



**UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS**  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS  
EAP. DE FÍSICA

Pronóstico de la actividad solar para el 2005-2006

**MONOGRAFÍA**  
para optar el título profesional de Licenciado en Física

**AUTOR**  
Christian Ronceros Leyva

Lima - Perú  
2006

*Dedicado a mi hija Stepphanny,  
mis padres, hermanos, primos y a  
todos aquellos que viven el  
apasionante mundo de la Física.*

# CONTENIDO

## RESUMEN

<b>Capítulo 1: INTRODUCCIÓN</b> .....	1
---------------------------------------	---

<b>Capítulo 2: OBJETIVOS</b> .....	2
------------------------------------	---

## Capítulo 3: FUNDAMENTOS TEÓRICOS

### 3.1. Aspectos Matemáticos

3.1.1. Series de Tiempo.....	3
3.1.2. Método de McNish – Lincoln.....	3
3.1.3. Método Corrector – Predictor.....	5
3.1.4. Transformada de Fourier.....	5
3.1.5. Transformada Rápida de Fourier y Espectro de Potencia.....	7

### 3.2. Aspectos Físicos

3.2.1 Actividad Solar.....	7
3.2.2. Ciclo Solar.....	8
3.2.3. Manchas Solares.....	9
3.2.4. Origen y Evolución de la Manchas Solares.....	11
3.2.5. Clasificación de la Manchas Solares	
* Clasificación de Zurich.....	11
* Clasificación de McInstosh.....	13
3.2.6. Método de Observación.....	14
3.2.7. Número de Wolf.....	14
3.2.8. Campo Magnético de las Manchas Solares.....	15

<b>Capítulo 4: TRATAMIENTO DE DATOS.....</b>	<b>17</b>
<b>Capítulo 5: TABLA DE RESULTADOS.....</b>	<b>24</b>
<b>Capítulo 6: APLICACIONES.....</b>	<b>27</b>
<b>Capítulo 7: CONCLUSIONES.....</b>	<b>28</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>29</b>

## **AGRADECIMIENTOS**

Quiero agradecer a las personas e instituciones que me ayudaron durante este estudio, ya sea asesorando, revisando, comentando y corrigiendo el manuscrito, brindándome su apoyo, ayuda técnica, amistad y compañerismo.

Agradezco de manera especial a mi asesor y amigo Lic. Walter Guevara Day por la gran ayuda que me brindó en el análisis de los datos, elaboración y corrección de la presente monografía técnica.

A Hernán Rivero Gavilán por proporcionarme su algoritmo de FFT para calcular la frecuencia de las manchas solares.

A la Comisión Nacional de Investigación y Desarrollo Aeroespacial (CONIDA) por haberme permitido hacer uso de sus ambientes, equipos de cómputo, material bibliográfico, etc.

## RESUMEN

La predicción de manchas solares es muy importante para muchas aplicaciones, tal es el caso de la tecnología espacial, defensa y economía nacional, las comunicaciones de radio, potencia eléctrica, prospección geofísica, navegación, clima e hidrología, etc.

Se utilizó una hoja de cálculo para encontrar el pronóstico del número mensual medio suavizado de manchas solares utilizando los datos obtenidos desde 1749 en diversos observatorios solares. El pronóstico está basado en el método de McNish-Lincoln el cual es uno de los mejores métodos en la actualidad. Se presenta brevemente los fundamentos del método.

Para nuestros propósitos se tiene registros disponibles del número de manchas solares medidas mensualmente desde 1749. La longitud del ciclo varía entre 9 y 14 años, siendo 11 años en promedio aproximadamente; llamado este “ciclo solar”. La amplitud también varía, el máximo número de manchas solares varía entre 49 (en el ciclo 6) y 201 (en el ciclo 19). Estas irregularidades hacen que la predicción sea muy difícil.

Asimismo, se hace un pequeño estudio de la relación que tienen las radiofrecuencias con el número mensual medio de manchas solares.

## **CAPÍTULO 1:**

## **INTRODUCCIÓN**

Las primeras referencias de las manchas solares fueron hechas por astrónomos chinos en el año 28 a.c., quienes probablemente pudieron ver los grandes grupos de manchas solares. (Ref. [6])

Las primeras observaciones con telescopio fueron en 1610, por los astrónomos Johannes y David Fabricius, quienes publicaron una descripción en junio de 1611. En tiempos posteriores Galileo mostró manchas solares a los astrónomos en Roma, y probablemente Christoph Scheiner había observado las manchas por 2 o 3 meses.

La variación cíclica del número de manchas solares fue observada primero por Heinrich Schwabe entre 1826 y 1843, luego en 1848 Rudolf Wolf empezó con sus observaciones sistemáticas. El número de Wolf es una expresión de manchas individuales y manchas agrupadas, las cuales tienen éxito demostrado en relación a lo observado. Wolf también estudió los registros históricos en un esfuerzo para establecer una base de datos de las variaciones cíclicas del pasado. Él estableció una base de datos desde 1700, aunque la tecnología y las técnicas para las observaciones solares lo establecieron desde 1610.

El número de manchas solares es un índice característico del nivel relativo de actividad solar, de esta forma su acertada predicción resulta ser de mucha importancia, tanto teórica como práctica. Actualmente los pronósticos se basan sólo a los números mensuales medios suavizados.

El presente trabajo consistió en elaborar un método mejorado de predicción basado en el método de McNish – Lincoln, así como automatizar los cálculos por medio de un programa de hoja de cálculo de computador.

## **CAPÍTULO 2:**

## **OBJETIVOS**

La presente monografía tiene como objetivos:

- ✓ Hacer un pronóstico del número de manchas solares para el ciclo actual (ciclo 23) usando el método de Mc. Nish – Lincoln.
- ✓ Relacionar brevemente el número de manchas solares con las radiofrecuencias.
- ✓ Encontrar el periodo del número promedio de manchas solares mediante un programa hecho en IDL.

## CAPÍTULO 3: FUNDAMENTOS TEÓRICOS

### 3.1. ASPECTOS MATEMÁTICOS

#### 3.1.1. SERIES DE TIEMPO

Conjunto de observaciones sobre valores que toma una variable (cuantitativa) en diferentes momentos de tiempo. Se utiliza para conocer el comportamiento futuro de ciertos fenómenos, con la finalidad de prevenir, es decir se usan para predecir lo que ocurrirá con una variable en el futuro a partir del comportamiento de esa variable en el pasado.

Los datos se pueden comportar de diferentes formas a través del tiempo, puede que se presente una tendencia, un ciclo, no tener una forma definida ó aleatoria, variaciones estacionales (anual, mensual, etc.).

#### 3.1.2. EL MÉTODO DE MC.NISH - LINCOLN

El primer paso de este método es encontrar los valores suavizados para los datos observados. Los ciclos se van contabilizando desde julio de 1756 en una secuencia ascendente. Al ciclo que va entre 1756 y 1766 se le llama ciclo 1; al que va entre 1766 y 1775 ciclo 2, y así sucesivamente. Actualmente (2005) estamos en el ciclo 23. Para cada mes pasado desde el mínimo de un ciclo dado existir un valor de “R”; es decir, tendremos  $R_1, R_2, \dots, R_\varphi$ ; donde el subíndice representa el número de meses pasados desde el mínimo (como no todos los ciclos duran igual, el mes límite  $\varphi$  no es único, aunque en promedio vale  $\varphi=132$ , es decir, aproximadamente 11 años).

El comportamiento estadístico de los ciclos se verá mejor reflejado en una curva suavizada por los  $\hat{R}$ , la cual se construye asignando a cada mes  $m$  después del mínimo un valor suavizado  $\hat{R}_m$  definido por:

$$\hat{R}_m = \frac{\frac{R_{m-6} + R_{m+6}}{2} + \sum_{i=-5}^{+5} R_{m-i}}{12} \dots\dots\dots(1)$$

El siguiente paso de este método consiste en obtener una curva media de todos los ciclos anteriores al actual (ciclo 23). Para ello debemos refinar un poco nuestra notación.

Como para cada ciclo anterior habrá un valor  $\hat{R}_m$  correspondiente al mes  $m$  pasado desde el mínimo, será mejor representar estos números con la notación siguiente:  $\hat{R}_m^j$ , donde el superíndice  $j$  represente el ciclo al cual corresponde el  $\hat{R}_m$  en consideración. Entonces por lo general, para cada mes después del mínimo tendremos 22 registros:  $\hat{R}_m^1, \hat{R}_m^2, \dots, \hat{R}_m^{22}$ ; de tal modo que el promedio de los  $\hat{R}_m^j$  sobre los 22 periodos define los puntos  $\bar{R}_m$  de la curva media:

$$\bar{R}_m = \frac{1}{22} \sum_{j=1}^{22} \hat{R}_m^j \dots\dots\dots(2)$$

donde  $m = 1, 2, \dots$  como es usual.

