



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO

---

---

FACULTAD DE CIENCIAS

ESTUDIO DE LA TENDENCIA SECULAR DE  
LA TEMPERATURA PARA SEIS ESTACIONES  
DISTRIBUIDAS EN LA PENÍNSULA DE YUCATÁN

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

FÍSICO

P R E S E N T A :

ALUMNO

JOSÉ LUIS MEZA SORIA



TUTOR

DRA. BLANCA EMMA MENDOZA ORTEGA

2010



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.

# Agradecimientos

Para mí es un momento muy especial al poder agradecer a todos aquellos que me han brindado su apoyo y comprensión para poder llevar a cabo mi superación académica, a todos los que me han apoyado para seguir adelante en las decisiones que he tomado a lo largo de mi vida, en especial a mis padres que me han alentado a obtener una mejor preparación: a mi madre Evelia Soria García por brindarme todo su apoyo, comprensión y ejemplo al igual que mi padre Ramón Meza Beltrán quien siempre fue un ejemplo a lo largo de toda su vida y estoy seguro que siempre lo será. A mis hermanas y hermano: Aida, Rocío y Ramón con quienes he tenido oportunidad de crecer y compartir tantas experiencias en los buenos y malos momentos, les doy las gracias. A todos mis familiares: abuelos, tíos, primos, sobrinos, a todos ellos gracias.

A la Universidad Nacional Autónoma de México quiero agradecer por haber sido la institución que me ha permitido obtener mi preparación como físico en las instalaciones de la Facultad de Ciencias, a todos los profesores y compañeros con quien tuve oportunidad de convivir. Así como el permitirme el acercamiento a los distintos institutos de prestigio y a los investigadores con los que he tenido oportunidad de convivir que laboran en esta gran casa de estudios. Por último quiero agradecer al Instituto de Geofísica donde llevé a cabo mi servicio social y mi tesis y por supuesto a la Dra. Blanca Emma Mendoza Ortega por su apoyo y comprensión para la realización de este trabajo, así como a los demás integrantes del jurado que participaron en las correcciones del mismo.

## Hoja de Datos del Jurado

- 1.- Datos del alumno  
Meza  
Soria  
José Luis  
56 77 85 34  
Universidad Nacional Autónoma de México  
Facultad de Ciencias  
Físico  
090257386
- 2.- Datos del tutor  
Dra  
Blanca Emma  
Mendoza  
Ortega
- 3.- Datos del sinodal 1  
M en C  
Ignacio  
Campos  
Flores
- 4.- Datos del sinodal 2  
Dr  
Víctor Manuel  
Mendoza  
Castro
- 5.- Datos del sinodal 3  
Dr  
Víctor Manuel  
Velasco  
Herrera
- 6.- Datos del sinodal 4  
Fís  
Margarita  
Sánchez y  
Sánchez
- 7.- Datos del trabajo escrito  
Estudio de la tendencia secular de la temperatura para seis estaciones distribuidas en La  
Península de Yucatán  
48 p  
2010

# Índice

## Agradecimientos

Capítulo 1 – El Sol	1
1.1 El Sol Como Estrella	1
1.1.1 Secuencia Principal	1
1.2 Composición Química del Sol	2
1.3 Estructura Interna del Sol	3
1.3.1 El Núcleo	3
1.3.2 La Zona Radiativa	4
1.3.3 La Zona Convectiva	5
1.4 La Atmósfera Solar	7
1.4.1 Fotosfera	7
1.4.2 Cromosfera	8
1.4.3 Corona	8
1.5 La Actividad Solar	9
1.5.1 Actividad en la Fotosfera	9
1.5.2 Actividad en la Cromosfera y Región de Transición	11
1.5.3 Actividad en la Corona	12
1.6 Causas de la Actividad Solar	13
Capítulo 2 – Atmósfera Terrestre	15
2.1 Estructura Interna de la Tierra	15
2.2 La Atmósfera de la Tierra	17
2.2.1 Estructura Vertical	17
2.3 Relaciones Sol-Tierra	20

2.3.1	La Magnetosfera Terrestre	20
2.3.2	El Sol y el Clima	20
2.3.3	Las Tormentas Geomagnéticas	22
2.3.4	Las Auroras	22

### Capítulo 3 – Estudio de la Tendencia de las Temperaturas

	Mínima, Máxima y Promedio en la Península de Yucatán	24
3.1	Introducción	24
3.2	Datos	24
3.3	Tratamiento	25
3.3.1	Métodos de Interpolación: Algoritmo	26
3.4	Resultados y Discusión	29
3.5	Comparación de las Series de Temperatura y la Actividad Solar	35
3.5.1	Irradiancia total y el clima	38
	Conclusiones	44
	Bibliografía	46

# Capítulo 1

## El Sol

### 1.1 El Sol Como Estrella

El material de este capítulo se obtuvo de la siguiente bibliografía: [4], [10], [11], [12], [13], [17], [26], [27], [29], [31],[32] y [34]. Se ha calculado que el Sol se formó hace 4.6 mil millones de años y que se encuentra en la mitad de su vida desde su formación. La energía que libera se ha incrementado en un 30 o 40%. De acuerdo a la teoría solar moderna, cuando el Sol consume su hidrógeno, el Sol se contrae y su núcleo se vuelve más denso, esta teoría propone que el Sol se vuelve más brillante conforme evoluciona, aumenta su temperatura, a la vez que va aumentando su edad, por otra parte su velocidad de rotación disminuye (Ver Figura 1.1).

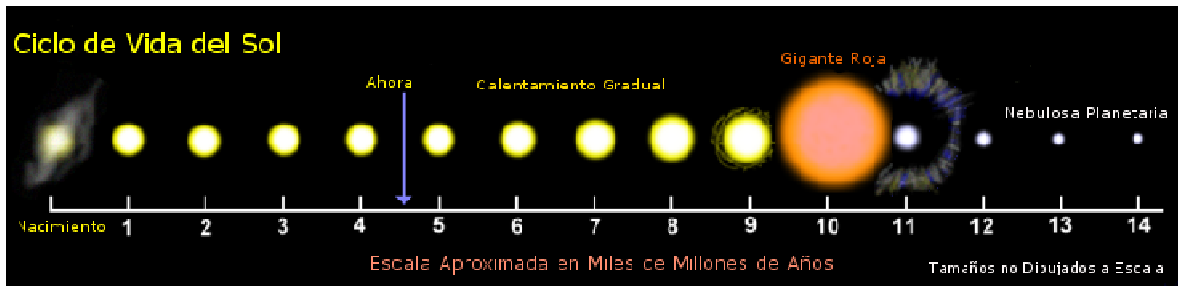


Figura 1.1 Ciclo de vida del Sol y su posición actual en la escala de tiempo

#### 1.1.1 Secuencia Principal

Nuestra estrella es una de tantas conocidas como G2. Su diámetro se calcula que mide  $1.39 \times 10^9$  metros que es 109 veces el diámetro de la Tierra, su masa se estima es de  $1.989 \times 10^{30}$  Kg, representa el 99.97% la masa del sistema solar y tiene una densidad de  $1.4 \text{ Kg/m}^3$ , que es un cuarto del que tiene la Tierra, podemos ver la posición del Sol en el diagrama HR en la Figura 1.2 y los principales datos de interés sobre éste en la Tabla 1. 1

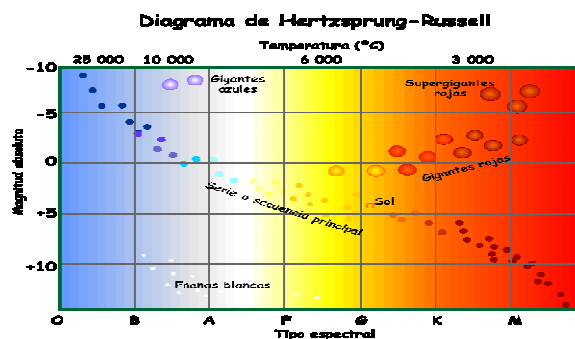


Figura 1.2 Posición del Sol en el diagrama Hertzsprung-Russell

Tabla 1.1

Parámetros principales del Sol

Distancia promedio a la Tierra	1.00 UA ( $1.495979 \times 10^8$ Km)
Distancia máxima a la Tierra	1.0167 UA ( $1.5210 \times 10^8$ Km)
Distancia mínima a la Tierra	0.9833 UA ( $1.4710 \times 10^8$ Km)
Periodo de rotación	25.38 días en el ecuador
Radio	$6.9599 \times 10^5$ Km (109 radios terrestres)
Masa	$1.989 \times 10^{30}$ Kg (333,000 masas terrestres)
Densidad promedio	1.4 g/cm <sup>3</sup>
Velocidad de escape en la superficie	617.7 Km/s
Luminosidad	$3.826 \times 10^{26}$ J/s
Temperatura superficial	5800 K
Temperatura central	$15 \times 10^6$ K
Tipo espectral	G2 V
Magnitud visible aparente	-26.74
Magnitud visible absoluta	4.83

## 1.2 Composición Química del Sol

El Sol está compuesto en su mayor parte por hidrógeno (93.96%), helio (5.9190%) y también se puede encontrar traza de otros elementos más pesados (1%). La proporción que se observa se obtiene por análisis del espectro solar. Para las capas periféricas la cantidad de masa del hidrógeno está entre el 69% y el 75%, la del helio está entre el 25% y el 29% y la de otros elementos es cercana al 2%. La composición química del Sol se observa en la Tabla 1.2

Tabla 1. 2

Composición química del Sol

Elemento	Porcentaje de la composición solar
Hidrógeno	93.96000%
Helio	5.91900%
Oxígeno	0.06483%
Carbón	0.03946%
Nitrógeno	0.00817%
Silicio	0.00423%
Magnesio	0.00376%
Neón	0.00348%
Hierro	0.00301%
Azufre	0.00150%
Aluminio	0.00028%
Calcio	0.00019%
Sodio	0.00019%
Níquel	0.00019%
Argón	0.00009%



Debido a las altas temperaturas en todas las regiones del Sol los elementos que lo componen se encuentran disociados en iones y electrones. A este tipo de mezcla se le conoce como plasma y se presenta en estado sólido o en forma de fluido. Es sensible a la presencia de campos electromagnéticos y es capaz de generar su propio campo.

## 1.3 La Estructura Interna del Sol

Aunque no podemos observar directamente lo que ocurre al interior del Sol, podemos saber que la fusión nuclear es su principal fuente de energía, gracias al empleo de métodos experimentales y modelos matemáticos. Gracias al estudio del Sol es posible describir las principales estructuras que lo componen, las cuales se describen a continuación.

### 1.3.1 El Núcleo

En el corazón del Sol, el núcleo ocupa el volumen de una esfera que tiene un radio de  $2 \times 10^5$  Km, donde 50 a 70% de la masa total del Sol se concentra. También sabemos que existe una pérdida de masa para poder emitir energía, de acuerdo a la bien conocida relación  $E = mc^2$ , en donde la mayor parte de la energía (98%) se libera en forma de fotones.

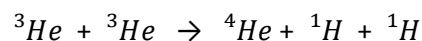
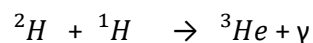
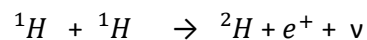
Se cree que en el centro del Sol la concentración de partículas alcanza cerca de  $5 \times 10^{31}$  partículas/ $m^3$ , una masa voluminal de 150 toneladas/ $m^3$ , una presión de  $2.2 \times 10^{11}$  de veces la presión atmosférica y una temperatura de  $15 \times 10^6$  K. También se calcula que ocupa el 0.3 del radio solar. La energía que se produce en el núcleo debe atravesar varias capas antes de poder llegar al espacio.

## Las Reacciones Nucleares Dentro del Sol

La energía del Sol se produce debido a las reacciones nucleares que se llevan a cabo en su núcleo, donde los átomos de hidrógeno (H) se fusionan para crear helio (He). El choque de dos protones de hidrógeno da como resultado la formación de un deuterio (un átomo de hidrógeno pesado que contiene un protón y un neutrón).

La cadena protón-protón es una serie de tres reacciones nucleares que da como resultado un núcleo de helio. Este proceso es eficiente a temperaturas mayores a  $1 \times 10^7$  K. El Sol obtiene el 90% de su energía de esta manera.

Los tres pasos en la cadena protón-protón involucran las siguientes reacciones:



En el primer paso, dos núcleos de hidrógeno (dos protones), se combinan para formar un núcleo de hidrógeno pesado llamado deuterio ( ${}^2\text{H}$ ), emitiendo una partícula llamada positrón ( $e^+$ ), y un neutrino ( $\nu$ ), una partícula subatómica casi sin masa y velocidades cercanas a la velocidad de la luz. En la segunda reacción, el deuterio absorbe otro protón de hidrógeno y con la emisión de un rayo

gamma ( $\gamma$ ), se convierte en un núcleo ligero de helio ( ${}^3\text{He}$ ). Finalmente, dos núcleos ligeros de helio se combinan para formar un núcleo común de helio ( ${}^4\text{He}$ ) y dos núcleos de hidrógeno, los cuales se reincorporan al ciclo protón-protón. El resultado de esta reacción en cadena es la transformación de cuatro núcleos de hidrógeno en un núcleo de helio, más energía. La energía aparece en forma de rayos  $\gamma$ , positrones, así como energía del movimiento de las partículas y los neutrinos.

Los rayos  $\gamma$  son inmediatamente absorbidos por los alrededores antes de viajar una fracción de milímetro. Esto calienta al gas y contribuye a mantener la presión. Los positrones que se producen en la primera reacción, se combinan con electrones libres y ambas partículas se desvanecen, convirtiendo su masa en rayos  $\gamma$ , de esta forma, los positrones también contribuyen a mantener caliente el centro del Sol. Más aún, al producirse nuevos núcleos por la fusión, estos se separan a grandes velocidades, con lo cual, esta energía también aporta un aumento en la temperatura del gas. Mientras que los neutrinos por su parte, casi nunca interactúan con otras partículas y no contribuyen al aumento de temperatura en el interior del Sol, pero al alejarse del Sol a una velocidad muy parecida a la de la luz, se llevan consigo 2% de la energía producida. Podemos observar una representación gráfica de dichos eventos en la Figura 1.3

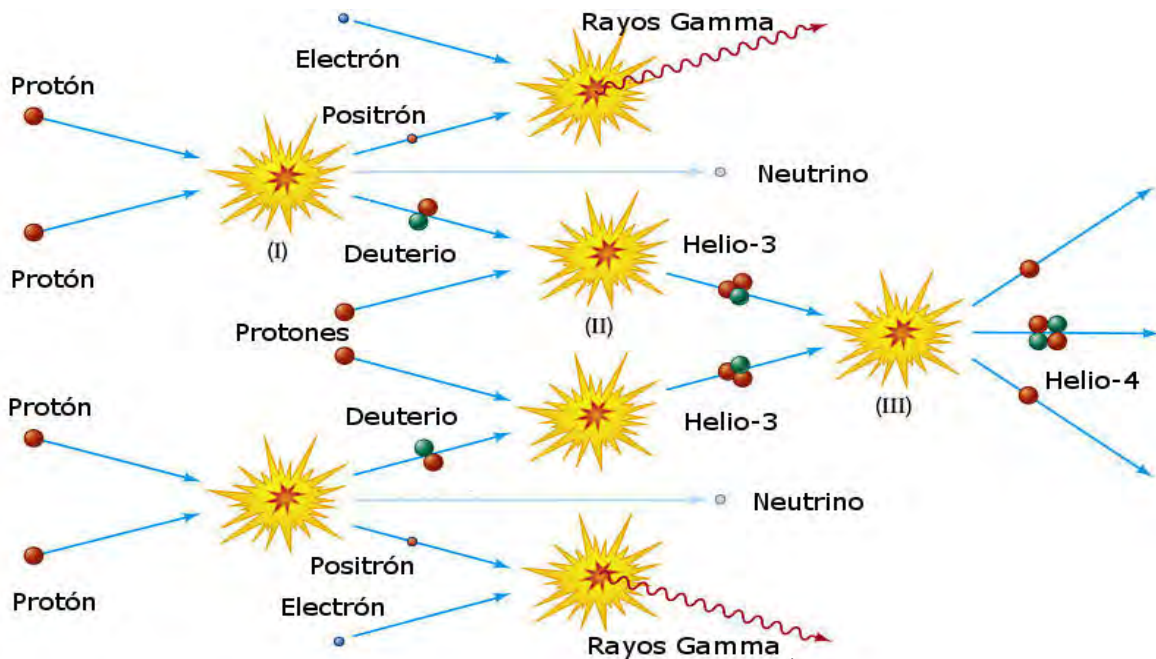


Figura 1.3 Representación de la cadena protón-protón donde se observan tres reacciones

### 1.3.2 La Zona Radiativa

La zona radiativa abarca de 0.3 a 0.7 del radio solar. La concentración de partículas decrece de  $1.4 \times 10^{31}$  a  $1.7 \times 10^{28}$  partículas/ $m^3$  entre la superficie de la zona interna y la superficie de la zona externa. La presión decrece de  $30 \times 10^6$  atmósferas a  $6 \times 10^6$  en la frontera de la zona convectiva y la zona radiativa respectivamente, por su parte, la temperatura decrece de  $8$  a  $1.3 \times 10^6$  K.

Los fotones tardan en atravesar la zona radiativa alrededor de  $10 \times 10^6$  años, lo cual está en contraste con los 2.33 segundos que les tomaría para propagarse a la superficie si no sufriera ninguna absorción o re-emisión en su trayecto. Después de atravesar la zona radiativa, los fotones llegan a la zona convectiva.

### 1.3.3 La Zona Convectiva

La zona convectiva ocupa de 0.7 a 1.0 el radio solar. En la zona convectiva se produce la convección en forma de grandes celdas en las que el material asciende a la superficie visible del Sol, cede su energía se enfría y vuelve a descender. En la parte externa de la zona convectiva la temperatura alcanza aproximadamente 6000 K. Las celdas de convección a simple vista tienen la forma de granos de arroz y se les conoce como gránulos. Estos gránulos dan la sensación de estar observando burbujas en ascenso en una sopa de jitomate hirviendo.

### Gránulos y Súper Gránulos

Llevando a cabo observaciones en fotos de gran resolución y con ayuda de telescopios especiales ha sido posible determinar que los gránulos tienen una forma de estructura irregular de tipo celular (Ver Figura 1.4). Se encuentra que tiene una variedad en el tamaño de los gránulos, se han encontrado algunos que miden 2300 Km. Algunos, los más pequeños de un tamaño de 210 Km y presentan un tamaño medio de 970 Km (en regiones cercanas a un fuerte campo magnético como las manchas solares). También es posible observar que la parte superior de la mayoría de los gránulos muestra variaciones intensas entre todos los gránulos y que la línea oscura intergranular casi desaparece.

