



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE CIENCIAS

**ESTIMACIÓN DE LA CUBIERTA TOTAL DE
NUBES BAJAS COMO FUNCIÓN DE LA
ACTIVIDAD SOLAR EN LOS PERIODOS 1983-
2146 Y 2009-2146.**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

F Í S I C A

P R E S E N T A:

DIANA GAMBORINO UZCANGA



**DIRECTOR DE TESIS:
DRA. BLANCA EMMA MENDOZA ORTEGA
2011.**



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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.

Hoja de Datos del Jurado

1. Datos del alumno.
Gamborino
Uzcanga
Diana
(045) 55 25 14 35 81
Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Ciencias
Física
407057997
2. Datos del tutor.
Dra.
Blanca Emma
Mendoza
Ortega
3. Datos del sinodal 1.
M. en C.
Augusto
Cabrera
Manuel
4. Datos del sinodal 2.
M. en C.
Manuel René
Garduño
López
5. Datos del sinodal 3.
M. en C.
Edgar
Vázquez
Luis
6. Datos del sinodal 4.
Dr.
Marco Antonio
Martínez
Negrete
7. Datos del trabajo escrito.
Estimación de la cubierta total del nubes bajas en función de la actividad solar en los periodos 1983-2146 y 2009-2146.
47 p.
2011.

Índice

1	Resumen	3
2	Motivación y Objetivo	3
3	Introducción	4
4	El Sol	5
4.1	Datos generales sobre el Sol	5
4.2	Estructura y atmósfera del Sol	6
4.3	Actividad solar	10
5	Relación Sol-Tierra	13
5.1	Efectos del Sol en la atmósfera Terrestre	13
5.1.1	Las variaciones de Sol.	13
5.1.2	La variación por estratos atmosféricos terrestres bajo la influencia del Sol.	13
5.2	El papel del Sol en el calentamiento y enfriamiento de la Tierra.	16
5.2.1	Glaciares y Teoría de Milankovitch.	18
6	Nubes	20
6.1	Tipos de Nubes	21
6.2	Cubierta de Nubes	24
6.3	Influencia de las Nubes en el Cambio Climático	24
7	Fuentes de obtención de datos	26
7.1	Datos de la Anomalía Nubosa	26
7.2	Datos de Manchas Solares	27
8	Análisis de Datos	31
8.1	Cálculo de la anomalía nubosa anual (periodo 2009-2146)	37
8.2	Cálculo de la anomalía nubosa decenal	38
9	Discusión y Conclusiones	41
10	Apéndice	43
10.1	Albedo de Nubes	43
11	Bibliografía	44

El presente trabajo consta de las siguientes partes:

Un *resumen* (1) donde se describe brevemente cómo se realizó la estimación de la cubierta nubosa. Después la *motivación y objetivos* (2) en donde se detalla cuál es el propósito de efectuar dicha estimación. Luego hay una pequeña *introducción* (3) en la que se citan diferentes trabajos sobre los estudios recientes que se han llevado a cabo acerca de la relación entre el clima terrestre (particularmente respecto a la cubierta nubosa) y la actividad solar.

Una vez situados en el marco de la relación entre actividad solar y cubierta nubosa, se describe cada una de estas partes. Se esboza de forma general al *Sol* (4), su estructura interna y atmósfera, así como una pequeña inclusión en su actividad. Posteriormente, se hace una reseña de la *relación Sol-Tierra* (5), donde se habla de los efectos del Sol en la atmósfera terrestre y del papel que juega el Sol en el clima terrestre. En seguida, se exponen las *nubes* (6), su composición, formación, tipos, cubierta y finalmente se habla de la influencia de las nubes en el clima terrestre.

Siguiendo el curso natural de este trabajo, se presentan las *fuentes de obtención de datos* (7) donde se explica cómo y por qué se usaron los datos de la cubierta nubosa y de manchas solares. El *análisis de datos* (8) consiste en usar la metodología del artículo [xviii] para corregir los datos de la anomalía de la cubierta nubosa para después relacionarla con las manchas solares y finalmente calcular a futuro la anomalía en función de manchas solares. Se hicieron 3 estimaciones de la anomalía de la cubierta nubosa.

La última parte consiste en la *discusión y conclusiones* (9) donde se argumenta cuál es la mejor estimación de las 3 que se llevaron a cabo.

1 Resumen

Para este estudio se usaron datos de nubosidad y manchas solares desde el año 1983 hasta el año 2008 . El trabajo consistió en llevar a cabo el cálculo de la anomalía nubosa de la cubierta de nubes bajas. La nubosidad es un factor determinante en la temperatura terrestre a través de su albedo (ver Apéndice A).

Para hacer este cálculo primero se graficaron los datos conocidos de anomalía nubosa en función de los datos de manchas solares, ambos comprendidos en el periodo 1983-2008. Posteriormente se encontró la línea de tendencia que mejor se ajustara a estos datos. Después se evaluó la función obtenida con dos predicciones del número de manchas solares para así obtener la predicción de la anomalía nubosa para los periodos 2009–2146 y 1986–2146.

Se hicieron en total 3 estimaciones de la anomalía nubosa; una de ellas se hizo anual en el periodo 2009-2146, mientras que las otras dos se hicieron en el periodo 1986-2146. De éstas últimas dos, una de ellas se obtuvo al promediar a 10 años el conjunto de los datos del número de manchas solares de la primera estimación anual y de datos observados desde 1983. Para la tercera estimación se usaron datos que ya estaban promediados a 10 años desde el año 1983 hasta el año 2146.

Los resultados indican que la anomalía nubosa obtenida al promediar a 10 años los datos del número de manchas solares predicho por una de las series es más apropiada que la obtenidas con la otra serie de los datos previamente promediados.

2 Motivación y Objetivo

En un artículo recientemente publicado [xviii], se muestra que de varios fenómenos relacionados con la actividad solar como son la irradiancia solar totaln (IST), la radiación ultravioleta, y los rayos cósmicos (RC), las manchas solares resultaron ser el índice de actividad solar mejor relacionado con las anomalías nubosas. De este modo, los autores obtuvieron anomalías nubosas para los próximos 30 años y calcularon la temperatura promedio del Hemisferio Norte terrestre para el mismo lapso.

Utilizando la metodología del artículo arriba mencionado, el objetivo del presente trabajo será intentar predecir las anomalías nubosas para los próximos cien años. Los resultados obtenidos serán utilizados por el mismo grupo de autores para simular la temperatura promedio del Hemisferio Norte terrestre para los próximos cien años.

3 Introducción

Entre las preguntas más polémicas que se hacen respecto al tema del cambio climático, es el papel que juega la actividad solar en el mismo. Durante varios siglos esta pregunta ha atraído la atención de los científicos y hay muchos trabajos que tratan este tema tan controversial (p. ej. ver ix).

Se han hecho varios intentos para estimar el impacto de la variabilidad solar en el clima a través del estudio de los fenómenos asociados con el Sol tales como las manchas solares o la actividad geomagnética (p. ej. ver: v, xxiii, xxxii, x), la Irradiancia Solar Total (IST) (p. ej. ver: xiii, iv, xi, xxix, xx), la radiación ultravioleta (p. ej. ver: vii, xxx), la modulación del circuito eléctrico global por el viento solar (p. ej. ver: xxxviii), y el flujo de rayos cósmicos galácticos (p. ej. ver: xxxvii, xxvii, xvi, xxiv, xlii, xxxiv).

Después de haber encontrado una buena correlación entre la cubierta de nubes bajas y los rayos cósmicos galácticos (RC) entre los años 1983 a 1994, se publicó un artículo [xxxv] donde los autores sugieren que los RC modulan la producción de nubes en escalas de tiempo de décadas y más. En la actualidad, la pregunta de si los RC modulan el clima a través de cambios en las nubes aún no está resuelta. El espectro de opiniones va desde el punto de vista de que los RC son el principal contribuyente del forzamiento radiativo a través de las nubes (p. ej. xxxi) o que los RC pueden afectar parcialmente la formación de nubes (p. ej. xli), hasta considerar que los RC tienen un efecto insignificante en el clima (p. ej. vi).

Sin embargo, también es posible que la correlación entre los RC y las nubes se deba al hecho de que el flujo de RC está relacionado con otro fenómeno que ejerce influencia sobre el clima: la IST, que se anticorrelaciona con los RC [xv]. En un artículo publicado [xxiv] se encontró que los promedios anuales de la cubierta de nubes bajas (CNB) presentan una anticorrelación ligeramente mayor con las manchas solares comparada con la correlación con RC (aunque ellos no hicieron comentario al respecto). En otro artículo [xi] se muestra que la anticorrelación de CNB con IST y manchas solares es más alta y más consistente que la correlación con rayos cósmicos. Pero, debido a la anticorrelación entre IST y RC, es difícil decir cuál de los dos mecanismos está en acción, o cuál combinación de los dos.

4 El Sol

La estrella más cercana a la Tierra, el Sol, es una esfera luminosa de plasma a alta temperatura y es la fuente principal de energía de la atmósfera terrestre y de la vida. El Sol domina a los demás cuerpos del sistema solar desde el punto de vista gravitatorio y mediante el impacto de su actividad. Es por ello que a su espacio de influencia se le denomina la *Heliosfera* y se extiende a más del doble de la órbita de Plutón. [xxii]

La vecina más próxima al Sol es Próxima Centauri (parte de sistema de tres estrellas Alpha Centauri), se encuentra a 4.29 años luz de nuestro sistema solar. El Sol está 0.27 millones de veces más cerca que la próxima estrella más cercana, por ende, recibimos mucho más energía del Sol. [xii]

Se estima que el Sol tiene 4.6×10^9 años y que se encuentra a medio camino de su vida [ii].

4.1 Datos generales sobre el Sol

El Sol está clasificado como una estrella de tipo espectral G2. La clasificación de tipo espectral está basada en la intensidad de las líneas de absorción de la serie de Balmer que son sensibles a la temperatura de la estrella. Estas líneas establecen la presencia de elementos químicos individuales en el Sol, cuyos componentes principales son: hidrógeno (90%), helio (9%) y un 1% de gases como el oxígeno y el nitrógeno. El Sol también contiene algunas trazas de elementos más pesados como calcio, sodio, carbono y hierro. [9, xxii]

El Sol se encuentra a una distancia media a la Tierra de 1.5×10^{11} m. Esta distancia es una medida muy importante ya que fija la escala de nuestro sistema solar y nos permite inferir, de otras observaciones, el tamaño, masa, luminosidad y temperatura efectiva del Sol. Esta distancia se conoce como la unidad astronómica o UA. El mejor valor actual es $1 \text{ UA} = 1.4959787 \times 10^{11}$ m. [xii]

A esa distancia, la luz proveniente del Sol toma alrededor de ocho minutos en alcanzar la Tierra. El tiempo de viaje medio de la luz, designado como τ_A , del Sol a la Tierra es de $\tau_A = 1 \text{ UA}/c = 499.004782$ s, donde la velocidad de la luz $c = 2.99792458 \times 10^8$ m/s [xii].

El Sol está formado, en su mayor parte, de gas de partículas cargadas de iones libres conocido como plasma. A pesar de tener una gran masa, el Sol tiene una menor densidad, o masa por unidad de volumen, que la Tierra. La densidad promedio del Sol es sólo de 1409 kg m^{-3} , que es un cuarto de la densidad promedio de la Tierra, mientras que su masa es de 1.99×10^{30} kg. [xii]

El Sol produce una cantidad enorme de luz. Su luminosidad absoluta (radiación emitida), está designada por el símbolo L_{\odot} , donde el subíndice \odot denota al Sol. Podemos inferir el valor de la luminosidad del Sol a partir de las mediciones de satélite sobre la cantidad total de energía que llega cada centímetro cuadrado de la Tierra cada segundo, obteniendo: $L_{\odot} = 3.854 \times 10^{26} \text{ W} = 3.854 \times 10^{26} \text{ Js}^{-1}$. [ii, xii]

En comparación, una lámpara incandescente emite de 60 a 100W de potencia, así que el Sol es más luminoso que 10^{24} bombillas .

El radio del Sol se puede inferir de su distancia y extensión angular, tiene el valor: $R_{\odot} = 6.955 \times 10^8 \text{m}$. Esto es como 109 veces el radio de la Tierra. [ii]

La temperatura efectiva del Sol, $T_{e\odot}$, de la parte visible del disco solar se puede determinar usando la Ley de Stephan-Boltzmann a partir de la luminosidad y tamaño del Sol, de la siguiente forma:

$$T_{e\odot} = \left(\frac{L_{\odot}}{4\pi\sigma R_{\odot}^2} \right)^{1/4} = 5780\text{K}$$

Otra propiedad física importante del Sol es la IST. Es el promedio de la cantidad de energía solar radiante, en todas las longitudes de onda, por segundo por unidad de área que llega al tope de la atmósfera terrestre a una distancia media de 1UA. El valor promedio desde 1978 hasta 1998 era de $IST = 1366.2 \text{ J/sm}^2$, con una incertidumbre de sólo 1.0 J/sm^2 . Mientras que el valor promedio fue de $IST = 1365.6 \pm 1.0 \text{ J/sm}^2$ durante los dos últimos mínimos medidos en el ciclo de 11 años de la actividad solar. Este comportamiento inconstante se atribuye a cambios de su actividad magnética. [xii]

Finalmente, debido a su naturaleza gaseosa, el Sol presenta una rotación que varía con la latitud: en el ecuador efectúa una rotación completa en ~ 27 días, mientras que en las regiones polares (latitudes $\sim 70^\circ$) le toma ~ 37 días. Este fenómeno se conoce como *rotación diferencial*. Esta rotación se determina a partir del movimiento de las manchas solares, que aparecen en latitudes entre 0° y $\pm 40^\circ$, y de fáculas polares (regiones brillantes que se discutirán más adelante) que aparecen en latitudes $\geq 70^\circ$. [xxi, xxii]

Los datos generales del Sol se pueden resumir en la Tabla 4.1:

Tabla 4.1. Datos generales del Sol.

Masa	$= 1.99 \times 10^{30} \text{kg}$
Radio	$= 6.955 \times 10^8 \text{m}$
Distancia desde Tierra (1UA)	$= 1.4959787 \times 10^{11} \text{m}$
Densidad promedio	$= 1409 \text{kg m}^{-3}$
Temperatura Efectiva	$= 5780 \text{K}$
Luminosidad	$= 3.854 \times 10^{26} \text{W}$
IST	$= 1365.6 \pm 1.0 \text{J/sm}^2$

4.2 Estructura y atmósfera del Sol

Estructura del Sol

Si bien no es posible observar la estructura interior del Sol, se ha podido modelar y se sabe que presenta capas esféricas o "capas de cebolla". La frontera física y las diferencias químicas entre las distintas capas son difíciles de determinar. Sin embargo, se puede establecer una función física que es diferente para cada una de las capas. En la actualidad, la astrofísica dispone de un modelo de estructura solar, conocido como el modelo estándar, que explica satisfactoriamente la mayoría de los fenómenos observados. Según este modelo, el Sol está formado de adentro hacia afuera por: 1) Núcleo, 2) Zona radiativa, 3) Zona convectiva, 4) Fotosfera o superficie visible, y la atmósfera solar que incluye la cromosfera, la región de transición y la corona (ver Figura 4.1). [8]

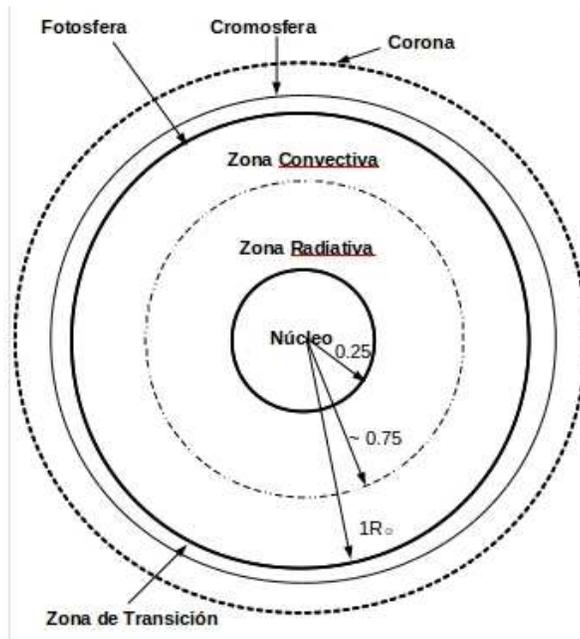


Figura 4.1. Estructura del Sol. Los números indican la fracción del radio solar. [1]

i. El núcleo.

