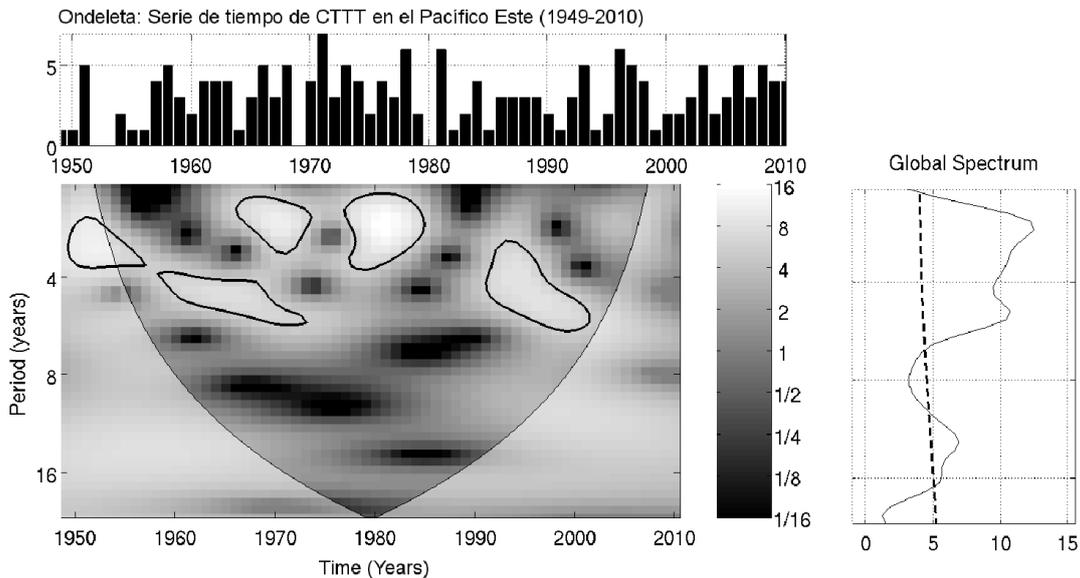
El programa que se utiliza fue desarrollado en el Centro Oceanográfico Nacional de Reino Unido, por Grinsted y colaboradores en 2004. Este programa fue diseñado para Matlab, en el cual, es necesario introducir en una línea del código, la instrucción de cargar los datos de la serie de tiempo y así genera el espectro de la TOC donde se muestran las periodicidades significativas

(con un nivel de confianza mayor a 95 %) dentro del cono de influencia (COI), (Torrence & Compo, 1998; Grinsted *et al.*, 2004).

También se incluye el espectro global en la gráfica de las ondeletas, el cual es el promedio de la potencia en cada periodo sobre todo el intervalo que se está considerando. Esta es una forma de mostrar la contribución a la potencia de cada periodicidad dentro del COI (e.g. Velasco & Mendoza (2008)). Se establecieron los niveles significativos en el espectro global de ondeletas con un modelo simple de ruido rojo (Gilman *et al.*, 1963).

Solamente se tomaron en cuenta las periodicidades por arriba del nivel del ruido rojo. La incertidumbre de las periodicidades se calcula midiendo la base del pico en la gráfica del espectro global donde el punto central es el valor de la periodicidad y la distancia a la derecha y a la izquierda del ancho del pico, es la incertidumbre.

El análisis espectral se aplicó primero en la base de datos de CT de Weather Unysis (datos instrumentales) de donde se hizo una serie de tiempo, tomando solo los CTTT, con el objetivo de encontrar las periodicidades en la serie de tiempo de los CTTT entre 1949 y 2010 (Figura 3.4).



**Figura 3.4:** Análisis espectral obtenido para la serie de tiempo de CTTT de 1949 a 2010. El panel superior muestra la serie de tiempo. El panel inferior muestra el espectro de potencia y el COI, y el panel inferior derecho muestra el espectro global donde la línea punteada indica el nivel de ruido rojo.

### 3.5.2. Resultado del análisis espectral

En el espectro global del análisis de la serie de tiempo de CTTT en de 1949 a 2010 (Figura 3.4, panel derecho), sobresalen por encima de la línea del ruido rojo, los picos en  $\sim 3, 5, 12$  y  $16$  años.

**Tabla 3.9:** Valores del coeficiente de correlación entre los datos instrumentales (1949-2010) y los periodos de 62 años de datos históricos.

Periodo de correlación	Coefficiente de Correlación
1887-1948	0.88
1825-1886	0.92
1763-1824	0.83
1701-1762	0.70

**Tabla 3.10:** Periodicidades de CTTT encontradas en las series de tiempo de 1949-2010 y 1701-2010.

Serie de Tiempo	Periodicidades
1949-2010	$2.7 \pm 0.3, 4.9 \pm 1, 12.3 \pm 1.7, 15.6 \pm 1.6$
1850-2010	$2.6 \pm 0.3, 3.7 \pm 0.3, 5.2 \pm 0.4, 12.4 \pm 1.7, 39.3 \pm 7$
1701-2010	$105 \pm 7$

Con la intención de comparar el comportamiento de los datos instrumentales a lo largo del periodo 1949-2010 con los resultados históricos, se realizó la TOC en periodos de 62 años de datos históricos. Los periodos fueron 1702-1762, 1763-1824, 1825-1886 y 1887-1948. Para los datos entre 1536 y 1700, no se realizó el análisis debido a la baja densidad de los datos.

El espectro global obtenido de cada periodo, se comparó con el espectro global del periodo 1949-2010, calculando la función de correlación. Los valores de la correlación se muestran en la Tabla 3.9.

De la Tabla 3.9, se puede ver que la correlación entre los espectros globales es alta, por lo que puede inferirse que la frecuencia de CTTT en periodos históricos es consistente con la actividad en el periodo instrumental. Así, bajo este criterio se construyó una serie de tiempo entre 1701 y 2010, y posteriormente se aplicó el análisis espectral que se muestra en la Figura 3.5a.

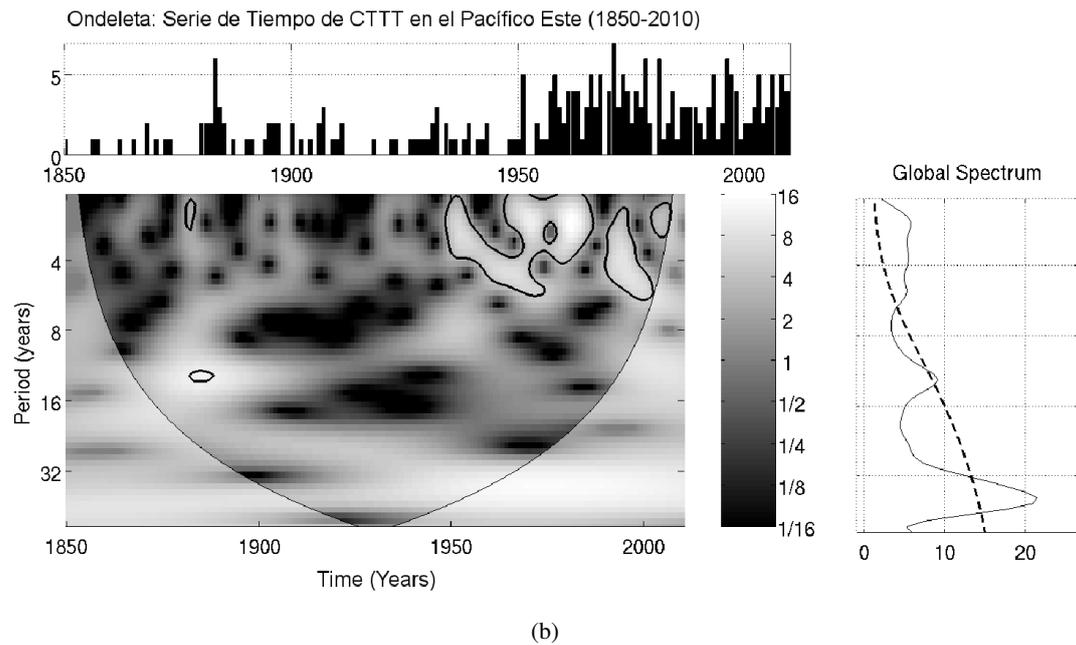
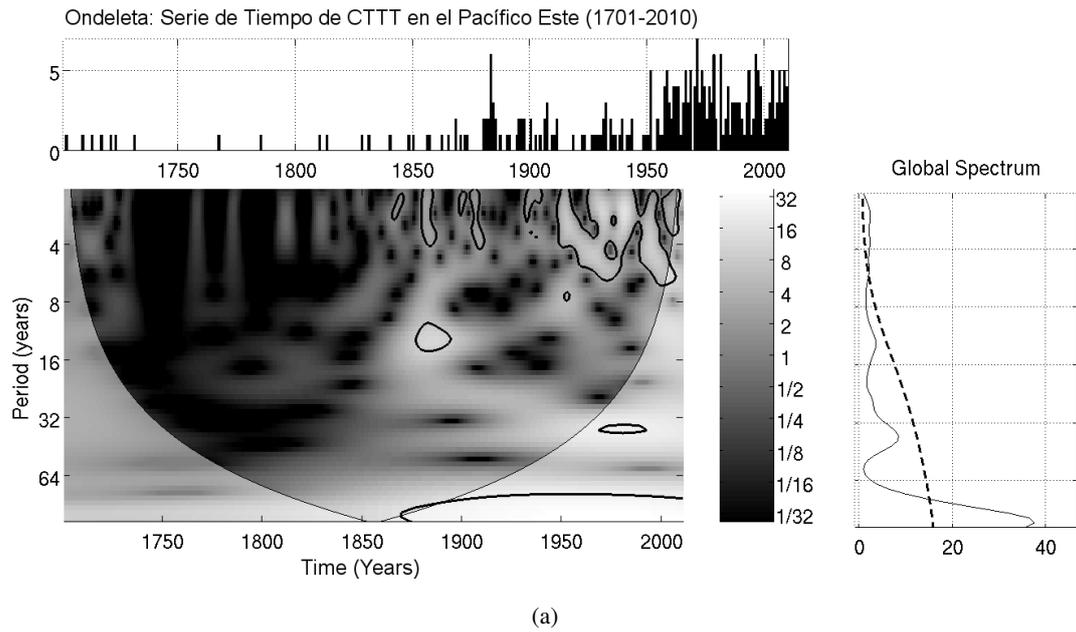
La periodicidad principal en el espectro global es de 105 años, pero como puede observarse en la serie de tiempo (Figura 3.5a, panel superior), la densidad de los datos es mejor a partir de 1850, por lo que se realizó el análisis espectral para la serie de tiempo de 1850 a 2010 (Figura 3.5b). Las periodicidades que muestra el espectro global es de  $\sim 2.6, 3.7, 5, 12$  y 39 años, con un 95 % de confianza al sobrepasar de la línea del ruido rojo.