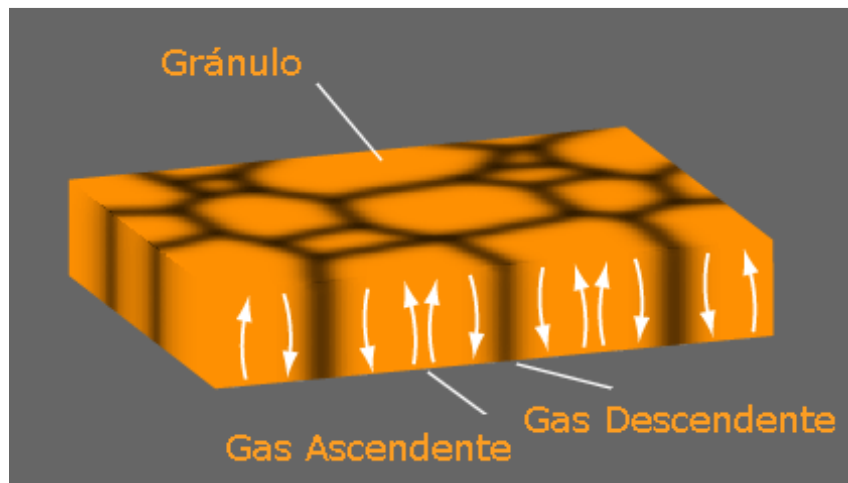


Figura 1.4

Estructura de los gránulos que muestra su forma de tipo celular

Utilizando técnicas espectro heliográficas, en los años 60 Leighton y sus colegas, encontraron células de gran escala que mostraban un movimiento horizontal en una dirección que se aleja del centro, muestran una variación en su diámetro que va de los  $2.0 \times 10^4$  a  $5.4 \times 10^4$  Km y se les conoce como súper gránulos debido a su variación temporal como espacial mayor a la granulación

(Ver Figura 1.5). Se logran apreciar cerca de 2500 celdas en el hemisferio visible y se estima que la distancia media entre los centros es de alrededor de  $3.5 \times 10^4$  Km, algunas celdas muestran una velocidad horizontal pico entre 0.3 y 0.5 Km/s y velocidades de ascenso y descenso del orden de los 0.1 y 0.2 Km/s.

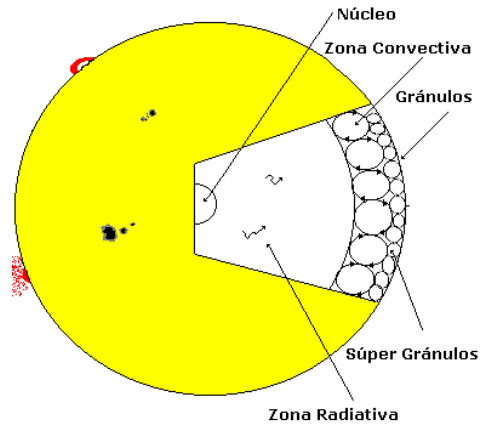


Figura 1.5 Posición de los gránulos y súper gránulos

Una vez que se crearon los fotones  $\gamma$ , estos hacen un recorrido hacia la superficie pasando por la zona radiativa y la zona convectiva. Debido a la densidad de la zona radiativa, el fotón va colisionando durante su trayecto lo cual le hace perder poco a poco su energía, lo que produce un cambio en su espectro de emisión cambiando de rayos  $\gamma$  (0.0001 nm) a rayos X (0.01-10 nm), luego a rayos ultra-violeta (10-400 nm) hasta emerger del Sol en forma de fotones en la región de la luz visible (400-740 nm). Podemos observar las capas internas del Sol en la Figura 1.6

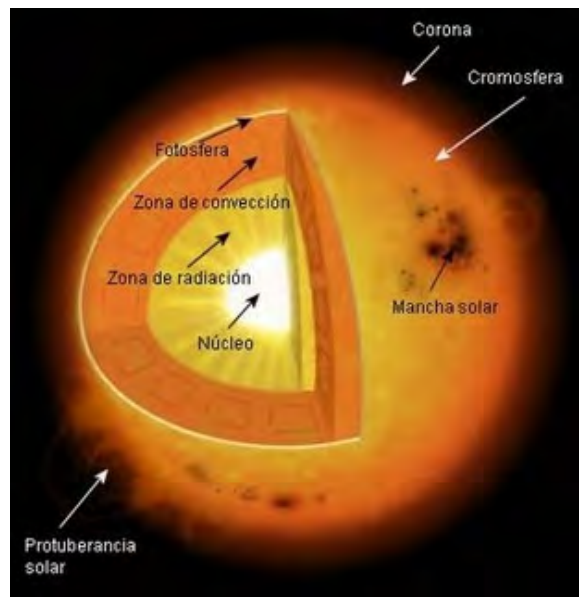


Figura 1.6 Estructura interna del Sol

## 1.4 La Atmósfera Solar

### 1.4.1 Fotosfera

La fotosfera es la superficie del Sol con la que la mayoría de nosotros estamos familiarizados, pues es la fotosfera lo que observamos normalmente al contemplar el Sol. Se calcula que tiene 100 Km de profundidad. Las manchas solares, fáculas así como gránulos que forman la parte superior de las celdas convectivas se observan en la fotosfera.

#### Fáculas

Las fáculas son áreas muy brillantes, usualmente más brillantes que el resto de la fotosfera, sólo se pueden observar en las cercanías de la orilla, donde se contempla un marcado contraste con el reducido brillo de la fotosfera, mientras que las manchas solares hacen parecer al Sol menos brillante, las fáculas lo hacen parecer más brillante. La aparición de las fáculas precede a las manchas solares y por lo regular duran varios ciclos de rotación solar después que la mancha solar ha desaparecido.

En general las fáculas aparecen antes de la formación de las manchas solares y sobreviven después de que las manchas han desaparecido. La región de las fáculas es una región ligeramente más caliente que la zona que la rodea.

Una mancha solar siempre tiene asociada una fácula a pesar que la fácula puede existir aparte de dicha mancha solar. La extensión de la fácula hacia la cromosfera se hace visible en el disco entero al utilizar espectro heliogramas utilizando longitudes de onda del hidrógeno o de vapor de calcio ionizado y cuando las observamos lejos de la orilla (donde el brillo de la fotosfera es menor) se les llama fácula cromosférica o placas (Ver Figura 1.7).

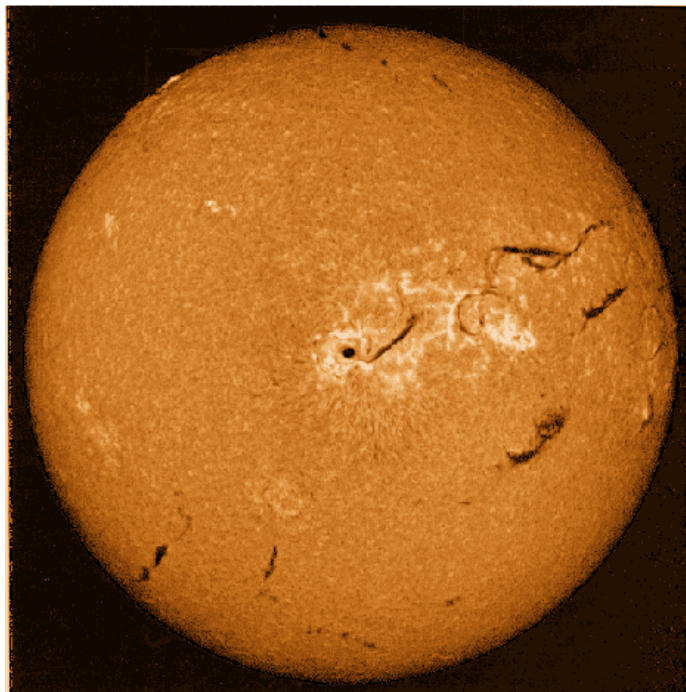


Figura 1.7

Fotografía donde se aprecian las placas

## 1.4.2 Cromosfera

Justo arriba de la fotosfera, se encuentra una capa de aproximadamente 1,500 Km, llamada cromosfera, donde se presenta un aumento de temperatura, incrementándose desde 6,000 K, hasta  $1.2 \times 10^4$  K, lo que representa un aumento de 4 K/Km.

Conforme el disco solar desaparece detrás de la Luna en un eclipse, se puede observar un anillo rojo (de emisión), es la cromosfera o esfera de color. La luz que está siendo emitida justo en la línea espectral  $H\alpha$  (a  $6563 \text{ \AA}$  en la parte roja del espectro), es la encargada de darle a la cromosfera su característico color rubí y por supuesto su nombre.

También hay grandes estructuras que se les conoce como prominencias. En las prominencias los campos magnéticos juegan un papel importante y son estos los que dan la forma de las prominencias. La corona que es donde se encuentran sumergidas las prominencias, es extremadamente rarificada y tiene temperaturas muy altas. Comparada con la corona, una prominencia está muy fría. Estas pueden durar por semanas o más, y su duración depende de los campos magnéticos y algunas pueden alcanzar alturas de varias decenas de miles de kilómetros sobre la superficie solar.

## 1.4.3 Corona

La corona es considerada como la parte más externa de la atmósfera solar y se puede observar durante los eclipses solares, tiene una temperatura extremadamente alta ( $1 \times 10^6$  K). En la Figura 1.8 observamos el perfil de la temperatura solar como función de la altura.

Se propone que el aumento de temperatura se debe a la disipación de ondas magneto-hidrodinámicas y a la aniquilación del campo magnético. Sin embargo se sigue trabajando intensamente en este problema.

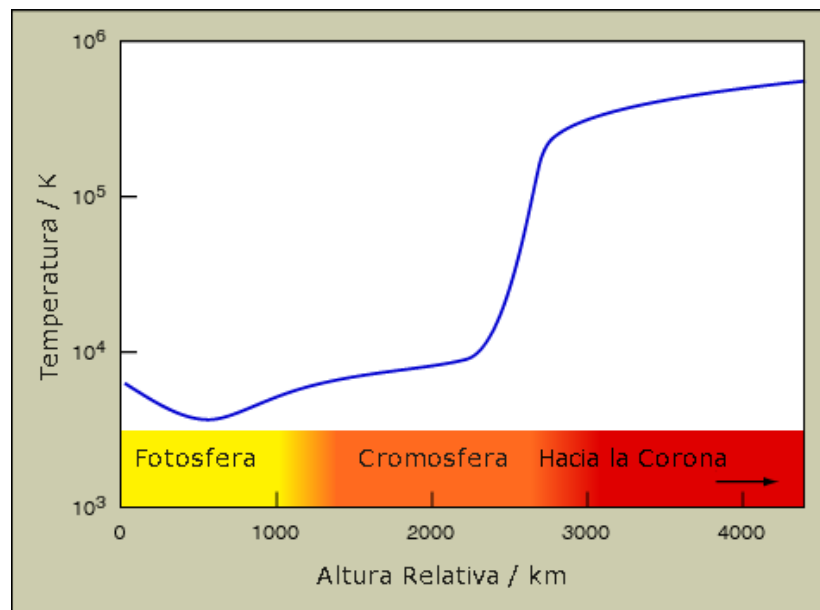


Figura 1.8 Gráfica que muestra el cambio de la temperatura en función de la altura en la atmósfera solar

## 1.5 La actividad solar

### 1.5.1 Actividad en la Fotosfera

#### Manchas Solares

En la fotosfera podemos observar claramente zonas oscuras, las cuales conocemos como manchas solares. Dichas manchas se encuentran formadas por una región oscura al centro conocida como Umbra y una región exterior más brillante llamada Penumbra, algunas veces las encontramos agrupadas.

Las manchas aparecen solas y con configuración magnética unipolar, a veces en grupos con configuraciones dipolares. Los tubos de flujo de campo magnético que surgen en regiones tales como las manchas se extienden hacia el resto de la atmósfera solar creando las llamadas regiones activas, por lo cual las manchas solares constituyen los pies de estas regiones.

La latitud promedio en la que se presentan las manchas solares, depende de la fase de la actividad del ciclo solar. Al inicio del ciclo aparecen pocas y por lo general a latitudes cercanas a los 35° N y S. Conforme avanza el ciclo de actividad van apareciendo más y a menores latitudes hasta llegar a los 5° N y S. Su apariencia oscura se debe a que su temperatura es menor (~ de 4000 K), que la de sus alrededores, por lo tanto tienen un brillo menor (la fotosfera alcanza alrededor de 6000 K). Su diámetro puede ser tan grande como  $5 \times 10^4$  Km y el campo magnético dentro de las manchas es de 100 a 5,000 veces mayor al campo de sus alrededores. Una mancha individual pequeña puede durar un día o menos, mientras que las manchas grandes y los grupos pueden estar presentes durante tres o cuatro meses.

El número de manchas solares varía entre un mínimo, un máximo y nuevamente un mínimo aproximadamente cada 11 años. Schwabe al contar las manchas solares encontró que repetidamente aparecían con números máximos en intervalos de aproximadamente 11 años y a esta variación del ciclo de las manchas solares se le conoce como ciclo solar o bien, ciclo de Schwabe. Se ha observado que la duración de los ciclos solares no es constante y que varía entre 9 y 12 años. En la Figura 1.9 se observa la evolución temporal del número de manchas solares desde el año 1750 hasta el 2006.

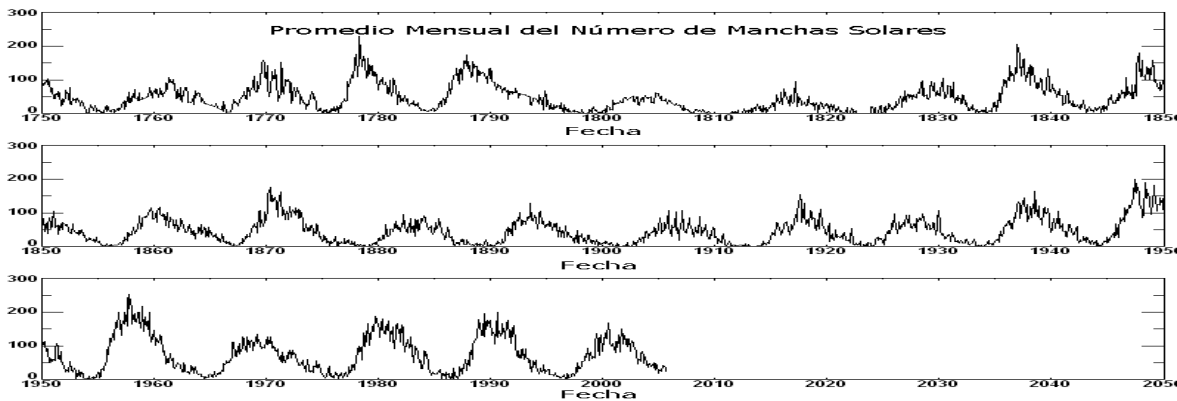


Figura 1.9

Variación temporal del número de manchas solares

En la Figura 1.10 podemos observar la predicción del número de manchas solares para el ciclo 23-24.

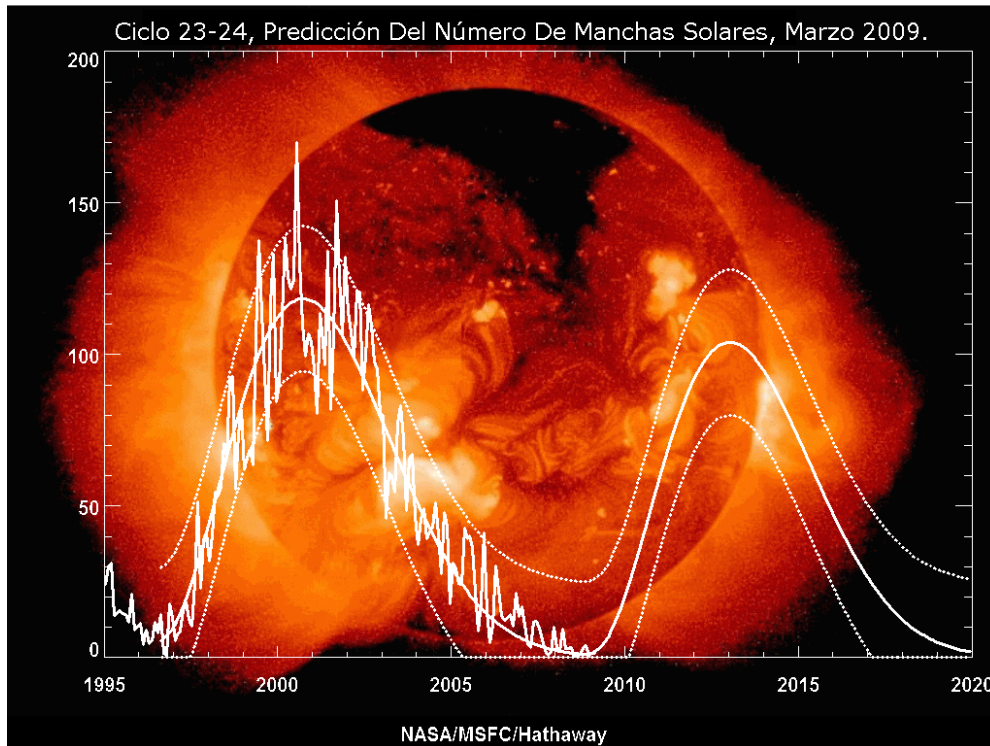


Figura 1.10 Predicción del número de manchas solares, ciclo 23-24

Si graficamos la latitud de la aparición de las manchas solares contra el tiempo, la gráfica toma la forma de las alas de una mariposa, a dicha gráfica se le conoce como diagrama de mariposa de Maunder, en honor a E. Walter Maunder quien fue el primero en publicarlo en 1922. Se puede apreciar en el diagrama de la mariposa que las manchas solares aparecen en latitudes mayores cuando el ciclo de la actividad comienza y van acercándose a las regiones ecuatoriales conforme el ciclo avanza hasta que estos desaparecen en el mínimo de la actividad solar (Ver Figura 1.11).

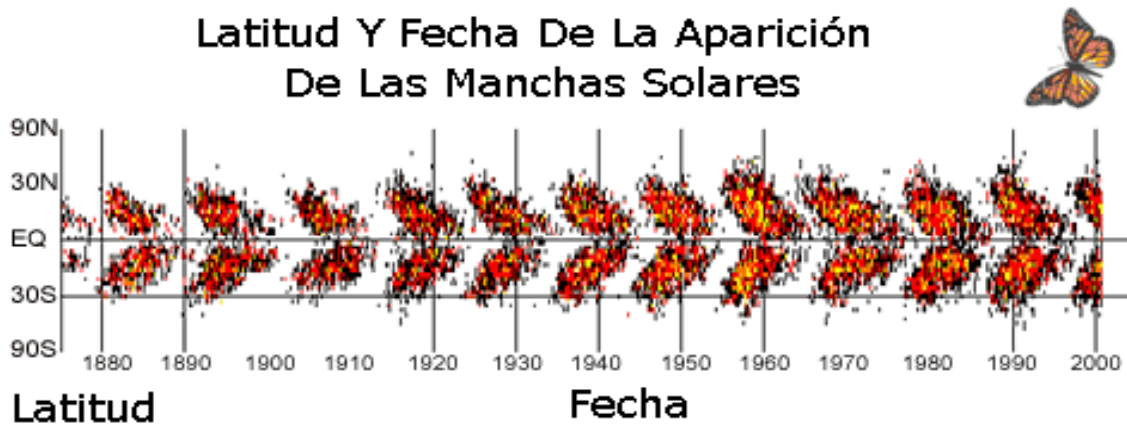


Figura 1.11 Diagrama de la mariposa de Maunder



## 1.5.2 Actividad en la Cromosfera y Región de Transición

### Prominencias

Algunas veces aparece en la corona gas relativamente frío que se observa mejor en la orilla del Sol (o limbo solar) teniendo como fondo al espacio, lo cual facilita la observación de lo que conocemos como prominencias.