Es la parte más interna ($r = 0$ a $1.75 \times 10^5 \text{km}$). Se calcula que el núcleo se extiende a más del 25% del radio total del Sol y contiene el 10% de la masa total del Sol. En esta región se lleva a cabo la mayor parte de la producción de energía. La temperatura del núcleo alcanza $1.56 \times 10^7 \text{K}$ y se calcula que la presión ahí es de 2.5×10^{11} atmósferas ($1 \text{atm} = 1013 \text{Pa}$). [ii]

La energía del Sol es producida a través de procesos termonucleares que se llevan a cabo en el núcleo solar, donde los átomos de hidrógeno (H) fusionan para crear el helio (He). Se propone que las reacciones nucleares toman lugar entre dos protones en colisión para formar el deuterio (átomo de hidrógeno que consiste en un protón y un neutrón). [ii]

ii. Zona Radiativa.

Región que abarca entre $r = 0.25R_{\odot}$ y $r \approx 0.75R_{\odot}$. La transferencia de energía dentro de la zona radiativa se hace a través de fotones que salen del núcleo como rayos gamma, pero en su camino hacia el exterior se van degradando hasta el visible. En la región intermedia entre la zona radiativa y la zona convectiva, la principal transferencia de energía cambia gradualmente de ser un flujo de fotones a convección por movimiento vertical. [ii]

iii. Zona Convectiva.

Abarca el último 25% del radio del Sol. Aquí la energía es transportada por el movimiento macroscópico de gas por medio de un proceso llamado convección. Se considera que la convección se presenta en forma de celdas de 3 tamaños diferentes: $\sim 3 \times 10^5 \text{km}$, $\sim 3 \times 10^4 \text{km}$ y $\sim 1000 \text{km}$ de diámetro, las más pequeñas son las más

superficiales. A temperaturas más bajas, más iones son capaces de bloquear el flujo de salida de la radiación de fotones con mayor eficacia. De esta forma, la naturaleza utiliza la convección para ayudar al transporte de energía desde el interior [8, 1].

iv. Fotosfera.

Es la superficie del Sol visible al ojo humano. Se calcula que la fotosfera tiene un grosor de 100km. En esta capa del Sol se observan algunas estructuras tales como manchas solares, fáculas brillantes y gránulos.

Los gránulos corresponden al gas caliente que asciende desde la zona convectiva y tienen unos 1000km de ancho. Las fáculas son zonas brillantes y calientes que junto con las manchas solares forman lo que se conoce como *región activa*. Las fáculas tienen mayores tiempos de vida que las manchas solares.

La palabra fotosfera significa *esfera de luz*. Se llama *superficie* del Sol porque en la parte superior de la misma, los fotones son capaces de escapar al espacio. Recordemos que el Sol es totalmente gaseoso, y este gas es tan denso (opaco) que uno no puede ver a través de él. Emite un espectro continuo y se ha determinado que la fotosfera del Sol tiene una temperatura de $\sim 5780\text{K}$. [iii, 1]

Atmósfera del Sol

El brillo de la fotosfera (superficie del Sol) nos impide normalmente ver la tenue atmósfera del Sol. Sólo durante los eclipses totales, cuando la Luna pasa justo delante del Sol, podemos ver con claridad esa atmósfera desde la Tierra. Está formada por dos regiones principales, la cromosfera y la corona. Por razones que todavía no conocemos a profundidad, la atmósfera solar incrementa su temperatura desde un mínimo valor de $4\,500\text{K}$ en la fotosfera hasta $1 \times 10^6\text{K}$ en la corona (ver Figura 4.2). [xxii]

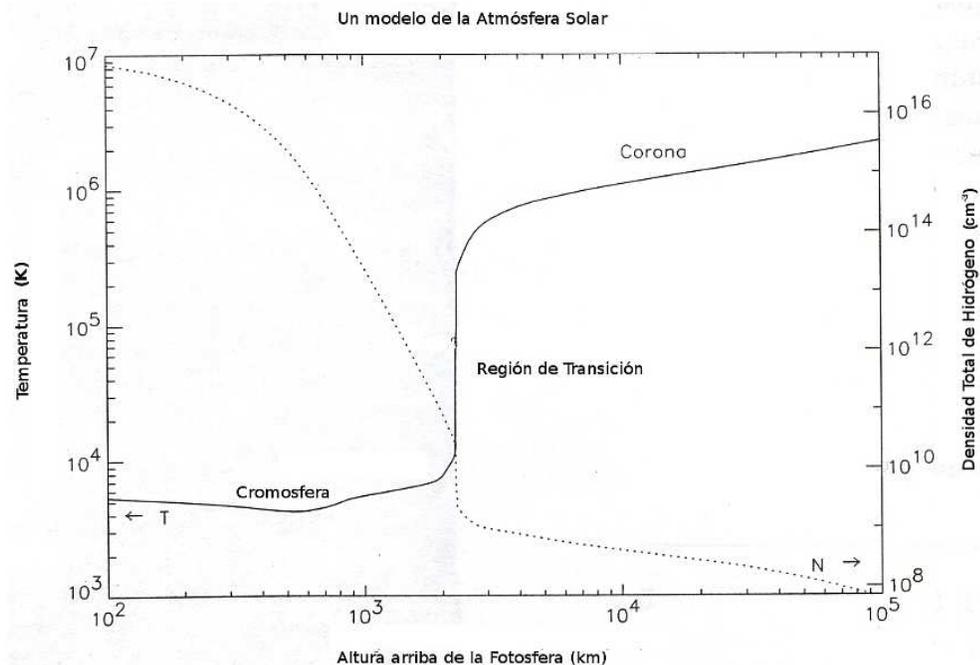


Figura 4.2. Variación de la temperatura con respecto a la altura en la atmósfera solar [1].

v. Cromosfera.

Durante los eclipses solares se puede distinguir una capa delgada de color rojizo en el borde de la Luna que oculta al disco solar. Esta colorida capa se llama la cromosfera, que significa “esfera de color”. La cromosfera tiene un grosor entre 2000 hasta 3000 kilómetros y su temperatura cerca de la fotosfera es de $\sim 4\,000\text{K}$, pero alcanza los $5 \times 10^5\text{K}$ en su punto más alto, donde la cromosfera se encuentra a la corona. Debido a que tiene una baja densidad, se ven las líneas de emisión del hidrógeno (en su mayoría en la longitud de onda roja de 656.3 nanómetros) [iii, 1]. Aquí también se observan las espículas, que son jets de plasma que se alinean con el campo magnético verticalmente.

vi. Corona.

Entre la cromosfera y la corona existe una delgada región donde la temperatura aumenta rápidamente hasta alcanzar $\sim 10^6\text{K}$, es conocida como la *región de transición* (ver Figura 4.2).

Una vez que la temperatura alcanza el millón de grados, se tiene la última capa conocida como la corona, región sumamente tenue y con una temperatura muy alta de $\sim 1\text{--}2 \times 10^6\text{K}$. Debido a su elevada temperatura, la corona se expande hacia el espacio formando el viento solar.

A estas altas temperaturas los átomos chocan con entre sí y expulsan a los electrones. Este proceso se llama ionización. A temperaturas elevadas, los átomos como el de hierro pueden emitir de 9 a 13 electrones. El hierro nueve veces ionizado sólo se produce a temperaturas de 1,3 millones de K y para el 13 veces ionizado la temperatura es de $2.3 \times 10^6\text{K}$. Durante la alta actividad solar, la temperatura de la corona puede alcanzar los $3.6 \times 10^6\text{K}$ y se alcanzan a ver líneas de calcio 14 veces ionizado.

La mayor parte de la corona está atrapada cerca del Sol en bucles de líneas de campo magnético. Estas regiones aparecen brillantes cuando se ven en rayos X. Sin embargo algunos bucles de líneas del campo magnético son tan extensos que parecieran regiones de campo magnético abierto y se ven como zonas oscuras en rayos-X. Se conocen como “ hoyos coronales”; de ellos escapa, principalmente, el viento solar.

Durante el ciclo de actividad solar de 11 años la apariencia de la corona cambia. En un máximo de actividad solar, la estructura de la corona es casi homogénea en todas las direcciones. Sin embargo, durante un mínimo tiene forma de pétalos de tal forma que cerca de los polos la luz que emite la corona tiene menor intensidad comparada con la de latitudes más bajas. [iii]

vii. Viento Solar.

Debido a la alta temperatura coronal, los iones escapan a la atracción gravitacional del Sol, principalmente por los hoyos coronales, y viajan grandes distancias hasta los confines más lejanos de la Heliosfera. A este conjunto de iones se le conoce como *viento solar*, y cerca de la Tierra el viento solar promedio tiene una velocidad de ~ 400 km/s. [iii]

4.3 Actividad solar

La actividad solar se debe a la existencia de la zona convectiva y la rotación diferencial [xxii].

La interacción entre la rotación diferencial y los movimientos convectivos en el interior del Sol provocan que las líneas de campo magnético, que al principio en el ciclo solar tienen dirección norte-sur geográfico (poloidal, Figura 4.3 (a)), se doblen dando lugar a un campo toroidal (Figura 4.3 (b)). Este campo toroidal es llevado a la superficie por convección debido al efecto de Coriolis (efecto que curva la dirección inicial de los objetos desviándolos en el Hemisferio Norte hacia el este geográfico y en el Hemisferio Sur hacia el oeste geográfico), ocasionando que las líneas de campo magnético se retuerzan. Estas torceduras se convierten en pequeñas componentes poloidales (Figura 4.3 (c)). El campo magnético poloidal se restablece debido a los efectos combinados de muchas celdas convectivas subiendo. La conversión del campo poloidal en toroidal y nuevamente en poloidal se lleva a cabo a lo largo de ~ 11 años. Este periodo se conoce como *ciclo de actividad solar* o también conocido por los siguientes nombres: ciclo solar, ciclo de 11 años del Sol, ciclo de actividad magnética del Sol. [xxii]

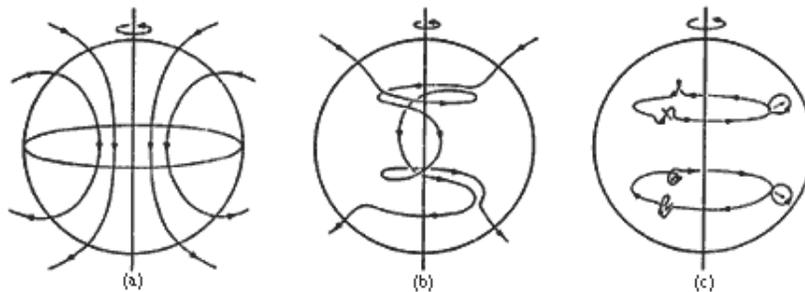


Figura 4.3. (a) Líneas del campo magnético poloidal. (b) La interacción entre la rotación diferencial y la convección da lugar a un campo toroidal (líneas de campo enredadas). De este campo se forman pequeños campos poloidales (c) [6].

Los primeros indicios de actividad solar que conocemos fueron las observaciones que hizo Galileo de las manchas en la superficie solar. Estas observaciones le permitieron deducir que el Sol rotaba sobre su propio eje ya que las manchas solares se movían a través del disco solar (ésta es la llamada *rotación diferencial* que ya se mencionó anteriormente). Hoy en

día, sabemos que las manchas solares son una manifestación del ciclo de actividad de 11 años del Sol [xxii].

Sin embargo, hoy en día se puede medir la actividad solar a través de la manifestación de otros fenómenos asociados con el Sol como por ejemplo: las variaciones IST, rayos cósmicos (partículas cargadas, principalmente protones y núcelos de hidrógeno) y radiación ultravioleta.

Las manchas solares son regiones oscuras que se encuentran en la fotosfera y que se asocian con fuertes campos magnéticos y una temperatura más baja que el resto de la fotosfera. Las manchas solares presentan regiones centrales oscuras conocidas como la *umbra* y regiones exteriores menos oscuras conocidas como la *penumbra* (Ver Figura 4.4). [ii]

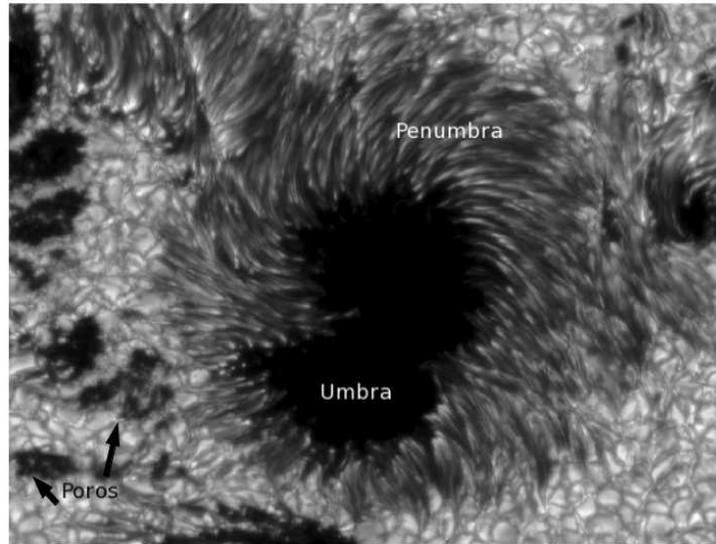


Figura 4.4. Fotografía de una mancha solar del ciclo de actividad solar 23. Se muestran las regiones de una mancha: *umbra* y *penumbra*; se muestran algunos *poros* en la parte inferior izquierda. [7].

Las manchas solares comienzan su vida como pequeños poros que son regiones pequeñas y oscuras de larga duración que carecen de estructura. En ocasiones estos poros se convierten en manchas solares, pero la mayoría no lo hace. Los poros tienden a ser asociados con campos magnéticos más débiles que los de las manchas solares. La mayoría de los poros se desvanecen después de un corto tiempo (\sim un mes) [ii]. Se cree que las manchas solares pueden considerarse como poros en etapa avanzada que adquirieron una penumbra [xxxvi]. Por otra parte, la duración de una mancha solar puede ser de algunas horas para poros principalmente y hasta de algunos meses para manchas más evolucionadas [19]. Sin embargo, es difícil determinar el tiempo de vida exacto de una mancha por dos razones principales: a) la rotación del Sol, ya que impide ver el curso completo de la mancha cuando se sale del disco solar para desplazarse a lado no visible del Sol y b) por la rotación de la Tierra; la observación de manchas solares desde la Tierra sólo es posible durante el día.

En 1843, Schwabe descubrió después de muchas observaciones, que el número de manchas solares fluctúa entre un máximo y un mínimo con una periodicidad de aproximadamente 10 años. La variación en el número de manchas solares también es conocida como el ciclo de Schwabe en honor al descubridor, o también se conoce como el *ciclo solar* (puesto que su variación con el ciclo de actividad magnética solar tiene \sim el mismo periodo) [ii].

En ese mismo siglo, Wolf encontró que la duración del ciclo solar estaba más cerca de los 11.1 años. Más recientemente se ha observado que la duración de cada ciclo varía entre los 9 y 12 años. Siguiendo el esquema de numeración establecido por Wolf, el ciclo $\circ 1^\circ$ corresponde al periodo de 1755 a 1766.

Usualmente el aumento en el número de manchas solares (el tiempo entre un mínimo y el subsecuente máximo) tiene una menor duración comparado con el tiempo de disminución de su número (tiempo entre un máximo y el siguiente mínimo) con algunas excepciones [ii].