En la Tabla 3.10 se presenta un resumen con los resultados de las periodicidades obtenidas del análisis espectral.

### 3.6. Discusión y conclusiones.

De todos los eventos identificados en los archivos históricos, se seleccionaron 119 relacionados con fenómenos hidro-meteorológicos ocurridos cerca de la cPM, dentro de la temporada de CT.

En la mayoría de los casos, por el tipo de daños reportados de acuerdo a la escala Saffir-



**Figura 3.5:** Análisis espectral obtenido para la serie de tiempo de (a) 1701 a 2010, y (b) 1850 a 2010. En ambas figuras, el panel superior muestra la serie de tiempo de CTTT. El panel inferior muestra el espectro de potencia y el inferior derecho muestra el espectro global donde la línea punteada indica el nivel de ruido rojo.

Simpson, podrían tratarse de huracanes de al menos categoría 1. Considerando lo anterior, se seleccionaron 85 posibles CT.

De acuerdo con este estudio, Baja California Sur es el estado con mayor número de CTTT (ver Tabla 3.1), lo cual concuerda con estudios previos con datos de la segunda mitad del siglo XX (p. ej. Jauregui (2003)).

Con la información anterior se construyó una serie de tiempo de CTTT en el Pacífico oriental entre 1536 y 1948 (Figura 3.3).

Una vez que se compararon los datos históricos con los instrumentales, al dividirlos en periodos iguales de 62 años, se contruyó otra serie de tiempo para el periodo de 1701 a 2010. Los resultados del análisis de ondeleta de éste periodo, arrojó periodicidades de CTTT en la cPM de 3, 5, 12, 39 y 105 años.

Las periodicidades más sobresalientes ocurrieron durante el periodo instrumental (1949-2010) y fueron de 12 y 3 años, y para el periodo de 1701 a 2010, fueron las de 105 y 39 años.

Algunas de estas periodicidades, tomando en cuenta las incertidumbres, coinciden con periodicidades asociadas a algunos fenómenos climáticos de gran escala como la Oscilación Multidecenal del Atlántico (AMO), la Oscilación del Atlántico Norte (NAO), la Oscilación Decenal del Pacífico (PDO) o el Índice de la Oscilación del Sur (SOI) (p. ej. Velasco & Mendoza (2008)). Coincide también con periodicidades de fenómenos externos como la periodicidad de 11 años del ciclo de actividad solar.

La periodicidad de 3 años coincide con las periodicidades encontradas en la PDO, la de 4 años con la NOA, PDO y SOI, y la 100 años con la AMO. La periodicidad de 12 años es la más persistente de las series de tiempo analizadas y coincide con la PDO y el ciclo de 11 años de actividad solar. Otros estudios han encontrado esta periodicidad al estudiar los CT en el Pacífico oriental (e.g. Englehart & Douglas (2001); Mendoza & Pazos (2009)).

De lo anterior, se puede concluir que aunque no se tiene una plena identificación de todos los CTTT entre 1701 y 2010, éstos pueden ser una muestra representativa al coincidir sus periodicidades con las de los fenómenos de gran escala y de la actividad solar, dado que se ha encontrado que todos estos fenómenos están relacionados con la actividad de CT.

Los 85 CTTT identificados, son una primera versión de un catálogo de posibles CT que afectaron las cPM entre los siglos XVI y XX. El acceso a registros instrumentales de estados de la cPM, diferentes a los presentados aquí y conteniendo datos de precipitación, presión, temperatura y velocidad de vientos, previos a 1949, serían de gran utilidad para identificar mayor número de CT. En Baja California Sur, en el periodo de la colonización (1521-1810), la flota española fue afectada en varias ocasiones por tormentas intensas que pudieron estar reportadas en archivos conservados en el Archivo General de Indias. Este archivo podría utilizarse también como otra fuente de identificación de CT, así como ya se ha hecho en otras investigaciones para el Mar Caribe (García-Herrera *et al.*, 2007).

## Capítulo 4

# Ciclo de 22 años en huracanes y su relación con la actividad geomagnética

### 4.1. Introducción

El ciclo de 22 años ha sido identificado en la actividad solar y geomagnética. Los cambios en la polaridad del campo magnético general del Sol muestran este ciclo. En el análisis espectral de las manchas solares, aparece esta periodicidad, y es atribuida a la alternancia del máximo de manchas solares en ciclos par-non. Esta alternancia está últimamente ligada al campo magnético solar y a su cambio de polaridad vía la interacción con un campo magnético fósil en la zona convectiva (e.g. Mursula *et al.* (2001); Prestes *et al.* (2006); Demetrescu & Dobrica (2007)). En estudios de rayos cósmicos el ciclo de 22 años está asociado con la inversión del campo magnético general del Sol alrededor del máximo de actividad solar (Kota & Jokipii, 1983). El índice geomagnético aa, parece presentar esta periodicidad (e.g. Cliver *et al.* (1996); Demetrescu & Dobrica (2007)), asociado con un mecanismo de acoplamiento geométrico y de inversión de polaridad (Rosenberg & Coleman, 1969; Russell & McPherron, 1973) sumado a una variación en el campo magnético polar del Sol (Cliver *et al.* , 1996).

Algunos fenómenos climáticos presentan un ciclo de 22 años, por ejemplo las sequías (e.g. Cook *et al.* (1997); Mendoza *et al.* (2005, 2006), el grosor de los anillos de los árboles en Rusia (Raspopov *et al.* , 2004), registros de temperatura (e.g. Dobrica *et al.* (2008)), actividad de CT en el Atlántico (e.g. Kane (2006)), el grosor de los anillos de los árboles de Brasil y Chile (Rigozo *et al.* , 2007) o las series de lluvia total anual en el sur de Brasil (Rigozo *et al.* , 2007).

En la presente investigación, se buscó una asociación entre CT con categoría de huracán (ver Apéndice A) y perturbaciones relacionadas con la actividad solar. Si existiera esta relación, la existencia de un ciclo de 22 años en las ocurrencias de huracanes no sería causa de sorpresa. Para ello, se obtuvo la correlación entre CT y fenómenos asociados a la actividad solar relevantes en el contexto del ciclo de 22 años y finalmente se investigó el origen de tal periodicidad.

## 4.2. Datos

Debido a que la ciclogénesis en los océanos Atlántico y Pacífico oriental son diferentes, se trabajó con las series de tiempo de forma separada, y también haciendo distinción entre huracanes débiles y mayores.

Se cuenta con información disponible de huracanes en el Atlántico, desde 1851. Para esta investigación se utilizaron datos anuales de huracanes desde 1851 a 2007. Para el Pacífico oriental se cuenta con información confiable desde 1949. Los datos empleados aquí comprenden de 1949 a 2007. Los datos de CT fueron obtenidos del Servicio Nacional de Estado del Tiempo vía el servicio de datos satelitales NOAAPORT (<http://weather.unisys.com/hurricane/>). Es necesario tener en cuenta que los datos anteriores a 1944 no son muy confiables ya que las imágenes de satélite comenzaron en 1944. Sin el reconocimiento aéreo, algunos CT no fueron tomados en cuenta o se les asignó una intensidad errónea. Es hasta la mitad de los años 60's que comenzó la cobertura satelital continua. En particular para Estados Unidos hay datos confiables sobre CT desde 1899 (e.g. Landsea (1993)).

La RST tiene un efecto preponderante en la temperatura de la superficie del mar, la cual también contribuye a la formación de huracanes mayores (DeMaria *et al.*, 1993; Goldenberg *et al.*, 2001). Las mediciones espaciales de la RST están disponibles desde 1978 (e.g. Fröhlich (2000)). Para los propósitos del presente trabajo, se utilizó una serie de tiempo reconstruida de Lean (2000). Se trabajó con datos anuales desde 1871 a 2000; en este lapso de tiempo la reconstrucción está basada en el brillo de las fáculas y el oscurecimiento por manchas solares.

Los rayos cósmicos han sido estudiados también en el contexto de la actividad de huracanes (Elsner & Kavlakov, 2001; Kavlakov *et al.*, 2008; Pérez-Peraza *et al.*, 2008). La información sobre rayos cósmicos está disponible desde 1958. Aquí utilizamos datos entre 1958 y 2007, obtenidos del Centro Nacional de Datos Geofísicos ([ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/SOLAR\\_DATA/COSMIC\\_RAYS/moscow.tab](ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/SOLAR_DATA/COSMIC_RAYS/moscow.tab)).