Se necesitan tres cosas para que la prominencia exista: 1) la corona como una fuente de masa para la formación de la prominencia, 2) un campo magnético capaz de suspender el material y 3) una configuración del campo capaz de mantenerla a “bajas” temperaturas, del orden de los  $1 \times 10^4$  K, comparados con  $1 \times 10^6$  K, que hay en la corona. De cualquier forma, la fuente de masa no se mantiene por siempre, de tal forma que la suspensión magnética se debilita y la materia vuelve a las partes más bajas de la cromosfera o el aislamiento térmico es ineficiente y la prominencia se evapora en la corona. Algunas veces, las prominencias terminan de una manera más dramática, en donde el soporte del campo magnético se comprime por el peso de la prominencia, se vuelve inestable y libera su energía magnética como lo hace un resorte, lanzando a la prominencia de manera violenta y espontánea hacia el medio interplanetario.

La prominencia más grande que se ha observado, ocurrió el 4 de junio de 1946, durante su desarrollo (alrededor de una hora), alcanzó una altura de al menos un radio solar ( $7 \times 10^5$  Km). Su velocidad de ascenso fue de  $7 \times 10^5$  Km/h (durante la erupción).

### Espículas

Estas estructuras parecen chorros verticales. Las principales características de las espículas son que tienen una base con diámetro de 1,000 Km, alturas entre 5,000 y  $1 \times 10^4$  Km un promedio de 30 por cada súper gránulo y una vida de 8 minutos. Su temperatura es cercana a los  $1 \times 10^5$  K. A pesar de que se ha probado una correlación con el campo magnético, el origen de las espículas se mantiene incierto (Ver Figura 1.12).

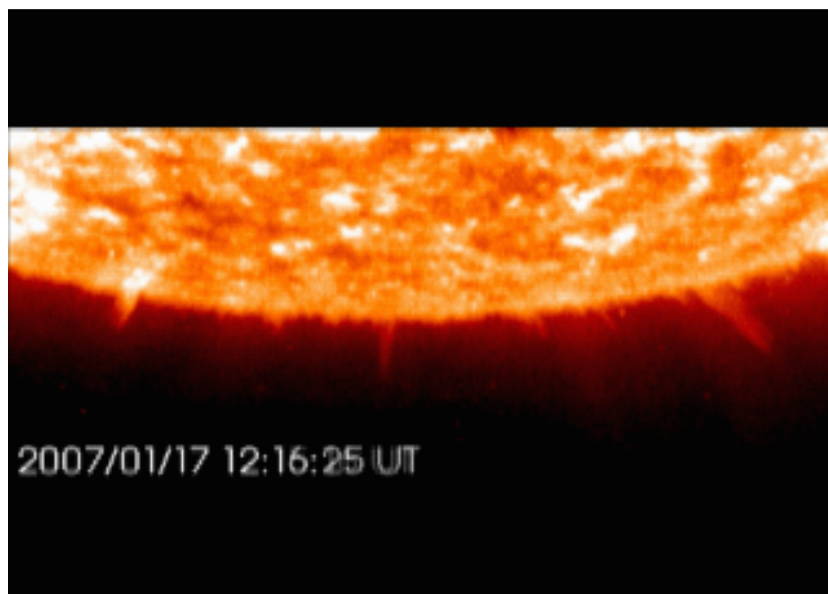


Figura 1.12

En esta foto se puede apreciar las espículas

Las espículas son sólo pequeñas comparadas con las grandes prominencias. Las mediciones muestran que se elevan tanto como el diámetro de la Tierra ( $1.3 \times 10^4$  Km o más). Cada una nace, se dispara hacia arriba a velocidades de 20 Km/s, alcanzan su máxima altura de quizá  $1.5 \times 10^4$  Km y se desvanece, todo en aproximadamente 10 minutos, formándose nuevas espículas conforme otras desaparecen.

### 1.5.3 Actividad en la Corona

#### Fulguraciones

Una fulguración solar se refiere a un fenómeno explosivo que ocurre en las regiones coronales cuyos pies están en las regiones activas de la fotosfera, como ya se mencionó, estas regiones activas se encuentran en las manchas solares. Al observar una fotografía en rayos X de la corona del Sol, se aprecian zonas muy brillantes debido a su alta temperatura de emisión. En ocasiones algunas regiones del Sol se tornan muy brillantes por un corto tiempo, son las fulguraciones.

Las fulguraciones involucran una gran cantidad de energía, presentan una regla general: un rápido incremento en la intensidad seguido de un corto periodo de actividad para después decaer lentamente, alcanzan temperaturas de hasta  $25 \times 10^6$  K y pueden desatar una onda sísmica que se propaga a gran parte del Sol.

#### Hoyos coronales

El campo magnético que presenta la corona, aun cuando no es uniforme, presenta características que resultan fáciles de observar cuando se utilizan detectores sensibles a los rayos X y rayos ultravioleta extremos, en este tipo de fotografías las regiones en donde el campo es cerrado aparecen como zonas claras. Las muy brillantes muestran las regiones activas y las más oscuras muestran las zonas en las que las líneas de campo están abiertas al espacio, a estas regiones se les llama hoyos coronales. El ciclo de la actividad solar influye en su tamaño y ubicación, durante el mínimo solar son grandes y se presentan en los polos teniendo vida promedio de varios años, por el contrario en épocas del máximo solar estos grandes hoyos coronales desaparecen y pueden aparecer hoyos más pequeños de naturaleza altamente inestable con periodos cortos de duración (horas o días) y ubicados en latitudes heliográficas medias y bajas. Se ha comprobado que de los hoyos coronales escapan haces de viento solar que llegan a alcanzar los 1000 Km/s. En la Figura 1.13 se pueden apreciar los hoyos y las regiones activas.

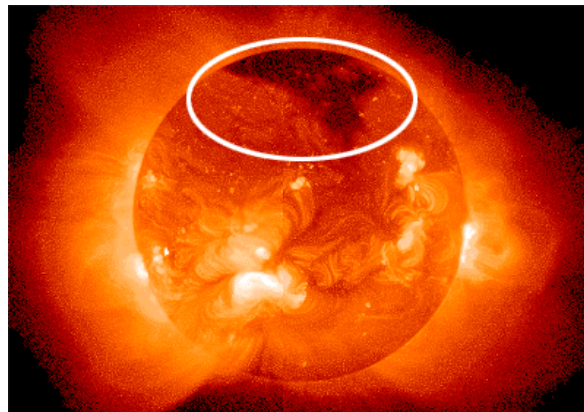


Figura 1.13

Fotografía que muestra hoyos coronales en las regiones polares

## Eyecciones de Masa Coronal

Generalmente las eyecciones de masa coronal (EMC) están asociadas con filamentos que estallan. En ocasiones los filamentos se desestabilizan bruscamente y lanzan hacia el medio interplanetario todo su material y material que se encuentra sobre de ellos. Las EMC son fenómenos muy frecuentes, en épocas de gran actividad solar se puede apreciar varias EMC durante un solo día. La variación de masa eyectada varía mucho alcanzando entre  $1 \times 10^{12}$  a  $1 \times 10^{13}$  Kg, con velocidades que van de unos cuantos m/s hasta varios cientos de m/s.

## 1.6 Causas de la Actividad Solar

Las causas de la actividad solar son principalmente la rotación diferencial y la existencia de la zona convectiva.

### La Rotación Solar

Se ha observado que la mayor parte del material solar es material ionizado conocido como plasma, su rotación no es la de un cuerpo sólido, y a diferencia de éste, tiene una rotación que varía con la latitud llamada rotación diferencial. Aún así, desde un punto de vista del sistema de referencia terrestre, el Sol parece tener una rotación de 27.28 días. Considerando un promedio latitudinal desde el ecuador al polo, se obtiene un valor de 27.7 días con valores que oscilan entre 35 días en los polos y 25 días en el ecuador, y se conoce como rotación sinódica. Podemos ver en la Figura 1.14 como las líneas del campo magnético comienzan a retorcerse y pasan de tener una forma de dipolo a mostrar una forma toroidal.

La velocidad angular varía con la helio-latitud siguiendo la relación:

$$\Omega = 14.37 - 2.33 \text{ sen}^2 (\text{latitud}) - 1.563 \text{ sen}^4 (\text{latitud}) \quad \text{grados por día}$$

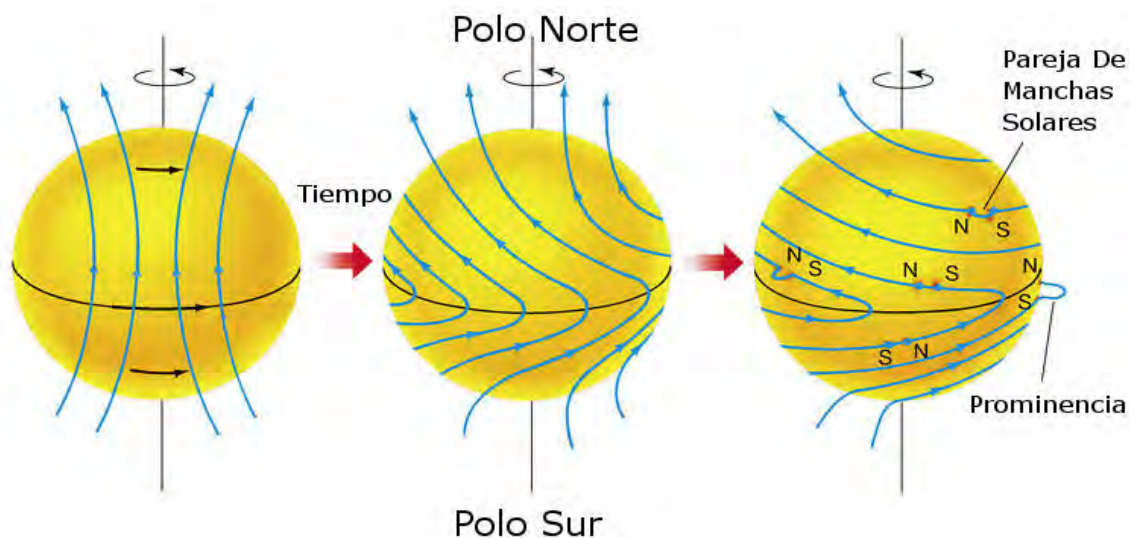


Figura 1.14 Representación de las líneas del campo magnético del Sol, éstas pasan de tener la forma de un dipolo hasta llegar a tener una forma toroidal

## Efecto Dínamo

La rotación diferencial, está claramente ligada al ciclo magnético del Sol. Se piensa que el campo magnético del Sol es producido por esta rotación así como por el movimiento de la zona convectiva.

Los gases que componen al Sol se encuentran altamente ionizados, por lo que son muy buenos conductores de electricidad. Cuando un conductor eléctrico rota y además presenta el fenómeno de convección, puede convertir parte de la energía del flujo en energía de un campo magnético, a este proceso se le conoce como efecto dínamo. Una vez que se ha creado el campo magnético, la convección y la rotación diferencial quedan muy relacionadas y se encargan de torcer, acortar, alargar o modificar de alguna manera el campo que produce el ciclo magnético solar.

Cuando la presión del fluido domina a la presión magnética, la rotación diferencial modifica la estructura del campo bipolar estirando las líneas de campo magnético en las latitudes bajas y dejándolas casi intactas en latitudes altas (efecto  $\omega$ ), por otra parte la fuerza de Coriolis logra que el gas y por lo tanto el campo que arrastra, giren formando lazos o espiras de tubos magnéticos (efecto  $\alpha$ ). Estos procesos pueden estar activos en cualquier parte en la zona de convección solar pero con distintos resultados dependiendo de su fuerza relativa. Para el Sol, en un periodo de aproximadamente 5.5 años los efectos  $\omega$  y  $\alpha$  deforman el campo magnético a tal grado que pasa de una estructura básicamente dipolar al inicio del ciclo a una estructura aproximadamente toroidal durante el máximo de actividad.

El campo magnético alrededor de los polos del Sol invierte su polaridad cada 11 años, cerca del máximo del número de manchas: el polo sur magnético pasa a ser un polo norte y viceversa; después de otros 11 años ambos polos vuelven a adquirir su polaridad anterior. Así, a diferencia de la Tierra que conserva su orientación magnética durante mucho más tiempo, el Sol invierte sus polos magnéticos en periodos muy cortos y en forma evidentemente asociada con los ciclos de manchas. Este tipo de inversión de la polaridad magnética del Sol es un ciclo que se le conoce como ciclo de Hale o ciclo magnético solar y es de aproximadamente 22 años. Y se ha observado que otras estrellas de tipo solar también presentan ciclos de mínima y máxima actividad semejante a la que tiene el Sol. La Figura 1.14 muestra como las líneas del campo magnético se van torciendo pasando de una forma dipolar a otra toroidal desde un mínimo de la actividad solar hasta un máximo de la misma.

# Capítulo 2

## Atmósfera Terrestre

### 2.1 Estructura Interna de la Tierra

El material de este capítulo se obtuvo de la siguiente bibliografía: [1], [3], [6], [8], [10], [13], [14], [17], [18], [29] y [35]. En una primera aproximación se puede pensar que la Tierra se compone de una serie de esferas, las cuales presentan características muy propias. En la parte más interna se encuentra el núcleo, el cual está compuesto por níquel y hierro y su radio se encuentra entre los 6370 y los 5150 Km de profundidad, esto representa una distancia de 1220 Km desde el centro. Diversos estudios han mostrado que el núcleo tiene una composición sólida y tiene una temperatura que es cercana a los 5000 K, lo cual significa que la magnetización intrínseca del centro es imposible ya que la temperatura se encuentra por encima de la temperatura de Curie del hierro, que es de 1043 K.

A 2900 Km de profundidad el hierro se presenta en su estado líquido. El núcleo líquido se compone en su gran mayoría de níquel y hierro, sin embargo, también se encuentran otro tipo de elementos como son: oxígeno, azufre, silicio y carbón. La temperatura desciende de los 4800 K en su parte interna y llega a los 3100 K en su parte externa. El núcleo líquido tiene la propiedad de comportarse como un metal conductor en estado líquido, con propiedades parecidas a las de un plasma. Poco a poco, parte del núcleo líquido se cristaliza y se va depositando en el núcleo sólido. Debido a la pérdida progresiva de su hierro, el núcleo líquido es proporcionalmente enriquecido con elementos más ligeros, como azufre y oxígeno, particularmente las capas más profundas, esto es, las más cercanas al núcleo sólido. Esta cristalización es un proceso exotérmico y cede calor que alimenta al núcleo líquido. Esta energía es consumida parcialmente por el movimiento de convección en este núcleo. Conforme el material del núcleo líquido se eleva se ve sometido a una fuerza de gravedad y a fuerzas centrífugas en aumento debido a la rotación de la Tierra y al desplazamiento de su eje. Todo esto tiene como consecuencia el movimiento general del núcleo líquido, como si fuera el movimiento del flujo de un río lento el cual se retuerce alrededor de sí mismo. Este movimiento es de particular interés ya que es él quien genera el campo magnético terrestre.

Tanto el núcleo interno como el externo son más pesados que las capas superficiales de la Tierra, ocupan un volumen del 16% del volumen del planeta y contienen el 33% de la masa terrestre. A 2900 Km de profundidad se encuentra la discontinuidad de Gutenberg e indica el punto donde el núcleo externo se encuentra con el manto sólido, el cual se extiende hasta los 670 Km de profundidad, luego encontramos la capa externa y finalmente la litosfera y la capa superficial (Ver Figura 2.1).

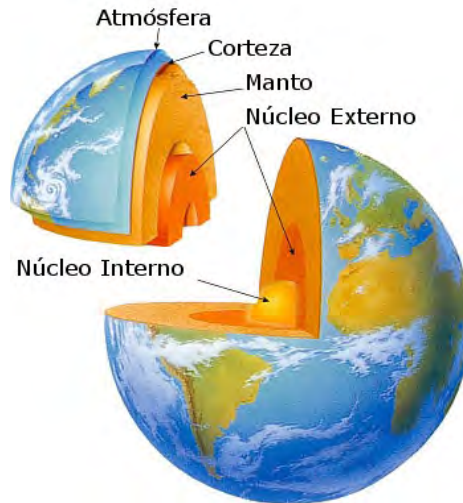


Figura 2.1

Estructura interna de la Tierra

Contrario a lo que se puede pensar, la posición del eje del polo magnético no depende de la posición del eje de rotación del planeta, sino del movimiento del plasma líquido que está presente en el núcleo líquido. Actualmente hay un ángulo de 11 grados entre los 2 ejes y continuamente cambia. En una primera aproximación el campo magnético es bien representado por un dipolo.

## 2.2 La Atmósfera de la Tierra

### 2.2.1 Estructura Vertical

La atmósfera terrestre está compuesta principalmente de nitrógeno molecular y oxígeno molecular, así como de otros elementos que constituyen el resto de la atmósfera, como lo indica la Tabla 2.1.

Tabla 2.1 Principales componentes de la atmósfera terrestre

Componente	% por Volumen	Componente	% por Volumen
Nitrógeno (N <sub>2</sub> )	78.08	Vapor de Agua	0 a 4
Oxígeno (O <sub>2</sub> )	20.95	Ozono	0 – 12x10 <sup>-4</sup>
Argón (Ar)	0.93	Amoniaco (NH <sub>3</sub> )	0.004x10 <sup>-4</sup>
Dióxido de Carbono (CO <sub>2</sub> )	0.033	Dióxido de Azufre (SO <sub>2</sub> )	0.001x10 <sup>-4</sup>
Neón (Ne)	18.2x10 <sup>-4</sup>	Dióxido de Nitrógeno (NO <sub>2</sub> )	0.001x10 <sup>-4</sup>
Helio (HE)	5.2x10 <sup>-4</sup>	Aerosoles, polvo, gases	Altamente variables
Kriptón (Kr)	1.1x10 <sup>-4</sup>		
Xenón (Xe)	0.089x10 <sup>-4</sup>		
Hidrógeno (H <sub>2</sub> )	0.5x10 <sup>-4</sup>		
Metano	1.5x10 <sup>-4</sup>		
Óxido Nitroso (NO <sub>2</sub> )	0.27x10 <sup>-4</sup>		
Monóxido de Carbono (CO)	0.19x10 <sup>-4</sup>		

### Troposfera

Los fenómenos meteorológicos ocurren en una región entre la superficie y la altura media de 16 Km (cerca de 17 Km en el ecuador y de 8 Km en los polos), a esta capa se le conoce con el nombre de troposfera, el aire se está mezclando constantemente.