A partir de la curva media y los registros que nos ayudaron a calcularla podemos realizar un análisis estadístico para predecir los siguientes valores de  $\hat{R}_m$ . El procedimiento a seguir (desarrollado por Mc. Nish y J.V.Lincoln) consiste en utilizar la curva media de los 22 ciclos como pauta general y “acomodar” el nuevo ciclo en ésta. El procedimiento toma la forma matemática siguiente:

$$R'_m = \bar{R}_m + \alpha_m (\hat{R}_{m-1} - \bar{R}_{m-1}) \dots\dots\dots(3)$$

donde  $\hat{R}'_m$  es el valor que queremos predecir,  $\bar{R}_m$  y  $\bar{R}_{m-1}$  los valores promedio de los 22 ciclos para los  $m$  y  $(m-1)$ -ésimo después del mínimo y  $\hat{R}_{m-1}$  el valor observado suavizado del número mensual medio de manchas solares del mes anterior al que queremos predecir. El factor  $\alpha_m$  es una constante de ajuste, para cada mes después del mínimo, que debemos calcular haciendo que la diferencia entre el valor observado del mes anterior y la media de los 22 ciclos se conserve para el siguiente mes.

Un análisis de regresión (mínimos cuadrados) nos muestra que:

$$\alpha_m = \frac{\sum_{j=1}^{22} (\hat{R}_m^j - \bar{R}_m)(\hat{R}_{m-1}^j - \bar{R}_{m-1})}{\sum_{j=1}^{22} (\hat{R}_{m-1}^j - \bar{R}_{m-1})^2} \dots\dots\dots (4)$$

para todos los meses después del mínimo, es decir para  $m = 2, 3, \dots$

### 3.1.3. METODO CORRECTOR – PREDICTOR

Este método consiste en calcular valores futuros cuando se conocen unos valores previos, mediante un método explícito (predictor) que conduce a valores futuros. Seguidamente se emplea un método implícito (corrector) el que se toma como valor inicial.

### 3.1.4. TRANSFORMADAS DE FOURIER

Una serie de Fourier puede usarse algunas veces para representar una función dentro de un intervalo. Si una función está definida sobre toda la recta real, puede representarse con una serie Fourier si es periódica. Si no es periódica, entonces no puede representarse con una serie Fourier para todo  $x$ . Aun en este caso es posible representar la función en términos de senos y cosenos, pero la serie de Fourier se convierte en una integral de Fourier. La motivación proviene de considerar formalmente las series de Fourier como funciones con período  $2T$  y hacer tender  $T$  al infinito.

Suponiendo que:

$$f(x) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n e^{in \frac{x}{T}} \dots\dots\dots (5)$$

donde

$$c_n = \frac{1}{2T} \int_{-T}^T e^{-in \frac{x}{T}} f(t) dt \dots\dots\dots (6)$$

tomando

$$\omega_n = \frac{n\pi}{T} \quad \text{y} \quad \Delta\omega = \omega_n - \omega_{n-1} = \frac{\pi}{T}$$

reemplazando la fórmula de la integral por los coeficientes de Fourier:

$$\frac{1}{2\pi} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left( e^{i\omega_n x} \int_{-T}^T e^{-i\omega_n t} f(t) dt \right) \Delta\omega$$

La sumatoria se asemeja a una suma de Riemann de una integral definida, y en el límite  $T \rightarrow \infty$  ( $\Delta\omega \rightarrow 0$ ) tendríamos:

$$\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \left( e^{i\omega x} \int_{-T}^T e^{-i\omega t} f(t) dt \right) d\omega \quad x \in \mathbb{R}$$

Una función  $F(\omega)$  se denomina la transformada de Fourier de  $f(x)$ , si:

$$F(\omega) := \mathcal{F}\{f(t)\} := \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i\omega t} f(t) dt \quad \dots\dots\dots (7)$$

entonces existe:

$$\mathcal{F}^{-1}\{F(\omega)\} := \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} e^{i\omega x} F(\omega) d\omega \quad \dots\dots\dots (8)$$

la cual se denomina la **transformada inversa de Fourier** de  $F(\omega)$ . La transformada de Fourier de  $f$  es por lo tanto una función  $\mathcal{F}\{f(t)\}$  de una nueva variable  $\omega$ . Esta función, evaluada en  $\omega$ , es  $F(\omega)$ .

### 3.1.5. TRANSFORMADA RÁPIDA DE FOURIER Y ESPECTRO DE POTENCIA

El método clásico se basa en el cálculo directo (Ref. [4]), dada la serie real:

$$x_j \quad j = 0, 1, 2, \dots, N-1$$

de la transformada de Fourier (N = Número de datos)

$$x_k = \sum_{j=0}^{N-1} x_j \cdot e^{-(2\pi jk)i/N} \quad k = 0, 1, \dots, N-1$$

Entonces el espectro de potencia será:

$$G_k = \frac{2\Delta t}{N} |x_k|^2 \quad k = 0, 1, \dots, \frac{N+1}{2}$$

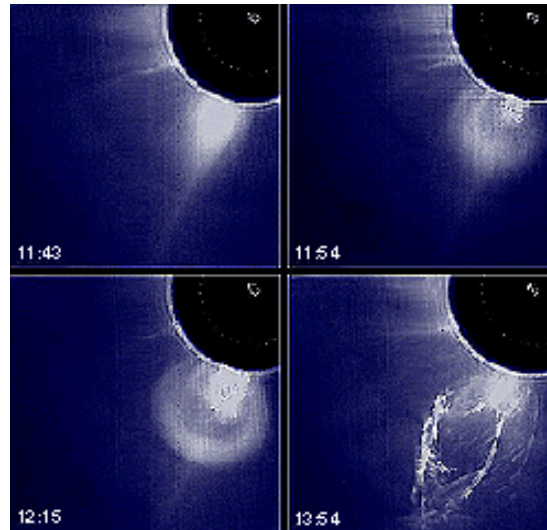
## 3.2. ASPECTOS FÍSICOS

### 3.2.1. ACTIVIDAD SOLAR

El Sol no es un lugar tranquilo, sino que desprende energía de repente. Uno de los eventos que más se ven son los destellos solares: aumentos de brillo repentinos, localizados y pasajeros, que ocurren en regiones activas cerca de las manchas solares. Casi siempre son más fáciles de ver en los rayos-x y h-alfa, pero pueden afectar el espectro electromagnético completo. Otro evento, la eyección de masa coronal, se propaga por el viento solar, donde puede encontrarse con la Tierra e influenciar la actividad geomagnética. (Ref. [6])

Se piensa que todas estas formas de actividad solar son controladas por la liberación de energía del campo magnético del Sol. Cómo se libera esta energía y qué relación hay entre los diferentes tipos de actividades solares, son unos de los muchos enigmas que enfrentan los físicos solares hoy en día. La cantidad de actividad solar no es constante, y está muy relacionada con el número típico de manchas solares que son visibles.

El número de manchas solares y el nivel de actividad solar varían con el período aproximado de 11 años conocido como el ciclo solar. La actividad solar se puede evaluar por el número de manchas y grupos de manchas que aparecen en la fotosfera solar.



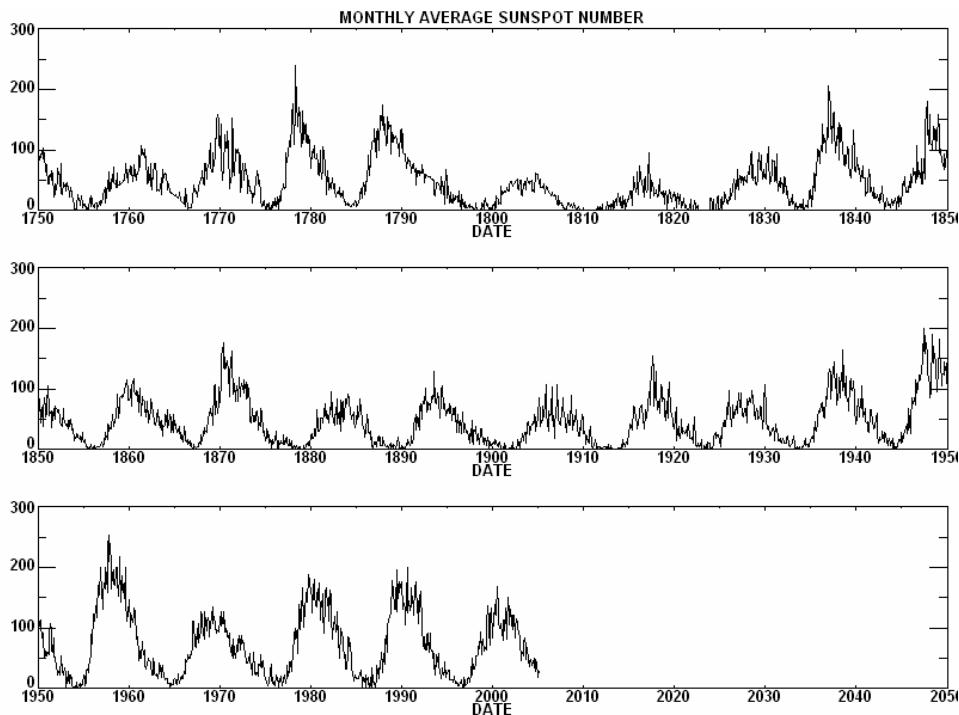
*Figura 3.1.- La actividad Solar*

### **3.2.2. CICLO SOLAR**

El número de manchas solares en el Sol no es constante. Además de los cambios causados por la rotación del Sol las manchas solares desaparecen de la vista y luego aparecen otra vez. Al pasar el tiempo nuevos grupos de manchas solares se forman y las antiguas decaen y desaparecen. (Ref. [6])

Cuando se les mira por un tiempo corto (algunas semanas o meses), estos cambios en el número de manchas solares puede parecer casual. Sin embargo, las observaciones de muchos años nos muestran una característica notable del Sol: el número de manchas solares cambia de manera periódica, usualmente llamado el ciclo de 11 años (en realidad, el período cambia, y se acerca más a 10.5 años en este siglo). El ciclo de 11 años de manchas solares está relacionado con un ciclo de 22 años donde se invierte el campo magnético del Sol. A pesar de que el ciclo se ha mantenido uniforme en este siglo, han existido grandes cambios en el pasado. Desde 1645 hasta 1715, un período conocido como el Mínimo de Maunder, el Sol presentaba muy pocas manchas.