En lo concerniente a huracanes y perturbaciones geomagnéticas, estudios previos han utilizado los índices geomagnéticos Kp y Ap (Elsner & Kavlakov, 2001; Kavlakov *et al.*, 2008; Pérez-Peraza *et al.*, 2008). Otro índice geomagnético, el Dst, detecta las perturbaciones de la componente horizontal del campo geomagnético, monitoreando el estado del anillo de corriente (ver Capítulo 1). Aquí utilizamos el índice Dst, disponible desde 1957 debido a que su medición es en latitudes cercanas al ecuador, dos de los observatorios están localizados en las regiones de ciclogénesis; se trabajó con datos anuales desde 1957 a 2007, obtenidos del centro mundial de datos para geomagnetismo de Kyoto ([http://swdcwww.kugi.kyotou.ac.jp/dst\\_final/index.html](http://swdcwww.kugi.kyotou.ac.jp/dst_final/index.html)). Para la derivación de las series de tiempo de Dst utilizadas en este trabajo, se promedian los datos de los cuatro observatorios magnéticos para tener estandarizar los datos. La localización de los observatorios se puede ver en la Figura 2.8 en el capítulo 2.

## 4.3. Metodología

Suponiendo que existiera un ciclo de 22 años en huracanes, se propuso que éste estuviera relacionado con la actividad solar. Para investigar la naturaleza de esta periodicidad presupuesta, se dividieron los datos en dos tipos. Los correspondientes a la parte ascendente de los ciclos

solares pares junto con la parte descendente de los ciclos solares nones, son identificados como tipo 1. El campo magnético interplanetario durante estas épocas apunta en dirección al Sol.

Los datos correspondientes a la parte ascendente de los ciclos nones junto con la parte descendente de los ciclos pares son identificados como tipo 2. Durante éstas épocas, el campo magnético interplanetario apunta en dirección opuesta al Sol.

De acuerdo a cada tipo, 1 o 2, y categorías de huracanes (débil o mayor) el número de huracanes en el Atlántico y el Pacífico aparece en la primer columna de la Tabla 4.1. El número de huracanes durante épocas tipo 1 y tipo 2 no coincide con el número total de huracanes porque el tipo 1, incluye datos hasta 1989 y el tipo 2 hasta el 2000, es decir, que al separar los datos por tipos, hubo años que no se tomaron en cuenta porque correspondían a años donde no se completaba el ciclo con las fases ascendentes y descendentes de los ciclos solares.

Para conocer las periodicidades de cada fenómeno durante las épocas tipo 1 y tipo 2, se realizó el análisis espectral utilizando una vez más el método de ondeletas explicado en el capítulo 3. Las Figuras que se muestran aquí, son las mismas que se incluyeron en la publicación de Mendoza & Pazos (2009).

#### 4.4. Resultados y discusión

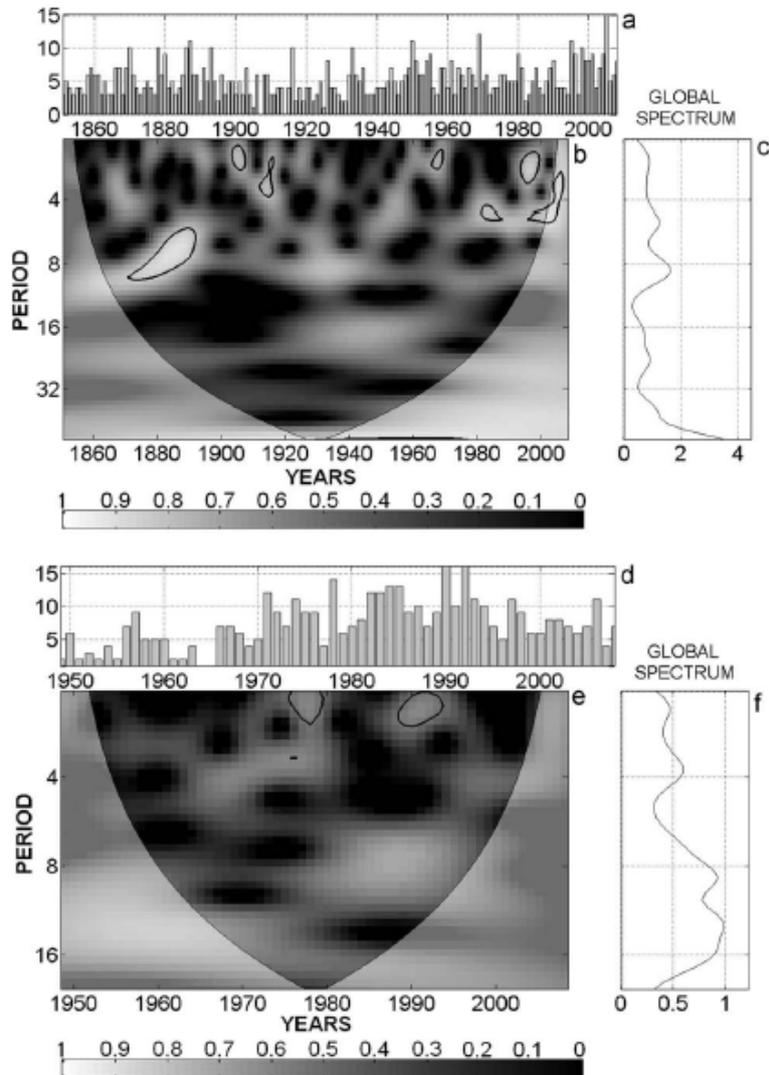
La Figura 4.1 presenta el análisis espectral de ondeletas de los huracanes en los océanos Atlántico y Pacífico. La Figura 4.1c muestra el espectro global. Los picos relevantes a  $2.3 \pm 0.2$ ,  $5 \pm 0.7$ ,  $9 \pm 1.6$  y  $24 \pm 5$  años, son evidentes. Particularmente, el pico en 24 años es cercano al ciclo de 22 años, tomando en cuenta la incertidumbre. El espectro de huracanes en el Pacífico oriental de la Figura 4.1f, presenta frecuencias en  $2.3 \pm 0.1$ ,  $3.8 \pm 0.4$ ,  $9 \pm 1$  y  $13 \pm 2$  años.

Es necesario resaltar que la longitud de la serie de tiempo de huracanes en el Pacífico no permite la identificación de picos mayores a 16 años al utilizar la técnica de ondeletas. Los ciclos cuasi-decenales y cuasi-bidecenales pueden estar relacionados con los principales ciclos de actividad solar, o a fenómenos climáticos de gran escala. Sin embargo, como se mencionó anteriormente, estamos interesados en el estudio de periodicidades de huracanes en el contexto de la actividad solar.

Se encontró la evidencia de un ciclo de 22 años en huracanes. Sin embargo, para establecer la naturaleza de esta periodicidad, se separaron todas las series relevantes en tipos 1 y 2 como se discutió antes. Aquí se propone organizar los datos utilizando épocas superpuestas, es decir, haciendo coincidir los años del mínimo solar en todos los periodos, sin importar la longitud del ciclo, con el objetivo de no perder de vista el posible efecto de la actividad solar en la actividad de huracanes durante cada periodo. Los coeficientes de correlación relevantes están resumidos en las Tablas 4.1 a 4.3.

En las tablas, la primera columna indica el océano, en la segunda los huracanes se separaron por intensidad: T = El conjunto de todos los huracanes de las categorías 1 a la 5; D = huracanes "débiles" con categoría 1 y 2; M = huracanes "fuertes" con categorías 3, 4 y 5. La columna "Todos" se toman en cuenta todos los ciclos solares juntos; tipo 1 = son los periodos que comprenden la parte ascendente de un ciclo par y la descendente de un ciclo non; tipo 2 = Los periodos que comprenden la parte ascendente de un ciclo non y la parte descendente de un ciclo par. Los números en negritas indican correlaciones significativas ( $> 0.5$ ). Los valores

mayores en la fila se encuentran resaltados y el número de huracanes aparece entre paréntesis en la Tabla 4.1.



**Figura 4.1:** Análisis de ondeletas de la series de tiempo de huracanes.(a)Serie de tiempo de huracanes en el océano Atlántico; (b) Espectro de ondeleta; (c) espectro global de la ondeleta; (d) serie de tiempo de huracanes en el océano Pacífico; (e) espectro de ondeleta y (f) espectro global de la ondeleta. En la parte inferior de los espectros se muestra el nivel de significancia estadística en escala de grises. El nivel de confianza del 95 % se encuentra dentro de los contornos encerrados en la línea negra gruesa dentro del COI.

La Tabla 4.1 muestra las correlaciones encontradas para huracanes y RST. De acuerdo a Nyberg *et al.* (2007), los picos y las tendencias de los huracanes mayores en el Atlántico norte,

**Tabla 4.1: Coeficientes de correlación entre huracanes y RST.**

Región	Intensidad	Todos	Tipo 1	Tipo 2
Atlántico	T (824)	0.18	0.13 (358)	0.19 (413)
	D (532)	0.15	-0.05 (236)	0.12 (268)
	M (172)	0.12	0.17 (122)	0.22 (145)
Pacífico	T (433)	-0.28	0.07 (145)	0.11 (234)
	D (261)	0.01	0.39 (94)	0.35 (98)
	M (172)	0.45	-0.25(51)	-0.1 (136)

**Tabla 4.2: Coeficientes de correlación entre huracanes y flujo de rayos cósmicos.**

Región	Intensidad	Todos	Tipo 1	Tipo 2
Atlántico	T	-0.27	-0.45	-0.18
	D	-0.41	-0.42	-0.39
	M	-0.04	-0.20	-0.04
Pacífico	T	-0.12	-0.29	-0.07
	D	-0.42	-0.29	-0.50
	M	0.19	-0.02	-0.29

ocurren con RST menor en diversos periodos entre 1730 y 2005. A lo largo del periodo que fue estudiado, tanto los huracanes del Atlántico como del Pacífico no están significativamente correlacionados ( $r = 0.5$ ) con la RST ni aun cuando son separados por épocas tipo 1 y 2 (cuarta y quinta columna respectivamente), dado que los coeficientes de correlación no mejoran en la mayoría de los casos.