Las manchas solares están asociadas con campos magnéticos fuertes del orden de miles de gauss, y estos tienden a formarse en grupos con otras manchas solares que se asocian con la misma estructura de campo magnético. En comparación, el campo magnético de los alrededores es del orden de pocos gauss. [ii]

El ciclo de Manchas Solares

Como se mencionó, el número de manchas solares aumenta y disminuye en un ciclo de ~ 11 años (ver Figura 4.5). Las primeras manchas de cada ciclo aparecen cerca de $\pm 40^\circ$ de latitud. Su número aumenta a medida que se acercan al ecuador, hasta llegar al máximo. Este ciclo se debe a la rotación diferencial del Sol [iii]. Por convención, cada nuevo ciclo comienza cuando se observan las primeras manchas solares, que ocurre un tiempo después del mínimo de actividad solar del ciclo anterior.

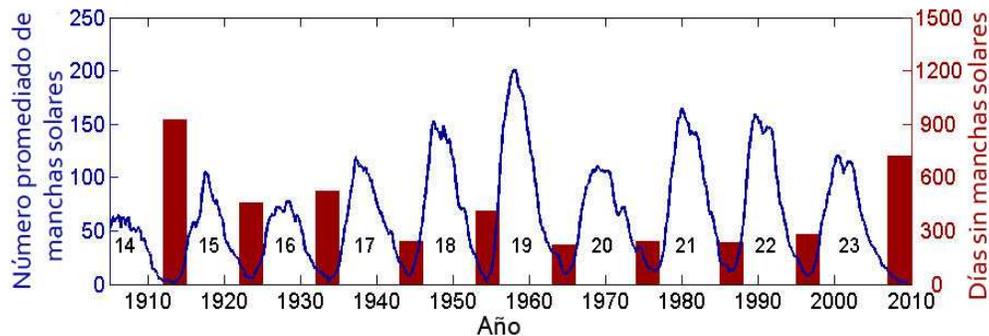


Figura 4.5. Ciclo de manchas solares desde 1735, cuando empezó el ciclo 1. El mínimo de manchas del ciclo 23 (2009) ha sido el más largo en la era espacial, con la mayor cantidad de días sin manchas solares [3].

5 Relación Sol-Tierra

5.1 Efectos del Sol en la atmósfera Terrestre

5.1.1 Las variaciones de Sol.

El material de esta sección se obtuvo de la referencia [xii].

Nuestras vidas dependen de la presencia continua del Sol y su constante emisión. La cantidad total de energía que proviene del Sol es la IST. Se ha observado que su emisión luminosa varía en tándem con el ciclo de actividad solar de 11 años del Sol: cerca del máximo de actividad solar (cuando las manchas solares son más numerosas) en el ciclo de 11 años, el Sol se vuelve más brillante y más luminoso. La IST incrementa un 0.1% entre la actividad mínima y la máxima.

Este incremento en la IST se atribuye a las fáculas. Mientras la actividad solar aumenta, también hay un incremento en el número de manchas solares y fáculas. La disminución en la radiación solar debida a las manchas solares es menor que el incremento debido a las fáculas y por ello el Sol es más luminoso durante el máximo que durante el mínimo.

Todo el espectro de la radiación solar es modulado por la variable actividad solar. Gran parte de la radiación solar es emitida en la zona del espectro visible e infrarrojo-cercano donde las variaciones son relativamente moderadas. En contraste, hay cambios enormes en las longitudes de onda del ultravioleta y de Rayos X que contribuyen sólo en una pequeña fracción en la luminosidad total del Sol. La emisión en ultravioleta se duplica de un mínimo a un máximo de actividad solar, mientras que en la corona el brillo de rayos X incrementa por un factor de 100. Esta actividad se lleva a cabo fuera del espectro visible y su contribución en la variación de la IST es despreciable.

No obstante, la variación de la radiación ultravioleta y rayos X del Sol transforma dramáticamente las condiciones en la alta atmósfera terrestre donde esta radiación es absorbida. La radiación solar emitida en longitudes de onda del visible no afecta notablemente la alta atmósfera y llega hasta la superficie.

5.1.2 La variación por estratos atmosféricos terrestres bajo la influencia del Sol.

El material de esta sección se obtuvo de las referencias [2, xii].

El 75% de masa atmosférica se encuentra en los primeros 11 km de altura, desde el nivel del mar. Los principales elementos que la componen son el oxígeno (21%) y el nitrógeno (78%).

Se pueden distinguir dos regiones principales en la atmósfera por el tipo de composición. La *homosfera* y la *heterosfera*. La *homosfera* ocupa los primeros 100 km desde el suelo y tiene una composición constante y homogénea. Contiene nitrógeno (78%), oxígeno (21%), argón (0.93%), dióxido de carbono (0.046%), neón (18.2 ppm), helio (5.24 ppm), kriptón (1.14 ppm), hidrógeno (0.5 ppm), ozono (~ 11.6 ppm) y vapor de agua (su cantidad varía con la altura y el tiempo). La *heterosfera* se extiende desde los 100 km hasta el límite superior de la atmósfera (unos 10.000 km); está estratificada, es decir, formada por diversas capas

con composición diferente. Entre 100 y 400 km hay una capa de nitrógeno molecular; entre 400 y 1.100 km hay una capa de oxígeno atómico; entre 1.100 km y 3.500 km hay una capa de helio y entre 3.500 km y 10.000 km hay una capa de hidrógeno.

También se pueden dividir las capas atmosféricas de acuerdo a su gradiente de temperatura (ver Figura 5.1).

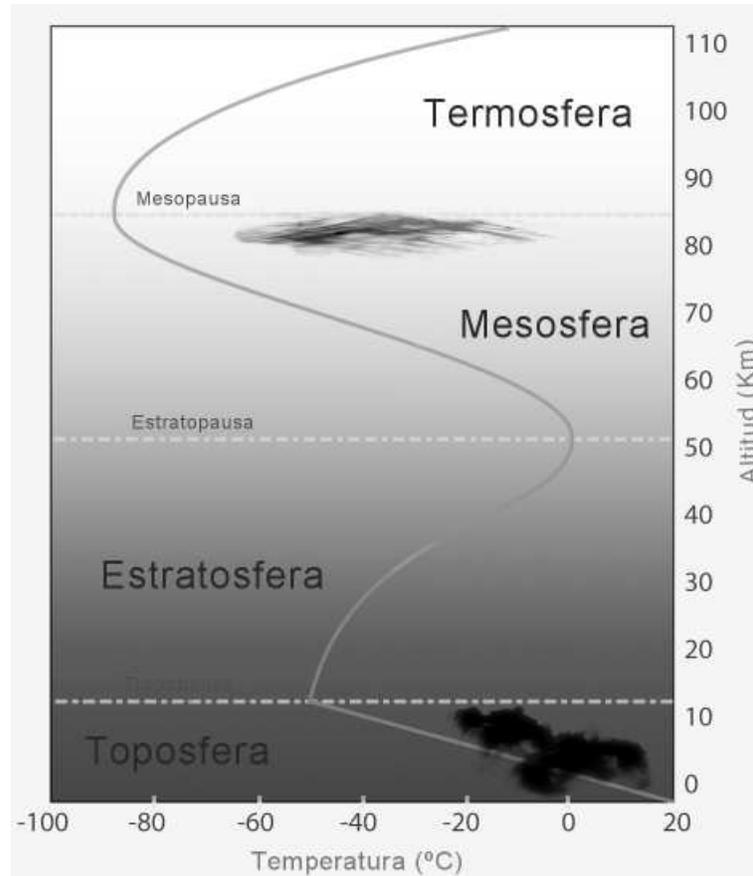


Figura 5.1. Capas de la atmósfera terrestre de acuerdo al gradiente de temperatura [4].

En la capa más baja de la atmósfera la temperatura disminuye de forma constante al incrementar la altura. A esta capa se le conoce como *troposfera* que proviene del griego *tropo* de girar. La luz visible pasa a través de la troposfera para calentar el suelo. La temperatura por encima del suelo tiende a disminuir a mayor altitud, donde el aire se expande, la presión baja y se enfría. La temperatura promedio del aire cae por debajo del punto de congelación (273 K) a una altura de 1 km sobre la superficie de la Tierra, y disminuye progresivamente hasta llegar a 220 K a aproximadamente 10 km.

En la troposfera es donde ocurre el tiempo y el clima terrestre. La circulación global de aire, impulsada por el calentamiento diferencial del Sol en el ecuador y regiones polares de la Tierra, crea patrones convectivos complejos de la atmósfera en esta capa.

Después, la temperatura empieza a aumentar dentro de la siguiente capa de la atmósfera, conocida como *estratosfera*, que se extiende hasta ~ 50 km. La palabra estratosfera se acuñó a partir de *estrato-esfera*, donde *estrato* se refiere a capa. La radiación ultravioleta, proveniente del Sol, es absorbida en gran medida por la estratosfera donde calienta el gas y contribuye a la creación del ozono.

Cuando los rayos ultravioletas, con longitudes de onda de alrededor de 200nm, golpean una molécula diatómica de oxígeno (O_2), la separan en sus dos componentes de átomos de oxígeno (dos O). Posteriormente, uno de los átomos de oxígeno libres se encuentra con una molécula de oxígeno (O_2) y se queda ligada a ella, creando una molécula de ozono (tres oxígenos: O_3).

En principio, la capa de ozono nos protege absorbiendo la radiación ultravioleta solar. Sin embargo, hay una pequeña cantidad de radiación ultravioleta que logra atravesar la capa de ozono y llegar a la superficie de la Tierra. Esta radiación produce, en personas expuestas un tiempo prolongado a ella, cataratas, cáncer de piel y más comúnmente quemaduras de sol.

La amenaza de los rayos ultravioleta causó gran preocupación a nivel mundial cuando se descubrió que disminuía la densidad de la capa de ozono con la emisión de los químicos conocidos como clorofluorocarbonos (CFCs). En el año de 1990, en un encuentro internacional se acordó que la emisión de CFCs estaba prohibida.

Ya que la capa de ozono es producida por la radiación ultravioleta, y ésta última varía con el ciclo de actividad solar, existen pequeñas fluctuaciones naturales en su densidad. La cantidad global de ozono aumenta, disminuye y vuelve a aumentar otra vez de 1 a 2% en consonancia con la actividad solar. Esto modula la capa de ozono a un nivel comparable con el agotamiento del ozono producido por el hombre a través de la emisión de químicos.

La *mesosfera*, nombre que proviene del griego *meso* que significa *intermedio*, yace justo arriba de la estratosfera. La temperatura desciende al incrementar la altura, alcanzando su punto más bajo de ~ 100 K en el tope de esta capa. La principal razón de la disminución en la temperatura es la baja concentración de ozono y la reducida absorción de la radiación ultravioleta solar.

Arriba de la mesosfera la temperatura comienza a incrementar de nuevo con la altura, donde alcanza valores, a una altura de unos 150km, que son mucho mayores comparados con los del nivel del suelo. A esta capa se le conoce como *ionosfera*; es una cáscara esférica de electrones y iones, creada y calentada por la absorción de la energía de radiación ultravioleta-extrema (121nm-10nm, wikipedia) y rayos X (0.01nm-10nm) proveniente del Sol. Esta radiación arranca electrones de los átomos y moléculas en la parte alta de la atmósfera y por ende contribuye a la creación de iones y electrones libres que no están ligados a átomos.

La ionosfera fue postulada en el año de 1902 para explicar la radiocomunicación transatlántica desarrollada por Guglielmo Marconi. Debido a que las ondas de radio viajan en líneas rectas y no pueden atravesar la sólida Tierra, rodean la curvatura de la Tierra por reflexión en los electrones presentes en la ionosfera.

Los rayos X y la radiación ultravioleta-extrema producen y alteran de manera significativa a la ionosfera terrestre. Su gran densidad cerca del máximo de actividad solar de 11 años produce un incremento en la ionización, calentamiento y mayor expansión de la alta atmósfera. A una altura determinada en la ionosfera, la temperatura, la densidad de los electrones libres y la densidad de los átomos neutros aumenta y disminuye en sincronía con la actividad solar a través del ciclo de 11 años. Este cambio en el contenido y estructura de la ionosfera (inducido por el Sol) afecta su habilidad de reflejar ondas de radio.

5.2 El papel del Sol en el calentamiento y enfriamiento de la Tierra.

El material de esta sección proviene de la referencia [xii].

Se han encontrado señales de la variante actividad solar en registros de temperatura en la superficie de los océanos: Durante los últimos 130 años, la temperatura global de la superficie del mar ha subido y bajado unos 0.05°C aparentemente en sincronía con el ciclo de 11 años de actividad solar.

Asimismo, la temperatura del aire sobre los suelos se ha correlacionado con el ciclo de actividad solar. La temperatura promedio anual en el hemisferio norte ha aumentado y disminuido unos 0.2°C aparentemente en sincronía con el ciclo de actividad solar durante los últimos 130 años (ver Figura 5.2). Los ciclos cortos tienden a presentar una elevada actividad solar que al parecer calientan nuestro planeta, mientras que los ciclos más largos conllevan una disminución de la actividad solar y época de frío en la Tierra.

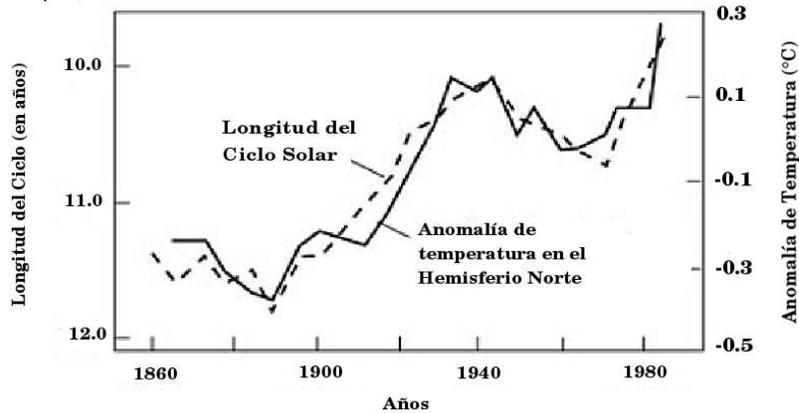


Figura 5.2. Gráfica de la longitud del ciclo de actividad solar en escala de años y la anomalía de la temperatura en el Hemisferio Norte [4].

Muchos de los cambios en la temperatura en la Tierra durante la primera mitad del siglo XX podrían estar directamente relacionados con el brillo y el oscurecimiento del Sol. La variabilidad solar proporciona una explicación razonable para las subidas y bajadas del registro de temperatura durante este período.

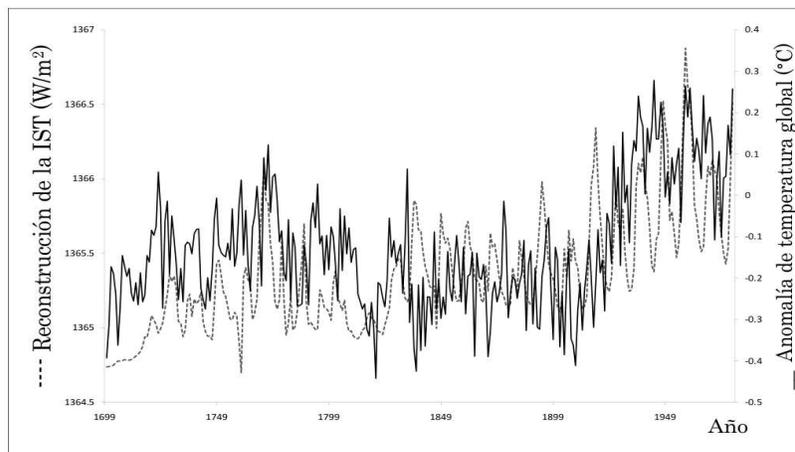


Figura 5.3. Reconstrucción de la IST desde el año 1700 al año 1979 [17].

Para entender plenamente las mediciones de temperatura, los científicos han examinado los registros históricos de la IST del Sol y otras estrellas. La reconstrucción de la IST (ver Figura 5.3) de la Tierra muestra que la temperatura terrestre cambió en consonancia con la IST por un siglo, de 1700 a 1800. El enfriamiento producido por emisiones brumosas de volcanes desempeñó después un papel importante, sin embargo la IST y la temperatura volvieron a estar en consonancia durante otro siglo, de 1870 a 1970 (ver Figura 5.3).