A pesar de que el número de manchas solares es la característica que más se puede observar, todos los aspectos del Sol y de la actividad solar están influenciados por el ciclo solar. Ya que las manifestaciones de la actividad solar (como la eyección de masa coronal) son más frecuentes en los máximos solares y menos frecuentes en el mínimo solar, la actividad geomagnética también sigue el ciclo solar. Aún no se encuentra una explicación del porqué hay un ciclo solar.

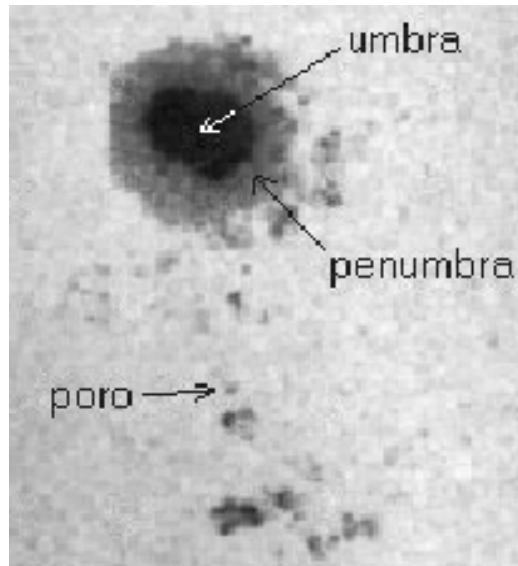


*Figura 3.2.- El Ciclo Solar desde 1750 hasta la actualidad*

### **3.2.3. MANCHAS SOLARES**

Son regiones de la Fotosfera solar que aparecen más oscuras con respecto a las zonas circundantes a causa de la temperatura más baja que las caracteriza. Las manchas solares son la mejor evidencia de la actividad en el Sol. Consisten en una región central oscura llamada umbra, y una zona más clara denominada penumbra. La penumbra tiene un diámetro promedio de 2,5 veces el de la umbra, y su área total constituye el 80% de la mancha. Si la mancha es de reducidas dimensiones no posee penumbra y en tal caso se denomina poro. La penumbra tiene una estructura de filamentos claros y oscuros con disposición radial desde la umbra.

Ambas se muestran más oscuras que la fotosfera porque su temperatura es menor a la de ella: unos 4000 K para la umbra, 5600 K para la penumbra y 6000 K para la fotosfera, aproximadamente.



**Figura 3.3.- Mancha Solar**

Las manchas solares se producen debido a los intensos campos magnéticos que impiden el movimiento regular del plasma que alcanza la superficie desde el interior, esto provoca un descenso local de la temperatura entre los 1000 K y 1500 K, respecto a la media 5800 K. Como estas zonas son más frías, por contraste con el resto de la fotosfera, se ven más oscuras.

Puesto que la cantidad de radiación emitida por un cuerpo caliente es proporcional a la cuarta potencia de su temperatura efectiva, la umbra emite sólo un 30% aproximadamente de la luz emitida por un área igual de la fotosfera, mientras que la penumbra tiene un brillo de un 70% aproximadamente del valor fotosférico.

La oscuridad de una mancha solar es simplemente un efecto de contraste; si se pudiera ver una mancha solar típica, con una umbra del tamaño aproximado de la Tierra, aislada y a la misma distancia que el Sol, brillará unas 50 veces más que la Luna llena.

### 3.2.4. ORIGEN Y EVOLUCIÓN DE LAS MANCHAS SOLARES

Morfológicamente una mancha nace por el oscurecimiento y desarrollo del diámetro de un poro. Solamente una pequeña fracción de los muchos poros observados cercanos a las regiones activas se convierte en manchas. Los poros son pequeños puntos oscuros en los que no puede diferenciarse entre umbra y penumbra. Pueden transformarse en una mancha o simplemente desaparecer al cabo de uno o varios días. Se presentan aislados o en grupos.

Las manchas, sin embargo, son de un mayor tamaño, en ellas se diferencia claramente la umbra y la penumbra. La umbra es oscura y ocupa la zona central de la mancha; la penumbra, en cambio, es mucho más difusa y su diámetro es al menos el doble que la umbra. Ni la umbra ni la penumbra tienen un aspecto perfectamente regular. Suelen ser redondeadas, ovaladas o alargadas. Las manchas salen por el este y se ponen por el oeste, aparecen entre la 5° y 40° de latitud (Norte o Sur). La duración de las manchas puede variar de unos días a unas semanas. No poseen movimiento propio y su aparente desplazamiento es debido a la rotación del sol.

Físicamente las manchas aparecen por una diferencia de presión en la zona convectiva del interior solar, los tubos magnéticos salen a la fotosfera a causa de esta diferencia de presión formándose bucles, en los pies de estos bucles están las manchas solares.

### 3.2.5. CLASIFICACIÓN DE LAS MANCHAS SOLARES

#### *\*Clasificación de Zurich*

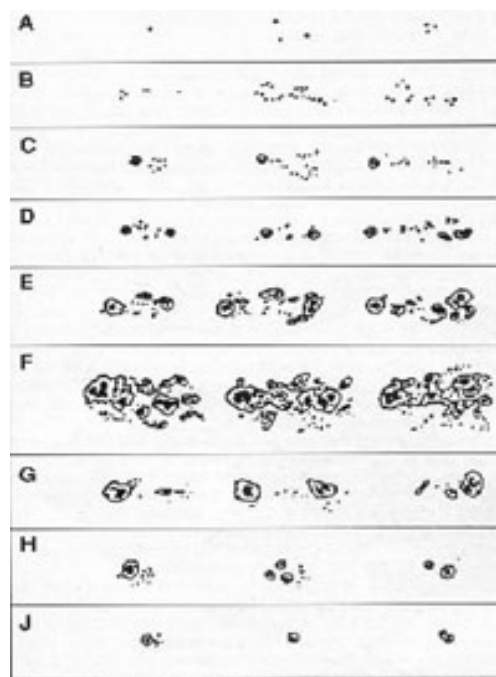
El más utilizado es la clasificación de manchas de Zurich, en las que se dividen las manchas solares en nueve clases, designadas con las letras **A, B, C, D, E, F, G, H, y J**. Esencialmente el sistema se basa en las etapas evolutivas por las que pasan los grupos de manchas, aunque no todas las manchas siguen la secuencia completa. (Ref. [2])

Las manchas, que empiezan como una pequeña agrupación (tipo A) o como un grupo bipolar (B), crecen rápidamente y en un período de 8 a 10 días alcanzan su tipología máxima (F) después de pasar por los tipos intermedios (C, D y E). Luego disminuyen más lentamente y el grupo pasa la mayor parte de su vida en la etapa final de la clasificación (G a J).

El tiempo de vida total de un grupo grande puede ser hasta de varias semanas, el promedio es de menos de dos semanas. El tiempo de vida está más o menos relacionado con el área del grupo de manchas solares; dicha área se expresa en millonésimas. De esta forma, una mancha pequeña de 10 millonésimas es probable que dure sólo un día, mientras que una mancha de 100 millonésimas de área se espera que sobrevivan unos 10 días.

<b>A</b>	Poros o grupo de poros (sin penumbra) concentrados en 2 ó 3 grados cuadrados.	
<b>B</b>	Grupo mayor de poros o poros en formación bipolar (sin penumbra), alineados generalmente en dirección Este-Oeste. En casos particulares, a gran aumento y con excelentes imágenes se puede apreciar que algunos de los poros muestran un rudimento de penumbra (unos pocos filamentos).	
<b>C</b>	Mancha pequeña o mediana (con penumbra) en formación bipolar con un grupo de poros.	
<b>D</b>	Dos o tres manchas con penumbra en formación bipolar y con poros intermedios.	Extensión inferior a 10°.
<b>E</b>	Grupo bipolar grande de estructura complicada, con penumbras complejas y generalmente con gran número de poros y manchas intermedias.	Longitud comprendida entre 10 y 15°.
<b>F</b>	Fase de máximo desarrollo de un grupo. Manchas muy extensas y complejas (generalmente con grandes sombras y penumbras), con numerosos poros.	Extensión superior a los 15°.
<b>G</b>	Grupo en decadencia. Bipolar grande con penumbras redondeadas, con eventuales poros intermedios. En fases más avanzadas de evolución, una gran mancha con poros en formación bipolar.	Dimensión superior a los 10°.
<b>H</b>	Mancha unipolar con penumbra, en ocasiones grupo compacto de manchas por subdivisión de la principal, con algunos poros en su proximidad.	Dimensiones entre 2°5' y 10°.
<b>J</b>	Mancha unipolar con penumbra redondeada, o pequeña mancha en proceso de disolución.	Dimensión inferior a 2°5'.