La Tabla 4.2 presenta las correlaciones encontradas entre huracanes y rayos cósmicos. Los huracanes en el Atlántico y el Pacífico, no muestran una correlación significativa tomando los ciclos solares completos, ni tampoco cuando son separados en tipos 1 y 2. Sin embargo, separando los datos mejoran los coeficientes de correlación, porque como se mencionó anteriormente, durante cada tipo, la actividad solar es diferente. Las más altas correlaciones sin importar su significancia, se encontraron para tipo 1 en huracanes débiles y mayores en el Atlántico. El Pacífico muestra este tipo de correlación para tipo 2 en huracanes débiles y mayores, mientras que todos los huracanes las muestran para épocas tipo 1.

Finalmente, la Tabla 4.3 muestra correlaciones encontradas para huracanes y el índice Dst. Claramente, al tomar todos los ciclos solares juntos, no se encuentran correlaciones significativas, excepto para los huracanes en el Pacífico. Sin embargo, cuando los datos se separan en épocas tipo 1 y tipo 2, los huracanes en el Atlántico y el Pacífico se anticorrelacionan y correlacionan, respectivamente de forma significativa ( $r > 0.5$ ) con el tipo 2; la excepción son los huracanes débiles en el Pacífico, cuya correlación no mejora al separarlos. Además, es notable que la correlación significativa encontrada para todos los huracanes en el Pacífico se vuelve mayor durante las épocas tipo 2.

Los resultados de las Tablas 4.2 y 4.3, concuerdan con las correlaciones significativas en-

**Tabla 4.3: Coeficientes de correlación entre huracanes y Dst.**

Región	Intensidad	Todos	Tipo 1	Tipo 2
Atlántico	T	-0.39	0.25	<b>-0.77</b>
	D	-0.27	0.29	<b>-0.63</b>
	M	-0.37	0.05	<b>-0.74</b>
Pacífico	T	<b>0.66</b>	0.39	<b>0.85</b>
	D	0.40	0.38	0.39
	M	0.38	0.06	<b>0.79</b>

entre los cambios de la intensidad de los huracanes en el Atlántico norte y el índice de actividad geomagnética Kp, pero no con rayos cósmicos (Elsner & Kavlakov, 2001; Kavlakov *et al.*, 2008).

Se ha sugerido que los rayos cósmicos modulados por el viento solar pueden influenciar a los huracanes (Tinsley & Beard, 1997). También se ha propuesto que los rayos cósmicos influyen en la formación de nubes bajas (Svensmark, 2007). Sin embargo, trabajos recientes parecen indicar que sólo una pequeña fracción de la cubierta de nubes bajas está relacionada con rayos cósmicos (Erlykin *et al.*, 2009). La baja correlación entre rayos cósmicos y huracanes, concuerda con el último resultado.

Los resultados indican que las correlaciones significativas más altas fueron obtenidas entre huracanes y actividad geomagnética durante épocas tipo 2.

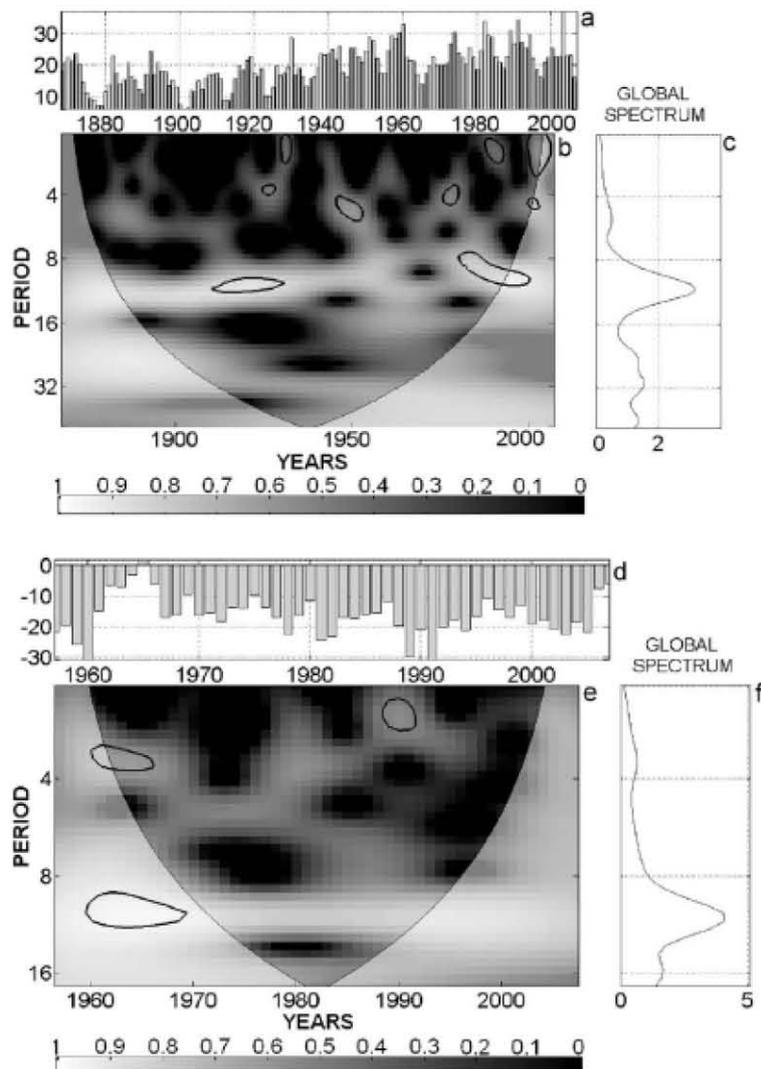
De acuerdo a Cliver *et al.* (1996), estas épocas están favorecidas. El índice aa es  $\sim 20\%$  mayor durante la fase descendente de los ciclos pares y la parte ascendente de los ciclos impares, que corresponde a nuestro tipo 2. Comparado con las épocas tipo 1, las épocas tipo 2 presentan aumentos en fenómenos tales como las eyecciones de masa coronal durante la fase ascendente de los ciclos impares y aumento en las corrientes co-rotantes de alta velocidad durante la parte descendente de los ciclos pares.

Las Tablas 4.1 a 4.3, muestran comportamientos diferentes en los huracanes del Atlántico y el Pacífico. Podemos especular que tal diferencia se debe a la influencia de la ciclogénesis en el océano, así como fenómenos climáticos de gran escala. Particularmente, la actividad geomagnética durante épocas tipo 2 no explica adecuadamente tal fenómeno climático-océánico ya que los huracanes en el Atlántico muestran anti-correlación mientras los huracanes del Pacífico muestran correlación (ver Tabla 4.3).

El espectro global de ondas de Dst en la Figura 4.2f, muestra picos prominentes en  $3.6 \pm 0.3$ ,  $6.5 \pm 0.4$  y  $11 \pm 1.6$  años, sin embargo las series de tiempo no son lo suficientemente largas para detectar la periodicidad de  $\sim 22$  años con el método de ondas. Se ha mostrado que los índices Dst y aa tienen variaciones similares (Echer *et al.*, 2004). Las series de tiempo de actividad geomagnética más largas es la del índice aa (Mayaud, 1972). El ciclo de 22 años en el índice aa, se ha identificado en el análisis espectral (e.g. Demetrescu & Dobrica (2007)).

Aplicando el método de ondas a las series de tiempo de aa, en la Figura 4.2c se observan claramente picos en  $12 \pm 2$  and  $26 \pm 5$  años. Tomando en cuenta las incertidumbres, el último valor coincide con el ciclo de 22 años. Dadas las similitudes, se puede asumir que el Dst presenta

también un ciclo de 22 años.



**Figura 4.2:** Análisis de ondeletas de la serie de tiempo de huracanes. (a) Serie de tiempo de huracanes en el océano Atlántico; (b) Espectro de ondeleta; (c) espectro global de la ondeleta; (d) serie de tiempo de huracanes en el océano Pacífico; (e) espectro de ondeleta y (f) espectro global de la ondeleta. En la parte inferior de los espectros se muestra el nivel de significancia estadística en escala de grises. El nivel de confianza del 95 % se encuentra dentro de los contornos encerrados en la línea negra gruesa dentro del COI.

La coherencia entre huracanes y los índices Dst y aa, aparecen en las Figuras 4.3 y 4.4. La Figura 4.3c, muestra la coherencia global entre los huracanes del Atlántico y Dst. Se observan picos en  $6 \pm 0.6$ ,  $9 \pm 1.5$  y  $13 \pm 1.5$  años. El ciclo de 11 años coincide con las incertidumbres de los picos en 9 y 13 años (ver Figura 4.3b).

Aunque ambas series de tiempo parecen estar en desfase, se observa una tendencia de anti-correlación, cuya naturaleza no es clara. Este comportamiento se observa en la Tabla 4.3, mostrando que los huracanes en el Atlántico tienen una baja correlación ( $r = -0.39$ ) cuando no se hace distinción entre épocas tipo 1 y 2.

La Figura 4.3f presenta la coherencia global entre los huracanes del Pacífico y Dst, y aparecen picos en  $3.5 \pm 0.2$ ,  $8 \pm 2$  y  $13 \pm 1.5$  años. La periodicidad en 8 años está presente consistentemente en ambas coherencias, coincidiendo con la Tabla 4.3 la cual indica que todos los huracanes del Pacífico se correlacionan ( $r = 0.66$ ) cuando no se hace distinción entre las épocas 1 y 2.

Finalmente la Figura 4.4c muestra la coherencia global entre los huracanes del Atlántico y el índice aa. Son evidentes los picos en  $6 \pm 1.1$ ,  $13 \pm 1.5$  y  $24 \pm 3.7$  años. El pico en 13 años está en anti-fase. La Tabla 4.3 muestra una anti-correlación ( $r = -0.39$ ) entre los huracanes del Atlántico cuando no hay distinción entre épocas tipo 1 y 2. El pico de 24 años aparece consistentemente a lo largo del lapso de tiempo dentro del COI, pero no se puede hacer una comparación directa con la Tabla 4.3.