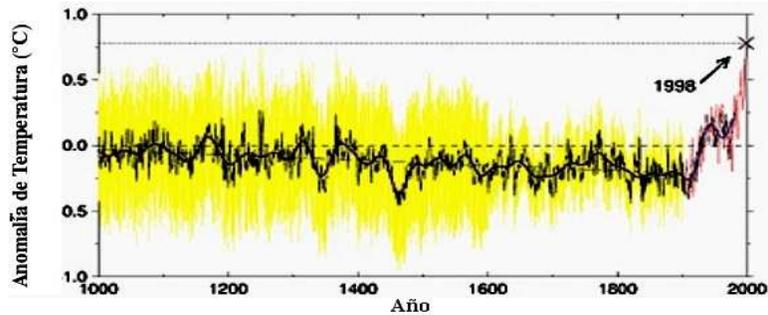


Figura 5.4. Anomalía de la temperatura terrestre [4].

Actualmente la Tierra está más caliente de lo que ha estado en algún momento durante los últimos 1000 años (Figura 5.4). El calentamiento global por el efecto invernadero (fenómeno por el cual determinados gases de la atmósfera absorben energía emitida por la superficie calentada por radiación solar) es, probablemente responsable de este reciente aumento en la temperatura. Son pocos los componentes de la atmósfera, como el dióxido de carbono y vapor de agua, que absorben la radiación infrarroja de la superficie, elevando la temperatura en la troposfera. El metano y el óxido nitroso también actúan como gases activos en el infrarrojo, pero son menos abundantes que el dióxido de carbono y vapor de agua.

La quema continua y acelerada de combustibles fósiles (petróleo, gas natural y carbón) está causando grandes daños al medio y no obstante, la actividad solar podría modificar sustancialmente este calentamiento.

Las observaciones de la IST, hechas por naves espaciales, de las últimas tres décadas indican que ésta ha variado alrededor de 0.1%. Las observaciones de variaciones magnéticas así como el brillo de estrellas con masas y edades cercanas a las del Sol, indican que es posible que haya variaciones sustanciales en la luminosidad del Sol a lo largo de centenares o miles de años. Esto podría estar asociado a cambios en el clima de la Tierra en escalas de tiempo de cientos, miles o cientos de miles de años.

Los registros de actividad solar de tiempos pasados a través de manchas solares, anillos de árboles y núcleos de hielo podrían indicar cambios del clima producidas por el Sol. Un ejemplo de ello es el período comprendido entre 1645 a 1715, ahora conocido como el Mínimo de Maunder (ver Figura 5.5), cuando la actividad de manchas solares se redujo a niveles inusualmente bajos y el mundo experimentó uno de los períodos más fríos de la Pequeña Edad de Hielo en Europa. Durante el Mínimo de Maunder la IST disminuyó en un $\sim 0.25\%$ respecto a la actual. Esto explicaría la disminución de alrededor de 0.5°C en la temperatura media global de ese periodo.

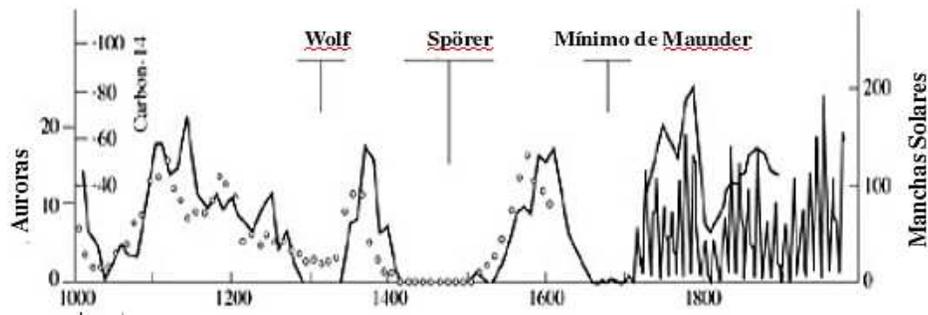


Figura 5.5. Periodos largos de Actividad Solar [4].

Durante los últimos dos mil años, el Sol ha pasado casi un tercio del tiempo en un estado relativamente inactivo (Figura 5.5). Por lo tanto, los períodos prolongados de inactividad solar deben considerarse como una característica permanente del Sol, y se puede esperar que ocurra de nuevo en el futuro.

Por cientos de años el Sol ha cambiado drásticamente el clima de la Tierra. Muestra de ellos son los periodos registrados de la actividad solar tal como la Pequeña Edad de Hielo (1400-1800), que comprende al mínimo de Spörer (1400-1530) y el mínimo de Maunder (1645-1715) (ver Figura 5.5). Durante este largo periodo de clima frío los glaciares alpinos se expandieron, el río Támesis y los canales de Venecia se congelaban con regularidad, y los pintores representaban inviernos inusualmente duros en Europa.

5.2.1 Glaciares y Teoría de Milankovitch.

Durante el pasado millón de años, nuestro clima ha sido dominado por las recurrentes edades de hielo, con una duración de alrededor de 100 mil años. Estas glaciaciones son interrumpidas cada 100 mil años más o menos por un intervalo relativamente corto de temperaturas más altas conocido como *periodo interglacial*, que dura 10 ó 20 mil años, cuando los glaciares se retiran. Nosotros vivimos ahora en un intervalo interglacial cálido, llamado *Holoceno*, en que la civilización humana ha florecido. Sin embargo, es posible que en un futuro regrese una glaciación.

La alteración rítmica de las etapas glaciales e interglaciales está relacionada con alteraciones periódicas en la cantidad y distribución de la luz solar recibida por Tierra durante decenas de miles de años. Tres ciclos astronómicos se combinan para modificar los ángulos y la distancia a la que la luz del sol alcanza a la Tierra, contribuyendo a las eras del hielo. Esta explicación la desarrolló íntegramente el astrofísico serbio Milutin Milankovitch de 1920 a 1941, por lo que estos ciclos son llamados *ciclos de Milankovitch*. Estos ciclos involucran la precesión y cambios en la inclinación del eje y la forma la órbita terrestre. Los *ciclos de Milankovitch* se producen durante decenas de miles de años.

Los barrenos extraídos del hielo glaciar en Groenlandia y la Antártida proporcionan el más largo registro natural del pasado clima de la Tierra. El aire atrapado en los núcleos de hielo polar indica que los cambios de temperatura del aire en la Antártida se asocian con concentraciones variables de dióxido de carbono atmosférico y metano. Las temperaturas suben cada vez que los niveles de dióxido de carbono y metano suben, y disminuyen juntos también.

Estos registros apoyan fuertemente la idea de que los Ciclos de Milankovitch causan variaciones en la intensidad y la distribución de la luz solar que le llega a la Tierra, que a su vez contribuye a iniciar los cambios naturales en el clima y activa el flujo y reflujos del glacial.

6 Nubes

Composición (material sobre la composición de nubes obtenido de [xii]).

Una nube es un hidrometeoro (suspensión de partículas acuosas en la atmósfera) que consiste en una masa visible formada en gran parte por aire. Aunque las nubes contienen una gran cantidad de partículas microscópicas suspendidas, $1000/\text{cm}^3$ típicamente, incluso las gotas más grandes son muy pequeñas. Entonces, a pesar de la enorme cantidad de partículas contenidas en unas nubes, éstas tienen una masa relativamente pequeña. Este hecho puede que no sea tan sorprendente si tomamos en cuenta que la cantidad de vapor de agua corresponde a menos del 2% de la masa total de la atmósfera.

Para determinar la masa relativa del aire y del agua líquida contenida en una nube podemos aplicar un cálculo aritmético sencillo. El radio promedio de una gota de agua en la nube es aproximadamente de 0.001cm , y el volumen de una esfera es igual a $\frac{4}{3}\pi r^3$, donde r es el radio. Sustituyendo el valor de radio promedio de una gota encontramos que su volumen promedio es de $4.18 \times 10^{-9} \text{cm}^3$.

Ya que la densidad del agua es aproximadamente de $1\text{g}/\text{cm}^3$, se sigue que la masa de cada gota es de aproximadamente $(4.18 \times 10^{-9} \text{cm}^3) \times (1\text{g}/\text{cm}^3) = 4.18 \times 10^{-9} \text{g}$. Esta masa multiplicada por $1000 \text{gotas}/\text{cm}^3$, indica que la densidad promedio de agua líquida en una nube es de $4.18 \times 10^{-6} \text{g}/\text{cm}^3$. Por otra parte, a una altura de 5.5km sobre el nivel del mar, la densidad de aire es de $6 \times 10^{-4} \text{g}/\text{cm}^3$. Si comparamos este valor con la densidad del agua líquida encontramos que hay alrededor de 150 veces más aire que agua contenido en una nube.

Formación (material sobre la formación de nubes obtenido de [5]).

Algunas masas de aire que constituyen la atmósfera terrestre llevan entre sus componentes significativas cantidades de agua que se obtuvieron a partir de la evaporación del agua de mar y de la tierra húmeda, las cuales se juntan con partículas de polvo o cenizas que hay en el aire (núcleos de condensación).

Estas masas de aire cálido y húmedo tienden a elevarse cuando se topan con otra masa de aire frío y seco. Las masas de aire no se revuelven entre sí cuando chocan; están bien delimitadas y tienden a desplazarse hacia zonas de menor presión atmosférica. Al elevarse las masas de aire caliente se expanden al encontrar menor presión en las alturas y, de acuerdo con la ley de los gases ideales, disminuye también su temperatura. Esto causa que el agua que contienen estas masas de aire se condense formando las nubes.

Hace aproximadamente dos décadas se publicó un artículo [xxxv] donde los autores sugieren que los RC modulan la producción de nubes en escalas de tiempo de décadas y más. Se propuso entonces, que el mecanismo de producción de nubes por los RC es a través de los electrones que se liberan en la interacción de los RC y la atmósfera. Los electrones liberados actúan como catalizadores, lo que acelera la formación de moléculas de agua y cúmulos pequeños de ácido sulfúrico que sirven como núcleos de condensación, y éstos son pieza principal en la formación de nubes. [20]

6.1 Tipos de Nubes

El material de esta sección se obtuvo de la referencia [i]

Las nubes pueden asumir una gran variedad de formas y tamaños y pueden ocurrir a grandes altitudes o cerca de la superficie terrestre. La mayor parte de las nubes ocurren en la troposfera, pero algunas ocurren en la estratosfera e inclusive en la mesosfera. Las nubes pueden contener gotas líquidas, cristales de hielo o una mezcla de estos dos. En esta sección se describirán los diferentes tipos de nubes.

El primer sistema de clasificación de nubes ampliamente aceptado fue ideado por el químico inglés Luke Howard en el año de 1803. Él dividía las nubes en 4 categorías básicas:

- i. Cirros (*Cirrus*) – nubes delgadas y tenues compuestas por cristales de hielo.
- ii. Estratos (*Stratus*)– nubes estratificadas.
- iii. Cúmulos (*Cumulus*)– nubes con desarrollo vertical.
- iv. Nimbos (*Nimbus*)– nubes capaces de formar precipitaciones.

El sistema actual de clasificación de nubes es una versión modificada de la de Howard que mantiene sus cuatro categorías y que también permite nuevas combinaciones (por ejemplo, las nubes cirrostratos tienen características de nubes cirros y de nubes estratos). Los diez principales tipos de nubes agrupadas de acuerdo a su forma y altura es como sigue:

I. Nubes Altas:

Generalmente se encuentran arriba de los 6000m de altura. Están compuestas en su mayor parte de cristales de hielo en vez de gotas líquidas. Recordemos que dentro de la troposfera la temperatura promedio desciende de 15°C (a nivel del mar) a una tasa de 6°C/1000m, al aumentar la altura. Por esta razón, la temperatura promedio para las nubes altas por lo general no supera los -35°C, lo que implica que el enfriamiento al punto de congelación provoca la formación de cristales de hielo en lugar de gotas de agua líquida.

- *Cirrus* (Ci). Son agregaciones tenues de cristales de hielo. El espesor promedio de estas nubes es de 1.5 km, pero pueden llegar hasta 8km. Dada la baja temperatura en la que estas nubes logran existir, tienen muy poco vapor de agua como para formar hielo.
- *Cirrustratus* (Cs). Al igual que las nubes cirrus, están completamente compuestas por hielo pero tienden a ser más extensas horizontalmente y tienen una menor concentración de cristales. Aún cuando estas nubes reducen la cantidad de radiación solar que llega a la superficie, suficiente luz alcanza a penetrar como para crear sombras de objetos en la superficie.

Un rasgo característico de estas nubes es el *halo*, un anillo que se forma alrededor del Sol o la Luna. Se forman por la refracción y reflexión de la luz en los cristales de hielo. La luz del Sol se curva sobre todo a 22° y debido a que los cristales de hielo están alineados aleatoriamente, un observador verá un anillo de luz más brillante por aquellos cristales que estén a 22° de la luz del Sol o la Luna dirigida al observador.

- *Cirrocumulus* (Cc). Están compuestas por cristales de hielo que se arreglan en grandes filas individuales de cúmulos nubosos. Estas nubes se forman durante episodios de *viento de corte*, condición mediante la cual la velocidad y/o dirección del viento cambia con la altura. Los vientos de corte por lo general ocurren por delante de sistemas avanzados de tormentas, por lo que las nubes cirrocumulus son a menudo precursores de precipitación.

II. Nubes Medias :

Estas nubes se forman entre los 2000 y 6000 metros de altura sobre el nivel del mar y están compuestas comúnmente por gotas de agua. Las dos grandes categorías en este grupo tienen el prefijo *alto* que significa *medio*.

- *Altostratus* (As). Son la contraparte a nivel medio de las cirrostratus. Difieren de las cirrostratus en que son más extensas y están compuestas primordialmente por gotas de agua. Las altostratus dispersan una gran porción de la luz del Sol hacia el espacio, y por lo tanto reducen la cantidad de luz que llega a la superficie terrestre. Una forma de distinguir las es que no hacen sombra en los objetos en la superficie debido a que la luz que llega al suelo es dispersada casi completamente por estas nubes.
- *Alto cumulus* (Ac). Son nubes en capas que forman bandas largas que contienen una serie de nubes infladas acomodadas en filas. Son color gris generalmente y consisten en gotas de agua.

III. Nubes Bajas:

Se forman por debajo de los 2000 metros de altura.

- *Stratus* (St). Son nubes estratificadas que se forman cuando se elevan extensas áreas de aire estable. Normalmente tienen un espesor de entre 0.5 y 1 km, en contraste con su extensión horizontal que puede alcanzar decenas de kilómetros. Usualmente, la velocidad de elevación del aire que produce estas nubes es de unas cuantas decenas de cm/s y su contenido es de agua.

Las nubes stratus no necesariamente se forman por la elevación del aire, también pueden ser el resultado de una turbulencia asociada a vientos muy fuertes.

- *Stratocumulus* (Sc). Son nubes estratificadas con cierto desarrollo vertical. Su oscuridad varía cuando se ve desde abajo porque el espesor cambia a través de la nube. Las secciones más gruesas aparecen más oscuras y las zonas más delgadas son lugares más brillantes.
- *Nimbostratus* (Ns). Son nubes estratificadas que producen precipitación. Se caracterizan por tener una capa no uniforme y color gris oscuro. Vistas desde abajo, estas nubes son muy parecidas a las stratus, excepto por la presencia de la precipitación.

IV. Nubes con desarrollo vertical profundo (se extienden a lo alto en gran parte de la atmósfera):

Las nubes cumuliformes son aquellas que tienen un importante desarrollo vertical (entre 2 y 6 km de altura sobre su base) y ocurren cuando el aire es absolutamente o condicionalmente inestable. Las velocidades verticales dentro de las nubes son de varios metros por segundo, pero pueden alcanzar los 50 m/s. En otras palabras, las corrientes ascendentes en ciertas nubes cumuliformes pueden ser más rápidas que los vientos horizontales que se encuentran en huracanes débiles. El contenido de agua líquida es muchas veces mayor al que tienen las nubes stratus.