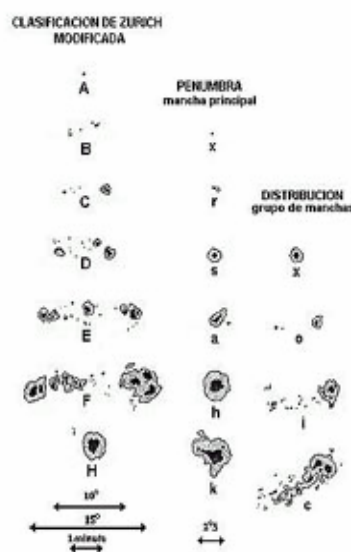
**Figura 3.4.- Clasificación de Zurich (características)**



**Figura 3.5.- Clasificación de Zurich (tipo de manchas)**

### **\*Clasificación de McInstosh**

La clasificación de McInstosh consiste en una descripción más detallada de las manchas solares y por tanto permite realizar nuevos estudios estadísticos y de correlación con otros fenómenos solares. Este sistema de clasificación de manchas consiste en un esquema de tres dígitos, el primero indicativo del tipo de grupo, el segundo del aspecto de la mancha principal y el tercero de la distribución de esta. La combinación de los tres parámetros de clasificación permite definir 60 tipos distintos de manchas solares frente a los 9 tipos de la clasificación de Zurich. (Ref. [2])



**Figura 3.6.- Clasificación de McInstosh**

La clasificación ha sido extendida para incluir dos parámetros adicionales con el fin de describir mucho mejor el tamaño, la complejidad y la estabilidad de la mancha principal.

Las categorías de las manchas mayores se basan en si la penumbra es rudimentaria o desarrollada, si la mancha es simétrica o asimétrica y a si su longitud excede o no de los  $25^\circ$  (una mancha simétrica tiene una duración mayor que una asimétrica). El tercer parámetro en la clasificación divide a los grupos en tres categorías de acuerdo con la aglomeración de manchas en el interior del grupo; los grupos abiertos poseen débiles gradientes entre las manchas de polaridad magnética opuesta, en tanto que los grupos compactos poseen grandes manchas con penumbras cerca de la línea de inversión de polaridad y en tal caso poseen gradientes magnéticos más altos.

Evidentemente, con la clasificación de McIntosh se obtiene una información mucho mayor, facilitando realizar estudios adicionales, al tiempo que permite efectuar una predicción sobre la actividad y posterior evolución de los grupos.

### **3.2.6. MÉTODO DE OBSERVACIÓN**

El método de observación típico consta de tres fases: marcaje, dibujo y clasificación-recuento. En la fase de marcación se orienta una hoja de dibujo de acuerdo con la inclinación del eje del Sol respecto al eje de la Tierra y se marcan la posición y contornos de las manchas visibles en una proyección sobre placa. En la fase de dibujo se completan los contornos con los detalles visibles en proyección a caja oscura, con más aumentos, y se buscan manchas y grupos no marcados en la primera fase. (Ref. [6])

En la fase de clasificación y recuento se identifican y clasifican los grupos de manchas, se hace recuento por regiones del número de manchas solares y se anotan los datos meteorológicos y de calidad de imagen.

Hasta hace unos años, los aficionados con pocos medios estaban limitados a la observación en luz visible, pero hoy gracias a Internet, no es necesario ni siquiera poseer un telescopio para estar al día sobre la evolución de las manchas solares y el número de Wolf.

Los físicos solares ponen a nuestra disposición toda la información que se obtiene del Sol diariamente, casi en tiempo real, tanto sin procesar como ya procesada, obtenida tanto en observatorios situados en tierra (p.ej. Big-Bear) o desde satélites espaciales (p.ej. el SOHO).

### **3.2.7. NÚMERO DE WOLF**

En 1848 el astrónomo suizo R. Wolf introdujo el Número Relativo de Manchas Solares  $R$  como una medida de la actividad de las manchas solares. El número de Wolf está definido por:

$$R = k(10g + s)$$

donde  $s$  es el número de manchas sobre el disco visible, sin importar el tamaño y  $g$  el número de grupos de manchas. (Ref. [2], Ref. [1])

El factor  $k$  es un coeficiente de reducción personal que depende del método de cuenta de manchas y de la subdivisión de ellas en grupos así como del tamaño y el aumento del telescopio empleado, además de las condiciones de observación. Un poro aislado cuenta como foco y como grupo, por tanto el menor número de actividad que podemos tener va desde 0, en caso de estar completamente limpia la superficie solar, a 11. Veamos algunos ejemplos gráficos:



*Figura 3.7.- Ejemplos del número de Wolf*

### 3.2.8. CAMPO MAGNÉTICO DE LAS MANCHAS SOLARES

Las observaciones espectrográficas nos han permitido detectar y medir los campos magnéticos. Al estudiar el espectro de las manchas solares, se comprueba que estas son gigantescos imanes, tanto aisladas como en grupo. El descubrimiento de los campos magnéticos, hechos por Hale fue la primera prueba de la importante función que los fenómenos electromagnéticos ejercen en la Física solar. (Ref. [2])

Si observamos al Sol, se puede decir que hay una capa gaseosa homogénea en equilibrio y debajo de ella se encuentra otra capa de material en constante agitación, sometida a una ebullición continua. Estas son algunas de las propiedades que presentan la fotosfera, que nos ha dado a comprender cuan complejos y misteriosos son los fenómenos solares, como los manifestados a través de las manchas solares y las fáculas.

Si hacemos que una mancha solar se proyecte sobre la rendija de un espectrógrafo se obtiene un espectro bastante diferente del normal. Hale, que descubrió este fenómeno, demostró que esta descomposición es idéntica a la que se observa en el laboratorio cuando se coloca el foco luminoso en un campo magnético intenso; por ejemplo, entre los polos de un potente electroimán. En la Tierra existe un campo magnético muy débil que orienta la aguja de una brújula. Pero en una mancha solar el campo es enorme, comparable al de un potente electroimán. Numerosos estudios del magnetismo de las manchas solares deducen que:

Todas las manchas tienen un campo magnético.

Las líneas de fuerza del campo, es decir, las direcciones que toma la aguja imanada, son perpendiculares a la superficie solar en el centro de la mancha, pero se ensanchan enseguida.

La intensidad del campo es máxima en el centro de la mancha, decreciendo de manera uniforme hasta el exterior de la penumbra.

A veces se observan campos más débiles en zonas sin manchas, pero estas regiones de manchas invisibles anuncian la aparición de manchas visibles.

La mayor parte de los grupos están formados por dos manchas; son los grupos bipolares. En ellos una de las manchas es un polo magnético norte y la otra un polo sur.

El campo magnético vertical en la umbra de una mancha es normalmente del orden de 2.000 a 4.000 G, unas 10.000 veces más intenso que el campo en la superficie de la Tierra, que varía entre unos 0,3 G en el ecuador y un máximo de unos 0,7 G en el polo.

El magnetismo solar es de hecho el factor de control de una amplia variedad de fenómenos solares. Los grupos de manchas solares se dividen según sus propiedades magnéticas en tres clases principales tal como sigue:

$\alpha$  : Grupos unipolares, manchas aisladas o grupos de manchas con la misma polaridad magnética.

$\beta$  : Grupos bipolares, en los que las manchas P y F son de polaridad magnética opuesta.

$\gamma$  : Grupos complejos, en los que están mezcladas muchas manchas de cada polaridad magnética.