## 4.5. Conclusiones.

Al realizar el análisis espectral de ondeletas a las series de tiempo de huracanes, se encontraron periodicidades que coinciden con los dos principales ciclos del Sol:

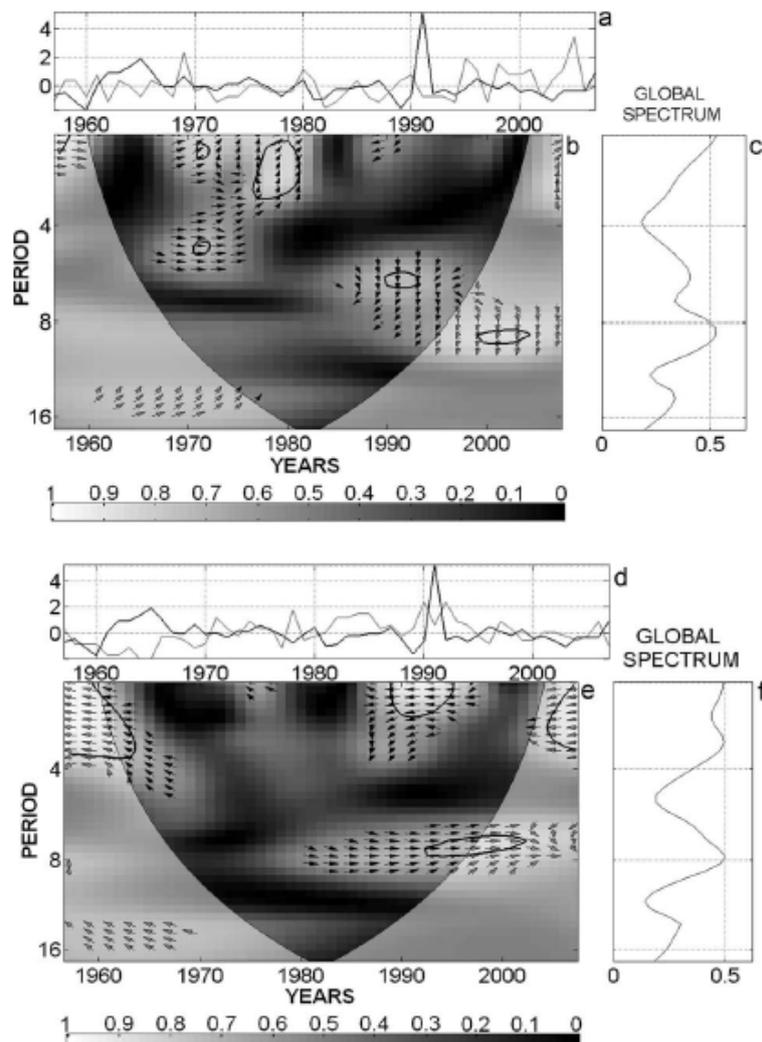
- El ciclo magnético
- El ciclo de manchas solares

Para los huracanes en océano Atlántico hay picos cerca de los 11 y 22 años. La serie de tiempo de los huracanes del océano Pacífico no es lo suficientemente larga para permitir la identificación del ciclo de 22 años, sin embargo el ciclo de 11 años claramente aparece.

Utilizando el método de épocas superpuestas para investigar la naturaleza del ciclo de ocurrencia de huracanes de 22 años, se encontró que las correlaciones significativamente más altas aparecen entre los huracanes del Atlántico y del Pacífico, con el índice de actividad geomagnética Dst a lo largo de épocas tipo 2.

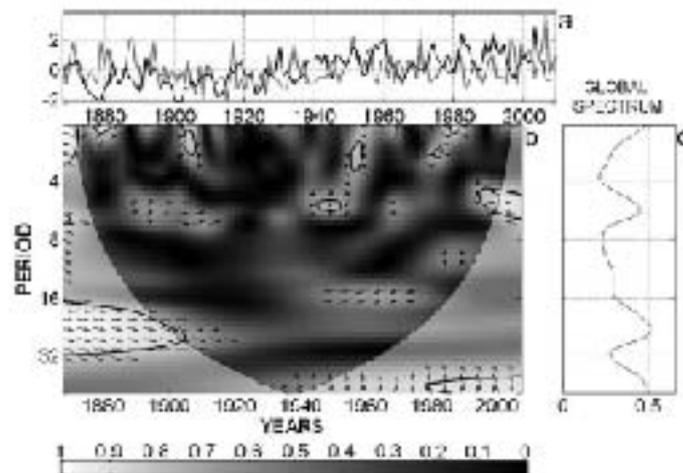
A lo largo de estas épocas la actividad geomagnética se incrementa durante la parte ascendente de un ciclo solar non, lo cual se debe al relativo exceso de eyecciones de masa coronal, pero también, se incrementa durante la fase descendente del ciclo solar par debido a los campos magnéticos poloidales, los cuales son relativamente intensos en los hoyos coronales que producen las corrientes co-rotantes de alta velocidad.

Aun más, se encontró que para huracanes y rayos cósmicos los coeficientes de correlación más altos, sin importar su significancia, ocurren durante las épocas tipo 1 para el Atlántico y durante épocas tipo 2 en el Pacífico. También, para las épocas tipo 2 los huracanes en el Atlántico se anti-correlacionan con el Dst, mientras los huracanes en el Pacífico, se correlacionan. Diversos autores han especulado que los diferentes comportamientos pueden ser causados por la diferencia en la ciclogénesis y el efecto de los fenómenos meteorológicos de gran escala.



**Figura 4.3:** Análisis de coherencia de la series de tiempo de huracanes y Dst.(a) Serie de tiempo de huracanes en el océano Atlántico (línea gris) y serie de tiempo e Dst (línea negra); (b) Espectro de coherencia; (c) espectro global de la coherencia; (d) serie de tiempo de huracanes en el océano Pacífico (línea gris) y serie de tiempo e Dst (línea negra); (e) espectro de coherencia y (f) espectro global de la coherencia. El nivel de significancia estadística se encuentra en escala de grises. Aparece en la parte inferior de los espectros. El nivel de confianza del 95 % se encuentra dentro de los contornos encerrados en la línea gruesa negra o dentro del COI. Las flechas horizontales corresponden a una situación de fase si su dirección apunta a la derecha o anti-fase si su dirección apunta a la izquierda; las flechas verticales hacia arriba o hacia abajo corresponden a una situación de fuera de fase, indicando el retraso entre las dos variables.

Se concluye que existe un ciclo de 22 años en la actividad de huracanes y una fuerte correlación entre huracanes y la actividad geomagnética que ocurre sólo durante ciertas etapas del ciclo de actividad solar.



**Figura 4.4:** Análisis de coherencia de la series de tiempo de huracanes y aa. (a) Serie de tiempo de huracanes en el océano Atlántico (línea gris) y serie de tiempo de aa (línea negra); (b) Espectro de coherencia; (c) espectro global de la coherencia. El nivel de significancia estadística se encuentra en escala de grises. Aparece en la parte inferior de los espectros. El nivel de confianza del 95 % se encuentra dentro de los contornos encerrados en la línea gruesa negra o dentro del COI. Las condiciones de las flechas son las mismas que en la Figura 4.3.

## Capítulo 5

# Conclusiones y Trabajo Futuro

Los CT, fenómenos climáticos importantes no solo por su influencia en la circulación global, sino por sus efectos sociales y económicos, son el tema central de esta investigación, en cuanto a su relación con la actividad solar. Los principales resultados de este trabajo se pueden resumir como sigue:

- Después de analizar registros históricos de posibles CT que tocaron tierra en las CPM, entre 1536 y 1948, se identificaron 85 CT, construyendo un catálogo que no se había realizado anteriormente para el PTO. El catálogo permite conocer la presencia de estos eventos y su impacto en la sociedad de esos años, debido a su vulnerabilidad.
- Los estudios de los últimos años muestran que el PTO es una región muy activa en la producción de CT, el catálogo que se generó en este trabajo coincide con estos estudios, incluso en cuanto a la trayectoria, ya que las poblaciones que registraron mayor número de eventos, son las mismas que los que se registran en la actualidad: Baja California Sur y Sinaloa.
- La información del catálogo de CTTT, es útil para estudiar la probabilidad de que un CT llegue a las CPM en cada temporada.
- El análisis espectral aplicado a la serie de tiempo obtenida del catálogo, indica que existe una periodicidad de 11 años, lo cual es consistente con los resultados del análisis espectral aplicado a las series de datos instrumentales de CT en el océano Atlántico y el PTO.
- Es necesario considerar que esta serie de tiempo al solo mostrar CT que tocaron tierra tanto en los datos históricos como instrumentales, no representa toda la actividad de CT en el PTO.
- Dado que la periodicidad de 11 años coincide con uno de los ciclos más evidentes de actividad solar, utilizando el método de épocas superpuestas, fue posible establecer una relación entre los CT y la actividad solar. Esto se logró a través de la correlación entre el índice Dst y el número de CT en el lapso de tiempo donde un ciclo solar par descende y el non asciende, lo cual se repite cada 22 años, estableciendo un ciclo de 22 años para la

formación de CT, que además también fue identificado por el análisis espectral en la serie de CT del Atlántico.

- Esta periodicidad de 22 años, no fue identificada en el análisis espectral realizado a la serie histórica del PTO, lo cual puede deberse a que los datos históricos no tienen la densidad suficiente para mostrar todas las frecuencias que puede presentar el fenómeno.

Esta investigación representa un aporte en el tema de las relaciones Sol-Clima, por lo que aun queda mucho trabajo por hacer.

En el capítulo 3 acerca de la identificación de los CT que tocaron tierra (CTTT), para lo cual se realizó una visita a los archivos históricos de estados costeros del Pacífico mexicano, se vio la necesidad de realizar un estudio exhaustivo en el que se pueda acceder también a datos instrumentales de precipitación, presión, temperatura y velocidad del viento, previos a 1949, así como de la información potencial que podría ser encontrada en el Archivo General de Indias, para poder identificar un mayor número de CT.