- *Cumulus* (Cu). Las nubes cumulus se han clasificado en dos grandes subgrupos que se distinguen por la profundidad de su desarrollo vertical.

Cumulus Humilis. Tienen una cimera de aire ascendente que resulta de un calentamiento localizado en la superficie. No producen precipitación y pueden evaporarse rápido después de su formación. Estas nubes marcan las zonas de aire ascendente y las zonas sin nubes ocurren donde el aire desciende.

Cumulus congestus. Consisten en torres múltiples, y cada torre tiene varias celdas que se elevan. Esto les da una apariencia como de un fuerte con numerosas columnas de alturas variables. Su fuerte desarrollo vertical indica que se formaron en aire inestable. Las torres individuales de una cumulus congestus tienen una duración de vida de unos 10 minutos y se reemplazan constantemente por nuevas formas.

- *Cumulonimbus* (Cb). Son las nubes más violentas porque producen las tormentas eléctricas más intensas. En el aire cálido, húmedo e inestable, estas nubes pueden ocupar casi toda la profundidad de la troposfera y más arriba.

Se distinguen por la presencia de yunques, compuestos totalmente por cristales de hielo y se forman por los vientos altos de la estratosfera baja que extienden a la nube hacia adelante. Los fuertes vientos pueden impulsar granizo hacia el yunque, donde son expulsados y caen de la nube. Por esta razón, los pilotos de avión los evitan.

La Figura 6.1 muestra una ilustración de los diferentes tipos de nubes de acuerdo a su altitud.

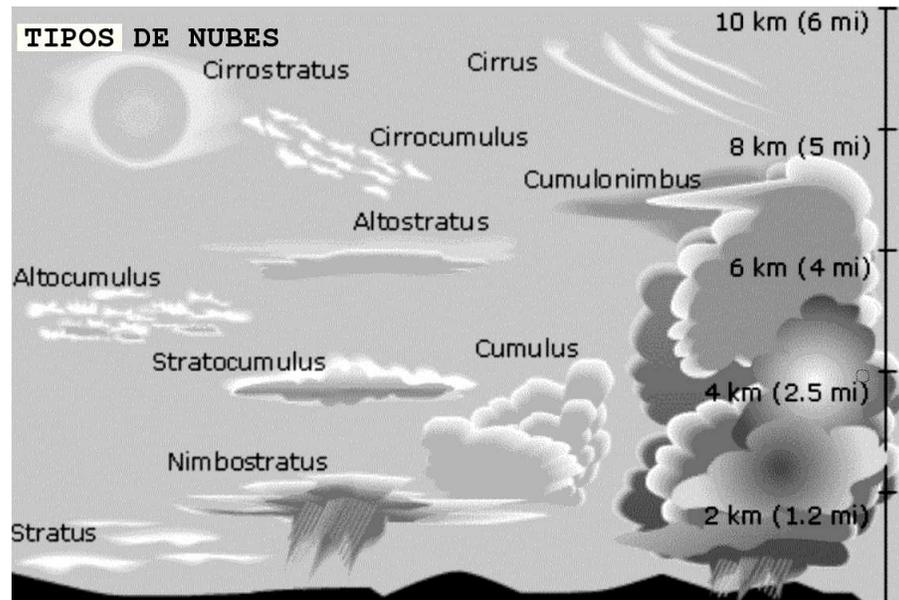


Figura 6.1. Tipos de nubes [18].

6.2 Cubierta de Nubes

El material de esta sección se obtuvo de la referencia [i].

Además de sus forma y altura, otra característica importante de las nubes es su amplitud o cobertura. Los meteorólogos utilizan varios términos para describir la cobertura. Cuando las nubes ocupan más de nueve décimas partes del cielo, se dice que está *nublado*. Cuando la cobertura está de entre seis décimas y nueve décimas, se llama *quebrada*. Las nubes *dispersas* ocupan entre un décimo y la mitad del cielo, y menos de una décima la cubierta de nubes se clasifica como un cielo despejado.

Las nubes, en un día determinado, no se limitan a una única altura sobre la superficie, sino que pueden ocurrir simultáneamente en varios niveles en la atmósfera, y cada nivel puede tener diferentes tipos de nubes y cantidad diferente de la cobertura. Así, por ejemplo, un informe de nubes detallado podría describir el cielo como con cúmulos dispersos a 1000m, altoestratos quebrado en 4 km, y una capa nublada de cirroestratos a 7km.

6.3 Influencia de las Nubes en el Cambio Climático

El material de esta sección se obtuvo de la referencia [i].

Hoy en día está ampliamente aceptado por la sociedad científica que el aumento en los gases de efecto invernadero (tales como: dióxido de carbono(CO_2), metano (CH_4), vapor de agua (H_2O), entre otros) que se introducen en la atmósfera por la actividad humana están incrementando la temperatura global. Para tratar de cuantificar los efectos que diversos fenómenos tienen en la atmósfera los científicos usan modelos.

Los modelos estiman la distribución global de la temperatura y precipitación que daría lugar a cambios hipotéticos en la atmósfera (tales como duplicar el contenido de dióxido de carbono). Los modelos se resuelven primero con los valores de control que representan las condiciones actuales, y luego se resuelven otra vez usando los valores perturbados (cambiados). Al comparar los resultados del modelo control con los valores perturbados, se puede estimar el efecto sobre la atmósfera.

Desafortunadamente, este procedimiento incluye una serie de dificultades tales como nuestra imperfecta comprensión del impacto de las nubes en el clima. Específicamente, en lo que respecta al calentamiento global, tenemos que responder a dos preguntas importantes: ¿cómo podría un aumento en los gases de efecto invernadero afectar a la cobertura global de nubes? y ¿cómo podrían los cambios en la cubierta de nubes afectar el clima?

Una hipótesis propone que el aumento de estos gases produce un calentamiento global lo que incrementa la evaporación en la superficie y esto podría aumentar el contenido de vapor de agua en la atmósfera. Un aumento en el vapor de agua atmosférico podría conducir a un aumento en la cobertura global de nubes. Sin embargo, no sabemos qué tipo de nubes se incrementarían más, lo cual es importante porque cada tipo de nube tiene un impacto diferente en el clima.

El aumento en la cobertura de nubes puede promover el enfriamiento, aumentando el porcentaje de luz solar reflejada de vuelta al espacio. Sin embargo, las gotas de agua también son eficaces absorbiendo energía de onda larga emitida por la superficie de la Tierra. Así, el *albedo* (razón entre la radiación reflejada por una superficie y la radiación incidente en la misma) podría provocar un enfriamiento global, mientras que la absorción de energía de onda larga podría promover el calentamiento (permitiendo a la atmósfera retener energía que de otra forma escaparía al espacio). La magnitud relativa de los dos efectos depende del tipo de nube.

Un aumento en la profundidad de las nubes *cumulus* no disminuiría tanto la cantidad de radiación solar que alcanza la superficie, pero podría reducir la cantidad de radiación de onda larga que se pierde en el espacio por la atmósfera. Este proceso contribuye a la retroalimentación positiva que promueve el calentamiento. Por otro lado, un aumento en las nubes estratiformes reduciría la cantidad de radiación solar (cantidad de energía solar recibida por la superficie) en la Tierra, mientras que la cantidad de radiación de onda larga perdida en el espacio sería relativamente pequeña. Esto corresponde a una retroalimentación negativa que podría reducir la tasa de calentamiento.

Aún no se sabe si el aumento o disminución en la cobertura de nubes se presentará en altitudes bajas, medias o altas. Se cree que un aumento de nubes cirrus altas promovería un calentamiento global de la atmósfera, pero ese aumento en nubes bajas y medias tendría el efecto contrario.

Y aún hay más problemas sin resolver, por ejemplo, los modelos no incluyen procesos (de formación de nubes) micro-físicos complejos que ocurren dentro de las nubes y que influyen en la precipitación. Por lo tanto, aún está sujeta a mucha incertidumbre la cuestión de cómo la cubierta de nubes y sus cambios podrían afectar a la cantidad y distribución de las precipitaciones.

7 Fuentes de obtención de datos

Se usaron 4 fuentes diferentes de donde se obtuvieron los datos de anomalía nubosa y manchas solares.

7.1 Datos de la Anomalía Nubosa

Los datos de anomalía nubosa se obtuvieron de la página oficial que pertenece al International Satellite Cloud Climatology Project (ISCCP) [14]. El sitio web de ISCCP ofrece muchas series de datos sobre nubes de distintas regiones del planeta Tierra, por lo que existe una lista de los códigos de región y su descripción que se usa para identificar los archivos que se desean descargar [13].

El archivo de datos de la cubierta nubosa usado en esta tesis corresponde a la región global cuyo código es "glb". Este archivo contiene columnas de datos de diferentes valores medidos y calculados sobre la cubierta nubosa; en este trabajo sólo se usará la columna de datos de la *anomalía de nubes*. La anomalía es la diferencia de una unidad medible o valor anormal (p. ej. temperatura o precipitación, y en este caso de la nubosidad), en una región dada durante un periodo específico a partir de la media o promedio a largo plazo (o valor normal), generalmente de los últimos 30 años. La anomalía se expresa generalmente en porcentaje.

El ISCCP se estableció en 1982 como parte del World Climatology Research Center. Este proyecto es responsable de la recolección y análisis de las mediciones de radiación de las condiciones meteorológicas. Los datos son recolectados por un conjunto de satélites meteorológicos que son operados por varias naciones y procesados por algunos grupos de agencias gubernamentales, laboratorios y universidades.

Estas mediciones se usan para inferir la distribución global de nubes, sus propiedades y sus variaciones diurnas, estacionales e interanuales. La recolección de datos comenzó el día 1ero de Julio del año 1983 y se planea que continúe después del día 30 de Julio del año 2010.

Los conjuntos de datos y los productos analizados resultantes se usan para mejorar la modelación del papel que desempeñan las nubes en el clima, en particular elucidar sus efectos en el balance de radiación global. Además, estos datos sirven como soporte de muchos otros estudios incluyendo la comprensión del ciclo hidrológico. Los conjuntos de datos de nubes de ISCCP proporcionan una vista global sistemática del comportamiento de las nubes.

La sede ICCSP se encuentra en el Instituto Goddard para estudios espaciales en Nueva York, EE.UU. Los datos de ISCCP son almacenados en el Archivo Central de ISCCP y en la NASA. Si bien los datos se suelen utilizar para estudiar el clima, también son un recurso valioso para actividades astronómicas [12].

Los datos anuales observados de la anomalía de nubes bajas (AN (obs)) en el periodo de 1983 a 2008 se muestran en la Tabla 7.1.

Tabla 7.1. Datos anuales de la anomalía de la cubierta global de nubes bajas.

Año	AN (obs) (ISCCP) (%)
1983	0.646
1984	0.966
1985	1.667
1986	1.762
1987	1.539
1988	0.964
1989	0.388
1990	0.449
1991	0.341
1992	0.290
1993	0.904
1994	1.226
1995	0.808
1996	0.888
1997	0.672
1998	-0.152
1999	-0.061
2000	-0.561
2001	-0.907
2002	-1.593
2003	-1.097
2004	-1.468
2005	-1.788
2006	-2.324
2007	-2.107
2008	-2.230

7.2 Datos de Manchas Solares

Los datos de manchas solares se obtuvieron de 3 fuentes diferentes.

La primera fuente es de la página oficial de Solar Influences Data Analysis Center (SIDC) [15]. Aquí se obtuvo información sobre el número de manchas solares anuales desde el año 1983 hasta el año 2008. El SIDC es un centro operacional de pronóstico del clima espacial organizado por el Royal Observatory of Belgium. Empezó su funcionamiento en el año de 1981 y alberga el centro de SunspotIndex Data (SID), centro mundial de datos del índice de manchas solares. SIDC analiza la actividad solar y ofrece servicios en tres diferentes escalas:

1. *Advertencias rápidas y Monitoreo en tiempo real.* Siendo el Regional Warning Center para Europa occidental del International Space Environment Service, el SIDC recolecta y redistribuye datos solares, geomagnéticos e ionosféricos en Europa occidental. Las predicciones a corto plazo para 3 días y las alertas se producen a diario.
2. *Pronósticos y análisis de mediano plazo.* El SIDC se encarga de calcular el índice de manchas solares, llamado Número Internacional de Manchas Solares. Además, este centro funge como un servicio de análisis de datos de la Federation of Astronomical and Geophysical Data Analysis Services donde se realiza el cálculo y la difusión del número de manchas solares diario, mensual y anual con predicciones de rango medio

(de hasta 12 meses).

3. *Análisis de eventos previos y de ciclo solar a largo plazo.* Desde el lanzamiento del SOLar and Heliosferic Observatory (SOHO), el Extreme-Ultraviolet Imaging Telescope (EIT) ofrece una visión global de la corona en la longitud de onda del extremo ultravioleta (91.2 nm - 1 nm) en toda la fase ascendente del ciclo de actividad solar. Esta serie de datos de larga duración no tiene precedentes y permite el estudio de la evolución a lo largo del ciclo solar de fenómenos tales como las regiones activas, hoyos coronales, eyecciones de masa coronal o ráfagas solares. Esto se usa como un insumo para la red de investigación europea de simulaciones de Clima Espacial [15].

Con propósitos de pronóstico, se usaron dos fuentes más de donde se obtuvo la información de manchas solares :

- a) Una previsión de la actividad solar en las épocas de máximos y mínimos para los siguientes 1000 años usando una suma de ondas sinusoidales derivada del análisis espectral de la serie de tiempo del número de manchas solares con promedio de 10 años en el periodo 1006-3006 [xxviii].
- b) Una previsión anual de manchas solares utilizando el algoritmo de redes neuronales para el periodo 2009–2146 [xl].

En la presente tesis se emplearon las 3 series del número de manchas solares mencionadas en (a) y (b) y de SIDC que se denotará como Rz (SIDC). La encontrada en [xl] en el periodo 2009-2146 se denotará como Rz (Velasco-Herrera, 2011) y la encontrada en [xxviii] en el periodo 1986-2146 se denotará como Rz (Rigozo et al., 2010).

En las Tablas 7.2, 7.3 y 7.4 se muestran los datos empleados.

Tabla 7.2. Datos anuales observados del RZ (SIDC) en el periodo de 1983 a 2008.

Año	Rz (SIDC)
1983	66.6
1984	45.9
1985	17.9
1986	13.4
1987	29.2
1988	100.2
1989	157.6
1990	142.6
1991	145.7
1992	94.3
1993	54.6
1994	29.9
1995	17.5
1996	8.6
1997	21.5
1998	64.3
1999	93.3
2000	119.6
2001	111
2002	104
2003	63.7
2004	40.4
2005	29.8
2006	15.2
2007	7.5
2008	2.9

Tabla 7.3. Datos anuales de Rz (Velasco-Herrera, 2011) en el periodo 2009-2146 .

Año	Rz (Velasco-Herrera, 2011)	Año	Rz (Velasco-Herrera, 2011)	Año	Rz (Velasco-Herrera, 2011)
2009	40	2055	57	2101	186
2010	59	2056	66	2102	145
2011	70	2057	66	2103	92
2012	71	2058	55	2104	42
2013	61	2059	38	2105	9
2014	45	2060	18	2106	0
2015	27	2061	4	2107	15
2016	11	2062	0	2109	81
2017	2	2063	8	2110	107
2018	0	2064	27	2111	115
2019	3	2065	50	2112	102
2020	9	2066	71	2113	74
2021	15	2067	81	2114	40
2022	19	2068	77	2115	12
2023	18	2069	59	2116	0
2024	15	2070	34	2117	7
2025	10	2071	11	2118	31
2026	5	2072	0	2119	64
2027	1	2073	7	2120	96
2028	0	2074	34	2121	117
2029	0	2075	75	2122	121
2030	3	2076	120	2123	108
2031	5	2077	156	2124	81
2032	8	2078	172	2125	49
2033	10	2079	163	2126	22
2034	10	2080	131	2127	4
2035	10	2081	86	2128	0
2036	8	2082	40	2129	7
2037	5	2083	9	2130	20
2038	2	2084	0	2131	34
2039	0	2085	16	2132	43
2040	0	2086	50	2133	44
2041	1	2087	90	2134	37
2042	4	2088	123	2135	26
2043	9	2089	135	2136	13
2044	13	2090	124	2137	4
2045	16	2091	92	2138	0
2046	17	2092	52	2139	2
2047	14	2093	16	2140	8
2048	8	2094	0	2141	16
2049	3	2095	10	2142	22
2050	0	2096	45	2143	26
2051	2	2097	97	2144	25
2052	10	2098	150	2145	21
2053	25	2099	189	2146	14
2054	42	2100	202		

Tabla 7.4. Datos promediados de 10 años de Rz (Rigozo et al., 2010) en el periodo 1983-2146 .