El flujo de la energía solar que llega a la Tierra a una distancia de 1UA (Unidad Astronómica, distancia promedio Sol-Tierra = 1.49598x10<sup>8</sup> Km) es de 1367 ± 4 W/m<sup>2</sup>. El 60% de esta energía calienta la superficie y el 40% es reflejado o difundido por la superficie hacia el espacio.

La energía absorbida en la superficie de la Tierra calienta el suelo, lo cual provoca que se caliente el aire que está en la capa más baja de la atmósfera y este proceso facilita que se presenten los fenómenos de convección y conducción. Este flujo de energía hacia la Tierra por parte del Sol, también favorece la evaporación en mares y lagos.

La presión y la densidad decrecen en función de la altitud siguiendo una ley exponencial. Conforme se aumenta la altura la temperatura decrece de manera lineal dentro de la troposfera aproximadamente 6 ó 7 grados/Km. En la Figura 2.2 se aprecia el comportamiento de la variación

de la temperatura conforme se recorren las distintas capas de la atmósfera. Los valores dependen de gran manera en el porcentaje de humedad del aire, ya que conforme sube el aire se presenta la condensación del agua y se frena el enfriamiento del aire. Entonces el decremento es de alrededor de 9.8 grados/Km cuando el aire está totalmente seco y de 5 grados/Km cuando el aire se encuentra saturado de agua.

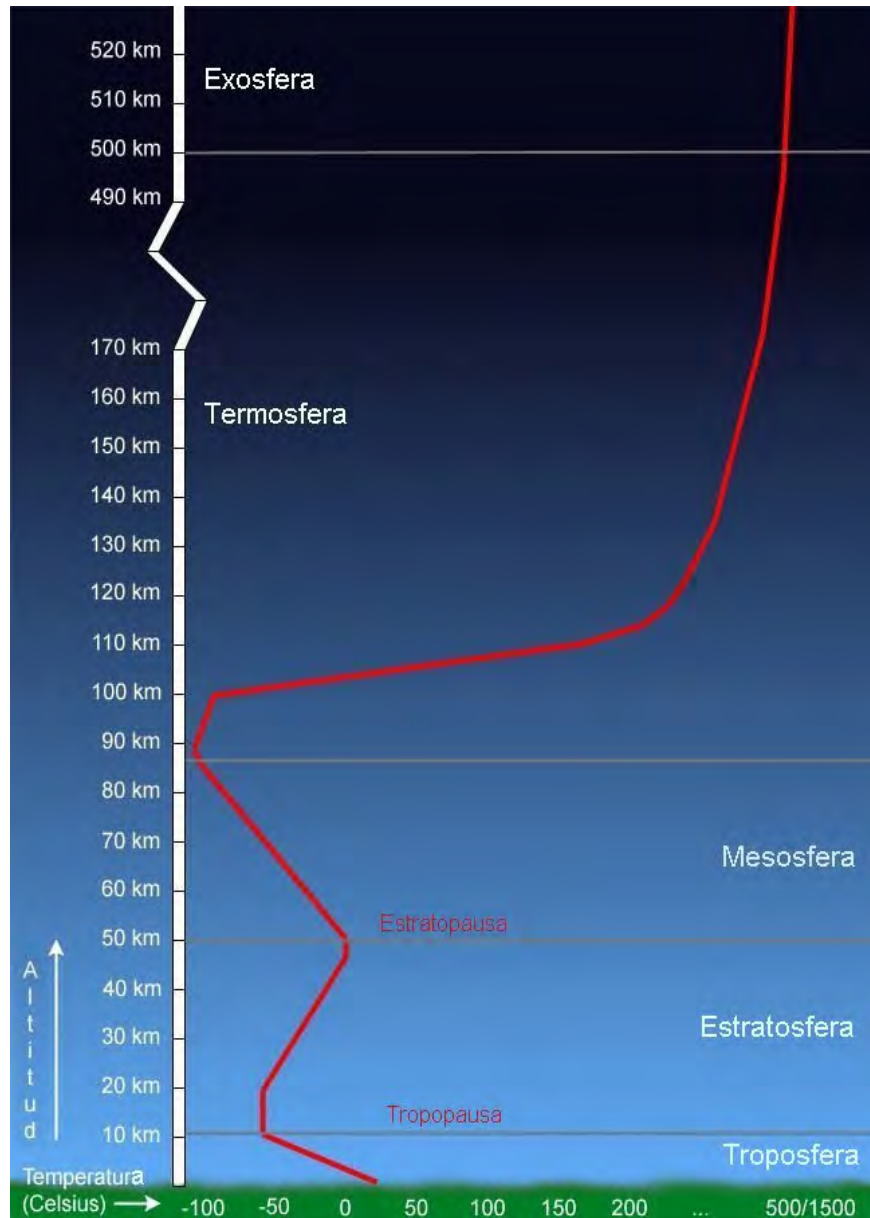


Figura 2.2 Estructura vertical de la atmósfera donde se aprecia la temperatura en cada una de las capas

Es bien conocido que el aire caliente es más ligero y tiende a elevarse, conforme se eleva también se enfría, la densidad aumenta y entonces baja nuevamente, cediendo su calor en las capas superiores.



## Estratosfera

Más allá de la troposfera encontramos la estratosfera a una altura entre los 17 y 50 Km, se caracteriza por la progresiva desaparición del agua. La energía solar que llega directamente a la atmósfera o la energía que es re-emitida por el suelo es utilizada en calentar o disociar moléculas, especialmente ozono (lo cual ocurre de manera más efectiva a una altura de 40 Km) y el oxígeno molecular (de manera más efectiva entre 20 y 25 Km). La radiación responsable de la primera disociación (la del ozono), se encuentra entre los 240 y 310 nanómetros y la segunda disociación (la del oxígeno molecular), se encuentra entre los 200 y 240 nanómetros, esta es la región del ultravioleta.

La estratosfera absorbe gran cantidad de radiación ultravioleta y es gracias a ello que fue posible el desarrollo de la vida en la Tierra. A diferencia de la troposfera, en cuanto más aumenta la altitud la temperatura aumenta. Esto se debe a que las reacciones de disociación son exotérmicas (ceden calor) y de esta forma la temperatura aumenta alrededor de los 0°C.

## Mesosfera

El límite superior de la estratosfera, cerca de los 50 Km es la estratopausa, por encima de ésta se encuentra la mesosfera. La concentración de ozono decrece. Su disociación, la cual cede calor, no es más una fuente de calentamiento ya que conforme aumenta la altitud la temperatura decrece, esto ocurre hasta los 85 Km de altura.

En todas las capas inferiores descritas, los átomos y las moléculas se mezclan produciendo un gas homogéneo. Existe una temperatura y una concentración atmosférica, estos términos se aplican a toda la atmósfera. Es por esta razón que a la atmósfera se le da el nombre de homosfera que va desde el nivel del suelo hasta una altitud cercana a los 85 km, la concentración es cercana a los  $1 \times 10^{25}$  partículas/m<sup>3</sup> a nivel del suelo y de  $1 \times 10^{19}$  partículas/m<sup>3</sup> en la homopausa, la cual es el límite superior de la homosfera.

## Termosfera

En esta capa la temperatura se incrementa con la altura, las temperaturas alcanzan los 1200 °C. La termosfera se extiende desde una altura de 90 km hasta los 500 km por arriba de la superficie terrestre. Algunas de las moléculas en la alta mesosfera y parte baja de la termosfera llegan a ser ionizadas (cargadas eléctricamente) por rayos X y ultravioleta provenientes de la radiación solar, por esta razón a esta región también se le conoce como ionosfera.

## Exosfera

La capa exterior más alta es la exosfera, formada principalmente por helio e hidrógeno, las moléculas de gas se rompen en átomos y debido a que la atracción gravitacional es débil, algunas partículas logran escapar hacia el espacio.

## 2.3 Relaciones Sol-Tierra

### 2.3.1 La Magnetosfera Terrestre

El campo geomagnético de la Tierra se puede considerar que a primera aproximación tiene la estructura de un dipolo, lo cual implica que las líneas del campo son líneas cerradas que emergen del polo sur en todas direcciones y entran por el polo norte.

Las regiones donde el campo geomagnético tiene una mayor influencia en las cargas en movimiento se le conoce como la magnetosfera, se considera a partir de los 600 Km de altura e incluye el espacio exterior cercano a la Tierra, alrededor de diez radios terrestres.

Las características de la magnetosfera son el resultado de una compleja interacción entre el campo magnético de la Tierra y el viento solar.

A pesar de que el campo geomagnético tiene la estructura del dipolo, las líneas del campo se ven deformadas por el viento solar, presentando un achatamiento en la parte del día y un estiramiento en el lado de la noche. El viento solar ejerce una presión debido al movimiento térmico de las partículas y también al movimiento de flujo, que se equilibra con la presión térmica y magnética del plasma magnetosférico. A esta región llamamos magnetosfera. Aún más, el campo magnético tiene influencia en las partículas cargadas del viento solar.

La parte frontal de la magnetosfera, la magnetopausa se encuentra a aproximadamente 10 radios terrestres (desde la superficie de la Tierra). De cualquier forma se puede encontrar a 13 radios terrestres cuando la actividad solar es mínima y a 6 radios terrestres cuando la actividad solar es intensa (erupciones, fulguraciones, eyección de masa coronal). En los costados la magnetopausa se encuentra a alrededor de 15 radios terrestres. En la parte de la noche adquiere una forma de la cola de un cometa. En el lado de la noche la magnetopausa es cercana a varias decenas de radios terrestres.

Afuera de la magnetosfera el espacio está dominado por el viento solar y al campo magnético interplanetario. Adentro (en la magnetosfera) el campo magnético de la Tierra es la fuerza que controla. La magnetopausa existe como una barrera entre los dos medios.

### 2.3.2 El Sol y el Clima

#### El Mínimo de Maunder

Además de la variación de los 11 años o ciclo solar se pueden encontrar otro tipo de variaciones de más largo plazo, como el ciclo de Gleissberg con un periodo cercano a los 100 años.

Este tipo de variaciones que presenta el Sol lo hacen el candidato perfecto para influenciar el clima en variaciones de tiempo. Otro tipo de variaciones terrestres como la actividad volcánica también pueden influir en el clima pero por pocos años por lo que no son capaces de forzar al sistema climático para presentar variaciones a largo plazo.

Como ya se mencionó la actividad del Sol se puede ver reflejada en el número de manchas solares, ya que éstas son fáciles de observar se ha tenido un conteo relativamente bueno desde 1610 esto es, desde la invención del telescopio. Conteos regulares se han llevado a cabo desde el siglo dieciocho.

El número de manchas solares ha tenido grandes variaciones con periodos de máximo con más de 300 y mínimos con registros de ninguna mancha solar. Desde que las observaciones se llevan a cabo de forma regular el periodo más largo sin registro de manchas solares duró 70 años, a este periodo se le conoce como el mínimo de Maunder y duró de 1645 a 1715.

Este mínimo no ha sido el único periodo de inactividad, se han presentado otros de menor duración tales como: el mínimo de Dalton, que duró de 1795 a 1830 y otro más a comienzos del siglo veinte. La gráfica de número de manchas a lo largo del tiempo así como el mínimo de Maunder y de Dalton se puede apreciar en la Figura 2.3.

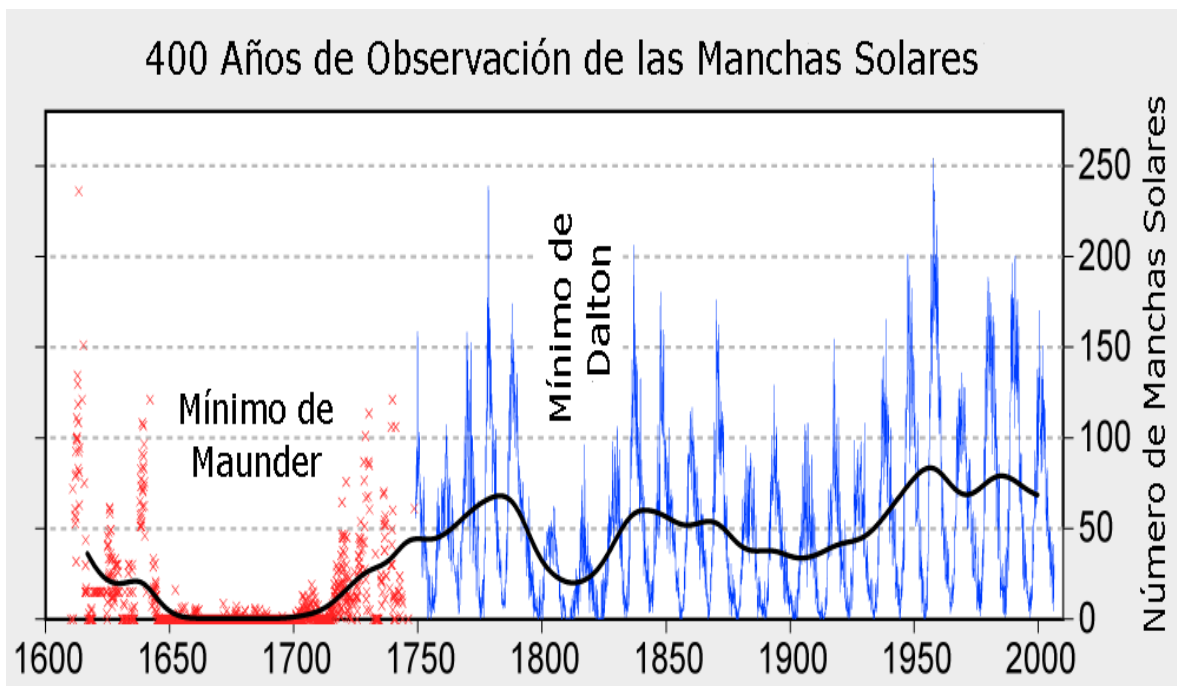


Figura 2.3 Periodos de actividad solar mínima: mínimo de Maunder y mínimo de Dalton

La variación en el clima se puede deber a que la cantidad de energía que es radiada a la Tierra conocida como la radiación total del Sol o constante solar no es en sí una constante sino que tiene variaciones del 0.1% a lo largo del ciclo solar. Su valor medio es de aproximadamente  $1367 \pm 4 \text{ W/m}^2$  y en escalas de tiempo puede presentar una variación en días a décadas y probablemente más largas, asociadas a periodos largos de baja o alta actividad solar.

También se encuentran variaciones en la irradiancia espectral, las longitudes de onda corta en la región del ultra violeta (UV) y ultravioleta extremo (UVE) presentan variación de más del 10% a lo largo del ciclo solar. A pesar de que las investigaciones al respecto aún son pocas, estas variaciones pueden influenciar significativamente las capas más delgadas y sensitivas de la atmósfera terrestre y por lo tanto tener importantes implicaciones en el cambio climático.

### 2.3.3. Las Tormentas Geomagnéticas

Las tormentas geomagnéticas se encuentran asociadas a disturbios en el viento solar tales como a la eyección de masa coronal y flujo del viento solar a altas velocidades los cuales tienen mucha mayor densidad de plasma y velocidad.

Las tormentas geomagnéticas son disturbios globales en el campo magnético terrestre, se caracterizan por un aumento súbito en el campo magnético seguido de una disminución en la intensidad del mismo durante los siguientes minutos y horas, teniendo una fase de recuperación gradual que puede tardar días.

### 2.3.4 Las Auroras

Las subtormentas geomagnéticas también son generadas por fulguraciones solares y actividad de eyección de masa en el Sol, pueden durar por alrededor de media hora a una hora. Uno de los efectos geomagnéticos de las subtormentas es el colorido despliegue de las auroras cerca de los polos norte y sur de la Tierra.

Las auroras generalmente no son visibles en los polos magnéticos, se les puede apreciar mejor en zonas circulares, algunas de 4000 Km de diámetro centradas en los polos magnéticos conocidos como óvalos de aurora.

La emisión visible de la aurora se presenta alrededor de los 90-130 Km sobre la Tierra y es debido a la excitación de los átomos de oxígeno y nitrógeno y de moléculas que se encuentran presentes en la atmósfera terrestre debido a los electrones energéticos del viento solar que se dirigen a los polos magnéticos norte y sur de la Tierra.

La característica emisión auroral del rojo fuerte (6300 Å) y del verde (5576 Å), se debe a la excitación de átomos neutrales de oxígeno de la atmósfera terrestre. La aurora del norte se le conoce como aurora boreal y a la del sur como aurora austral. En las Figuras 2.4 y 2.5 observamos algunas auroras boreal y austral, respectivamente.



Figura 2.4 Alaska, EE. UU.

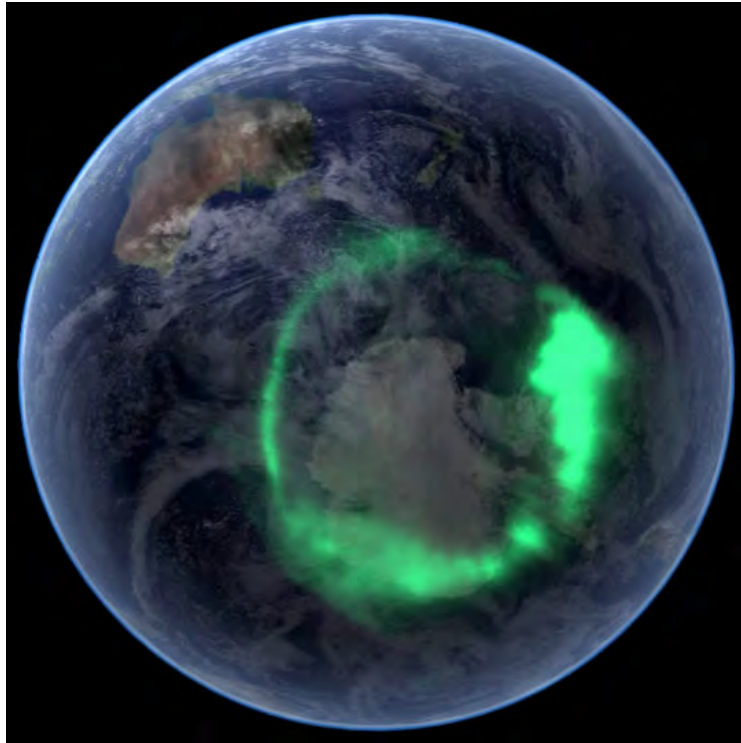


Figura 2.5

Aurora austral rodeando la Antártida el 11 de septiembre de 2005

# Capítulo 3

## Estudio de la Tendencia de las Temperaturas Mínima, Máxima y Promedio en la Península de Yucatán

### 3.1 Introducción

El material de este capítulo se obtuvo de la siguiente bibliografía: [2], [7], [9], [15], [16], [20], [25], [27], [28], [29], [30] y [33], excepto [19], [21], [22], [23], [24], [25] y [26] que corresponde a la sección 3.5.1. A lo largo del siglo pasado se llevaron a cabo mediciones confiables de variables del clima tales como temperatura, humedad relativa media, precipitación, precipitación total, precipitación máxima, helada, tormenta eléctrica, niebla, etc., en forma de registro para poder observar el comportamiento del clima.