## CAPÍTULO 4:

## TRATAMIENTO DE DATOS

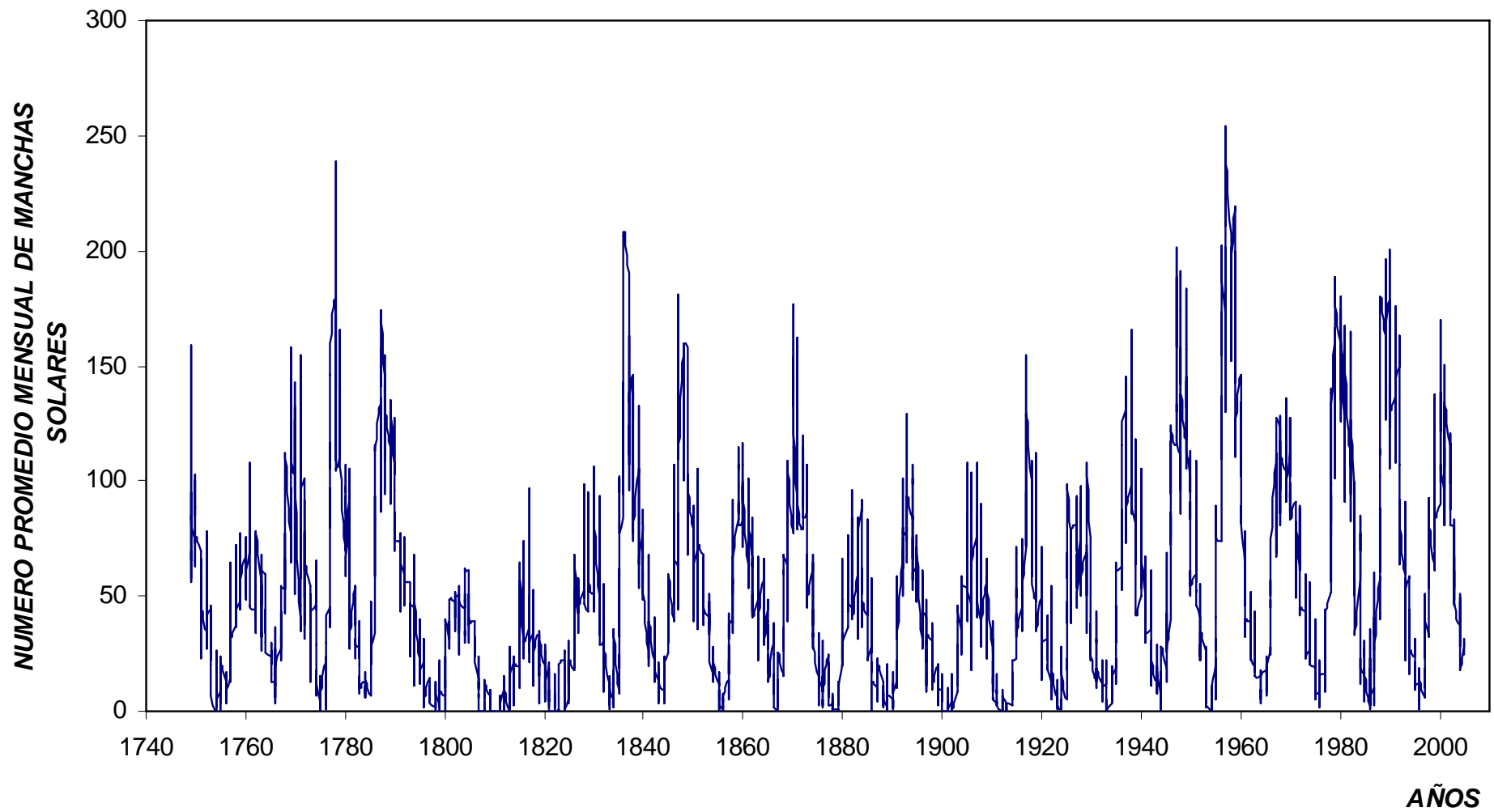
Los datos fueron tomados del *National Geophysical Data Center (NGDC)- NOAA satellite and Information Service*. (Ref. [6])

Se utilizó datos internacionales a causa que el conteo de manchas solares es variable con respecto a cada observador e instrumento de uso, es decir; si usted mira al Sol con binoculares de baja potencia (equipados con los filtros apropiados) puede que le sea posible ver dos o tres manchas grandes. Un observador mirando con un telescopio de alto poder podría llegar a ver entre 10 o 20. Con un observatorio potente ubicado en el espacio se podrían ver aún más, digamos entre 50 y 100.

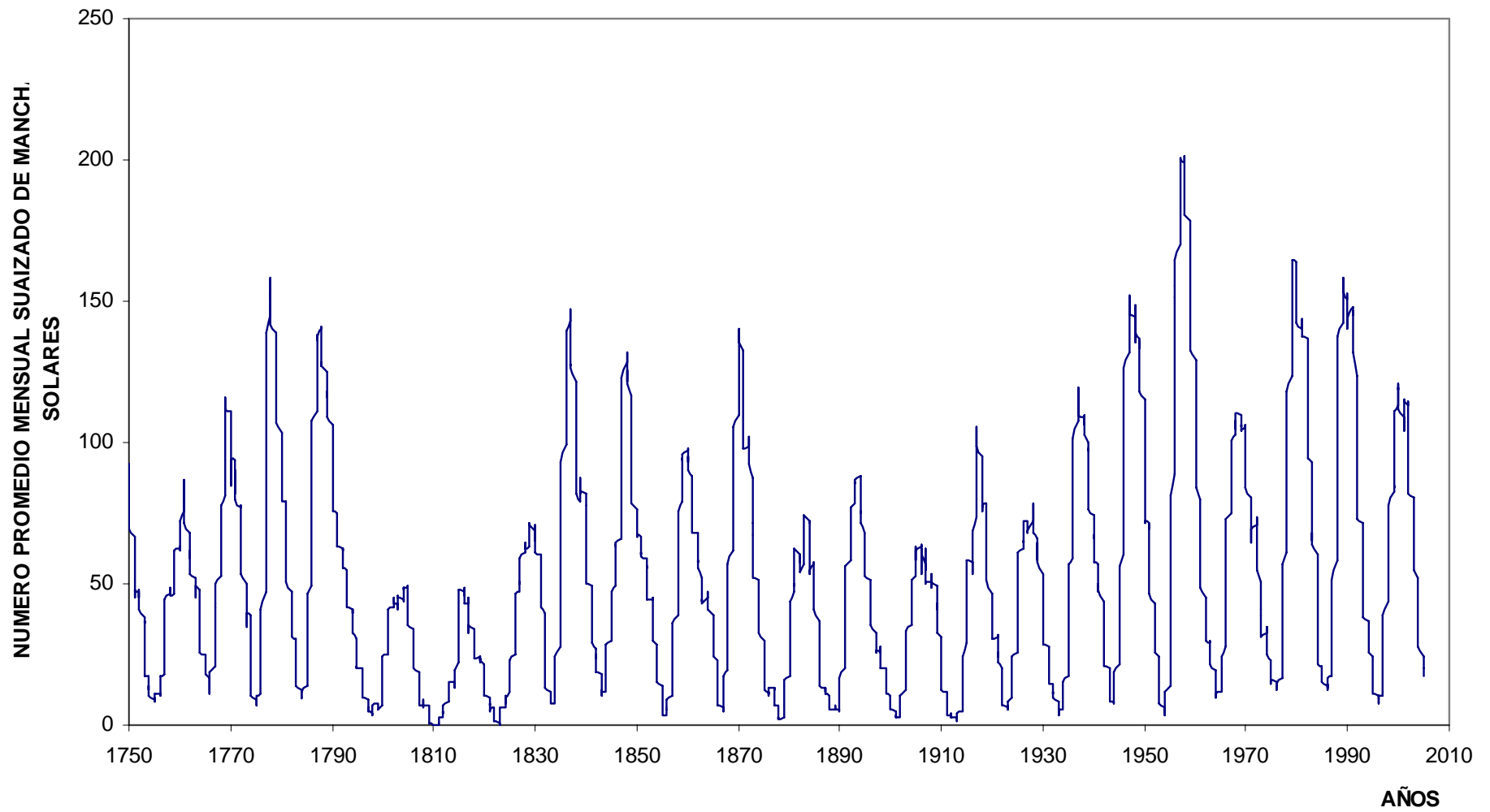
Existen dos cifras oficiales de manchas solares de uso común. El primero, el "Número Boulder de Manchas Solares" diario, es llevado por el Centro del Ambiente Espacial de NOAA (Space Environment Center) usando la fórmula diseñada por Rudolph Wolf , como se explicó anteriormente  $k$  es un factor variable de escala (generalmente  $k < 1$ ) que da cuenta de las condiciones de observación y el tipo de telescopio (binoculares, telescopios espaciales, etc.). Los científicos combinan la información recogida por muchos observatorios cada uno con su propio factor  $k$  para llegar al valor diario.

El número de Boulder (ofrecido diariamente en SpaceWeather.com) generalmente es cerca de un 25% más alto que el otro índice oficial, el "Número Internacional de Manchas Solares", publicado diariamente por el Centro Índice de Información de Manchas Solares ubicado en Bélgica. Ambos, los números Boulder e Internacional se calculan con la misma fórmula básica, pero incorporan información de observatorios diferentes.