Década	Rz (Rigozo et al., 2010)
1977-1986	35.95
1987-1996	78.02
1997-2006	66.28
2007-2016	62.3
2017-2026	61.3
2027-2036	69.2
2037-2046	70.5
2047-2056	63.8
2057-2066	67.3
2067-2076	54.6
2077-2086	46.4
2087-2096	37.7
2097-2106	22.4
2107-2116	13
2117-2126	12.1
2127-2136	19.5
2137-2146	40.3

8 Análisis de Datos

Antes de hacer la estimación de anomalía de nubes bajas en función de las manchas solares fue necesario "corregir" la serie de datos de AN(obs).

En la Figura 8.1 se muestra la gráfica de la AN(obs). Ésta presenta una tendencia con pendiente negativa. Se puede ver a la AN(obs) como una función de diferentes parámetros; en general depende de la temperatura en la superficie y aire, presión atmosférica, evaporación del agua en los océanos, cantidad de aerosoles en la atmósfera y por último la actividad solar. Se publicó un artículo recientemente [xviii] donde se muestra que de varios fenómenos relacionados con la actividad solar, las manchas solares resultaron ser el índice mejor correlacionado con las anomalías nubosas. Los autores de este artículo también mostraron que si se elimina la tendencia negativa de la serie de AN(obs) se obtiene una mejor correlación con las manchas solares comparada con la serie original. Esto sugiere que la tendencia negativa de los datos de AN(obs) no se debe directamente a la actividad solar sino que está relacionada con los otros parámetros mencionados, como temperatura y presión.

Usando la misma metodología usada en el artículo mencionado en el párrafo anterior para eliminar la tendencia negativa de la serie de AN(obs), se ajustaron varias tendencias y se escogió la que mejor se correlaciona con los datos.

[La correlación entre datos se hace con el coeficiente de correlación (también conocido como *coeficiente de Pearson*). Éste mide la relación lineal entre dos variables aleatorias cuantitativas x y y . Se define como: $R = \frac{\text{Media} - \text{Moda}}{\text{Desviación estándar}}$. Es un número adimensional entre -1 y +1. Si la relación entre estas dos variables es: a) cero, significa que no existe relación lineal entre las variables; b) 1 indica que la relación es perfecta; c) -1 indica correlación negativa o anticorrelación perfecta; d) cerca de -1 y +1 significa que la relación es muy fuerte y e) cerca de +0.5 y -0.5 muestra una relación moderada.]

Después se restó la mejor tendencia a los datos de AN (obs). Se graficaron los datos de la Tabla 7.1 de la AN (obs) en el periodo de 1983 a 2008 y se obtuvieron tres líneas de tendencia: lineal, cuadrática y cúbica. El coeficiente de correlación elevado al cuadrado (R^2) resulta ser mayor para la tendencia cuadrática comparado con la tendencia lineal y el R^2 de la tendencia cúbica no muestra un incremento considerable comparado con la tendencia cuadrática. Los valores de R^2 aumentan lentamente al aumentar el grado de la curva de tendencia asociada a los datos y es por esta razón que no se incluyen en el análisis (ver Tabla 8.1). En la Figura 8.1 se grafica AN (obs) en función del tiempo.

Tabla 8.1. Funciones analíticas asociadas a cada curva de tendencia de las anomalías nubosas observadas, y su coeficiente de correlación elevado al cuadrado (R^2). La variable y de las funciones analíticas representa a la AN(obs), mientras que la variable x representa el periodo.

Orden de Curva de Tendencia	Función Analítica	Coeficiente de correlación al cuadrado (R^2)
1) <i>Lineal</i>	$y = -0.1484x + 1.18244$	0.798
2) <i>Cuadrática</i>	$y = -0.0075x^2 + 0.0382x + 1.0784$	0.8884
3) <i>Cúbica</i>	$y = 0.0001x^3 - 0.0124x^2 + 0.0866x + 0.9875$	0.8896

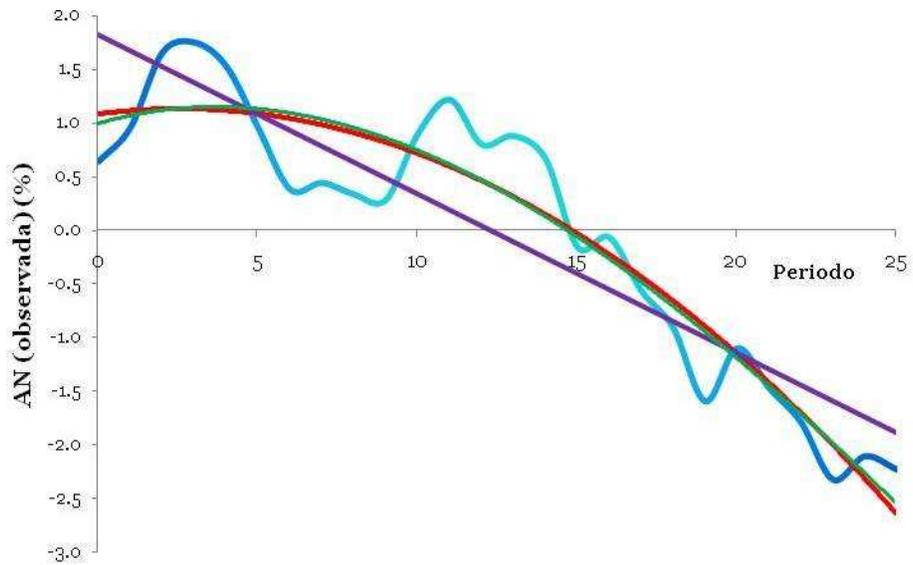


Figura 8.1. Datos anuales de la anomalía de nubes bajas observadas (línea azul degradado). Se grafican las tendencias cuyas ecuaciones aparecen en la Tabla 8.1: Tendencia lineal (lila), tendencia cuadrática (línea roja) y tendencia cúbica (línea verde). Se usa el periodo de 0 a 25 que corresponde a los años 1983 y 2008 respectivamente.

La curva de tendencia que mejor se ajusta por tener un R^2 mayor es la tendencia cúbica. Sin embargo éste valor no difiere en más de 1% al valor de R^2 correspondiente a la tendencia cuadrática. Por lo tanto se escogió la tendencia cuadrática para corregir los datos, ya que la ecuación es más simple.

La corrección más adecuada de la tendencia consiste en sustraer los valores que se obtienen al evaluar la función (2) de la Tabla 8.1, de la tendencia cuadrática, en el periodo anual correspondiente a los datos de AN (obs). Los valores obtenidos se muestran en la Tabla 8.2.

Tabla 8.2. Datos anuales de Rz (SIDC) y AN(obs)-Tendencia Cuadrática.

Año	Rz (SIDC)	AN (obs) - Tendencia Cuadrática
1983	66.6	-0.433
1984	45.9	-0.143
1985	17.9	0.542
1986	13.4	0.636
1987	29.2	0.428
1988	100.2	-0.118
1989	157.6	-0.650
1990	142.6	-0.530
1991	145.7	-0.563
1992	94.3	-0.525
1993	54.6	0.194
1994	29.9	0.634
1995	17.5	0.351
1996	8.6	0.581
1997	21.5	0.529
1998	64.3	-0.116
1999	93.3	0.169
2000	119.6	-0.121
2001	111	-0.243
2002	104	-0.689
2003	63.7	0.061
2004	40.4	-0.041
2005	29.8	-0.077
2006	15.2	-0.314
2007	7.5	0.218
2008	2.9	0.424

En la Figura 8.2 se graficaron los valores obtenidos para la corrección de los datos AN (obs). Esta gráfica, comparada con la gráfica de la Figura 8.1, muestra una tendencia con pendiente cero.

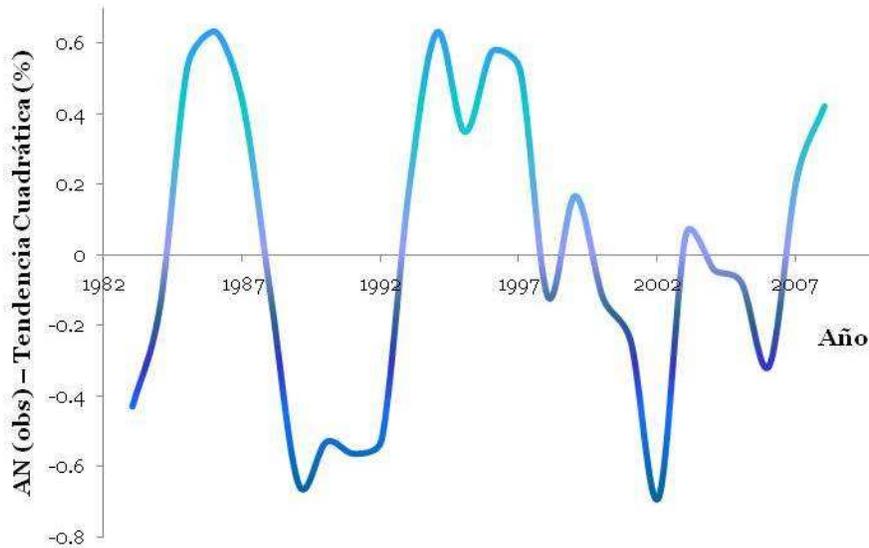


Figura 8.2. AN(obs) – Tendencia Cuadrática en función del tiempo para el periodo 1983-2008.

Se hicieron estimaciones de la AN (obs) de la cubierta de nubes bajas a partir de las manchas solares (usando: Rz (SIDC), Rz (Rigozo et al. 2010) y Rz (Velasco-Herrera, 2011)), siguiendo el método en (ii):

1. Se obtuvo la función analítica de la AN (obs) en función de Rz (SIDC) que mejor se ajustó para el periodo 1983-2008. Se hizo una primera reconstrucción de las anomalías nubosas con la expresión matemática encontrada.
2. La ecuación que mejor representa a la reconstrucción hecha con las observaciones (ver punto 1) se utilizó para hacer la reconstrucción (segunda reconstrucción) anual tomando los datos de manchas solares de Rz (Velasco-Herrera, 2011) entre 2009 y 2146.
3. Se hizo lo mismo que en el punto 2 pero usando Rz (Rigozo et al., 2010) entre 1986 y 2146.
4. La cuarta reconstrucción se hizo tomando el promedio de cada diez años de los datos de Rz (Velasco-Herrera, 2011) en el periodo de 1986 a 2146.

Ahora, los datos de la nueva anomalía nubosa (AN(obs) - Tend, Cuadrática) se relacionarán con los datos de Rz (SIDC). La función analítica de la curva que mejor se ajuste se usará para reconstruir la anomalía nubosa hasta el año 2008.

En la Figura 8.3 se graficaron los datos de la corrección AN(obs) - Tendencia Cuadrática (columna 3 de Tabla 8.2) en función de los datos Rz (SIDC) (puntos morados). Se agregaron

dos líneas de tendencia (lineal en verde y cuadrática en rojo) y sus funciones analíticas y el coeficiente de correlación al cuadrado (R^2) se muestran en la Tabla 8.3. La tendencia que mejor se ajusta es la cuadrática (5) porque R^2 es mayor que en el caso lineal.

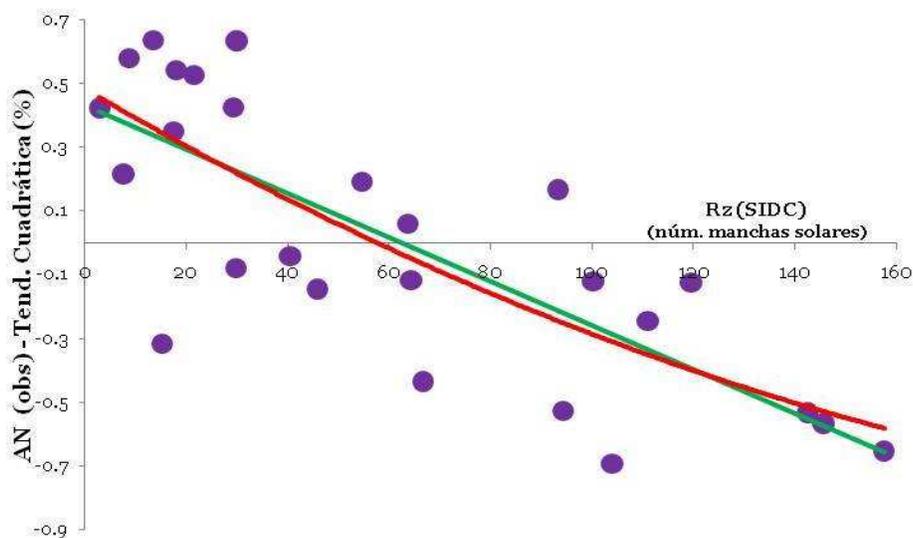


Figura 8.3. AN (obs)-Tend. Cuadrática vs. Rz (SIDC) entre el año 1983 y 2008 (puntos morados). Tendencia lineal (línea verde), tendencia cuadrática (línea roja).

Tabla 8.3. Funciones analíticas asociadas a cada curva de tendencia de la Figura 8.3 y su correspondiente R^2 .

Orden de curva de tendencia	Función Analítica	R^2
4) Lineal	$y = -0.0069x + 0.4319$	0.6027
5) <i>Cuadrática</i>	$y = 0.00002x^2 - 0.0093x + 0.4838$	0.6081

Las funciones analíticas de las curvas de tendencia nos dicen cómo es AN (obs)-Tend. Cuadrática, que corresponde a la variable y , en función de Rz (SIDC), que corresponde a la variable x .

Aunque aquí no se incluyen, también se graficaron directamente los datos de AN (obs) (con tendencia) en función de Rz (SIDC). Al agregar las líneas de tendencia lineal y cuadrática la R^2 resulta ser dos órdenes de magnitud más pequeña, en los dos casos, comparada con la obtenida usando la corrección AN (obs)- Tendencia Cuadrática.

Se evaluó la función (5) de la tendencia cuadrática en cada año del periodo de 1983 a 2008 para obtener la anomalía nubosa reconstruida a partir de Rz (SIDC). Esta reconstrucción sólo sirve para mostrar la metodología y la función analítica (5) que se usará una vez que se hagan las estimaciones a futuro de la anomalía de nubes bajas.

En la Tabla 8.4 se muestran los datos anuales (desde 1983 hasta 2008) de Rz (SIDC) en la columna 2; la corrección de la anomalía nubosa o AN(obs)- Tend. Cuadrática en la columna 3 y la reconstrucción de la AN (obs), que denominamos AN (Rz).

Tabla 8.4. Datos anuales de Rz (SIDC) y AN (obs) – Tend. Cuadrática y AN (Rz).