En este trabajo, la información instrumental permitirían tener una idea más precisa sobre la categoría del CT, ya que, como se mencionó, que los 119 eventos seleccionados que ocurrieron cerca de la costa dentro de la temporada de CT, debido al tipo de daños reportados de acuerdo a la escala Saffir-Simpson, podrían ser catalogados al menos como huracanes categoría 1, sin embargo sería posible detectarse una categoría mayor si se cuenta con los datos de presión y velocidad del viento. Por otro lado, también sería de gran utilidad, poder conocer con mayor detalle la vulnerabilidad de cada región en la época que se reportó el evento, ya que como es natural, los materiales y estilos de construcción han cambiado mucho con el tiempo y aun realizando una investigación detallada, es imposible que se hayan registrado todos los CTTT, ya que solo se están tomando en cuenta los que llegaron a zonas pobladas, siendo la única forma en que pudieron ser registrados. Sin embargo, aun con esta limitante, los resultados obtenidos, son un parámetro para estudiar la actividad de los CTTT.

Se sugiere también que el estudio sea comparado con datos de CTTT en las costas del Atlántico y del Pacífico Occidental.

De los resultados presentados en el capítulo 4, en los cuales, utilizando el método de épocas superpuestas para investigar la naturaleza de este ciclo de ocurrencia de huracanes de 22 años, y el hecho de encontrar que las correlaciones/anti-correlaciones más altas son para los huracanes en el Atlántico y el Pacífico con el índice de actividad geomagnética Dst a lo largo de épocas tipo 2, ha motivado a continuar el análisis. Evaluando las condiciones pre-ambientales a la ocurrencia del CT y la actividad geomagnética, utilizando series de tiempo de algunas de las variables atmosféricas que tienen relación con la ciclogénesis tropical como son la vorticidad potencial, la cantidad de energía convectiva disponible y la cizalla (ver sección 3.3) para comparar con series de tiempo del índice Dst, se podría encontrar el posible mecanismo físico que relaciona a los CT y la actividad geomagnética.

## Capítulo 6

# Trabajo a Futuro

La presente investigación es un pequeño aporte en el tema de la relaciones Sol-Clima, por lo que aun queda mucho trabajo por hacer.

En el capítulo 3 se abordó el tema de la identificación de los CT que tocaron tierra, para lo cual se realizó una visita a los archivos historicos de estados costeros del Pacífico mexicano. Sin embargo, aun es necesario un estudio exhaustivo en el que se pueda acceder también a datos instrumentales de precipitación, presión, temperatura y velocidad del viento, previos a 1949, así como de la información potencial que podría ser encontrada en el Archivo General de Indias, para poder identificar un mayor número de CT.

Los datos instrumentales permitirían tener una idea más precisa sobre la categoría del CT, ya que como se mencionó, que los 119 eventos seleccionados que ocurrieron cerca de la costa dentro de la temporada de CT, debido el tipo de daños reportados, de acuerdo a la escala Saffir-Simpson, podrían ser catalogados al menos como huracanes categoría 1, sin embargo sería posible detectarse una categoría mayor si se cuenta con los datos de presión y velocidad del viento. Por otro lado, también sería de gran utilidad, poder conocer con mayor detalle la vulnerabilidad de cada región en la época que se reportó el evento, ya que como es natural, los materiales y estilos de construcción han cambiado mucho con el tiempo.

De los resultados presentados en el capítulo 4, en los cuales utilizando el método de epocas superpuestas para investigar la naturaleza de este ciclo de ocurrencia de huracanes de 22 años, las correlaciones/anti-correlaciones más altas son para el Atlántico y el Pacífico con el índice de actividad geomagnética Dst a lo largo de epocas tipo 2, se ha dado pie a continuar el análisis, evaluando las condiciones pre-ambientales a la ocurrencia del CT y la actividad geomagnética, utilizando series de tiempo de algunas de las variables atmosféricas que tienen relación con la ciclo genesis tropical como son la vorticidad potencial, la cantidad de energía convectiva disponible y la cizalla (ver sección 3.3) con series de tiempo del índice Dst, de manera que se pueda encontrar el posible mecanismo físico que relaciona a los CT y la actividad geomagnética.

# Agradecimientos

La investigación del Capítulo 3 fue realizada gracias al apoyo de CONACyT, beca F282795. Gracias también a Adrian García de la Crónica de Culiacán, Sr. Rogers y Rosario Heras del Archivo Histórico de Sinaloa, Noé Gutiérrez y Martín Sánchez en la UNICACH, Luis Rochin y todo el personal del Archivo Histórico “Pablo L. Martínez” de la Paz, B.C., y Alberto Hernández del Servicio Meteorológico Nacional, por su amable ayuda durante la consulta de los archivos y por la información proporcionada.

## Apéndice A

# Clasificación Saffir-Simpson

La clasificación de los CT se basa en la velocidad sostenida de los vientos. Se le conoce como depresión tropical al CT cuyos vientos sostenidos alcanzan hasta 62 km/h. Cuando los vientos tienen un rango de velocidades entre 63 y 118 km/h, el CT se conoce como tormenta tropical y cuando se sobrepasan los 119 km/h se conoce como huracán (en América) o tifón (en Asia) (<http://www.srh.noaa.gov/srh/jetstream/tropics/tc.htm>).

A su vez, los huracanes están clasificados por la velocidad de los vientos sostenidos y los daños potenciales asociados de acuerdo a la escala Saffir-Simpson en 5 categorías.

### A.1. Categoría 1

Tiene un rango de vientos de 119-153 km/h y los daños relacionados a esta categoría son a personas y animales, debido a los objetos y escombros que lleva el viento tales como construcciones sin un anclaje apropiado, terrazas, bardas débiles, techos, vidrios de las ventanas, señalamientos, vallas, marquesinas y árboles con raíz poco profunda (NOAA<sup>1</sup>).

Como ejemplo de un huracán de esta categoría esta la tormenta tropical Stan, que se convirtió en huracán categoría 1 el 4 de octubre de 2005 y tocó tierra en las costas de Veracruz. Se calcula que causó pérdidas de más de 23 millones de pesos, ya que las lluvias afectaron otros estados, con un enorme incremento de los ríos provocando deslaves e inundaciones, decenas de miles de viviendas fueron afectadas y se registró la muerte de 98 personas (CENAPRED<sup>2</sup>, BBC news, Weather Unysis).

### A.2. Categoría 2

La categoría 2 tiene un rango de vientos sostenidos de 154-177 km/h. Los vientos son extremadamente peligrosos y pueden causar un daño más extenso. Existe un riesgo sustancial de lesiones o muerte en personas y animales por los escombros llevados por el viento, así como la ruptura de ventanas que no estén protegidas. Las construcciones sin anclaje apropiado tienen

---

<sup>1</sup>Administración Nacional Oceánica y Atmosférica, NOAA por sus siglas en inglés.

<sup>2</sup>Centro Nacional de Prevención de Desastres.

mayor riesgo de ser destruidas. Aumenta el riesgo de que los techos sean removidos en estructuras no solo débiles sino también en las bien construidas. Algunas paredes sin el refuerzo adecuado pueden caer. Los señalamientos, vallas y marquesinas tienen mayor probabilidad de ser destruidas. El número de árboles arrancados de raíz aumenta bloqueando los caminos. Puede haber una pérdida casi total de los servicios eléctricos. El agua potable puede ser escasa conforme los sistemas de filtración presenten fallas (NOAA).

Un ejemplo de este tipo de huracán fue Alex, que el 1 de julio de 2010, subió de categoría 1 a 2 tocando las costas de Tamaulipas. Los estados más afectados fueron Nuevo León y Tamaulipas con cerca de 4 000 personas damnificadas principalmente por las inundaciones. En Tamaulipas se reportaron más de 100 árboles y postes caídos. (NHC <sup>3</sup>, CNN<sup>4</sup>, Diario Milenio, El Diario de Victoria).

### **A.3. Categoría 3**

En la categoría 3, los vientos sostenidos van de 178-209 km/h y su daños pueden ser devastadores. Existe un alto riesgo de lesiones o muerte en personas y animales por los escombros llevados por el viento, así como la ruptura de ventanas que no estén protegidas. Prácticamente cualquier construcción sin anclaje apropiado antigua tiene mayor riesgo de ser destruida, las de construcción más reciente pueden presentar daños muy severos, con fallas en los techos y colapso de paredes. Existe un mayor riesgo de que los techos sean removidos en estructuras no solo débiles sino también en las bien construidas. Numerosas ventanas de edificios altos pueden ser llevadas por el viento. Las paredes sin el refuerzo adecuado colapsan. Los señalamientos, vallas y marquesinas tienen mayor probabilidad de ser destruidos. Gran número de árboles son arrancados de raíz bloqueando los caminos. Los servicios de electricidad y agua potable pueden no estar disponibles por varios días o algunas semanas después de la tormenta (NOAA).

El huracán Lane, es un ejemplo de categoría 3 que tocó tierra en las costas de Sinaloa, en la población del Dorado, el 16 de septiembre de 2006 con vientos de 200 km/h. Tan solo en la ciudad de Mazatlán, quedaron afectadas 4 800 familias. Entre los daños ocasionados, hubo árboles, torres de electricidad y señalamientos derribados, el suministro de agua potable y electricidad quedaron interrumpidos, carreteras y puentes dañados. Se registraron 4 personas muertas. El cálculo de los daños fue de aproximadamente 720 millones de pesos (SMN<sup>5</sup>, Weather Unisys, Reuters, Go-bierno de Sinaloa).

### **A.4. Categoría 4**

En la categoría 4, los vientos sostenidos van de 210-249 km/h y su daños pueden llegar a ser catastróficos. Existe un muy alto riesgo de lesiones o muerte en personas y animales por los escombros llevados por el viento, así como la ruptura de ventanas que no estén protegidas. Prácticamente cualquier construcción antigua sin anclaje apropiado es destruida, así como las de

---

<sup>3</sup>National Hurricane Center (Centro Nacional de Huracanes de Estados Unidos).