Según modelos climáticos del Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, por sus siglas en inglés), en los próximos años, la Península de Yucatán será una de las regiones que se verá más impactada en nuestro país por el cambio climático. Por otro lado, en esta región se cuenta con registros de temperatura a partir de 1921, lo cual permite un estudio a largo plazo.

### 3.2 Datos

Los datos que se emplearon en este trabajo fueron proporcionados por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y abarcan un periodo de aproximadamente 100 años, desde 1921 hasta el 2007. Los datos que utilizamos son: Temperatura Máxima Extrema, Temperatura Mínima Extrema y Temperatura Promedio.

Para estudiar el comportamiento secular de la temperatura en la Península de Yucatán, se cuenta con datos proporcionados por seis estaciones climatológicas. Dichas estaciones se encuentran ubicadas en los estados de Campeche, Quintana Roo y Yucatán y su distribución es la siguiente: Campeche, Campeche; Champotón, Campeche; Chetumal, Quintana Roo; Mérida, Yucatán; Progreso, Yucatán y Valladolid, Yucatán. Su distribución geográfica la podemos apreciar en la Figura 3.1 y su ubicación exacta la encontramos en la Tabla 3.1



Figura 3.1 Distribución geográfica de las estaciones climatológicas en la Península de Yucatán

Tabla 3.1 Localización de las estaciones distribuidas en la Península de Yucatán

Estación, Municipio y Estado	Latitud	Longitud
Campeche, Campeche.	19° 49'	90° 35'
Champotón, Campeche.	19° 18'	90° 35'
Chetumal, Quintana Roo.	18° 29'	88° 18'
Mérida, Yucatán.	20° 57'	89° 39'
Progreso, Yucatán.	21° 20'	89° 17'
Valladolid, Yucatán.	20° 40'	88° 12'

### 3.3 Tratamiento

Los registros de temperatura proporcionados por el SMN presentan huecos y es necesario realizar ajustes para obtener una serie continua.

Sabemos que frecuentemente es necesario hacer ajustes de modelos lineales y modelos que utilizan un polinomio de al menos segundo grado, cuando una de las variables medidas depende una de la otra. En estas situaciones la información que debe obtenerse son los parámetros que caracterizan a la función que relaciona ambas variables. Sin duda, el caso más simple es una relación lineal.

Las series de datos de temperatura para la Península de Yucatán se interpolaron lineal y cúbicamente, debido a la falta de datos en algunos intervalos de tiempo. El desafío es estimar  $f(x)$  para una  $x$  determinada, si la  $x$  que buscamos se encuentra entre la menor y mayor de la  $x_i$ 's llamaremos al problema, interpolación, de otra forma, se le llamará extrapolación. Es de nuestro interés que la interpolación, pueda modelar a la función entre los puntos conocidos y es importante mencionar que sólo se llevaron a cabo interpolaciones.

La forma más conocida para determinar esa función es utilizando un polinomio que se ajuste, sin embargo también se pueden utilizar funciones que consideran una división de polinomios (funciones racionales), o funciones trigonométricas (senos y cosenos dan paso a la interpolación trigonométrica y relacionan métodos de Fourier). En nuestro caso en particular se utilizó un ajuste lineal así como un ajuste Cubic Spline (el cual usa un polinomio de tercer grado).

En situaciones en donde nos concierne la continuidad de la derivada, se debe utilizar una función para llevar a cabo la interpolación, llamada función Spline. Un Spline es un polinomio entre cada pareja de los puntos de la tabla. Cubic Spline es la función más popular, produce una función que es continua hasta su segunda derivada. Las funciones Spline tienden a ser polinomios más estables con menos posibilidades de tener una oscilación brusca entre los puntos tabulados.

Para poder trabajar con los datos y llevar a cabo las interpolaciones correspondientes se usaron dos hojas de cálculo conocidas como Microsoft Office Excel 2007 y Origen Pro 8. Con ayuda de estas hojas de cálculo también se hicieron las gráficas correspondientes para cada una de las seis estaciones con las que se trabajó. De manera más detallada, el programa Origin Pro 8 se utilizó para las interpolaciones y el programa Microsoft Office Excel 2007 fue utilizado para realizar las gráficas.

### 3.3.1 Métodos de Interpolación: Algoritmo

#### Método Lineal

Dada una función tabulada  $y_i = y(x_i)$ ,  $i = 1, \dots, N$ , prestando atención a un intervalo en particular, entre  $x_j$  y  $x_{j+1}$ . La interpolación lineal en ese intervalo da la fórmula de interpolación

$$y = A y_j + B y_{j+1} \quad (3.1)$$

Donde

$$A = \frac{x_{j+1} - x}{x_{j+1} - x_j} \quad B = \frac{x - x_j}{x_{j+1} - x_j} \quad (3.2)$$

Las ecuaciones 3.1 y 3.2 son casos especiales para la fórmula de interpolación en el caso general de Lagrange.

Ya que es una ecuación lineal (en trozos), la ecuación 3.1 tiene su segunda derivada igual a cero en el interior de cada intervalo, y una indefinida o infinita segunda derivada en las abscisas  $x_j$ .

La interpolación lineal es un método rápido, para estimar algún valor construyendo una línea entre 2 puntos de interés (vecinos). El punto resultante puede no ser una buena aproximación de los valores faltantes.



La interpolación lineal da como resultado la media aritmética de 2 puntos adyacentes y es un método que se puede utilizar cuando no se necesita mucha precisión y es útil cuando se utilizan un gran número de datos pues requiere poco poder computacional.

## Método Cubic Spline

El objetivo de la interpolación Cubic Spline es el poder obtener una fórmula de interpolación que es suave en su primera derivada y es continua en su segunda derivada, ambas dentro del intervalo y en sus fronteras.

Este método toma los datos con los que se cuentan, rompe la gráfica en un número dado de segmentos y ajusta cada segmento con un polinomio cúbico. La segunda derivada de cada función cúbica es igualada a cero. Con estas condiciones de frontera se puede reconstruir una función entera.

La interpolación con ayuda de un polinomio requiere mucho más poder computacional que un método de interpolación lineal y cuando el orden del polinomio es alto, el ajuste de datos oscila mucho. Esta desventaja puede evitarse utilizando polinomios de bajo orden. El método Cubic Spline utiliza polinomios de tercer orden y lleva a cabo el ajuste de datos de una manera más natural. La interpolación Spline tiene menos errores que la interpolación lineal y la interpolación es más suave.

Supóngase, contrario a los hechos, que además de tener los valores tabulados de  $y_i$ , también tenemos tabulados los valores de la segunda derivada de la función,  $y''$ , esto es, un conjunto de números  $y''_i$ . Entonces, dentro de cada intervalo, podemos agregar al lado derecho de la ecuación 3.1 un polinomio cúbico cuya segunda derivada varía linealmente de un valor  $y''_j$  por la izquierda a un valor  $y''_{j+1}$  por la derecha. Llevando a cabo esta operación, se obtiene la deseada segunda derivada continua. Si también construimos el polinomio cúbico de tal forma que tengan valores de cero en  $x_j$  y  $x_{j+1}$ , no se estropeará el acuerdo con los valores de la función tabulados en  $y_j$  y  $y_{j+1}$  en los puntos frontera  $x_j$  y  $x_{j+1}$ . Reemplazando 3.1 por

$$y = Ay_j + By_{j+1} + Cy''_j + Dy''_{j+1} \quad (3.3)$$

Donde A y B se definen en 3.2

$$A = \frac{x_{j+1} - x}{x_{j+1} - x_j} \quad B = 1 - A = \frac{x - x_j}{x_{j+1} - x_j}$$

Y

$$C = \frac{1}{6} (A^3 - A)(x_{j+1} - x_j)^2 \quad D = \frac{1}{6} (B^3 - B)(x_{j+1} - x_j)^2 \quad (3.4)$$

Podemos revisar que  $y''$  es de hecho la segunda derivada del polinomio de interpolación 3.3. Tomando las derivadas de la ecuación 3.3 con respecto a  $x$  y utilizando las definiciones de  $A$ ,  $B$ ,  $C$  y  $D$  para calcular las derivadas  $\frac{dA}{dx}$ ,  $\frac{dB}{dx}$ ,  $\frac{dC}{dx}$ ,  $\frac{dD}{dx}$ , los resultados son:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{y_{j+1} - y_j}{x_{j+1} - x_j} - \frac{3A^2 - 1}{6} (x_{j+1} - x_j) y''_j + \frac{3B^2 - 1}{6} (x_{j+1} - x_j) y''_{j+1} \quad (3.5)$$

Para la primera derivada y

$$\frac{d^2y}{dx^2} = A y''_j + B y''_{j+1} \quad (3.6)$$

Para la segunda derivada. Ya que  $A = 1$  en  $x_j$  y  $A = 0$  en  $x_{j+1}$  mientras que para  $B$  el caso es opuesto. La ecuación 3.6 muestra que  $y''$  es la segunda derivada tabulada y que ésta será continua en los intervalos  $(x_{j-1}, x_j)$  y  $(x_j, x_{j+1})$ . El único problema es el haber supuesto el conocer las  $y''_i$ 's, cuando en realidad no las conocemos. De cualquier manera no se ha requerido de la continuidad de la primera derivada (3.5), entre los dos intervalos. La idea clave de la interpolación Cubic Spline es requerir esta continuidad y usarla para obtener ecuaciones para la segunda derivada  $y''_i$ .

Las ecuaciones requeridas se obtienen ajustando la ecuación 3.5 evaluada para  $x = x_j$  en el intervalo  $(x_{j-1}, x_j)$  igual a la misma ecuación evaluada para  $x = x_j$  pero en el intervalo  $(x_j, x_{j+1})$ . Con algunos arreglos se tiene (para  $j = 2, \dots, N - 1$ )

$$\frac{x_j - x_{j-1}}{6} (y''_{j-1}) + \frac{x_{j+1} - x_{j-1}}{3} (y''_j) + \frac{x_{j+1} - x_j}{6} (y''_{j+1}) = \frac{y_{j+1} - y_j}{x_{j+1} - x_j} - \frac{y_j - y_{j-1}}{x_j - x_{j-1}} \quad (3.7)$$

Estas representan  $N - 2$  ecuaciones lineales en las  $N$  desconocidas  $y''_i$ ,  $i = 1, \dots, N$ , entonces hay una familia de posibles soluciones de dos parámetros.

Para una solución única, se necesitan especificar dos condiciones, típicamente se toman condiciones de frontera en  $x_1$  y  $x_N$ , las formas más comunes de hacer esto, son:

Ajustar uno o ambos:  $y''_1$  y  $y''_N$  igual a cero, dando como resultado la interpolación Cubic Spline natural la cual tiene segunda derivada igual a cero en uno o ambos de sus puntos frontera.

Ajustar cualquiera de  $y''_1$  y  $y''_N$  a valores calculados en la ecuación 3.5 de tal forma que la derivada de la función de interpolación tenga un valor específico en cualquiera o ambos puntos frontera.

Una de las razones por la que la interpolación Cubic Spline es especialmente práctica es porque el conjunto de ecuaciones 3.7, junto con las dos condiciones de frontera es que no son sólo lineales sino además son tridiagonales. Por lo tanto las ecuaciones se pueden resolver utilizando un algoritmo tridiagonal.

Se considera para cada uno de los casos, cuál es la mejor elección para llevar a cabo la interpolación. Es importante considerar que en algunos casos sólo hace falta un dato en nuestra serie de datos lo que nos hace pensar que un ajuste lineal sería el adecuado, mientras que para otros casos la ausencia de datos es mayor, llegando a un máximo de 10 años, por lo que el ajuste se lleva de mejor manera con un ajuste polinómico.

Cuando hemos llevado a cabo la interpolación (en la ausencia de datos mensuales), es posible determinar el valor anual de la temperatura: máxima extrema, mínima extrema y promedio, simplemente obteniendo el promedio de la temperatura a lo largo de todos los meses del año. Una vez que se obtiene el promedio de las temperaturas: máxima extrema, mínima extrema y promedio y se han completado las serie de datos es posible llevar a cabo las gráficas de Temperatura vs Tiempo, que son las gráficas que nos ayudarán a determinar la tendencia de la temperatura a lo largo de casi 100 años.

Continuando con la tendencia de la temperatura: máxima extrema, mínima extrema y promedio, dicha tendencia será útil para poder determinar el comportamiento de la temperatura: máxima extrema, mínima extrema y promedio para cada una de las estaciones en estudio y así poder concluir si la temperatura en la Península de Yucatán se ha mantenido constante, si ha disminuido o si se ha incrementado a lo largo de un periodo aproximado de 100 años, para la región en estudio.

Dicha tendencia también se puede aproximar por un método lineal o un método polinómico, de tal forma que si se utiliza una tendencia lineal, es posible determinar la pendiente de la temperatura, así como su ordenada al origen. Al utilizar un método polinómico es posible determinar los coeficientes del polinomio así como el coeficiente de correlación al cuadrado. Estos valores son de especial interés pues nos brindan información de cómo se comportan los datos: la pendiente nos proporciona información del incremento o decremento de la temperatura, mientras que el coeficiente de correlación indica un buen comportamiento, si su valor es cercano al uno la correlación es buena (se considera una correlación fuerte si el valor es mayor a 0.8 y se considera débil si el valor es menor a 0.5) y tiene mala correlación si su valor es cercano al cero indicando que las variables son independientes. La fórmula para el coeficiente de correlación (del momento del producto Pearson),  $r$ , se expresa de la siguiente forma:

$$r = \frac{\sum(x-\bar{x})(y-\bar{y})}{\sqrt{\sum(x-\bar{x})^2 \sum(y-\bar{y})^2}} \quad (3.8)$$

### 3.4 Resultados y Discusión

Como ya se mencionó en la sección 3.1, se hicieron las debidas interpolaciones, las correspondientes gráficas de Temperatura vs. Tiempo, se obtuvieron las tendencias, las pendientes de las mismas y los promedios de las series de temperatura. El comportamiento de las series de temperatura máxima extrema, mínima extrema y media para cada estación meteorológica, se muestran en las Figuras 3.2, 3.3, 3.4, 3.5, 3.6 y 3.7. Cada gráfica para cada una de las regiones ésta ordenada alfabéticamente y agrupada dependiendo del Estado al que

pertenecen. Las Tablas 3.2 a 3.4, resumen los promedios de temperatura y la variación porcentual de la temperatura para la serie temporal completa de casi 100 años.

Tabla 3.2 Promedio de la Temperatura Máxima Extrema y Variación Porcentual en las 6 Estaciones en Estudio.

Estación: Municipio y Estado	Promedio de la Temperatura Máxima Extrema (°C)	Variación Porcentual de la Temperatura Para Todo el Periodo Considerado (%)
Campeche, Campeche.	34.6	13.7
Champotón, Campeche.	35.7	-12.4
Chetumal, Quintana Roo.	32.8	14.8
Mérida, Yucatán.	35.1	13.5
Progreso, Yucatán.	32.8	11.7
Valladolid, Yucatán.	34.2	12.4

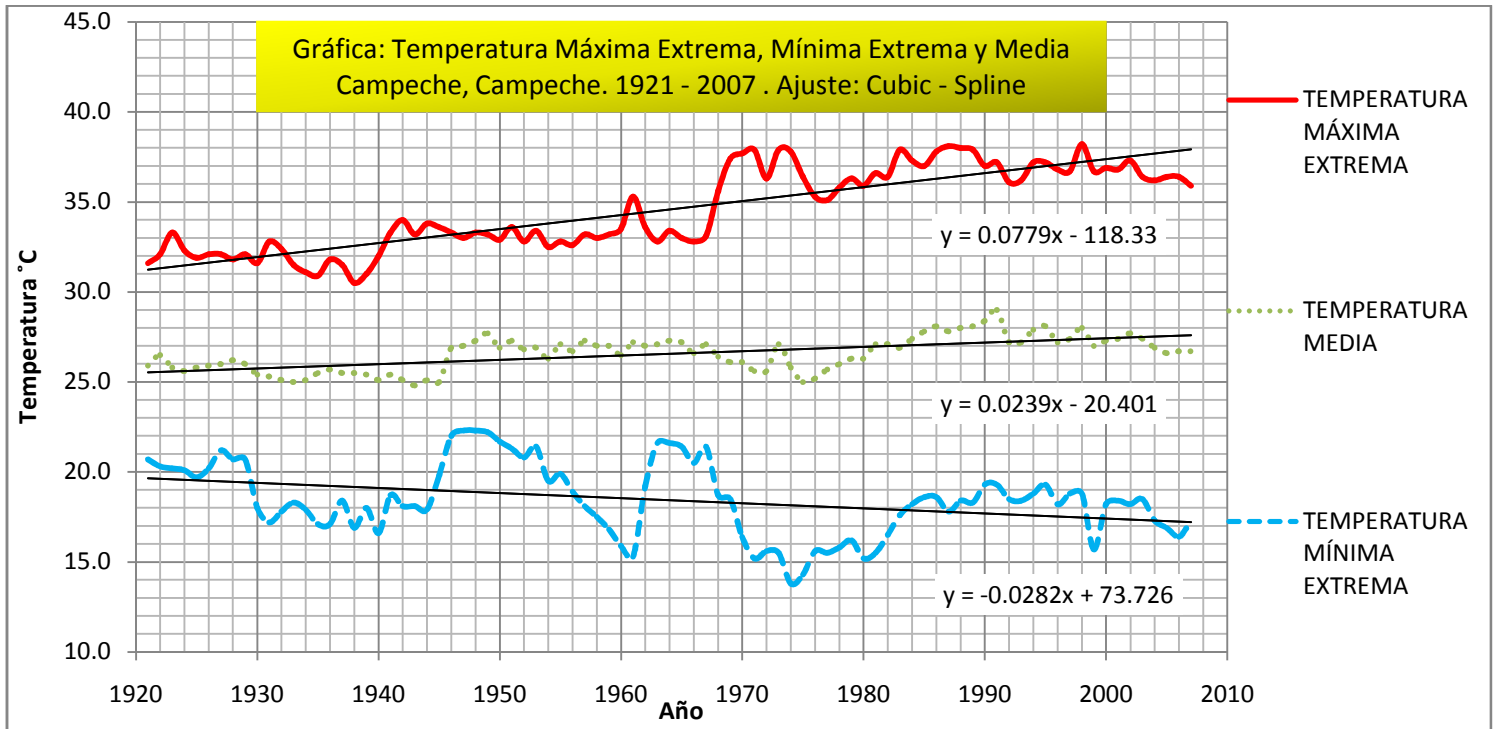
Tabla 3.3 Promedio de la Temperatura Media y Variación Porcentual en las 6 Estaciones en Estudio.