Año	Rz (SIDC)	AN (obs) - Tendencia	
		Cuadrática (%)	AN (Rz) Reconstrucción (%)
1983	66.6	-0.433	-0.047
1984	45.9	-0.143	0.099
1985	17.9	0.542	0.324
1986	13.4	0.636	0.363
1987	29.2	0.428	0.229
1988	100.2	-0.118	-0.247
1989	157.6	-0.650	-0.485
1990	142.6	-0.530	-0.436
1991	145.7	-0.563	-0.447
1992	94.3	-0.525	-0.215
1993	54.6	0.194	0.036
1994	29.9	0.634	0.224
1995	17.5	0.351	0.327
1996	8.6	0.581	0.405
1997	21.5	0.529	0.293
1998	64.3	-0.116	-0.032
1999	93.3	0.169	-0.210
2000	119.6	-0.121	-0.342
2001	111	-0.243	-0.302
2002	104	-0.689	-0.267
2003	63.7	0.061	-0.027
2004	40.4	-0.041	0.141
2005	29.8	-0.077	0.224
2006	15.2	-0.314	0.347
2007	7.5	0.218	0.415
2008	2.9	0.424	0.457

En la Figura 8.4 se graficaron los datos de las columnas 2 (Rz) y 4 (AN (Rz) reconstruida) de la Tabla 8.3 en función del año (1983 a 2008). La línea azul degradado es AN (Rz) y la negra con amarillo corresponde a Rz (SIDC). Se obtuvo un coeficiente de correlación de -0.9920 entre los datos Rz (SIDC) y la reconstrucción de la anomalía nubosa o AN (Rz).

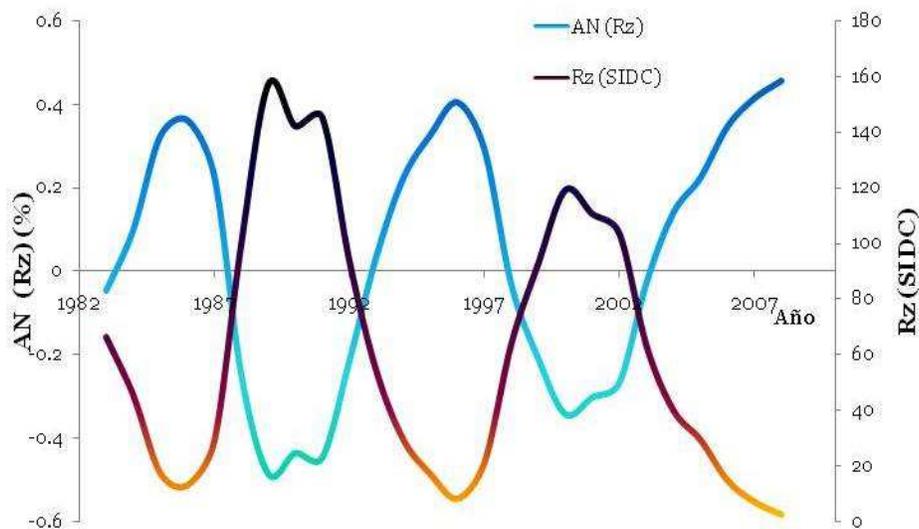


Figura 8.4. Datos anuales de Rz (SIDC) y AN (Rz) en el periodo de 1983 a 2008.

8.1 Cálculo de la anomalía nubosa anual (periodo 2009-2146)

El cálculo de la anomalía nubosa en este periodo se hizo con los datos Rz (Velasco-Herrera, 2011) de la Tabla 7.3 utilizando la función (5) de la Tabla 8.3. El resultado se muestra en la Tabla 8.5 y en la Figura 8.5. Se obtuvo un coeficiente de correlación de -0.9854 entre los datos de Rz (Velasco-Herrera, 2011) y la reconstrucción ANa (Rz), donde el subíndice «a» denota el periodo anual.

Tabla 8.5. Datos de ANa (Rz) en el periodo 2009 a 2146.

Año	AN _a (Rz)	Año	AN _a (Rz)	Año	AN _a (Rz)
2009	0.1438	2055	0.0187	2101	-0.5541
2010	0.0047	2056	-0.0429	2102	-0.4442
2011	-0.0692	2057	-0.0429	2103	-0.2025
2012	-0.0757	2058	0.0328	2104	0.1285
2013	-0.0091	2059	0.1593	2105	0.4017
2014	0.1058	2060	0.3229	2106	0.4838
2015	0.2473	2061	0.4469	2107	0.3488
2016	0.3839	2062	0.4838	2109	-0.1383
2017	0.4653	2063	0.4107	2110	-0.2823
2018	0.4838	2064	0.2473	2111	-0.3212
2019	0.4561	2065	0.0688	2112	-0.2567
2020	0.4017	2066	-0.0757	2113	-0.0949
2021	0.3488	2067	-0.1383	2114	0.1438
2022	0.3143	2068	-0.1137	2115	0.3751
2023	0.3229	2069	0.0047	2116	0.4838
2024	0.3488	2070	0.1907	2117	0.4197
2025	0.3928	2071	0.3839	2118	0.2147
2026	0.4378	2072	0.4838	2119	-0.0295
2027	0.4745	2073	0.4197	2120	-0.2247
2028	0.4838	2074	0.1907	2121	-0.3305
2029	0.4838	2075	-0.1012	2122	-0.3487
2030	0.4561	2076	-0.3442	2123	-0.2873
2031	0.4378	2077	-0.4803	2124	-0.1383
2032	0.4107	2078	-0.5241	2125	0.0761
2033	0.3928	2079	-0.5007	2126	0.2889
2034	0.3928	2080	-0.3913	2127	0.4469
2035	0.3928	2081	-0.1681	2128	0.4838
2036	0.4107	2082	0.1438	2129	0.4197
2037	0.4378	2083	0.4017	2130	0.3058
2038	0.4653	2084	0.4838	2131	0.1907
2039	0.4838	2085	0.3401	2132	0.1209
2040	0.4838	2086	0.0688	2133	0.1133
2041	0.4745	2087	-0.1912	2134	0.1671
2042	0.4469	2088	-0.3575	2135	0.2555
2043	0.4017	2089	-0.4072	2136	0.3663
2044	0.3663	2090	-0.3619	2137	0.4469
2045	0.3401	2091	-0.2025	2138	0.4838
2046	0.3315	2092	0.0543	2139	0.4653
2047	0.3575	2093	0.3401	2140	0.4107
2048	0.4107	2094	0.4838	2141	0.3401
2049	0.4561	2095	0.3928	2142	0.2889
2050	0.4838	2096	0.1058	2143	0.2555
2051	0.4653	2097	-0.2301	2144	0.2638
2052	0.3928	2098	-0.4612	2145	0.2973
2053	0.2638	2099	-0.5595	2146	0.3575
2054	0.1285	2100	-0.5787		

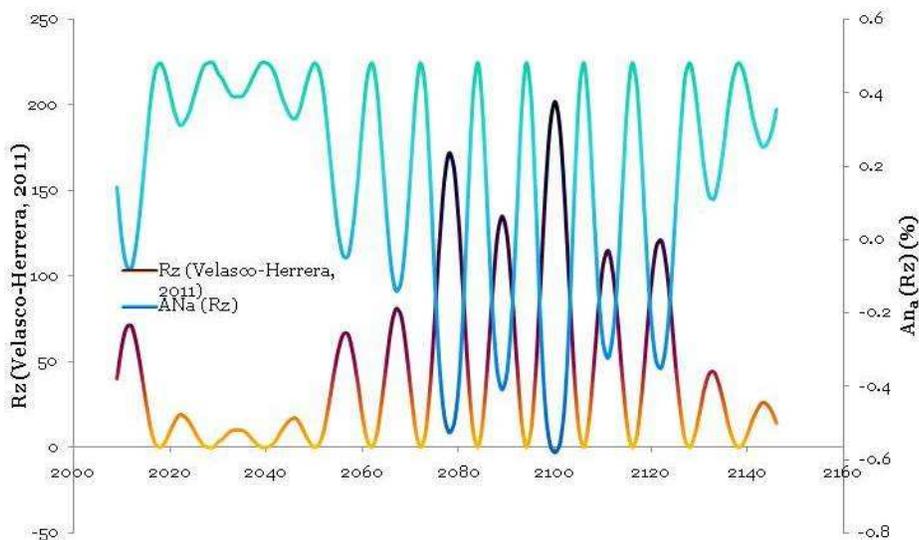


Figura 8.5. Gráfica de los datos anuales de Rz de la Tabla 7.3 y la reconstrucción ANa (Rz) de la Tabla 8.3.

8.2 Cálculo de la anomalía nubosa decenal

Se calculó el promedio de 10 años de Rz (SIDC). Los datos de Rz (Rigozo et al., 2010) corren a lo largo del ciclo solar y se tomaron los datos desde el año 1986 hasta el año 2146. Después se evaluó la función (5) en los datos de Rz de la Tabla 7.4 y los valores obtenidos se muestran en la Tabla 8.6 con el nombre de $AN_{d1}(Rz)$ (d1: reconstrucción decenal 1).

En la Figura 8.6 se graficaron los datos de la Tabla 8.2 para ver cómo se relaciona $AN_{d1}(Rz)$ y Rz. Se obtuvo un coeficiente de correlación de -0.9928 entre $AN_{d1}(Rz)$ y Rz en el periodo 1986-2146.

Tabla 8.6. Datos decenales de Rz (Rigozo et al., 2010) y $AN_{d1}(Rz)$ reconstruida.

Década	Rz (Rigozo et al., 2010)	AN _{d1} (Rz) (%)
1977-1986	62.3	-0.0180
1987-1996	69.2	-0.0640
1997-2006	65.8	-0.0415
2007-2016	62.3	-0.0180
2017-2026	61.3	-0.0111
2027-2036	69.2	-0.0640
2037-2046	70.5	-0.0724
2047-2056	63.8	-0.0281
2057-2066	67.3	-0.0515
2067-2076	54.6	0.0356
2077-2086	46.4	0.0953
2087-2096	37.7	0.1616
2097-2106	22.4	0.2855
2107-2116	13	0.3663
2117-2126	12.1	0.3742
2127-2136	19.5	0.3101
2137-2146	40.3	0.1415

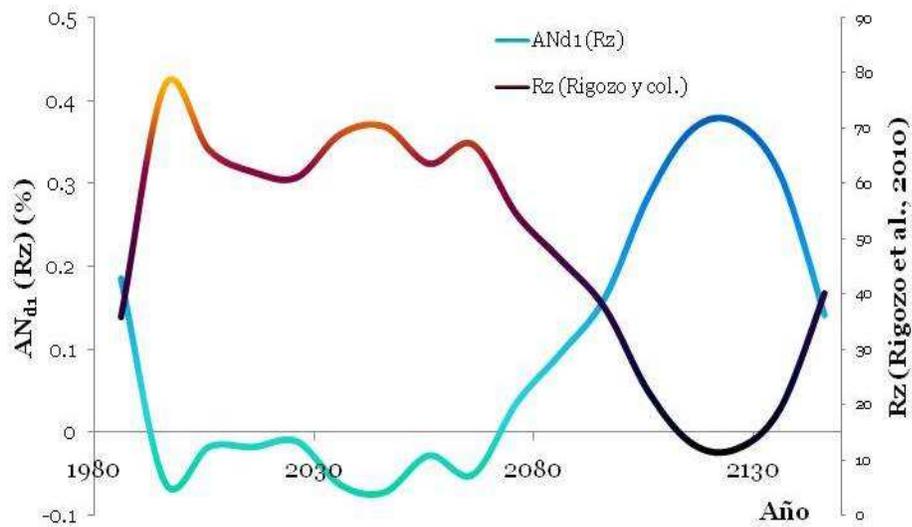


Figura 8.6. Datos decenales de Rz (Rigozo et al., 2010) y AN_{d1} (Rz).

Adicionalmente se hizo el promedio de cada diez años de los datos de Velasco-Herrera [xl] y se obtuvo una reconstrucción de la anomalía nubosa a lo largo del ciclo solar. Los datos de manchas solares promediados a 10 años y la reconstrucción de la anomalía nubosa usando la función 5 se muestran en la Tabla 8.7. Se obtuvo un coeficiente de correlación de

-0.9964 entre $AN_{d2}(Rz)$ y Rz en el periodo 1986-2156.

Tabla 8.7. Datos promediados a 10 años de Rz (Velasco-Herrera, 2011) y reconstrucción $AN_{d2}(Rz)$ en el periodo de 1986 a 2146.

Año	Promedio decenal de Rz (SIDC y Velasco-Herrera, 2011)	$AN_{d2}(Rz)$ (%)
1983-1986	35.95	0.1847
1987-1996	78.02	-0.0609
1997-2006	66.28	-0.0175
2007-2016	39.44	0.1604
2017-2026	9.6	0.3963
2027-2036	5.5	0.4332
2037-2046	6.7	0.4223
2047-2056	22.7	0.2829
2057-2066	33.7	0.1931
2067-2076	49.8	0.0702
2077-2086	82.3	-0.146
2087-2096	68.7	-0.060
2097-2106	111.2	-0.303
2107-2116	59.2	0.0033
2117-2126	69.6	-0.0666
2127-2136	22.8	0.2821
2137-2146	13.8	0.3592

En la Figura 8.7 se graficaron las dos series de datos de la Tabla 8.7, manchas solares de la columna 2 y la reconstrucción decenal de la anomalía nubosa de la columna 3.

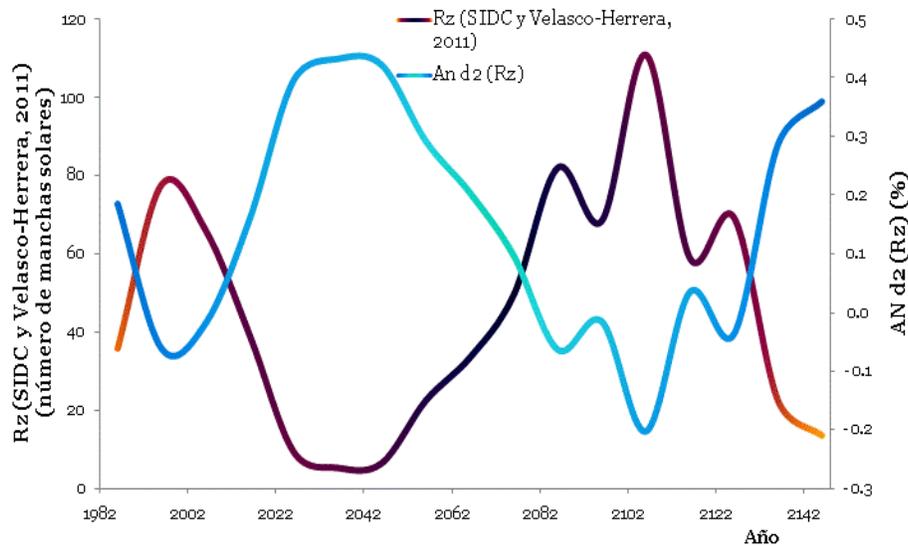


Figura 8.7. Gráfica de Rz (Velasco-Herrera, 2011) (línea amarilla-negra) y reconstrucción $AN_{d2}(Rz)$ (línea azul) en el periodo de 1986 a 2146.

9 Discusión y Conclusiones

Basándose en el trabajo de la referencia [xviii], consideramos que las manchas solares, como un indicador directo de la actividad solar, están relacionadas con las nubes. Si bien aún no se conocen con certeza los mecanismos físicos que dan origen a la correlación entre la actividad solar y el clima, no es la finalidad de esta tesis profundizar en este tema.

Después de analizar más de 50 predicciones, el Panel de Predicción del Ciclo Solar 24 intentó desarrollar un consenso para el número máximo de manchas solares para este ciclo, sin embargo, el Panel no pudo decidir si el ciclo 24 tendrá un máximo de manchas solares alto o bajo. La predicción alta del Panel fue de 140 ± 20 a ocurrir en el año 2011 y la predicción baja fue de 90 ± 10 a ocurrir en el año 2012 [xxv].

No obstante, se ha observado que la actividad solar ha disminuido, de manera que no tiene precedente desde ~ 1920 , en este ciclo solar 23 que terminó en noviembre de 2009. Por ejemplo, el número de manchas solares, la irradiancia solar total, y el flujo magnético abierto alcanzaron su punto máximo alrededor de 1985 y 1987 y han disminuido desde entonces [xiv]. En particular, las mediciones para la fase descenso y el mínimo del ciclo solar 23 indican que la IST ha caído por debajo de los mínimos vistos durante los dos mínimos solares anteriores [xiv].