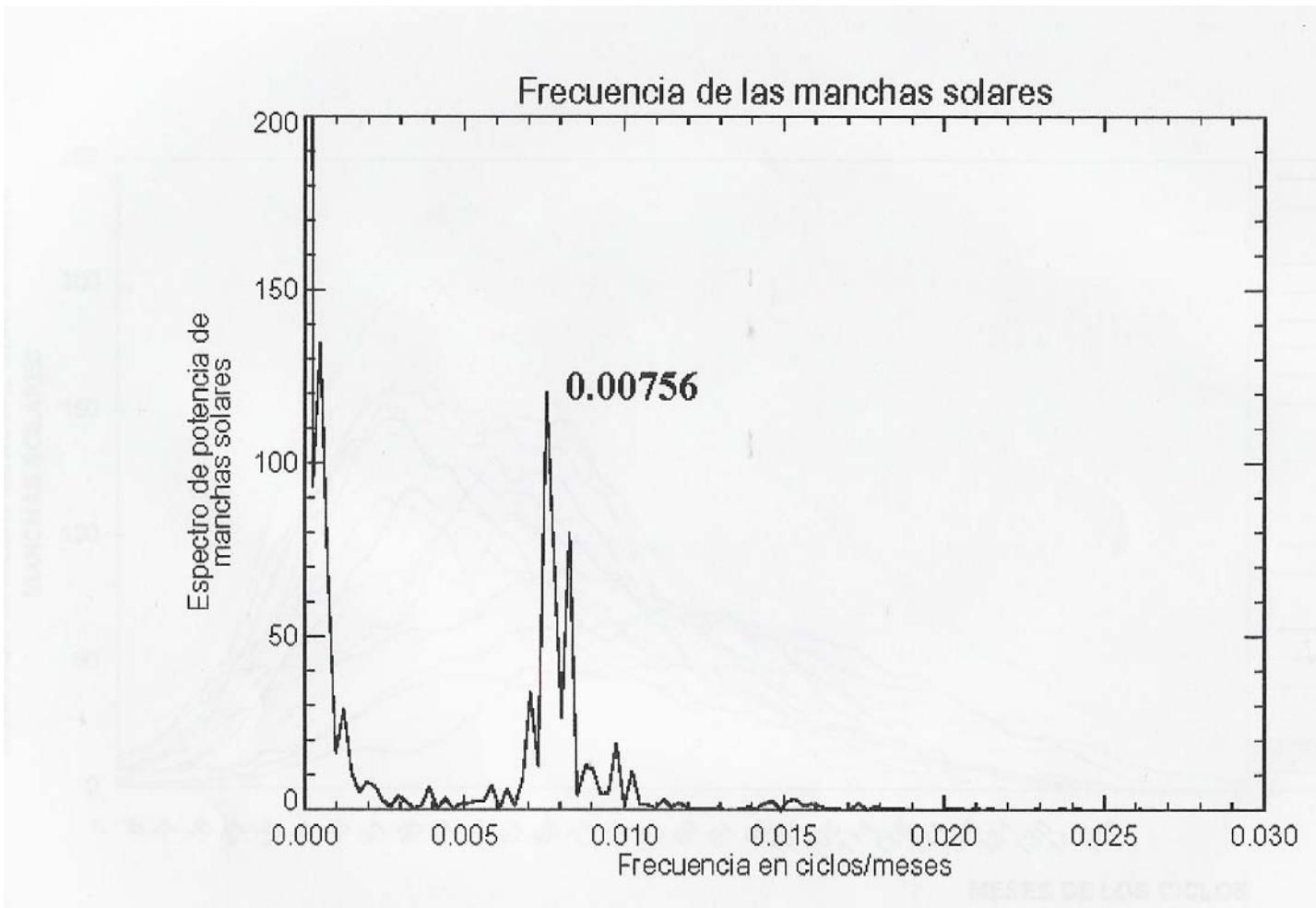
Nosotros tomaremos los datos mensuales y no los datos diarios, con la finalidad de minimizar los errores que podamos tener a causa del ruido y de esta forma obtener un mejor pronóstico para el número relativo mensual de manchas solares.



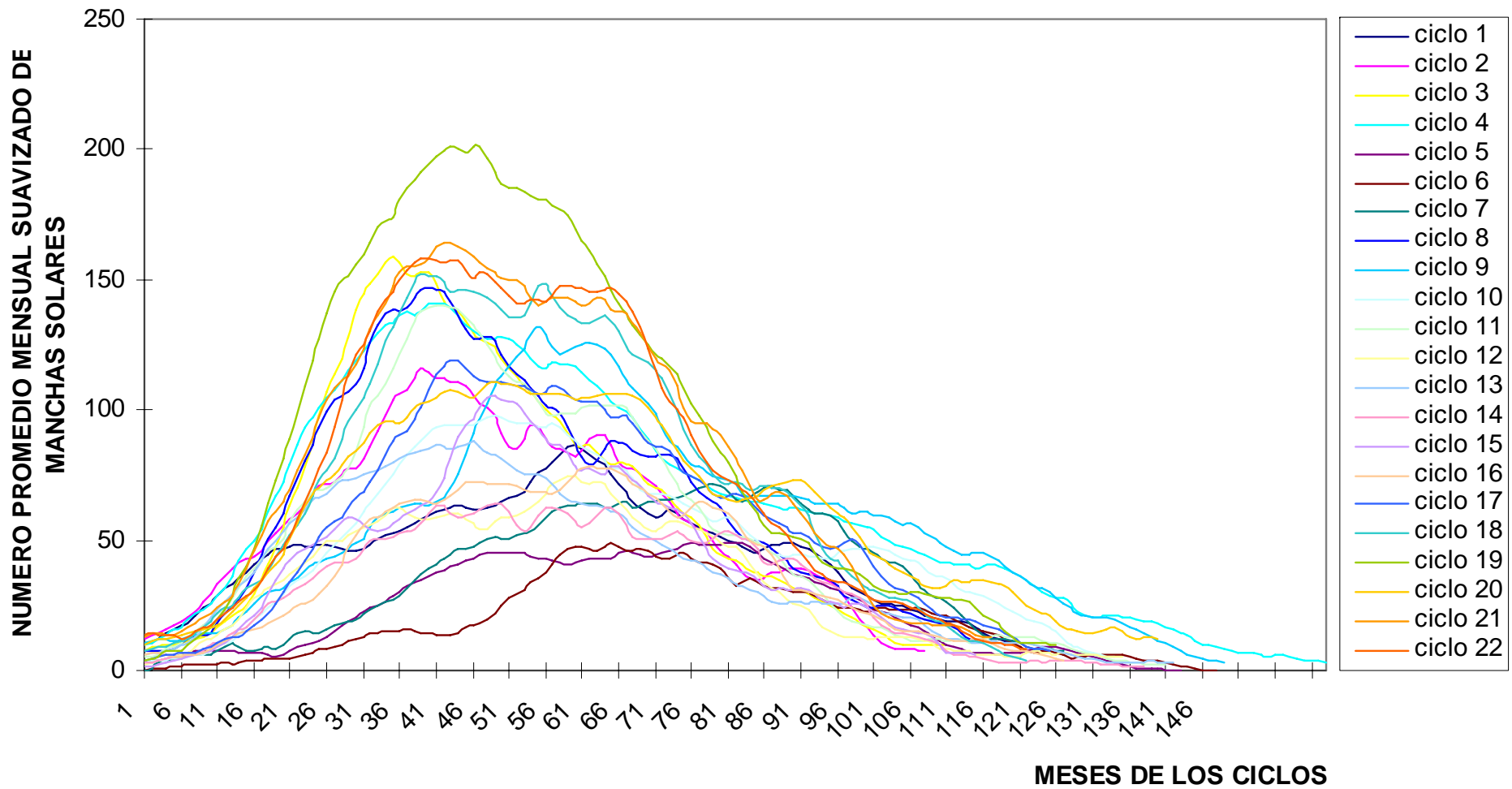
*Figura 4.1.- Número Promedio Mensual de Manchas Solares a través de los años.*



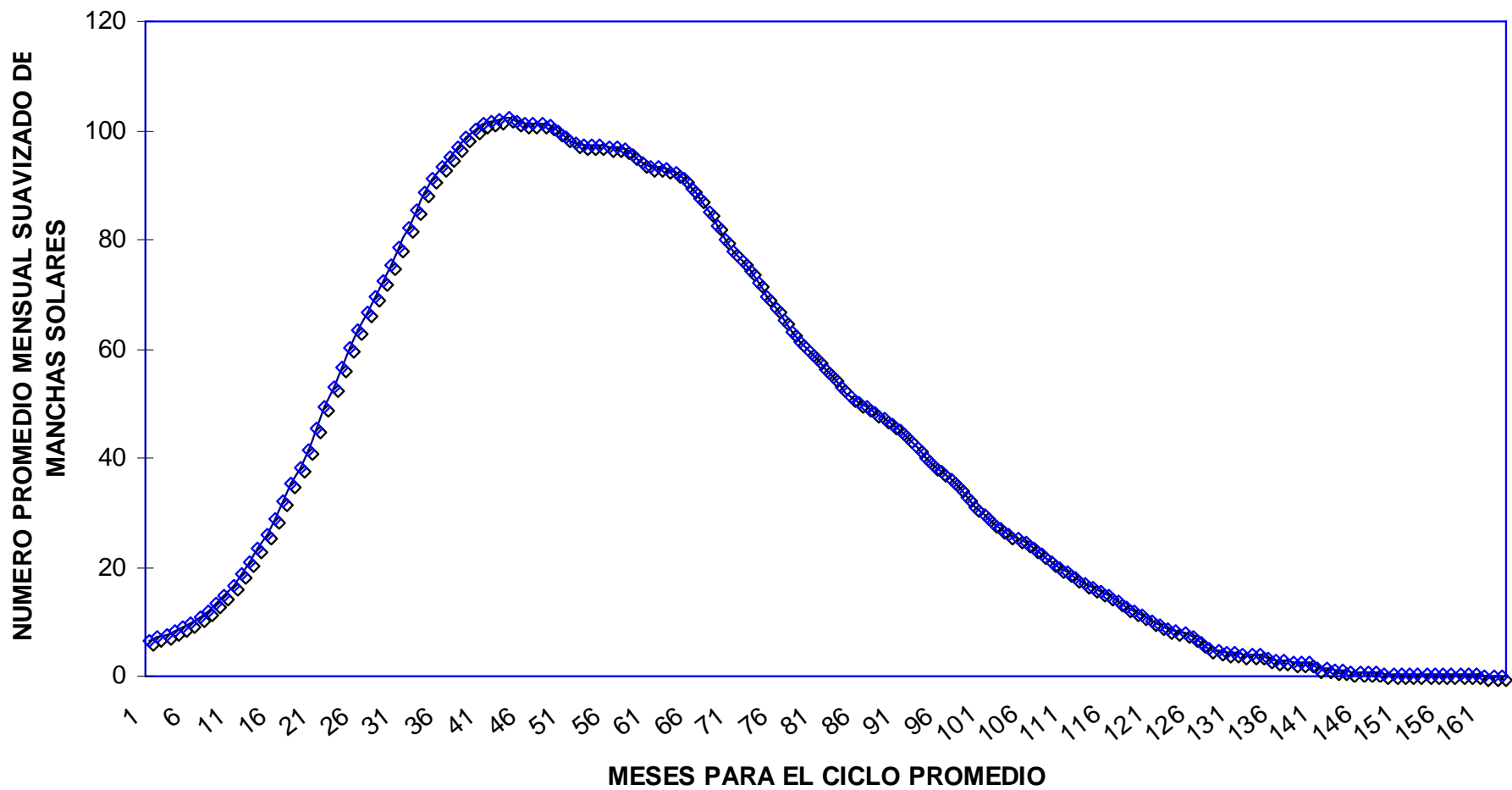
*Figura 4.2.- Número Promedio Mensual Suavizado de Manchas Solares a través de los años.*