Estación: Municipio y Estado	Promedio de la Temperatura Media (°C)	Variación Porcentual de la Temperatura Para Todo el Periodo Considerado (%)
Campeche, Campeche.	26.6	3.1
Champotón, Campeche.	26.1	3.8
Chetumal, Quintana Roo.	26.4	7.0
Mérida, Yucatán.	26.1	3.5
Progreso, Yucatán.	25.7	5.6
Valladolid, Yucatán.	26.0	8.1

Tabla 3.4 Promedio de la Temperatura Mínima Extrema y Variación Porcentual en las 6 Estaciones en Estudio.

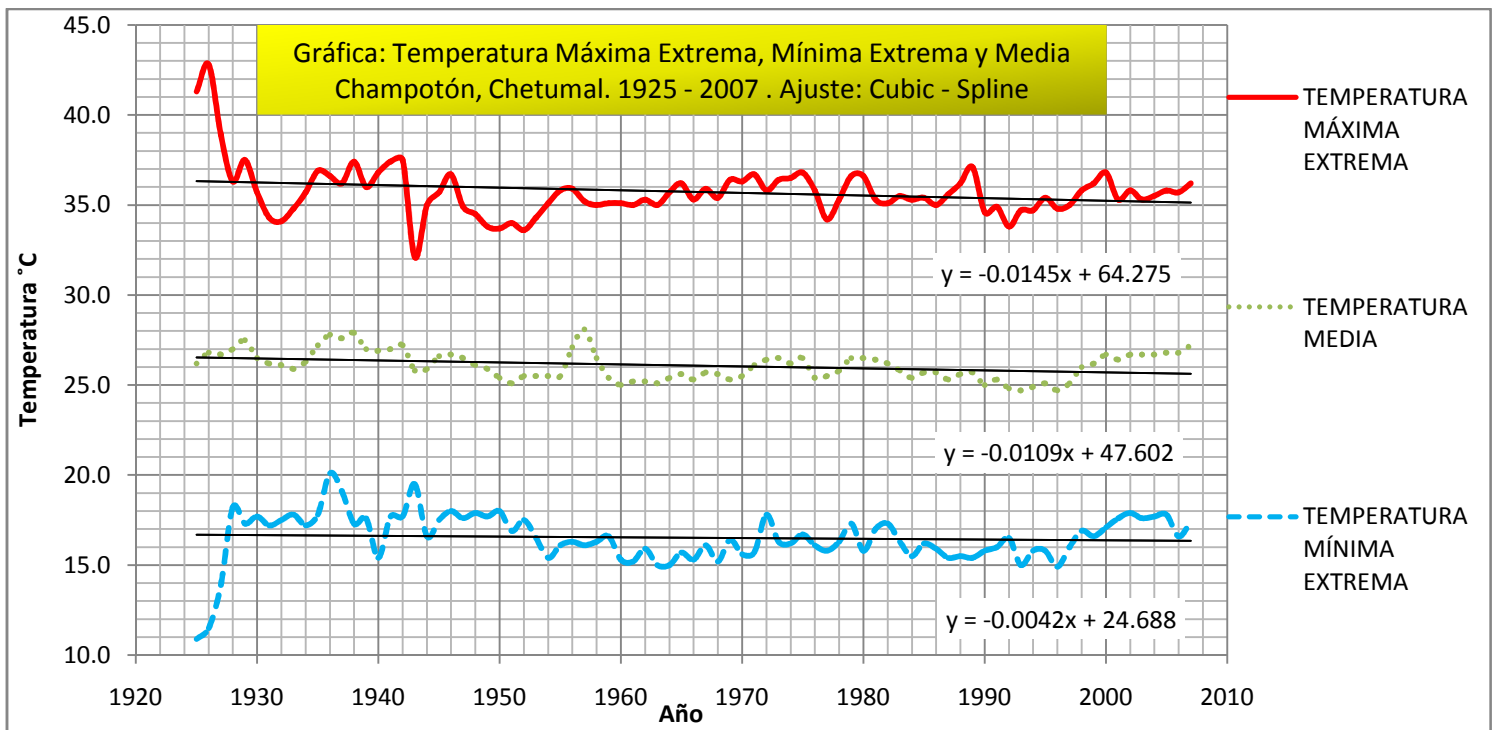
Estación: Municipio y Estado	Promedio de la Temperatura Mínima Extrema (°C)	Variación Porcentual de la Temperatura Para Todo el Periodo Considerado (%)
Campeche, Campeche.	18.4	-16.4
Champotón, Campeche.	16.5	6.0
Chetumal, Quintana Roo.	17.6	6.2
Mérida, Yucatán.	16.9	-13.5
Progreso, Yucatán.	19.6	-10.9
Valladolid, Yucatán.	16.4	-5.4

Figura 3.2



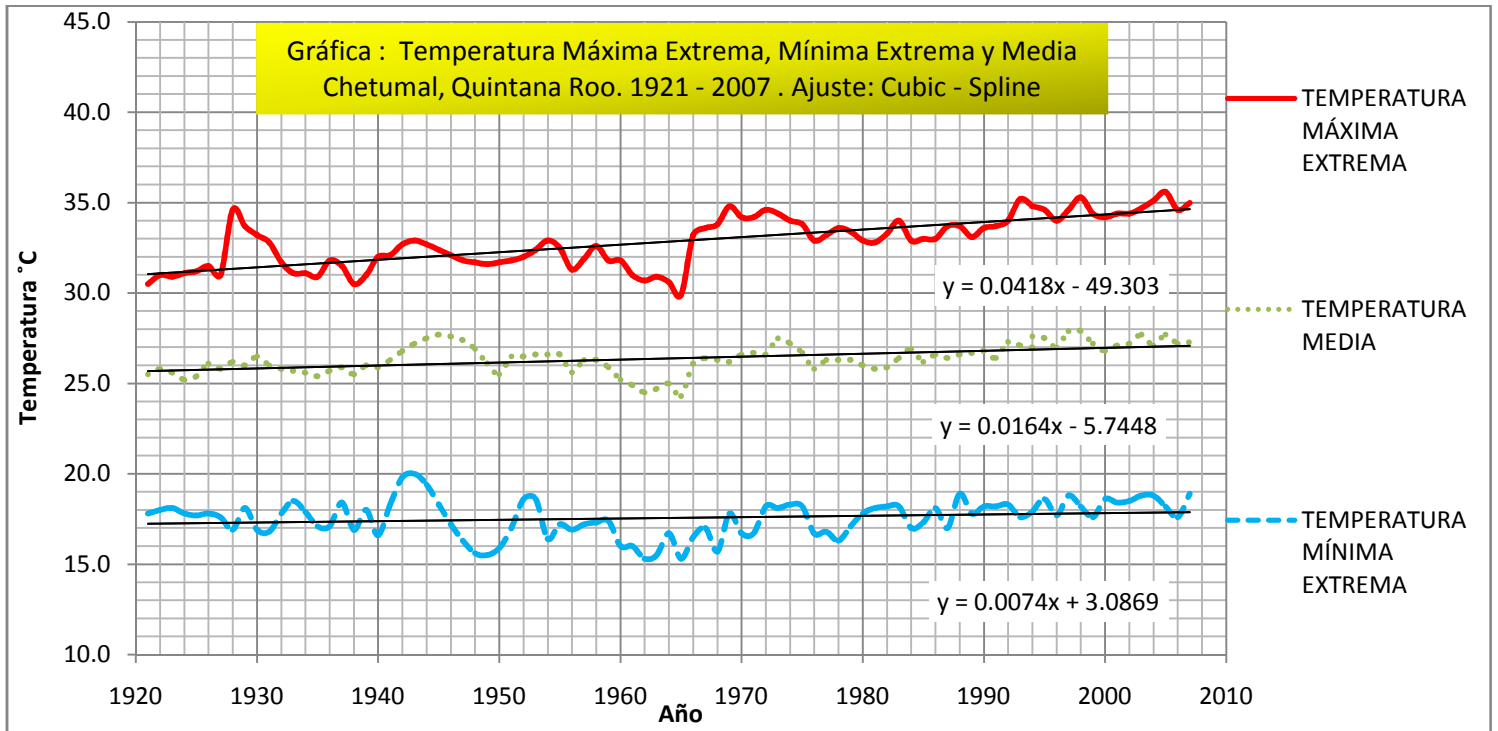
La línea recta es la tendencia de cada serie de temperatura

Figura 3.3



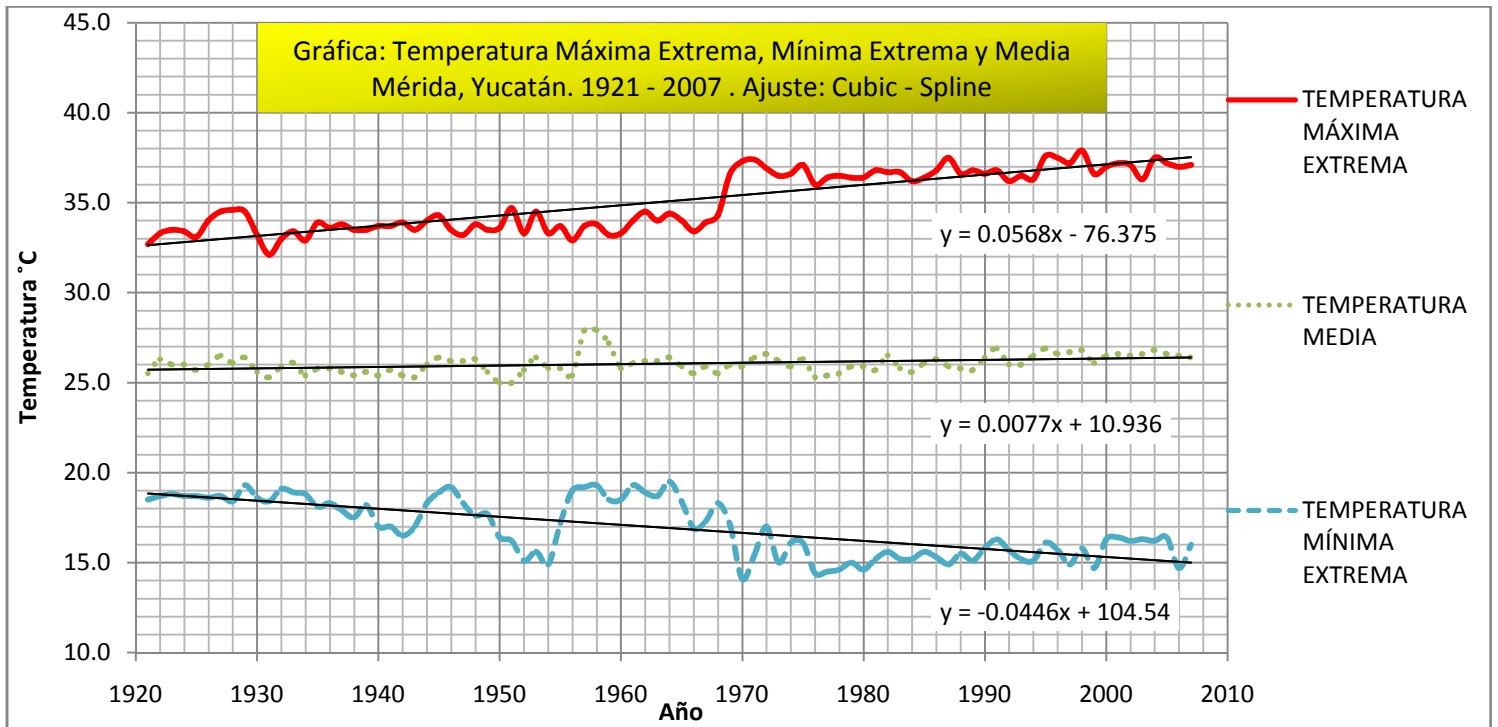
La línea recta es la tendencia de cada serie de temperatura

Figura 3.4



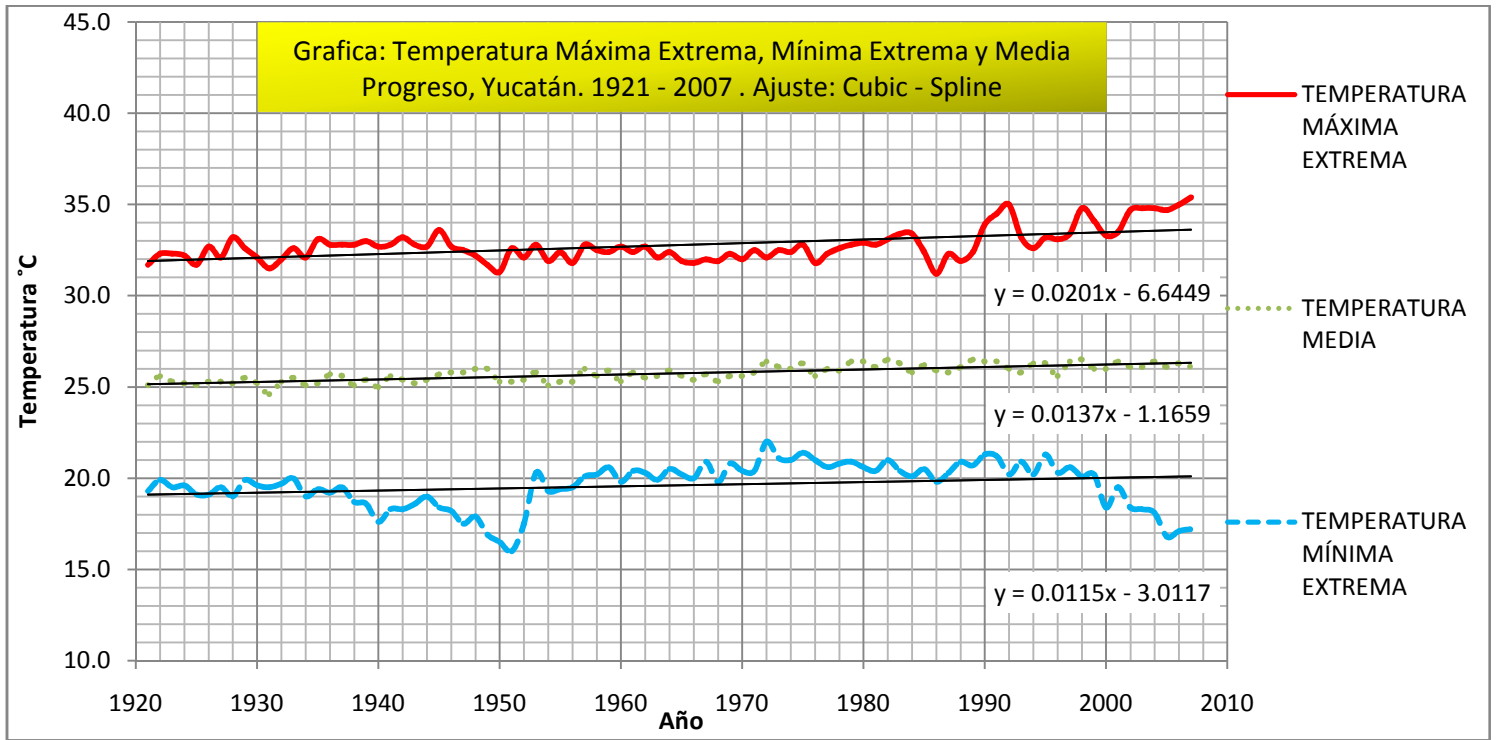
La línea recta es la tendencia de cada serie de temperatura

Figura 3.5



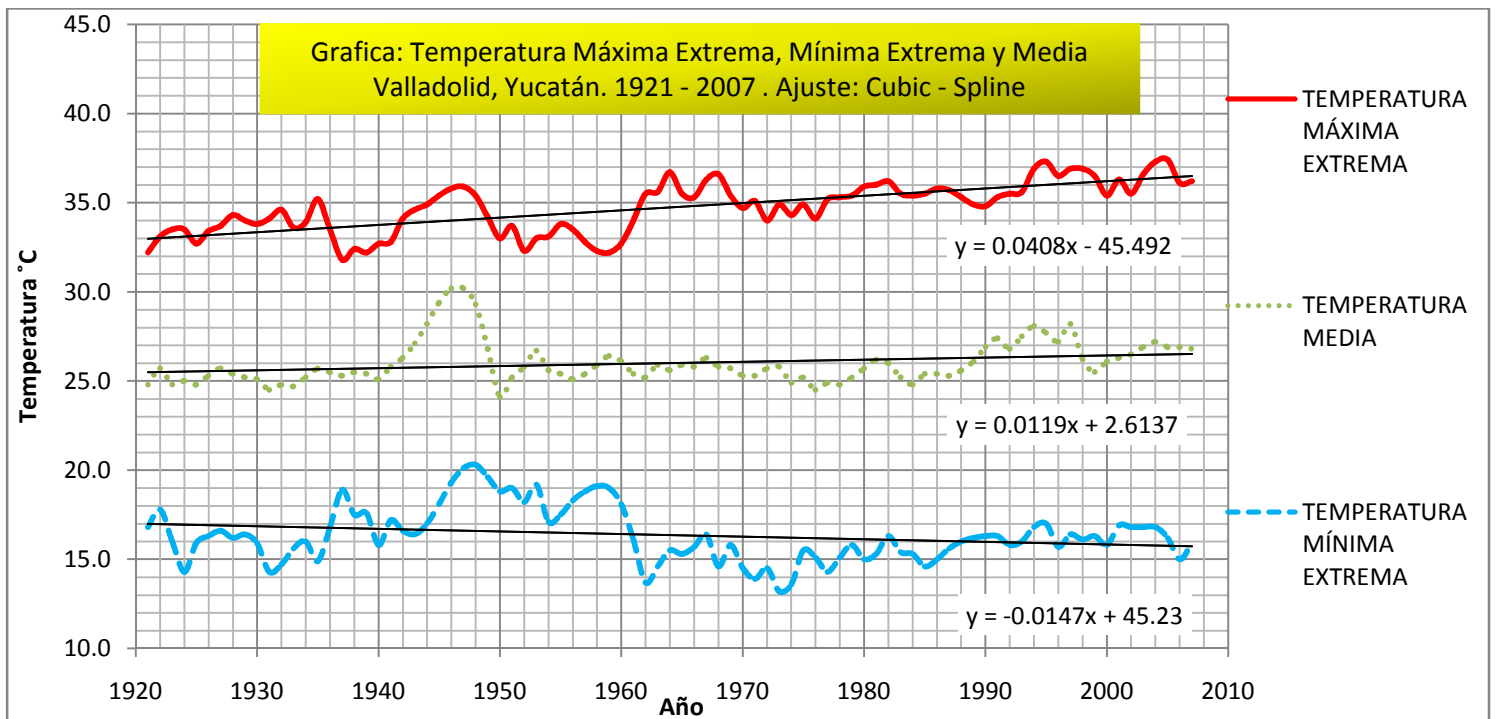
La línea recta es la tendencia de cada serie de temperatura

Figura 3.6



La línea recta es la tendencia de cada serie de temperatura

Figura 3.7



La línea recta es la tendencia de cada serie de temperatura

Observando las gráficas de la temperatura de las 6 estaciones en estudio y las Tablas, vemos que se pueden agrupar según el tipo de comportamiento que presentan. Para las estaciones de Campeche, Campeche; Mérida, Yucatán y Valladolid, Yucatán, las temperaturas correspondientes a máxima extrema, presentan una tendencia en aumento así como para la temperatura media. Por otro lado, las temperaturas correspondientes a mínima extrema, presentan una disminución en la tendencia de la temperatura. Las Figuras. 3.2, 3.5 y 3.7 muestran estos resultados.