<sup>4</sup>CNN Noticias.

<sup>5</sup>Servicio Meteorológico Nacional Mexicano.

construcción más reciente. En casas bien construidas se pueden sufrir daños extensos en techos paredes, puertas y ventanas. Mayores daños estructurales en edificios de apartamentos. La mayoría de las paredes sin el refuerzo adecuado colapsan. Prácticamente todos los señalamientos, vallas y marquesinas son destruidos. Los árboles y los postes de luz son arrancados, bloqueando los caminos aislando varias áreas. Los servicios de electricidad y agua potable pueden no estar disponibles por varias semanas después de la tormenta. La mayor parte del área queda inhabitable por semanas o meses.

El 25 de octubre de 2002, el huracán Kena, tocó tierra cerca de la población de San Blas, Nayarit, con categoría 4 y vientos de 230 km/h. Tres personas fallecieron, miles de viviendas se perdieron. En San Blas solo el 5 % de las viviendas quedaron sin sufrir daños. En Puerto Vallarta, la marea de tormenta provocó los mayores daños principalmente en hoteles. Las cosechas de tabaco, plátano y tomate fueron completamente destruidas. (SMN, Weather Unisys, NCDC/NOAA, Cruz Roja).

## **A.5. Categoría 5**

Para la categoría 5, los vientos sostenidos son mayores a 250 km/h, produciendo daños catastróficos. Existe un muy alto riesgo de lesiones o muerte en personas y animales por los escombros llevados por el viento aun dentro las casas, así como la ruptura de ventanas que no estén protegidas. Destrucción prácticamente total de las construcciones sin anclaje apropiado ya sean antiguas o recientes, así como casas de armazón. Daños extensos en casas bien construidas en techos, paredes, puertas y ventanas. Mayores daños estructurales en edificios de apartamentos. Caída de la mayoría de las paredes sin el refuerzo adecuado colapsando las construcciones. Un alto porcentaje de construcciones industriales son destruidas. Prácticamente todos los señalamientos, vallas y marquesinas son destruidos. La mayoría de los árboles son arrancados o quebrados y los postes de luz son derribados bloqueando los caminos y aislando varias áreas. Los servicios de electricidad y agua potable pueden no estar disponibles por varias semanas después de la tormenta. La mayor parte del área queda inhabitable por semanas o meses.

El 14 de septiembre de 1988, el huracán Gilbert de categoría 5 tocó tierra en la costa de Quintana Roo, sobre la isla de Cozumel con vientos de 257 km/h. No se había registrado un huracán de categoría 5 que tocara tierra en el Atlántico desde 1969. A diferencia de los otros ejemplos que rápidamente se debilitan a tormenta tropical al tocar tierra, Gilbert siguió su recorrido hacia el Golfo de México como categoría 3 y volvió a tocar tierra en Tamaulipas con categoría 4. Se generaron lluvias de 310 mm en 24 horas. El número de muertos fue de 318, de éstos, 255 ocurrieron en México. La selva de la Península de Yucatán fue prácticamente destruida, y hubo extensos daños en zonas urbanas. Los daños se estiman que fueron alrededor de 9 000 millones de pesos. Las costas y los recursos marinos, han requerido de varios años para recuperarse (Weather Unisys, NCEP/NOAA <http://www.hpc.ncep.noaa.gov/tropical/rain/gilbert1988.html>, <http://www.nhc.noaa.gov/sshws.shtml>, <http://www.nws.noaa.gov/>)(Lawrence & Gross, 1989; Meyer-Arendt, 1991).

# Bibliografía

- Allaby, M. 2003. *Hurricanes, Revised Edition*. Facts on File.
- Allaby, M. 2007. *Encyclopedia of Weather and Climate, Revised Edition*. Facts on File.
- Amador, J. A., Alfaro, Eric J., Lizano, Omar G., & Magaña, Victor O. 2006. Atmospheric forcing of the eastern tropical Pacific: A review. *Progress in Oceanography*, **69**, 101–142.
- AMS. 2000. *Glossary of Meteorology*. Allen Press.
- Berumen, M. 2003. *Geografía Económica de Oaxaca*.
- Bicknell, P. J. 1968. Did Anaxagoras Observe a Sunspot in 467 B. C.? *ISIS*, **59**, 87–90.
- Bothmer, V., & Daglis, I. A. 2007. *Space Weather - Physics and Effects*. Springer-Praxis.
- Calisesi, Y., Bonnet, R. M., Gray, L., Langen, J., & Lockwood, M. 2006. *Solar Variability and Planetary Climates*. Springer.
- Camp, C. D., & Tung, K.K. 2007. Surface warming by the solar cycle as revealed by the composite mean difference projection. *G. Res. Lett.*, **34**, L14703.
- Clavijero, F. 1852. *Historia de la antigua o Baja California*. Juan R. Navarro.
- Cliver, E. W., Boriakoff, V., & Bounar, K.H. 1996. The 22-year cycle of geomagnetic and solar wind activity. *J. of Geophys. Res.*, **101**, 27091–27109.
- Cook, E.R., Meko, D.M., & Stockton, C.W. 1997. A new assessment of possible solar and lunar forcing of bidecadal drought rhythm in the western United States. *J. Climate*, **10**, 1343–1356.
- Crooks, S. A., & Gray, L. J. 2005. Characterization of the 11-Year Solar Signal Using a Multiple Regression Analysis of ERA-40 Dataset. *J. Climate*, **18**, 996–1015.
- DeMaria, M., Balk, J.-J., & Kaplan, J. 1993. Upper-level eddy angular momentum fluxes and tropical cyclone intensity changes. *J. Atmos. Sci.*, **50**, 1133–1147.
- Demetrescu, C., & Dobrica, U. 2007. Signature of the hale and Gleissberg solar cycles in the geomagnetic activity. *J. Geophys. Res.*, **113**.

- Dobrica, U., Demetrescu, C., Boroneant, C., & Maris, G. 2008. Solar and geomagnetic activity effects on climate at regional and global scales: case study- Romania. *J. Atm. and Solar-Terr. Phys.*
- Echer, E., Gonzalez, W.D., Gonzalez, A.L.C., Prestes, A., Vieira, L.E.A., DalLago, A., & Guarnieri, F.L. and Schuch, N.J. 2004. Long-term correlation between solar and geomagnetic activity. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.*, **66**, 1019–1025.
- Elsner, J. B. 1999. *Hurricanes of the North Atlantic*. Oxford University Press.
- Elsner, J. B., & Kavlakov, S.P. 2001. Hurricane intensity changes associated with geomagnetic variation. *Atm. Science Lett.*
- Emanuel, K. 2003. Tropical Cyclones. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, **31**, 75–104.
- Englehart, P. J., & Douglas, A. V. 2001. The role of eastern North Pacific tropical storms in the rainfall climatology of western Mexico. *International Journal of Climatology*, **21**, 1357–1370.
- Englehart, P.J., Lewis, M.D., & Douglas, A.V. 2008. Defining the frequency of near-shore tropical cyclone activity in the eastern North Pacific from historical surface observations (1921?-2005). *Geophysical Research Letters*, **35**, 1–4. L03706.
- Erlykin, A. D., Sloan, T., & Wolfendale, A. W. 2009. Solar activity and the mean global temperature. *Environ. Res. Lett.*, **4**, 6pp.
- Escobar, A. 2004. *Desastres Agrícolas en México. Catálogo Histórico II. Siglo XIX (1822-1900)*. Vol. 2. Fondo de Cultura Económica.
- Fröhlich, C. 2000. Observations of irradiance variations. *Space. Sci. Rev.*, **94**, 15–24.
- Fuentes, O.A., & Vázquez, M.T. 1997. *Probabilidad de presentación de ciclones tropicales en México*. Cuaderno de Investigación, vol. 42. CENAPRED.
- Gallego, D., García-Herrera, R., Calvo, N., & Ribera, P. 2007. A new meteorological record for Cadiz (Spain) 1806 ?- 1852: Implications for climatic reconstructions. *J. Geophys. Res.*, **112**, 1–9. D12108, doi:10.1029/2007JD008517.
- García-Acosta, V., Pérez-Zevallos, J. M., & del Villar, A. Molina. 2003. *Desastres Agrícolas en México, Catálogo Histórico*. Vol. 1. Fondo de Culura Económica.
- García-Herrera, R., Gimeno, L., Ribera, P., & Hernández, E. 2005. New records of Atlantic hurricanes from Spanish documentary sources. *J. Geophys. Res.*, 1–7.
- García-Herrera, Ricardo, Gimeno, Luis, Ribera, Pedro, Hernández, Emiliano, González, Ester, & Fernández, Guadalupe. 2007. Identification of Caribbean basin hurricanes from Spanish documentary sources. *Climatic Change*, **83**, 55–85. 10.1007/s10584-006-9124-4.