Los campos magnéticos polares solares son de dos a tres veces más débiles que los dos ciclos anteriores y en general el flujo magnético heliosférico ha disminuido en comparación a los mínimos previos [xxxi].

Las observaciones del viento solar proveniente de los hoyos coronales polares durante la tercera órbita de Ulysses, mostraron que el viento solar rápido disminuyó su velocidad, era significativamente menos denso, más frío, tenía menor masa y menor momento de flujo comparado con el mínimo solar anterior [xvii]. Además, en la última revisión, el Panel indica que la predicción baja del ciclo solar 24 es la más probable y que el número de manchas solares máximo correspondiente ocurrirá en el año 2013 [16].

En la Figura 9.1 se muestran las dos reconstrucciones de la anomalía nubosa para el periodo 1986- 2146. La línea punteada color morado corresponde a la reconstrucción de la anomalía nubosa usando Rz (Rigozo et al., 2010). La línea color azul degradado corresponde a la reconstrucción de la anomalía nubosa usando Rz (Velasco-Herrera, 2011).

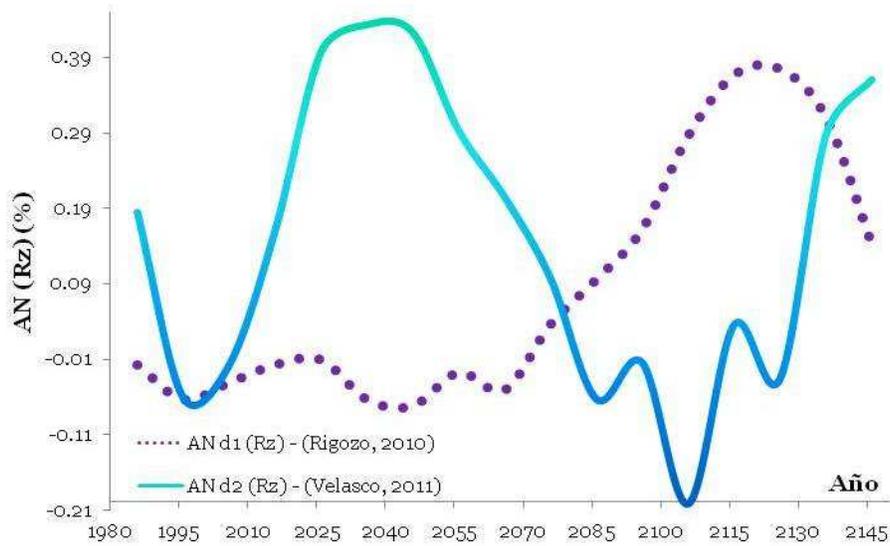


Figura 9.1. Gráfica de AN_{d1} (Rz) con datos de Rz (Rigozo et al., 2010) y AN_{d2} (Rz) con los datos de Rz (Velasco-Herrera, 2011).

De acuerdo con los trabajos previos ya mencionados sobre la actividad solar, concluimos que la predicción del número de manchas solares hecha por Velasco-Herrera [xl] se ajusta mejor al comportamiento presentado por el ciclo solar 23 que la reconstrucción de Rigozo et al. [xxviii]. Los valores del número de manchas solares anuales predichos por Velasco-Herrera [xl] para el año 2011 y 2012 son cercanos a los valores predichos por el Panel, mientras que los valores del número de manchas predicho por Rigozo et al. [xxviii] no son tan cercanos ni fácilmente comparables con los valores del Panel porque los autores hicieron promedios a diez años. Por lo tanto, consideramos que las anomalías nubosas usando los datos de Velasco-Herrera [xl] serían más apropiadas que las anomalías obtenidas con los datos de Rigozo et al. [xxviii].

10 Apéndice

10.1 Albedo de Nubes

El *albedo* es la *reflectividad difusa* o poder de reflexión de una superficie. Se expresa como la razón entre la radiación reflejada por un objeto o superficie y la radiación que incide sobre la misma. Es una cantidad adimensional que puede ser expresada en porcentaje. Se mide en una escala de 0 para una superficie negra perfecta sin poder de reflexión hasta 1 para una superficie blanca que refleja perfectamente.

Considerando que el suministro total de radiación solar en el tope de la atmósfera terrestre es constante todo el año se tiene que el 25% de la radiación disponible es absorbida por la atmósfera sin nubes. El 7% de la radiación absorbida es ultravioleta y se absorbe en la estratosfera por la capa de ozono. La radiación restante comprende al infrarrojo cercano (800nm – 2.5 μ m) que es absorbido en la troposfera por los gases (principalmente vapor de agua). Una pequeña porción de la radiación de onda corta (visible: 700 – 450nm, ultravioleta cercano: 400 – 15nm, infrarrojo cercano) disponible es absorbida por las nubes.

Las gotas de las nubes reflejan difusamente un gran porcentaje de la energía incidente. Es gracias al gran albedo de las nubes que éstas tienen una apariencia brillante y además reducen una gran cantidad de energía disponible para calentar la atmósfera y la superficie. En promedio, la cubierta global de nubes refleja hacia el espacio 19% de la radiación solar entrante. Por otra parte, el 6% de la radiación entrante en el tope de la atmósfera es dispersada hacia el espacio por los gases atmosféricos y los aerosoles. En conjunto, el 25% de la radiación entrante es dispersada de vuelta al espacio por las nubes, los gases y los aerosoles. En otras palabras, los gases y las nubes producen un albedo del 25% para la radiación total entrante.

El 50% de la radiación entrante llega hasta la superficie, donde un 5% de esta radiación se refleja al espacio exterior. En total, el 30% de la radiación solar entrante (25% de la atmósfera y 5% de la superficie) es dispersada hacia el espacio, dando como resultado un albedo terrestre de 30%.

Como resultado de este proceso, la atmósfera absorbe 25% de la energía, mientras que la superficie absorbe 45%. Sin embargo, la energía absorbida por la atmósfera y la superficie se debe estar perdiendo constantemente puesto que no observamos un calentamiento continuo del planeta. El balance de energía se da principalmente con la emisión de onda larga por la superficie hacia la atmósfera y espacio exterior.

11 Bibliografía

Libros y Artículos

- i. Aguado, E., Burt, J. *Understanding Weather and Climate*. Pearson, Prentice Hall. Tercera Edición. 2004. pp 182 -196.
- ii. Benestad, R. E. *Solar Activity and Earth's Climate*. Springer, Praxis Publishing Ltd, Chichester, UK, 2002.
- iii. Couper, H., Henbest, N. *Enciclopedia del Espacio*. ESPASA. Segunda Edición, 2003. pp. 154-159.
- iv. Cubasch, U.; Voss, R. 2000. *The Influence of Total Solar Irradiance on Climate*.
- v. Dobrica, V.; Demetrescu, C.; Boroneant, C.; Maris, G. 2009. *Solar and geomagnetic activity effects on climate at regional and global scales: Case study-Romania*. doi: 10.1016/j.jastp.2008.03.022.
- vi. Erlykin, A. D.; Sloan, T.; Wolfendale, A. W. 2009. *The search for cosmic ray effects on clouds*. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, Volume 71, Issue 8-9, p. 955-958. doi: 10.1016/j.jastp.2009.03.019.
- vii. Haigh, J. 1996. *The Impact of Solar Variability on Climate*. doi: 10.1126/science.272.5264.981
- viii. Hanslmeier, A. *The Sun and Space Weather*. Editorial Springer, segunda edición. 2006, pp 9-11, 14-15.
- ix. Hoyt, D. V.; Schatten, K. H. 1998. *The role of the sun in climate change*. Oxford University Press. New York. 1997.
- x. Kossobokov, V.; Le Mouél, J.; Courtillot, V.. 2010. *A statistically significant signature of multi-decadal solar activity changes in atmospheric temperatures at three European stations*. doi: 10.1016/j.jastp.2010.02.016.
- xi. Kristjánsson, J. E.; Staple, A.; Kristiansen, J.; Kaas, E.. 2002. *A new look at possible connections between solar activity, clouds and climate*. doi: 10.1029/2002GL015646.
- xii. Lang, K. R. *The Cambridge Encyclopedia of the Sun*. Cambridge University Press. Primera Edición. 2001. pp 9-11, 178-187.
- xiii. Lean, J.; Beer, J.; Bradley, R. 1995. *Reconstruction of solar irradiance since 1610: Implications for climate change*. doi: 10.1029/95GL03093.
- xiv. Lockwood, M., and C. Fröhlich, 2007. *Recent oppositely directed trends in solar climate forcings and the global mean surface air temperature*, Proc. Roy. Soc. A464(2094), 1367-1385.

- xv. Lockwood, M. 2002. *An evaluation of the correlation between open solar flux and total solar irradiance*. *Astronomy and Astrophysics*, v.382, p.678-687. doi: 10.1051/0004-6361:20011666.
- xvi. Marsh; Svensmark, 2000. *Cosmic Rays, Clouds, and Climate*. *Space Science Reviews*, v. 94, Issue 1/2.
- xvii. McComas, D.J., R.W. Ebert, H.A. Elliott, B.E. Goldstein, J.T. Gosling, N.A. Schwadron, and R.M. Skoug, 2008. *Weaker solar wind from the polar coronal holes and the whole Sun*, *Geophys. Res. Lett.* 35, L18103, doi: 10.1029/2008GL034896.
- xviii. Mendoza, B., Mendoza, V.M, Garduño, R. and Adem. J. 2010. *Modelling the Northern Hemisphere Temperature for Solar Cycles 24 and 25*. *J. ATM.SOLAR-TERR. PHYS.*, 72, 1122-1128.
- xix. Mendoza, B. 2005. *Total solar irradiance and climate*, *Adv. In Space Res.*, 35, 882-890.
- xx. Mendoza, B.; Velasco, V.. 2009. *High-latitude methane sulphonic acid variability and solar activity: the role of the total solar irradiance*. doi: 10.1016/j.jastp.2008.09.034.
- xxi. Noyes, R. W. *The Sun, Our Star*. Harvard University Press. Cambridge, Massachusetts, and London, England, 1982.
- xxii. Otaola, J., Mendoza, B., Pérez, R. *El Sol y la Tierra. Una relación tormentosa*. Fondo de Cultura Económica. Primera Edición, 1993.
- xxiii. Palus, M.; Novotná, D. 2009. *Phase-coherent oscillatory modes in solar and geomagnetic activity and climate variability*. doi: 10.1016/j.jastp.2009.03.012.
- xxiv. Pallé-Bagó, E; Butler, C. J. 2000. *Cosmic rays and climate: The influence of cosmic rays on terrestrial clouds and global warming*.
- xxv. Pesnell, W.D., 2008. *Predictions of solar cycle 24*, *Solar Phys.* 252, 209-220.
- xxvi. Pierce, J. R., Adams, P. J. 2009. *Can cosmic rays affect cloud condensation nuclei by altering new particle formation rates?* L09820, doi: 10.1029/2009GL037946.
- xxvii. Pudovkin; Veretenenko, 1995. *Cloudiness decreases associated with Forbush decreases of galactic cosmic rays*.
- xxviii. Rigozo, N. R., D.J.R. Nordemann, E. Echer, M.P.S. Echer, H.E. Silva . 2010. *Prediction of solar minimum and maximum epochs on the basis of spectral characteristics for the next millennium*. *Planetary and Space Sci.* 58, 1971-1976.
- xxix. Shindell, D. T.; Faluvegi, G.; Miller, R. L.; Schmidt, G. A.; Hansen, J. E.; Sun, S. 2006. *Solar and anthropogenic forcing of tropical hydrology*. doi: 10.1029/2006GL027468.

- xxx. Schindell, 2009.
- xxxii. Smith, E.J., and A. Balogh, 2008. *Decrease in heliospheric magnetic flux in this solar minimum: recent Ulysses magnetic field observations*, Geophys. Res. Lett. 35, L22103, doi: 10.1029/2008GL035345.
- xxxiii. Souza Echer, M. P.; Echer, E.; Nordemann, D. J. R.; Rigozo, N. R. 2009. *Multi-resolution analysis of global surface air temperature and solar activity relationship*. doi: 10.1016/j.jastp.2008.09.032.
- xxxiv. Svensmark, H., 2003. *Cosmic Rays and the Evolution of Earths Climate During the Last 4.6 Billion Years*.
- xxxv. Svensmark 2006. *The Antarctic climate anomaly and galactic cosmic rays*. Reprint arXiv:physics/0612145.
- xxxvi. Svensmark,H y Friis-Christensen 1997. *Variation of cosmic ray flux and global cloud coverage-a missing link in solar-climate relationships*. Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics, v. 59, p. 1225-1232. doi: 10.1016/S1364-6826(97)00001-1
- xxxvii. Thomas, J.; Weiss, N. *Sunspots: Theory and Observation*. 1992. Mathematical Physical Series. Vol. 375. pp. 3-60.
- xxxviii. Tinsley y Deen, 1991. *Apparent tropospheric response to MeV-GeV particle flux variations: A connection via electrofreezing of supercooled water in high-level clouds?* doi: 10.1029/91JD02473.
- xxxix. Tinsley, 2000. *Influence of Solar Wind on the Global Electric Circuit, and Inferred Effects on Cloud Microphysics, Temperature, and Dynamics in the Troposphere*. Space Science Reviews, v. 94, Issue 1/2
- xl. Usoskin et al. 2004.
- xli. Velasco-Herrera, V.M. *A Prediction for the Next Solar Secular Minimum* . Solar Phys. Sometido, 2011.
- xlii. Voiculescu, M., Usoskin, I. G., Mursula, K. 2006. *Different response of clouds on solar input*. L21802, doi: 10.1029/2006GL027820.
- xliii. Usoskin, I. G.; Marsh, N.; Kovaltsov, G. A.; Mursula, K.; Gladysheva, O. G. 2004. *Latitudinal dependence of low cloud amount on cosmic ray induced ionization*. Geophysical Research Letters, Volume 31, Issue 16, CiteID L16109. doi: 10.1029/2004GL019507.

Fuentes de Internet

1. ALP-SAT. Scientific Mission Planning for a Micro Satellite. <<http://www.scss.tcd.ie/Stephen.Farrell/ipn/background/alp-sat/main.html>>.
2. Atmósfera terrestre. <http://es.wikipedia.org/wiki/Atm%C3%B3sfera_terrestre>.
3. Dibyendu N. <http://ciencia.nasa.gov/ciencias-especiales/02mar_spo-tlessun/>.
4. Lang, K. 2010. <http://ase.tufts.edu/cosmos/view_chapter.aspid=page=4>.
5. Nubes. <http://es.wikipedia.org/wiki/Nube#Formaci3n_de_las_nubes>.
6. Otaola, J.; Mendoza, B.; Pérez, R.. Sobre el Sol, la Tierra y aquello que los rodea. <http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen3/ciencia3/114/hm/sec_4.htm>.
7. Royal Swedish Academy of Sciences. Vía <<http://www.astroengine.com>>.
8. Strobel, N. "The Sun and Stellar structure". Enero 2011. <<http://www.astronomynotes.com/starsun/s2.htm>>.
9. Tipo espectral (estelar). <http://es.wikipedia.org/wiki/Tipo_espectral_%28estelar%29>.
10. <http://ase.tufts.edu/cosmos/view_picture.asp?id=114>.
11. <<http://airlineworld.wordpress.com/2008/07/09/cloud-types/>>.
12. <http://en.wikipedia.org/wiki/International_Satellite_Cloud_Climatology_Project>.
13. <ftp://isccp.giss.nasa.gov/pub/tables/region_names>.
14. <<http://isccp.giss.nasa.gov/pub/data/D2CLOUDTYPES/>>.
15. <<http://sidc.oma.be>>.
16. <<http://www.swpc.noaa.gov/SolarCycle/SC24/index.html>>.
17. <<http://www.skepticalscience.com/pics/ShapiroTSI1600.png>>.
18. <<http://ies.rayuela.mostoles.educa.madrid.org/Publicaciones/>>.
19. <http://www.astrogea.org/divulgacio/sol_spots.htm>.
20. <<http://tusamigos.blogia.com/2007/101801-los-rayos-cosmicos-y-el-clima-de-la-tierra.php>>