Para las estaciones de Chetumal, Quintana Roo así como en Progreso, Yucatán, las temperaturas correspondientes a máxima extrema y mínima extrema, presentan ambas un aumento en la tendencia de la temperatura y por lo tanto también se observa la tendencia en aumento de la temperatura media. Las Figuras. 3.4 y 3.6 muestran estos resultados. Las Tablas 3.2 a 3.4 muestran el promedio de las series de temperatura.

Por último, la estación de Champotón, Chetumal, es la única estación que presenta una tendencia en la temperatura tal que muestra una disminución en la misma tanto en temperaturas máxima extrema, como en mínima extrema y de igual modo la temperatura media. La Figura. 3.3 muestra esta discusión.

Al considerar el comportamiento de las estaciones en estudio, se puede llevar a cabo un promedio estadístico de las 6 estaciones y determinar cuál ha sido la tendencia de la temperatura para la región de la Península de Yucatán, el resultado aparece en la Tabla 3.5

Tabla 3.5 Variación de la Temperatura Máxima Extrema, Media y Mínima Extrema de las 6 Estaciones en Estudio

<b>Variación de la Temperatura Máxima Extrema, Media y Mínima Extrema en la Península de Yucatán (°C)</b>
<b>3.7</b>
<b>1.1</b>
<b>-1.2</b>



### 3.5 Comparación de las Series de Temperatura y la Actividad Solar

Una vez que se llevó a cabo el tratamiento de datos trataremos de observar alguna relación con otro parámetro.

Al estudiar los datos, surge la curiosidad de saber qué es lo que está causando la variación de la temperatura, en particular en la región en estudio. Es decir, tratar de averiguar la causa que provoca la variación de la tendencia de la temperatura en el periodo de tiempo que abarca de 1921 a 2007. Es por esta razón que surge un primer intento de explicar esta tendencia al tratar de correlacionar la temperatura de las estaciones en estudio con la actividad solar así como el flujo de energía y la actividad antropogénica, en particular comparando la temperatura con el número de manchas solares en un periodo de tiempo que es igual al periodo abarcado por los datos de las temperaturas.

Para ello, se normalizan las gráficas del número de manchas solares como las gráficas de temperatura promedio de cada una de nuestras estaciones en estudio y se lleva a cabo una comparación directa así como un análisis de los datos para identificar si existe algún tipo de correlación o anticorrelación entre estas series de datos.

De las 6 estaciones en estudio, podemos decir que en 2 de ellas se puede encontrar una cierta correlación, dicha comparación la podemos apreciar en las Figuras 3.8 y 3.9, así como en las tablas 3.6, 3.7, 3.8 y 3.9

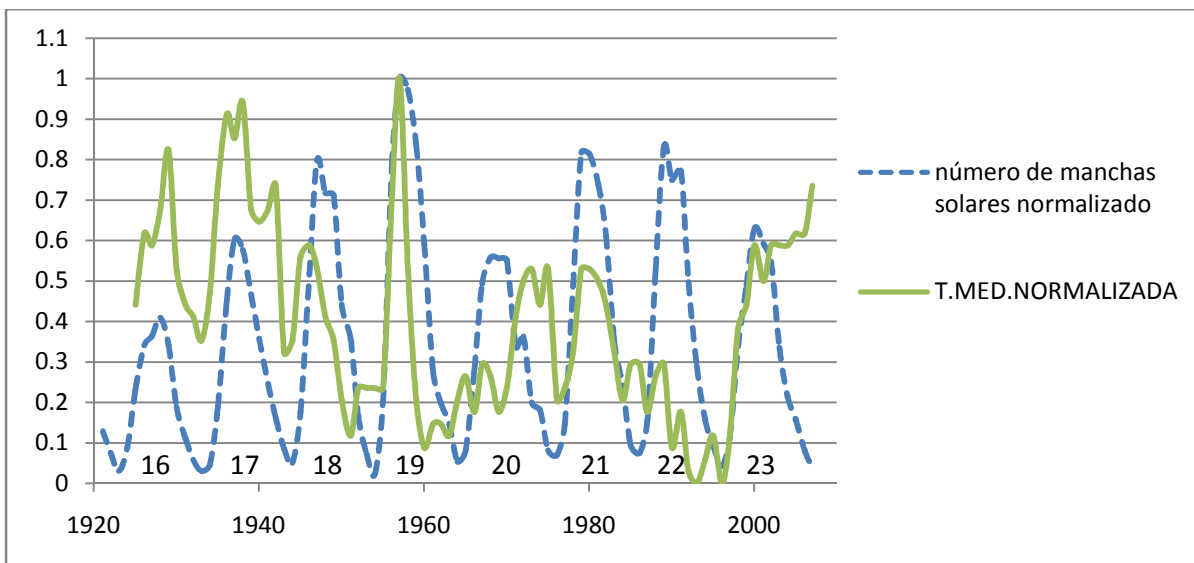


Figura 3.8

Estación Champotón

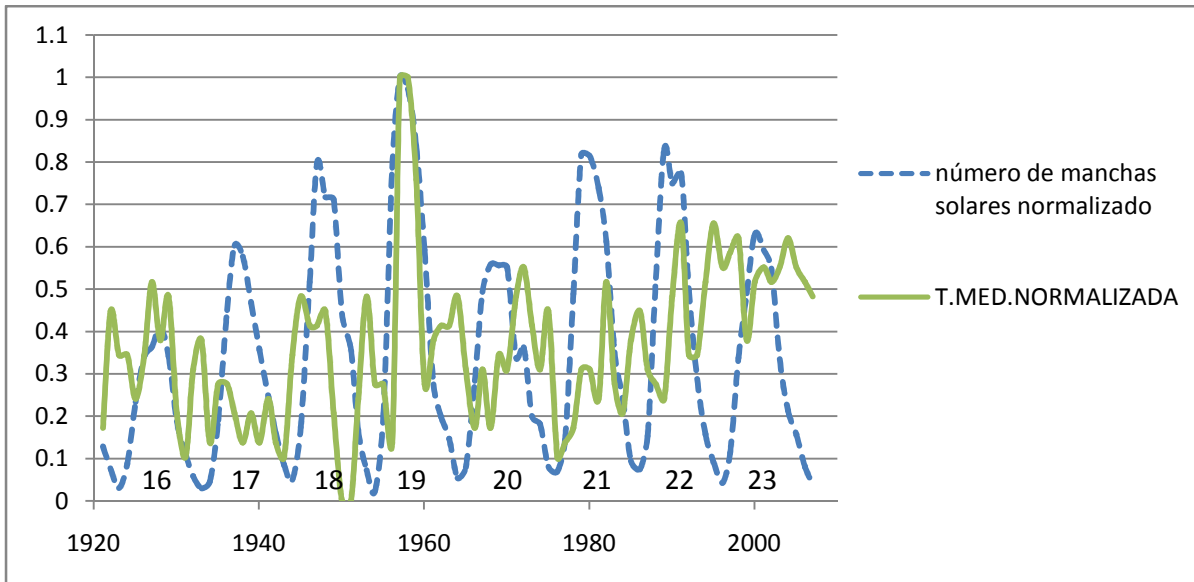


Figura 3.9 Estación Mérida

Para la estación de Champotón se puede apreciar una buena correlación para los ciclos solares 16, 17, 19 y 21, y 23 (agosto de 1923 a septiembre de 1933, septiembre de 1933 a febrero de 1944, abril de 1954 a octubre de 1964, junio de 1971 a septiembre de 1986, mayo de 1996 a diciembre del 2008, respectivamente), mientras que para la estación de Mérida la correlación se observa para los ciclos solares 16, 18 y 19 (agosto de 1923 a septiembre de 1933, febrero de 1944 a abril de 1954, abril de 1954 a octubre de 1964, respectivamente). En ambas comparaciones se logra apreciar una muy buena correlación entre el ciclo solar más intenso (en el periodo en estudio), que es el ciclo 19; sin embargo, en el resto de los ciclos solares no es posible determinar la correlación sin llevar a cabo otro tipo de análisis.

Como una primera aproximación para conocer la posible relación entre la actividad solar y el clima, se obtiene el coeficiente de correlación entre el número de manchas solares y la temperatura media para las estaciones en estudio durante un periodo de tiempo que abarca desde 1921 hasta 2007. Las estaciones de Champotón y Mérida son las más representativas, los valores que se obtienen se muestran en la Tabla 3.6 para las correlaciones y en la Tabla 3.7 para las anti-correlaciones para la estación de Champotón, y las Tablas 3.8 y 3.9 para la estación de Mérida respectivamente.

Tabla 3.6 Coeficiente de correlación, estación Champotón

Año	Coeficiente de Correlación
1939	0.8
1947	0.7
1951	0.6
1961	0.6
1963	0.5

1983	0.5
2000	0.6

Tabla 3.7 Coeficiente de anti-correlación, estación Champotón

Año	Coeficiente de Anticorrelación
1926	-0.6
1929	-0.7
1936	-0.7
1944	-0.5
1967	-0.5
1971	-0.5
1992	-0.7
1994	-0.5

Tabla 3.8 Coeficiente de correlación, estación Mérida

Año	Coeficiente de Correlación
1928	0.5
1937	0.6
1939	0.8
1940	0.5
1947	0.7
1948	0.5
1951	0.7
1961	0.5
1963	0.6
1983	0.5
2000	0.6

Tabla 3.9 Coeficiente de anti-correlación, estación Mérida

Año	Coeficiente de Anticorrelación
1929	-0.7
1936	-0.6
1964	-0.5
1967	-0.6
1971	-0.5
1992	-0.8
1994	-0.5

En las otras estaciones no se alcanza a apreciar un tipo de correlación entre la temperatura promedio y el número de manchas solares. Por último se lleva a cabo un análisis del mismo estilo al utilizado anteriormente pero con las anomalías de la temperatura y el número de manchas solares encontrando que no se puede determinar si existe una correlación entre estas variables. Para poder saber si esto es verdad o no, será necesario llevar a cabo estudios más especializados. De igual modo es necesario tomar en cuenta otro tipo de variables que estén involucradas en el cambio de la temperatura para la región en estudio como pueden ser las emisiones de contaminantes a la atmósfera así como la actividad volcánica, cambios en las corrientes oceánicas, deforestación de la zona, entre otros. El número de variables se vuelve cada vez mayor, lo cual representa un reto para avanzar hacia un mejor entendimiento del porqué y hacia dónde se dirige el cambio climático, tanto local como global.

### 3.5.1 Irradiancia solar total y el clima

Todos sabemos que la principal fuente de energía para la Tierra es sin duda el Sol y es la radiación solar quien proporciona el sustento de la vida así como también es la principal causa de las variaciones en el clima.

Anteriormente se consideraba que la cantidad de energía que llegaba a la Tierra se mantenía constante, sin embargo se han observado variaciones, principalmente con la ayuda de satélites que se han encargado de llevar a cabo estas mediciones desde 1978. Las mediciones las han realizado los satélites: HF (Hickey-Frieden), ACRIM (Active Cavity Radiometer Irradiance Monitor I y II), ERBS (Earth Radiation Budget Satellite) y VIRGO (Variability of solar Irradiance and Gravity Oscillations), por su siglas en inglés, entre otros (Fröhlich y Lean, 1998).

El flujo total de radiación en todas las longitudes de onda que recibe la Tierra del Sol en el tope de la atmósfera y a una distancia promedio de 1 Unidad Astronómica (UA) se le denomina Irradiancia solar. Puede ser calculada si conocemos el radio del Sol, la temperatura de la fotosfera y el valor de la UA, el resultado es de  $1367 \text{ W/m}^2$ . Las observaciones satelitales indican un valor promedio de  $1367 \pm 4 \text{ W/m}^2$  (Mendoza, 2005).

La radiación electromagnética solar que llega a la Tierra presenta cambios debido principalmente a 3 mecanismos:

- 1.-Variaciones de la órbita planetaria: inclinación, precesión y excentricidad de la órbita.
- 2.-Cambios en el albedo: debido a los cambios en la nubosidad o a la composición atmosférica y a cambios en la distribución de la masa en los continentes y en los cuerpos oceánicos.
- 3.- Variaciones intrínsecas de la radiación solar.

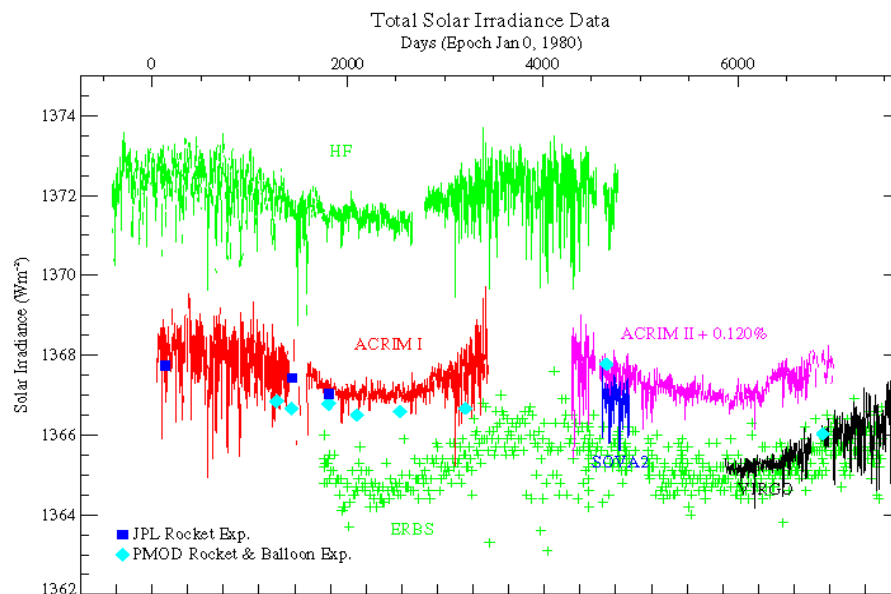
Algunos de estos mecanismos producen cambios que son evidentes en escalas de tiempo de miles o millones de años, pero en particular los cambios observados de la Irradiancia solar ocurren en

escalas de tiempo que se encuentran en minutos o décadas (que son las escalas de tiempo que resultan importantes para el ser humano).

Gracias a estas observaciones se han encontrado las siguientes variaciones en la Irradiancia Total Solar así como las causas:

- 1.- Cambios en minutos y horas están relacionados con la granulación, meso y súper granulación.
- 2.- Cambios de pocos días a semanas están dominados por las manchas solares (variaciones de alrededor de 0.3%)
- 3.- Cambios a lo largo del ciclo solar (de alrededor del 0.1%) se encuentran en consonancia con la actividad de las manchas solares.
- 4.- las observaciones espaciales tienen poco más de 30 años por lo que las variaciones en escalas de tiempo mayores a los 11 años son inciertas (Fröhlich y Lean, 1998).

Debido a que existen distintas series de tiempo de la Irradiancia es posible llevar a cabo una composición de las series de tiempo (por ejemplo Willson, 1997; Willson y Mordvinov, 2003; Fröhlich y Lean, 1998; Fröhlich, 2000). La figura 1 muestra las series de datos de los diferentes satélites mientras que la Figura 2 muestra la serie compuesta por Fröhlich (2000).



**Figura 1.** Las diferentes series de tiempo desde 1978: HF (Hickey-Frieden), ACRIM (Active Cavity Radiometer Irradiance Monitor I y II), ERBS (Earth Radiation Budget Satellite), SOVA2 (Solar Variability) y VIRGO (Variability of solar Irradiance and Gravity Oscillations), por su siglas en inglés.

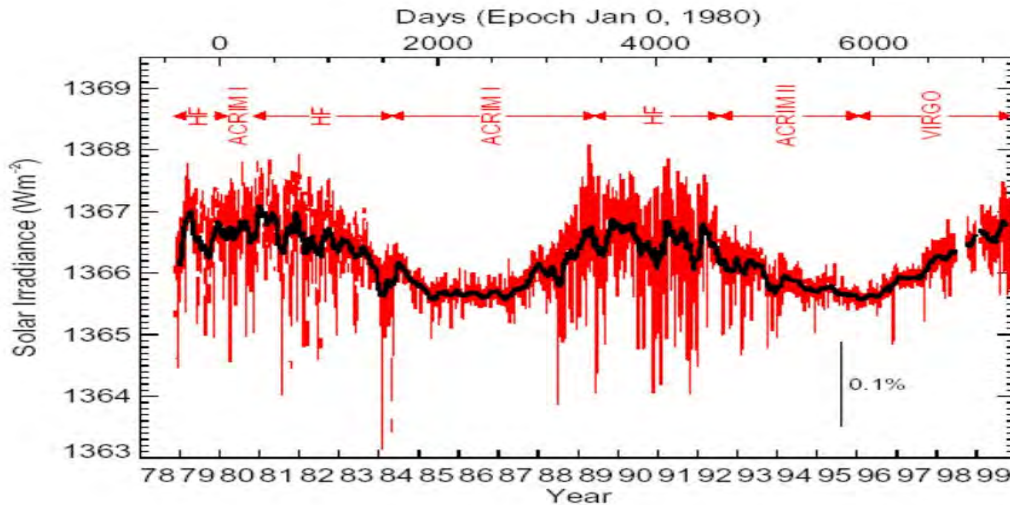


Figura 2. Serie compuesta por Fröhlich (2000).

Para calcular la cantidad de energía que llega a la Tierra consideramos una esfera que rodea totalmente al Sol cuyo radio es 1 UA:  $1.5 \times 10^{11}$  m. Se divide la emisión ( $3.865 \times 10^{26}$  W) por el área de nuestra esfera imaginaria (el área de cualquier esfera está dada por  $4\pi r^2 = 4\pi(1.5 \times 10^{11} \text{ m})^2 = 2.83 \times 10^{23} \text{ m}^2$ ):

$$\frac{3.865 \times 10^{26} \text{ W}}{4\pi(1.5 \times 10^{11} \text{ m})^2} = 1367 \text{ W/ m}^2$$

Asumimos que la Tierra radia como un cuerpo negro y que el albedo del planeta es del 30% y la irradiancia solar es  $1367 \text{ W/ m}^2$ . La forma de la Tierra no es un disco plano perpendicular al Sol sino que tiene una forma esférica (como una primera aproximación), por lo que el área es 4 veces mayor a la de un disco con el mismo radio. Así la intensidad de la radiación promedio sobre toda la esfera está dada por:

$$1367 \text{ W/ m}^2 \times 0.25 \times 0.7 = 239.2 \text{ W/ m}^2 \text{ (considerando que no hay atmósfera presente)}$$

El planeta debe perder exactamente tanta energía como recibe. Ya que conocemos la ley de Stefan-Boltzman para el cuerpo negro:

$$I = \sigma T^4 \quad \text{despejando T} \quad T = (I/\sigma)^{0.25}$$

Considerando que  $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W / (m}^2 \text{ K}^4)$  y ya que  $I = 239.2 \text{ W/ m}^2$ , la temperatura de equilibrio resulta ser  $254.9 \text{ K}$  ( $-18.3 \text{ }^\circ\text{C}$ ), por lo que la temperatura media de la Tierra resulta ser mucho más fría si no se encuentra presente la atmósfera.