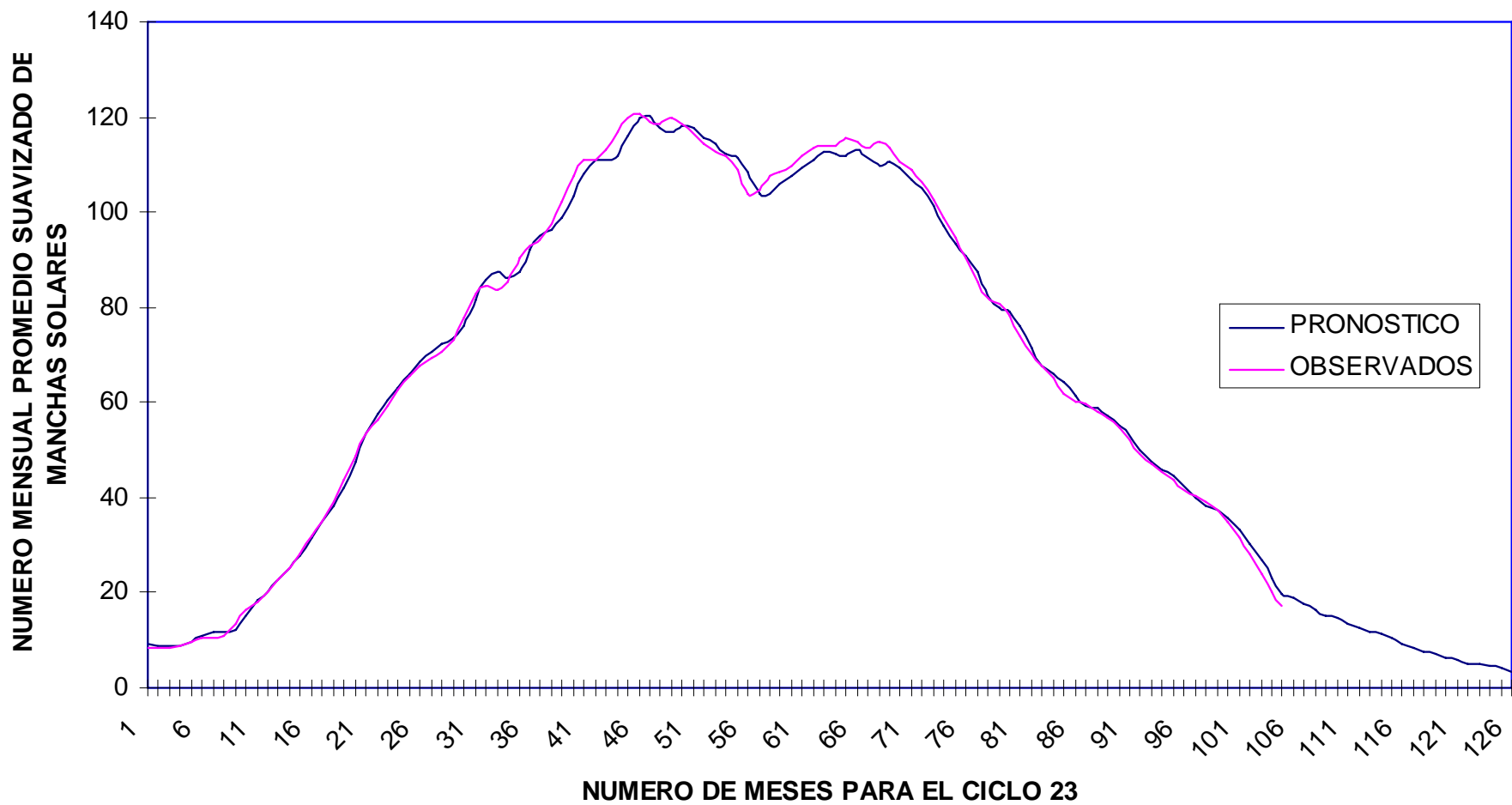
*Figura 4.3.- Espectro de potencia de las manchas solares y frecuencia en ciclo/meses.*



*Figura 4.4.- Número Promedio Mensual Suavizado de Manchas Solares para cada ciclo.*



*Figura 4.5.- Número Promedio Mensual Suavizado de Manchas Solares para el ciclo promedio.*



*Figura 4.6.- Número Promedio Mensual Suavizado de Manchas Solares observados y pronosticados para el ciclo actual (ciclo 23).*

## CAPÍTULO 5:

## TABLA DE RESULTADOS

FECHA	DATOS OBSERVADOS	DATOS SUAVIZADOS	PRONÓSTICOS(1)	SUAVIZADOS Y PRONÓSTICOS(2)	ERROR (%) RELATIVO(1)
jul-96	8,2	8,38	9,24	8,4	10,19
ago-96	14,4	8,28	8,97	8,3	8,43
sep-96	1,6	8,39	8,86	8,4	5,63
oct-96	0,9	8,81	8,99	8,8	2,01
nov-96	17,9	9,80	9,52	9,8	2,86
dic-96	13,3	10,38	10,89	10,4	4,89
ene-97	5,7	10,51	11,64	10,5	10,79
feb-97	7,6	11,02	11,75	11	6,69
mar-97	8,7	13,50	12,28	13,5	9,08
abr-97	15,5	16,49	15,15	16,5	8,11
may-97	18,5	18,28	18,60	18,3	1,77
jun-97	12,7	20,32	20,37	20,3	0,27
jul-97	10,4	22,58	22,63	22,6	0,25
ago-97	24,4	25,03	25,08	25	0,20
sep-97	51,3	28,31	27,77	28,3	1,93
oct-97	22,8	31,81	31,48	31,8	1,03
nov-97	39	34,97	35,09	35	0,34
dic-97	41,2	38,96	38,08	39	2,26
ene-98	31,9	43,72	42,18	43,7	3,52
feb-98	40,3	48,88	47,68	48,9	2,46
mar-98	54,8	53,44	53,20	53,4	0,46
abr-98	53,4	56,54	57,63	56,5	1,93
may-98	56,3	59,36	60,46	59,4	1,85
jun-98	70,7	62,51	63,13	62,5	0,98
jul-98	66,6	65,46	65,91	65,5	0,68
ago-98	92,2	67,80	68,67	67,8	1,28
sep-98	92,9	69,47	70,75	69,5	1,85
oct-98	55,5	70,48	72,32	70,5	2,61
nov-98	74	73,00	73,51	73	0,70
dic-98	81,9	77,88	76,17	77,9	2,18
ene-99	62	82,62	81,39	82,6	1,49
feb-99	66,3	84,64	85,97	84,6	1,58
mar-99	68,8	83,81	87,59	83,8	4,51
abr-99	63,7	85,47	86,25	85,5	0,92
may-99	106,4	90,48	87,58	90,5	3,21
jun-99	137,7	93,06	92,26	93,1	0,86
jul-99	113,5	94,35	95,01	94,3	0,70
ago-99	93,7	97,46	96,13	97,5	1,37
sep-99	71,5	102,30	98,74	102,3	3,48
oct-99	116,7	107,78	103,42	107,8	4,05
nov-99	133,2	110,99	108,13	111	2,57
dic-99	84,6	111,09	111,06	111,1	0,03
ene-00	90,1	112,92	111,16	113	1,55
feb-00	112,9	116,81	112,04	116,9	4,09
mar-00	138,5	119,93	115,93	120	3,34
abr-00	125,5	120,80	119,79	120,9	0,84
may-00	121,6	118,98	120,32	119	1,13
jun-00	124,9	118,71	117,89	118,8	0,69
jul-00	170,1	119,76	116,88	119,8	2,40
ago-00	130,5	118,65	118,17	118,7	0,40
sep-00	109,7	116,26	117,60	116,3	1,15
oct-00	99,4	114,48	115,58	114,5	0,97
nov-00	106,8	112,69	114,22	112,7	1,35
dic-00	104,4	112,03	112,33	112,1	0,27