- García-Oliva, F., Excurra, E., & Galicia, L. 1991. Pattern of Rainfall Distribution in the Central Pacific Coast of Mexico. *Geografiska Annaler*, **73**(3/4), 179–186.
- Gilman, D.L., Fuglister, E.J., & Mitchell, J.M. 1963. On the power spectrum of Red Noise. *J. Atmos. Sci.*, **20**, 182–184.
- Goldenberg, S. B., Landsea, C.W., Neumann, A.M. Mestas-Nu & Gray, W.M. 2001. The recent increase in Atlantic hurricane activity: causes and implications. *Science*, **293**, 474–479.
- Gonzalez, W. D., Joselyn, J. A., Kamide, Y., Kroehl, H. W., Rostoker, G., Tsurutani, B. T., & Vasyliunas, V. M. 1994. What is a geomagnetic storm? *J. Geophys. Res.*, **99**(A4), 5771–5792.
- Gray, W. M. 1968. Global view of the origin of tropical disturbances and storms. *Mon. Wea. Rev.*, **96**, 669–700.
- Gray, W. M. 1993. *Seasonal forecasting*. In: Holland, G.J., (Ed.), *Global guide to tropical cyclone forecasting*. Bureau of Meteorology Research Centre.
- Grinsted, A., Moore, J., & Jevrejeva, S. 2004. Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series, Non linear Process. *Geophys.*, **11**, 561–566.
- Hanslmeier, A. 2007. *The Sun and Space Weather*. Springer.
- Hargreaves, J. K. 1992. *The Solar-Terrestrial Environment*. Cambridge University Press.
- Hodges, Robert E., & Elsner, James B. 2010. A Statistical Analysis of the Frequency of United States and Eastern North Pacific Hurricanes Related to Solar Activity. *Pages 121–136 of: Elsner, James B. B., Hodges, Robert E. E., Malmstadt, Jill C. C., & Scheitlin, Kelsey N. N. (eds), Hurricanes and Climate Change*. Springer Netherlands.
- Hoyt, D. V., & Schatten, K. H. 1997. *The Role of the Sun in Climate Change*. Oxford University Press.
- Ivanov, K. G. 2006. Generation of the Katrina hurricane during the geomagnetic extrastorm at crossing of the heliospheric current sheet: Is it an accidental coincidence or physical essence? *Geom. and Aeron.*, **46**, 609–615.
- Jauregui, E. 2003. Climatology of land falling hurricanes and tropical storms in Mexico. *Atmosfera*, **4**, 193–204.
- Kane, R. P. 2006. Spectral characteristics of Atlantic seasonal storm frequency. *J. of India Meteor. Dept. (MAUSAM)*, **57**, 597–608.
- Kavilakov, S. 2005. Global cosmic ray intensity changes, solar activity variations and geomagnetics as North Atlantic hurricane precursors. *Int. J. Modern Phys.*, **20**, 6699–6701.
- Kavilakov, S., Pérez-Peraza, J., & Elsner, J.B. 2008. A statistical link between tropical cyclone intensification and major geomagnetic disturbances. *Geofisica Internacional*, **47**, 207–213.

- Kessler, W. S. 2006. The circulation of the eastern tropical Pacific: A review. *Progress in Oceanography*, **69**, 181–217.
- Kodera, K., Hori, M. E., Yukimoto, S., & Sigmond, Michael. 2008. Solar modulation of the Northern Hemisphere winter trends and its implications with increasing CO<sub>2</sub>. *Geophys. Res. Lett.*, **35**, L03704.
- Kota, J., & Jokipii, J.R. 1983. Effects of drifts on the transport of cosmic rays, VI. A three dimensional model including diffusion. *Astrophys. J.*, **265**, 573–581.
- Landsea, C. W. 1993. A climatology of intense (or major) Atlantic hurricanes. *Mon. Weather Rev.*, **121**, 1703–1713.
- Lang, K. R. 2009. *The Sun from Space*. Springer.
- Latorre, C., & Penilla, L. 1988. Influencia de los ciclones en la precipitación de Baja California Sur. *Atmosfera*, **1**, 99–112.
- Lawrence, M. B., & Gross, J. M. 1989. Annual Summaries: Atlantic Hurricane Season of 1988. *Mon. Weath. Rev.*, **117**, 2248–2259.
- Lean, J. 2000. Evolution of the Sun's spectral irradiance since the Maunder minimum. *Geophys. Res. Lett.*, **27**, 2425–2428.
- Longshore, D. 2008. *Encyclopedia of Hurricanes, Typhoons, and Cyclones, New Edition*. Facts on File.
- Ludlum, D. 1963. *Early American Hurricanes 1492-1870*. American Meteorology Society.
- Mayaud, P. N. 1972. The aa indices: A 100 year series characterizing the magnetic activity. *J. Geophys. Res.*, **77**, 6870–6874.
- Mayaud, P. N. 1980. *Derivation, meaning and use of Geomagnetic Indices, Geophys. Monogr. Ser.* Vol. 22. AGU.
- Mendoza, B., Jáuregui, E., Díaz-Sandoval, R., García-Acosta, V., Velasco, V., & Cordero, G. 2005. Historical droughts in central Mexico and their relation with El Niño. *J. Appl. Met.*, **44**, 709–716.
- Mendoza, B., Velasco, V., & Jáuregui, E. 2006. A study of historical droughts in south eastern Mexico. *J. Climate*, **19**, 2916–2934.
- Mendoza, B., García-Acosta, V., Velasco, V., Jáuregui, E., & Díaz-Sandoval, R. 2007. Frequency and duration of historical droughts from the 16th to the 19th centuries in the Mexican Maya lands, Yucatan Peninsula. *Climatic Change*, **83**, 151–168.
- Mendoza, Blanca, & Pazos, Marni. 2009. A 22-years hurricane cycle and its relation to geomagnetic activity. *J. Atm. And Solar-terrestrial Phys.*, **71**, 2047–2054.

- Menvielle, M., & Berthelier, A. 1991. The K-derived planetary indices: Description and availability. *Rev. Geophys.*, **29**(3), 415–432.
- Meyer-Arendt, K. J. 1991. Hurricane Gilbert: The Storm of the Century. *GeoJournal*, **23**, 323–325.
- Moldwin, M. 2008. *An Introduction to Space Weather*. Cambridge University Press.
- Mursula, K., Usoskin, I.G., & Kovaltsov, G.A. 2001. Persistent 22-year cycle in sunspot activity: Evidence for a relic solar magnetic field. *Solar Phys.*, **198**, 51–56.
- Nyberg, J., Malmgren, B. A., Winter, A., Jury, M.R., Kilbourne, K. Halimeda, & Quinn, T. M. 2007. Low Atlantic hurricane activity in the 1970s and 1980s compared to the past 270 years. *Nature*, **447**, 698–702.
- Pap, J. M., & (Eds.), P. Fox. 2004. *Solar Variability and Its Effects on Climate*. Vol. 141. Geophysical Monograph Series.
- Pérez-Peraza, J., Kavlakov, S., Velasco, V., Gallegos-Cruz, A., Azpra-Romero, E., Delgado-Delgado, O., & na Cruz, F. Villica2008. Solar, geomagnetic and cosmic ray intensity changes, preceding the cyclone appearances around Mexico. *Adv. Space Res.*, 1601–1613.
- Perez-Peraza, J., V.M., Velasco, & I., Libin. 2011. Influence of Cosmophysical Phenomena and African Dust on Hurricanes Genesis. *Pages 41–76 of: Lupo, Anthony (ed), Reacent Hurricane Research -Climate, Dynamics and Societal Impacts*. inTech.
- Prestes, A., Rigozo, N.R., Echer, E., & Vieira, L.E.A. 2006. Spectral analysis of sunspot number and geomagnetic indices (1868-2001). *J. Atm. Solar-Terr. Phys.*, **68**, 182–190.
- Raspopov, O. M., Dergachev, D.A., & Kolstrom, T. 2004. Hale cyclicity of solar activity and its relation to climate variability. *Sol.Phys.*, **224**, 455–463.
- Rigozo, N. R., Nordemann, D.J., Echer, E., daSilva, H.E., de Souza-Echer, & M.P., Prestes, A. 2007. Solar and climate imprint differences in tree ring width from Brazil and Chile. *J.Atmos.Sol.—Terr.Phys.*, **69**, 449–458.
- Rosenberg, R. L., & Coleman, P.J. 1969. Heliographic latitude dependence of the dominant polarity of the interplanetary magnetic field. *J. Geophys. Res.*, **74**, 5611–5622.
- Roy, I., & Haigh, J. D. 2011. The influence of solar variability and the quasi-biennial oscillation on lower atmospheric temperatures and sea level pressure. *Atmos. Chem. Phys.*, **11**, 11679–11687.
- Russell, C. T., & McPherron, R.L. 1973. Semiannual variation of geomagnetic activity. *J. Geophys. Res.*, **78**, 92–108.
- Salinas-Zavala, C.A., Leyva-Contreras, A., Lluch-Belda, D., & Díaz-Rivera, E. 1990. Distribución geográfica y variabilidad climática de los regimenes pluviométricos en Baja California Sur. *Atmosfera*, **3**, 217–237.

- Sanford, T. B., Black, Peter G., Haustein, James R., Feeney, James W., Forristall, George Z., & Price, James F. 1987. Ocean Response to a Hurricane. Part I: Observations. *J. Phys. Oceanogr.*, **17**, 2065–2083.
- Schrijver, C. J., & Siscoe, G. L. 2010. *Heliophysics, Evolving Solar Activity and the Climates of Space and Earth*. Cambridge University Press.
- Serra, S. 1971. Hurricanes and tropical storms of the west coast of Mexico. *Mon. Weather Rev.*, **99**, 208–302.
- Suess, S. T., & Tsurutani, B. T. 1998. *From the Sun: Auroras, Magnetic storms, solar flares, cosmic rays*. American Geophysical Union.
- Svensmark, H. 2007. Cosmoclimatology: a new theory emerges. *Astron. and Geophys.*, **48**.
- Tinsley, B. A., & Beard, K.V. 1997. Meeting summary. Links between variations in solar activity, atmospheric conductivity, and clouds: an informal workshop. *Bull.Am. Meteor.Soc.*, **78**, 685–687.
- Torrence, Christopher, & Compo, Gilbert P. 1998. A Practical Guide to Wavelet Analysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **79**, 61–78.
- Velasco, V., & Mendoza, B. 2008. Assessing the relationship between solar activity and some large scale climatic phenomena. *Adv. in Space Res.*, **42**, 866–878.
- Villanueva, E. 2002. *Presencia de Huracanes en Baja California Sur, el caso del ciclón Liza*. Universidad Autonoma de Baja California Sur.
- Wallace, J. M., & P.V., Hobbs. 2006. *Atmospheric Science, An introductory Survey*. Elsevier.
- Zirin, H. 1988. *Astrophysics of the Sun*. Cambridge University Press.