Esta temperatura es mucho más fría de las condiciones actuales (ya que la temperatura promedio es de  $14^\circ\text{C}$ ), y la razón para que la temperatura de la Tierra sea más cálida es debido a la presencia de los gases de efecto invernadero los cuales se encargan de absorber la radiación de onda larga que se refleja de la superficie manteniendo una temperatura más caliente. El más importante de

los gases de efecto invernadero es sin duda el vapor de agua seguido del dióxido de carbono. A pesar de que los elementos más abundantes en la atmósfera son el nitrógeno y oxígeno (78% y 21% respectivamente), estos aportan muy poco efecto de los gases de tipo invernadero. Los procesos naturales de los gases de efecto invernadero hacen posible la vida en la Tierra como la conocemos, sin embargo las actividades humanas son responsables de alterar la composición atmosférica al contaminarla con otros gases de efecto invernadero así como pequeñas partículas conocidas como aerosoles. La contribución más grande es debido a la quema de combustibles fósiles que liberan dióxido de carbono a la atmósfera. Los gases de efecto invernadero afectan el clima ya que alteran no sólo la cantidad de radiación que llega a la Tierra sino también la radiación en infrarrojo (IR) que libera la Tierra. Al producirse un cambio en los elementos que componen a la atmósfera se puede inducir un calentamiento o un enfriamiento del sistema climático. Desde el comienzo de la era industrial (alrededor de 1750) los efectos en el clima debido a la actividad humana han causado un calentamiento y se ha observado que el impacto humano en el clima durante esta era ha excedido a los cambios producidos por los procesos naturales tales como variaciones en el Sol o erupciones volcánicas (IPCC Fourth Assessment Report: <http://www.ipcc.ch/>).

Las principales emisiones de gases de efecto invernadero debido a la actividad humana son: dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ), óxido de nitrógeno ( $\text{N}_2\text{O}$ ) y los halocarburos (CFCs). Se ha registrado un incremento significativo de estos gases desde el comienzo de la era industrial lo cual podemos observar en la Figura 3.

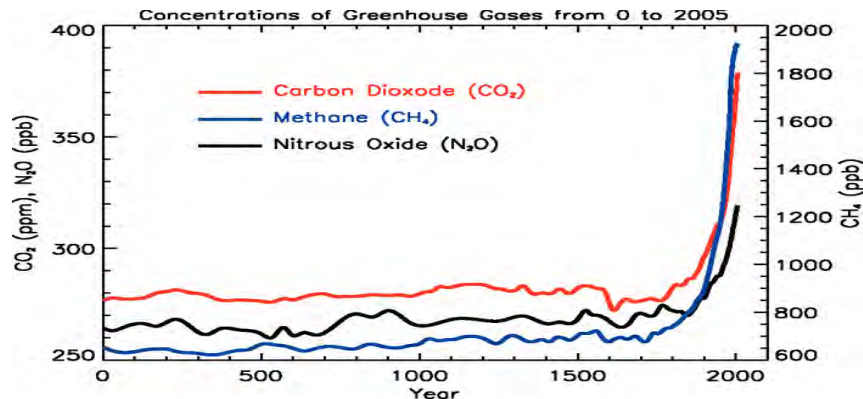


Figura 3 Concentración atmosférica de los gases de efecto invernadero más importantes de larga vida en los últimos 2000 años en unidades de parte por millón (ppm) o parte por billón (ppb por sus siglas en inglés, 1 billón equivale a  $1 \times 10^9$ ).

Según el IPCC, los forzamientos radiativos debido a los gases de efecto invernadero causados por la actividad humana pueden provocar un calentamiento en la atmósfera como en el caso del  $\text{CO}_2$ , el cual tiene la mayor aportación al forzamiento desde la era industrial. El incremento en el ozono troposférico también contribuye al calentamiento mientras que el ozono estratosférico produce un enfriamiento. Dichas aportaciones se presentan en la Figura 4.

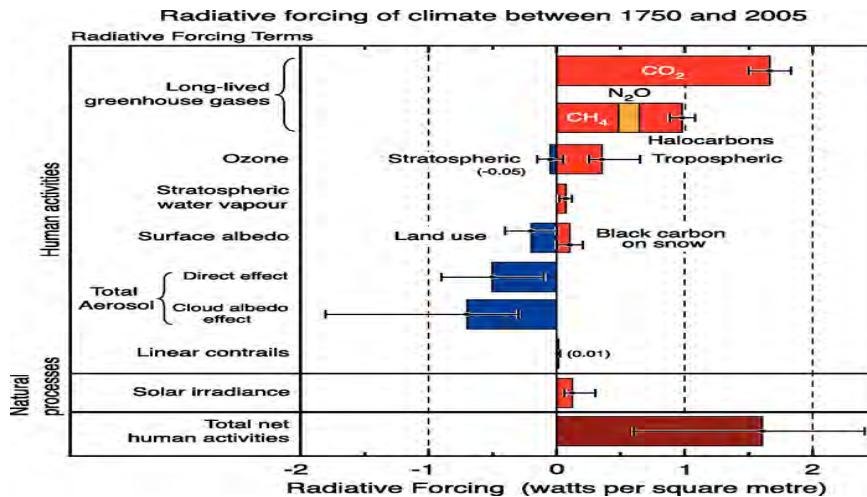


Figura 4 Forzamientos radiativos entre 1750 y 2005 según el IPCC, la línea negra asignada a cada barra representa la incertidumbre asociada a cada uno de los posibles forzamientos.

Según el IPCC se pueden llevar a cabo los cálculos para conocer cuánto ha contribuido cada uno de los gases al forzamiento radiativo desde 1750 utilizando las relaciones que se muestran en la Tabla 1, aunque hay que mencionar que existen otras expresiones en donde puede variar el valor de las constantes.

Tabla 1

Trace Gas	Simplified Expression Radiative Forcing, $\Delta F$ ( $Wm^{-2}$ )	Constant
CO <sub>2</sub>	$\Delta F = \alpha \ln(C/C_0)$	$\alpha = 5.35$
CH <sub>4</sub>	$\Delta F = \beta(M^{1/2} - M_0^{1/2}) - [f(M, N_0) - f(M_0, N_0)]$	$\beta = 0.036$
N <sub>2</sub> O	$\Delta F = \epsilon(N^{1/2} - N_0^{1/2}) - [f(M_0, N) - f(M_0, N_0)]$	$\epsilon = 0.12$
CFC-11	$\Delta F = \lambda(X - X_0)$	$\lambda = 0.25$
CFC-12	$\Delta F = \omega(X - X_0)$	$\omega = 0.32$
*IPCC (2001)		
The subscript "o" denotes the unperturbed (1750) concentration		
$f(M, N) = 0.47 \ln[1 + 2.01 \times 10^{-5} (MN)^{0.75} + 5.31 \times 10^{-15} M(MN)^{1.52}]$		
C is CO <sub>2</sub> in ppm, M is CH <sub>4</sub> in ppb		
N is N <sub>2</sub> O in ppb, X is CFC in ppb		
C <sub>0</sub> = 278 ppm, M <sub>0</sub> = 700 ppb, N <sub>0</sub> = 270 ppb, X <sub>0</sub> = 0		

Se sabe que la concentración del CO<sub>2</sub> antes de 1800 era de 275 ppm, antes de la revolución industrial y que esta concentración se incremento a 290 ppm en el año de 1880 llegando a una concentración de 365 ppm en el año de 1998, dicha concentración muestra un incremento



promedio en la concentración de 1.5 ppm cada año, lo cual a su vez representa un incremento en la temperatura.

Si calculamos el incremento del calentamiento debido al CO<sub>2</sub> entre los años 1920 y 2007, obtenemos un valor de:

$$\text{Calentamiento} = 5.35 \times \ln ( 379 / 305 ) = 1.2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Lo cual concuerda bastante bien con los resultados obtenidos en la presente tesis sobre la región en estudio, que arrojó un incremento de la temperatura de 1.0 °C para el periodo de 1921 a 2007. Sin embargo hay que considerar que algunos gases de efecto invernadero contribuyen al enfriamiento por lo cual este valor puede disminuir.

El forzamiento solar que se ha calculado ha sido la mayoría del tiempo pequeño comparado con las estimaciones antropogénicas debido a los gases de efecto invernadero. Algunas simulaciones que consideran los gases de efecto invernadero sin la influencia del Sol muestran un incremento lineal de 0.43 K para el siglo 20. Al considerar también el incremento en la Irradiancia, el incremento lineal resulta ser de 0.6 K lo cual es muy cercano a lo observado (calentamiento global promedio  $0.6 \pm 0.2 \text{ } ^\circ\text{C}$  – IPCC TAR, 2001-).

# Conclusiones

A través del estudio de la tendencia secular de la temperatura en la Península de Yucatán ha sido posible determinar la tendencia de la misma en el periodo que abarca de 1921 a 2007, encontrando un aumento en la temperatura de 1.0 °C, esto es un aumento bastante considerable para un periodo de tiempo tan corto (hablando en términos geológicos).

Este cambio seguramente va a tener consecuencias importantes para toda la región en estudio, tanto para la población humana como para la flora y fauna terrestre y marina. Estos cambios afectarán la forma de vida de toda la población local así como su economía.

Este resultado se obtuvo de la zona en estudio, de manera local, pero se ha observado un calentamiento global promedio de 0.6 +/- 0.2 °C desde principios del siglo 20 (IPCC TAR 2001), dicho aumento se ha atribuido en su mayor parte a la influencia antropogénica sobre el clima. Por lo que resulta muy importante entender cuales son las causas de esta tendencia de la temperatura (además de la influencia antropogénica), para poder disminuir la misma y así evitar las consecuencias que esto traería a la zona en estudio como puede ser el cambio en las estaciones climáticas: disminución o aumento de lluvia, lo que implicaría sequías o inundaciones, aumento del número de incendios ó aumento en el número de tornados que golpean la región, cambios en la flora y fauna, etc.

La irradiancia solar total se propuso primeramente como moduladora directa del clima, pero debido a su baja variabilidad entre máximo y mínimo solar (~ 0.1%), es necesario proponer mecanismos amplificadores. También se ha considerado que las variaciones solares en las longitudes de onda del ultravioleta (UV) y extremo UV (EUV) pueden ser las que modulen el clima. Se ha propuesto el forzamiento debido a estas emisiones debido a que entre máximo y mínimo de actividad solar varían entre un 1 a un 100%. La radiación UV es absorbida por el ozono que se encuentra en la estratosfera elevando su temperatura, un calentamiento de la parte baja de la estratosfera produce vientos más fuertes los cuales penetran en la troposfera alterando la circulación de la celdas de Hadley lo cual afecta el transporte de energía entre el ecuador y los polos así como la temperatura de la (baja) atmósfera (Shindell et al., 1999).

También se ha encontrado que existe una correlación entre la actividad solar y los rayos cósmicos. Los rayos cósmicos son modulados por la actividad solar y se considera que favorecen directamente la nucleación de nubes bajas en la Tierra. Esto a su vez produce cambios en la temperatura al modificar el albedo, incrementándolo cuando hay más nubes y viceversa (Pallé-Bagó y Butler, 2000).

Por otra parte se ha propuesto otro mecanismo indirecto para la formación de nubes involucrando al Sol y a los rayos cósmicos: el viento solar modula la llegada de los rayos cósmicos, éstos cambian la densidad de corriente en la ionosfera terrestre. La variación en la densidad de

corriente cambia la carga de las partículas de aerosol lo cual afecta los núcleos de condensación (formadores de nubes) y su ritmo de producción así como la microfísica de nubes y el clima. Las partículas de aerosol con carga son más efectivas que las partículas de aerosol neutras como núcleos de condensación nubosa.

El sistema climático es bastante complejo y se ve afectado por forzamientos internos y externos. Algunos eventos climáticos se pueden ver afectados por la actividad solar. En una primera aproximación no se encontró una correlación que se logre apreciar al trabajar con los datos de temperatura y el número de manchas solares para cada uno de los ciclos solares, lo cual no quiere decir que esta relación no exista. Es deseable hacer otro tipo de análisis que nos permita descubrir si existe ya sea una correlación o anticorrelación con la actividad solar, así como intentar considerar otro tipo de variables que tengan una influencia directa en el aumento de la temperatura para la región en estudio como puede ser la Irradiancia solar total o la contribución que pueden llevar a cabo los distintos gases de efecto invernadero como dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ), óxido nítrico ( $\text{N}_2\text{O}$ ) y los halocarburos (CFCs) los cuales han mostrado un aumento significativo desde el comienzo de la era industrial. O inclusive buscar otro tipo de fenómeno solar distinto al número de manchas solares que pueda asociarse al cambio de temperatura.

# Bibliografía:

## Libros

- [1] Aguado E., Burt J. E. 2004. *Understanding Weather and Climate*. Third Edition. Pearson Education, New Jersey. United States of America.
- [2] Arfken, George B, Weber, Hans-Jürguen. 2005. *Mathematical Methods for Physicists: International Edition*. Sixth Edition. Academic Press. United Kingdom.
- [3] Benestad R. E. 2006. *Solar Activity and Earth's Climate*. Second Edition. Springer - Praxis. Chichester, United Kingdom.
- [4] Bhatnagar A., Livingston W. 2005. World Scientific Series in Astronomy and Astrophysics, Vol. 6: *Fundamentals of Solar Astronomy*. World Scientific, Singapore.
- [5] Blondel P., Mason J. W. 2006. *Solar System Update*. Springer - Praxis. Chichester, United Kingdom.
- [6] Freeman J. W. 2001. *Storms in Space*. Cambridge University Press. United Kingdom.
- [7] Friedberg S. H., Insel A. J., Spence L. E. 1982. *Álgebra Lineal*. Publicaciones Cultural. México.
- [8] Hoyt D. V., Schatten K. H. 1997. *The Role of the Sun in Climate Change*. Oxford University Press. New York. United States of America.
- [9] Kenneth Hoffman, Ray Kunze. 1971. *Linear Algebra*. Second edition. Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey. United States of America.
- [10] Lilensten J., Bornarel J. 2006. *The Space Weather, Environment and Societies*. Springer. Netherlands.
- [11] Moldwin M. 2008. *An Introduction to Space Weather*. Cambridge University Press. United Kingdom.
- [12] Noyes R. W. 1982. *The Sun, Our Star*. Harvard University Press. Cambridge. United Kingdom.
- [13] Otaola J. A., Mendoza B., Pérez R. *El Sol y la Tierra: Una Relación Tormentosa*. Col. La Ciencia Desde México. Fondo de Cultura Económica. Núm. 114. México.
- [14] Sills A. D. 2003. *Earth Science, The Easy Way*. Barron's Educational Series. New York. United States of America.
- [15] Stoer J., R. Bulirsch. 1991. *Introduction to Numerical Analysis*. Second Edition. Springer – Verlag: New York. United States of America

[16] William H. Press, Brian P. Flannery, Saul A. Teukolsky, William T. Vetterling. 1992. *Numerical Recipes in C: The Art of Scientific Computing*. Cambridge University Press. United Kingdom.

## Revistas

[17] Mendoza Ortega, Blanca Emma. *Actividad Solar y Clima*. Monografías del Instituto de Geofísica/8, mayo del 2006. Geofísica, UNAM.

[18] *Ciencia*, Revista de la Academia Mexicana de Ciencias. Vol. 57, Núm. 1, enero-marzo 2006.

## Artículos

[19] Fröhlich, C., Lean, J. The sun's total irradiance: cycles, trends and relates climate change uncertainties since 1976, *Geophys. Res. Lett.* 25, 4377-4380, 1998.

[20] Hodell D. A., M. Brenner and J. H. Curtis. *Climate and cultural history of the Northeastern Yucatan Peninsula, Quintana Roo, Mexico*. *Climate Change*. 83, 215 – 240, 2007.

[21] Lean, J., J. Beer, and R. Bradley, Reconstruction of solar irradiance since 1610: Implications for climate change, *Geophys. Res. Lett.*, 22, 3195-3198, 1995.

[22] Lean, J.L., G.J. Rottman, H.L. Kele, T.N. Woods, J.R. Hickey and L.C. Puga, Detection and parameterization of variations in solar mid and near ultraviolet radiation (200 to 400 nm), *J. Geophys. Res.*, 102, 29939-29956, 1997.

[23] Lean, J.L., Cook, J., Marquette, W., Johannesson, A. Magnetic sources of the solar irradiance cycle, *Astrophys. J.*, 492, 390-401, 1998.

[24] Lean, J.L., O.R. White, W.C. Livingston, and J.M. Picone, Variability of a composite chromospheric irradiance index during the 11-year activity cycle and over longer time periods, manuscript in preparation, 2000.

[25] Mendoza B., V. Velasco, and E. Jáuregui. *A study of historical droughts in southeastern Mexico*. *Journal of Climate*. 19, 2916 – 2934, 2005.

[26] Mendoza B. *Solar Rotation and Cycle Length*. *Solar Physics*. 188, 237 – 243, 1999.

[27] Mendoza B. and V. Velasco. *High-latitude methane sulphuric acid variability and solar activity: the role of the total solar irradiance*. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 71, 33 – 40, 2009.

[28] Mendoza B., A. Lara, D. Maravilla and E. Jáuregui. *Temperature variability in central México and its possible association to solar activity*. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 63, 1891 – 1900, 2001.

[29] Mendoza B. *Total solar irradiance and climate*. Advances in Space Research. 35, 882 – 890, 2005.

[30] Mendoza B., V. García-Acosta, V. Velasco, E. Jáuregui and R. Díaz-Sandoval. *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, 2007.

[31] Mendoza, B. V. Velasco and J. F. Valdés-Galicia. *Mid-term periodicities in the solar magnetic flux*. Solar Physics. 233, 319 – 330. 2006.

[32] Moussas X., J. M. Polygiannakis, P. Preka-papadema and G. Exarhos. *Solar Cycles: A tutorial*. Advances in Space Research. 35, 725 – 738, 2005.

Shindell, D., Rind, D., Calachandran, N., Lean, J., Lonerga, P. Solar cycle variability, ozone and climate. Science 284, 305-308, 1999).

Pallé-Bagó, E. Butler, C.J. The influence of cosmic rays on terrestrial clouds and global warming. Astron. Geophys. 41, 418-422, 2000.

(IPCC Fourth Assessment Report: <http://www.ipcc.ch/>).

## Direcciones Electrónicas

[33] Servicio Meteorológico Nacional (SMN) <http://smn.cna.gob.mx/>

[34] Intergovernmental Panel of Climate Change (IPCC) <http://www.ipcc.ch/>

[35] National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) <http://www.noaa.gov/>

[36] International Satellite Cloud Cover Project (ISCCP) <http://isccp.giss.nasa.gov/>