ene-01	95,6	108,73	111,26	108,7	2,33
feb-01	80,6	104,05	108,34	104	4,13
mar-01	113,5	104,75	103,67	104,8	1,03
abr-01	107,7	107,55	103,65	107,5	3,62
may-01	96,6	108,62	105,93	108,6	2,47
jun-01	134	109,77	107,65	109,8	1,93
jul-01	81,8	111,70	109,30	111,7	2,15
ago-01	106,4	113,58	111,03	113,6	2,25
sep-01	150,7	114,07	112,71	114,1	1,20
oct-01	125,5	113,98	112,20	114	1,57
nov-01	106,5	115,53	111,69	115,5	3,32
dic-01	132,2	114,64	113,05	114,6	1,39
ene-02	114,1	113,48	111,59	113,5	1,66
feb-02	107,4	114,63	109,80	114,6	4,22
mar-02	98,4	113,34	110,46	113,3	2,54
abr-02	120,7	110,46	109,20	110,5	1,14
may-02	120,8	108,83	106,87	108,8	1,80
jun-02	88,3	106,23	104,93	106,2	1,22
jul-02	99,6	102,64	101,51	102,7	1,10
ago-02	116,4	98,65	97,23	98,7	1,44
sep-02	109,6	94,54	93,45	94,6	1,16
oct-02	97,5	90,45	91,02	90,5	0,63
nov-02	95,5	85,17	87,65	85,3	2,92
dic-02	80,6	81,95	82,30	82,1	0,42
ene-03	79,7	80,82	79,76	81	1,32
feb-03	46	78,32	78,92	78,6	0,76
mar-03	61,1	73,96	76,04	74,2	2,80
abr-03	60	70,09	71,43	70,4	1,91
may-03	54,6	67,58	67,54	67,9	0,07
jun-03	77,4	64,99	66,14	65,3	1,77
jul-03	83,3	61,80	64,43	62,1	4,25
ago-03	72,7	60,03	61,21	60,3	1,97
sep-03	48,7	59,52	59,32	59,8	0,33
oct-03	65,5	58,15	58,67	58,4	0,89
nov-03	67,3	56,75	56,98	57	0,42
dic-03	46,5	54,78	55,22	55	0,82
ene-04	37,3	52,01	52,87	52,1	1,66
feb-04	45,8	49,34	49,91	49,4	1,14
mar-04	49,1	47,14	47,48	47,2	0,72
abr-04	39,3	45,54	45,72	45,6	0,40
may-04	41,5	43,82	44,50	43,9	1,56
jun-04	43,2	41,63	42,44	41,7	1,94
jul-04	51,1	40,19	39,90	40,2	0,71
ago-04	40,9	39,25	38,39	39,3	2,19
sep-04	27,7	37,54	37,57	37,6	0,07
oct-04	48		35,97	35,9	
nov-04	43,5		34,41	34,6	
dic-04	17,9		33,23	33,1	
ene-05	31,3		32,20	31,1	
feb-05	29,1		31,28	29,1	
mar-05	24,8		30,48	28	
abr-05			29,39	26,5	
may-05			27,99	24,3	
jun-05			26,47	23,3	
jul-05			25,37	22,7	
ago-05			24,65	21,6	
sep-05			23,57	20,7	
oct-05			22,65	19,8	
nov-05			21,85	18,9	
dic-05			21,15	17,9	
ene-06			20,44	17,2	
feb-06			19,49	16,5	
mar-06			18,11	15,2	
abr-06			17,19	14,1	
may-06			16,26	13,4	
jun-06			14,72	12,5	
jul-06			13,92	11,6	
ago-06			12,82	11	
sep-06			12,25	10,7	
oct-06			11,67	10,5	
nov-06			10,61	10,2	
dic-06			9,33	9,7	

## DESCRIPCIÓN DE LAS FIGURAS Y LA TABLA

**Figura 4.1.-** Nos muestra el número mensual promedio de manchas solares a través de los años, iniciándose en el año 1749, se aprecia también a grandes rasgos una cierta periodicidad.

**Figura 4.2.-** Ilustra los datos en forma suavizada de la figura anterior, esto se obtuvo siguiendo el método de Mc.Nish – Lincoln; se observa mejor la periodicidad que muestran los datos. Observando que el máximo de manchas solares varía aproximadamente entre 50 a 200.

**Figura 4.3.-** Muestra una superposición de los 22 ciclos, cada ciclo con un diferente color. Observamos que el mínimo no es constante, es decir existe mucha dispersión entre sus valores. Esto quiere decir que no todos los ciclos son de 11 años o su equivalente 132 meses, sino que varían de acuerdo a cada ciclo.

**Figura 4.4.-** Nos muestra la curva promedio de los 22 ciclos, esto se obtuvo promediando en forma aritmética los 22 ciclos de la figura 3.

**Figura 4.5.-** Ilustra el resultado final de nuestros cálculos, nos muestra los datos observados suavizados (línea sólida lila) y los pronósticos para el ciclo 23. Observando una buena aproximación de este método.

**Tabla.-** Muestra la fecha, los datos observados, datos observados suavizados, el pronóstico desarrollado por Mc. Nish – Lincoln, los datos suavizados (color lila) y los pronósticos (color azul) desarrollado por científicos americanos y el error relativo porcentual del pronóstico de Mc. Nish – Lincoln para el ciclo actual (ciclo 23).

*“No se ha considerado todavía el trabajo eliminando algunos ciclos que no obedecen a una alta confiabilidad, por ejemplo los primeros 8 ciclos. Esto lo seguimos trabajando para mejorar los resultados.”*

## CAPÍTULO 6:

## APLICACIONES

### PREDICCIÓN FRECUENCIAS CRÍTICAS DE HF MÁXIMO

Para muchos problemas prácticos de radiocomunicaciones es necesario conocer cuando ocurrirá un máximo de actividad solar. Investigaciones hechas por muchos autores afirman que existe una relación entre las frecuencias críticas de la ionosfera para cada región y el número de manchas solares.

Según S.K. Mitra (Ref. [3]) tenemos:

**\*Para la región E:**

✚ Para el ascenso de actividad de manchas solares:

$$f_E^0 = \sqrt[4]{(2S + 60) \cos \chi}$$

✚ Para la descenso de actividad de manchas solares:

$$f_E^0 = \sqrt[4]{(1.6S + 60) \cos \chi}$$

**\*Para la región F<sub>1</sub>:**

✚ Para el ascenso de actividad de manchas solares:

$$f_{F_1}^0 = \sqrt[4]{(6.4S + 275) \cos \chi}$$

✚ Para la descenso de actividad de manchas solares:

$$f_{F_1}^0 = \sqrt[4]{(9.4S + 80) \cos \chi}$$

donde “S” es el número de manchas solares observados en el disco solar y “ $\chi$ ” es el ángulo cenital del Sol.

Por ejemplo si  $\chi$  vale 50°, el número de manchas solares para junio del 2005 vale 16.32 (pronóstico) entonces la frecuencia crítica para la región  $F_1 = 3.5$  MHz.

## CAPÍTULO 7:

## CONCLUSIONES

- De los cálculos notamos que no podríamos deducir exactamente el número mínimo de manchas solares, a causa que hay demasiada dispersión entre los mínimos de los 22 ciclos anteriores, observando que este mínimo se encontraría aproximadamente entre el año los años 2006 y 2007.
- El método proporciona buenos resultados dentro de los márgenes de error aceptados actualmente. El error promedio calculado es de 2.6%.
- Se podría reducir el margen de error si quitaríamos los ciclos que no son de alta confiabilidad y de esta forma obtener un mejor pronóstico.
- Vemos la importancia de la actividad solar en la tierra. Uno de las más importantes aplicaciones se da entre la relación del número de manchas solares y las frecuencias críticas en las regiones de la ionosfera.
- Gracias a este método de predicción se podría saber cuando ocurrirá un máximo de actividad solar y así tomar medidas contra los efectos que se dará sobre la tierra.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1].- Walter Guevara Day, Actividad Solar y Radiofrecuencias, 1998.
- [2].- R.j.Brag, R.E. Loughhead, Sunspots, 1965.
- [3].- S.K.Mitra, The Upper Atmosphere, 1948.
- [4].- Joel Rojas Acuña, Tesis de Licenciatura “Análisis Espectral de las medias mensuales del campo Geomagnético en Huancayo (desde 1922 hasta 1990), 1992.
- [5].- Cesar Torres Díaz, Monografía “La fotosfera, Observaciones de actividad fotosféricas y Magnetismo Solar” , 2001.
- [6].- On – Line.