

FACULTAD DE CIENCIAS- SECCIÓN DE FÍSICA

Universidad de la Laguna

Departamento de Astrofísica

# **Análisis del ciclo de actividad solar y su influencia en la Tierra**

Trabajo de Fin de Grado redactado por Álvaro Torregrosa Alberola

Profesor supervisor: Teodoro Roca Cortés

**Febrero de 2017**

## ÍNDICE DE CONTENIDO

<b>Abstract</b> .....	3
<b>Resumen</b> .....	4
<b>Capítulo 1. Introducción.</b> .....	5
Summary.....	5
1.1. Introducción. ....	6
1.2. Actividad magnética solar y terrestre. ....	6
1.3. Objetivos.....	8
<b>Capítulo 2. Metodología de análisis.</b> .....	9
Summary.....	9
2.1. Transformada de Fourier. ....	10
2.1.1. Ejemplos realizados con señales simuladas. ....	12
2.2. Función de correlación.....	14
2.2.1. Ejemplo de correlación con señales conocidas. ....	15
<b>Capítulo 3. Análisis de datos solares.</b> .....	16
Summary.....	16
3.1. El Sol.....	17
3.2. El ciclo de actividad solar. ....	17
<b>Capítulo 4. Análisis de datos terrestres</b> .....	23
Summary.....	23
4.1. Índices geomagnéticos: Aa, Aa y K.....	24
4.2. Temperatura media terrestre. ....	28
<b>Capítulo 5. Relación entre los datos solares y los terrestres.</b> .....	33
Summary.....	33
5.1. Correlación entre los índices geomagnéticos y las manchas solares. ....	34
5.2. Correlación entre las anomalías en la temperatura media terrestre y las manchas solares . ....	35
<b>Capítulo 6. Discusión de los resultados y propuestas de mejora futuras.</b> .....	36
Summary.....	36
6.1. Discusión y propuestas. ....	37
<b>Capítulo 7. Conclusiones.</b> .....	39
Summary.....	39
7.1. Conclusiones.....	40
<b>Bibliografía</b> .....	41

## ABSTRACT

In this work we will deal about the solar activity cycle and its influence on Earth. In the framework of the natural world it is part of the knowledge of terrestrial geomagnetic field and the problem of climate change.

The specific objective to be addressed is whether there is any relationship between the changes produced by the solar activity cycle that manifest on Earth either through the geomagnetic field or on global climate.

The methodology of analysis of observational data used is based on the Fourier transform (specifically the Fast Fourier Transform) and the correlation. With the transformation can be performed the analysis of the power spectrum of solar data (number of sunspots) and terrestrial data (geomagnetic indices Aa, Ap and K and terrestrial average temperature). Secondly, through the correlation of solar and terrestrial parameters you can see what event happens first and deduce whether there is a causal relationship.

The results are the production of the highest in the appearance of sunspots in cycles of approximately 11 years. Also it is shown that the main frequency or period of the solar cycle variations is not constant in period or amplitude. The geomagnetic indices show similar variations to sunspots during periods of approximately 11 years cycles. It has been found as the geomagnetic index Aa varies 1.2 years before the variation of sunspots happens opening therefore the possibility that it could be a predictor of the solar cycle. However, it has not been a cause-effect relationship between the number of sunspots and the earth's average global temperature.

These studies could continue by analyzing more solar data such as solar irradiance data and improve the statistical interpretation of the correlations for example through the Pearson correlation coefficient showing the correlation between two variables, as well as using the non-zero probability integral.

## RESUMEN

En el presente trabajo vamos a tratar acerca del ciclo de actividad solar y su influencia en la Tierra. Dentro del mundo natural se enmarca en el conocimiento del campo geomagnético terrestre y del problema del cambio climático.

El objetivo concreto que se va a abordar es ver si existe algún tipo de relación entre los cambios producidos por el ciclo de actividad solar que se manifiesten en la Tierra bien a través del campo geomagnético o bien en el clima global, en concreto, en la temperatura media de la Tierra.

La metodología de análisis utilizada se basa en el empleo de la transformada de Fourier (concretamente de la transformada rápida de Fourier, *Fast Fourier Transform*) y de la función de correlación. Con la FFT se puede realizar el análisis del espectro de potencia de los datos solares (número de manchas solares) y de los datos terrestres (índices geomagnéticos Aa, Ap y K y temperatura media terrestre). Además, por medio de la correlación de los parámetros solares y terrestres se puede ver qué suceso ocurre con anterioridad y deducir si existe una relación causa efecto.

Los resultados obtenidos son la determinación de los máximos en la aparición de las manchas solares en ciclos de aproximadamente 11 años. También se ha podido constatar cómo la frecuencia o periodo del ciclo solar no es constante ni en periodo ni en amplitud. Asimismo, los índices geomagnéticos muestran ciclos parecidos al de las manchas solares en periodos de aproximadamente 11 años. Se ha encontrado como el índice geomagnético Aa varía 1.2 años antes de la variación de las manchas solares y por lo tanto debería ser posible utilizarlo como predictor del ciclo de actividad solar. No se ha encontrado relación causa-efecto entre el número de manchas solares y la temperatura global media terrestre.

Se podrían continuar estos estudios por medio del análisis de más datos solares como la irradiancia solar y la mejora de la interpretación estadística de las correlaciones por ejemplo a través del coeficiente de correlación de Pearson que muestra el grado de correlación entre dos variables, así como usando la integral de probabilidad no nula.

# CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.

## SUMMARY.

The solar activity cycle includes the set of all periodic changes taking place in the sun over nearly a decade. They are basically due to fluctuations in the amount of energy released in the sun. Such variations and how they can influence on Earth have had a growing interest both ecological level (future of the human species) as well as in the scientific field (due to the horizons of knowledge that we can cross through this knowledge).

How the link between the phenomena occurring in the Sun and the Earth is expressed? At first look, it seems that the changes on both the Earth's magnetic field and global Earth temperature may have their origin in the sun. We know that fluctuations in the energy emitted by the Sun have visible effects like sunspots, which have a significant magnetic activity.

Also among the activity events we have solar flares, significant emission of X-rays, radio waves and the ejection of very energetic particles that can reach Earth. Consequently, disturbances produced in radio communications and power lines are produced that could affect our daily lives. The study of geomagnetic indices, which provide us with information on how many solar particles affect the Earth's magnetic field becomes evident and necessary.

We found that solar radiation reaching our planet has a significant influence because it causes phenomena such as diurnal variation and magnetic storms. We understand the diurnal variation as the variation in the Earth's magnetic field of the order of 10 to 100 nT . The reason is that during day time solar radiation ionizes the ionosphere. The result is the emergence of electric currents that arise when moving magnetic fields disturb the earth's mean magnetic field.

Magnetic storms are within the context of the sharp variability in particle radiation from the sun. In turn they are behind the changes in the magnetosphere (outermost layer of the atmosphere) that change the Earth's magnetic field globally. They may last for a few days and its effects are considerable in the magnetic field strength.

The solar wind is presented as a "transmission belt" of possible solar disturbances to the interplanetary medium and eventually reach Earth. The reason for this is that the named particles can escape the gravitational pull of the sun because of their high kinetic energy and the high temperature of the corona.

## **1.1. INTRODUCCIÓN.**

El impulsor del clima en la Tierra es nuestro “astro rey”, el Sol. Debido a su emisión energética y a su campo magnético influencia claramente a nuestro planeta madre. La clave está en poder analizar correctamente de qué forma nos afecta más, y a través de qué parámetros, para poder extraer alguna conclusión certera y evitar divagaciones.

La labor de predicción del ciclo de actividad magnética solar, conocido desde el siglo XVII hasta la actualidad es un procedimiento complejo que debe ser sometido a un estudio riguroso. Aún con todo esto, nos hallamos ante un integrante clave en las predicciones climáticas terrestres.

El más antiguo de los índices de actividad solar conocido es el número de manchas solares presentes en su superficie pero hay otros indicadores de la actividad solar como la irradiancia solar total, el número de las llamaradas y eyecciones de masa coronal. También hay indicadores en la Tierra como los radioisótopos en los anillos de los árboles y los núcleos de hielo en glaciaciones que varían en concordancia con las manchas solares. Dichos parámetros de actividad solar han sido estudiados en trabajos de investigadores como David H. Hathaway del NASA Ames Research Center [1] entre otros. En este trabajo se van a estudiar algunos de los principales parámetros solares. Por otro lado también vamos a estudiar algunos parámetros terrestres globales como puedan ser los índices planetarios geomagnéticos Aa, Ap y K que dan cuenta de la variabilidad del campo magnético terrestre y la temperatura media del planeta. Además, estudiamos las relaciones entre ellos con el propósito de intentar encontrar si hay alguna relación causal directa.

Comenzaremos haciendo una descripción de la metodología de análisis a utilizar: la Transformada de Fourier y la función de correlación así como unos ejemplos de las mismas realizados con señales conocidas. Luego vamos a realizar un análisis de los datos solares donde hablamos sobre el Sol y su ciclo de actividad. Después analizamos datos terrestres como son los índices geomagnéticos Aa, Ap y K (que dan cuenta de la variabilidad del campo magnético terrestre) y la anomalía en la temperatura media terrestre. Acto seguido efectuamos la correlación entre los parámetros solares y terrestres tratados en el presente documento: índices geomagnéticos-manchas solares y anomalía en la temperatura media global-manchas solares. A continuación discutimos los resultados: vamos a ver la respuesta del campo geomagnético cuando se producen cambios en el número de manchas solares y cuán significativa es la influencia del ciclo de actividad solar frente a la actividad humana. A su vez, realizamos propuestas de mejora para futuros proyectos. Acabamos con unas conclusiones clave de los resultados más importantes que se pueden extraer del presente documento.

## **1.2. ACTIVIDAD MAGNÉTICA SOLAR Y TERRESTRE.**

Para poder entrar en una descripción de qué entendemos como actividad magnética, bien sea en nuestro Sol, bien sea en nuestro planeta natal, debemos empezar definiendo el concepto más básico. En este caso partimos de la idealización del concepto de calor que lo podemos entender como la forma de energía que se transfiere entre dos sistemas (o un sistema y sus alrededores) obligado por una diferencia de temperatura.

Básicamente tenemos energía en circulación que se reconoce en el momento en que cruza la frontera de un sistema termodinámico. En la frontera del sistema de interés o bien en sus alrededores si la transferencia es de dentro hacia afuera, el calor transferido se vuelve parte de la energía interna del sistema o de los alrededores, dependiendo del caso particular. En consecuencia partiendo del concepto de transmisión, éste solamente ocurre en el momento que existe una diferencia de temperatura y en el sentido de mayor a menor. Asimismo, podremos inferir en que no habrá transferencia de calor entre dos sistemas que se encuentran a la misma temperatura (o sea, equilibrio térmico).

En segundo lugar, podemos hablar de que la convección es una de las tres formas de transferencia de calor. Ésta se origina a través de un fluido (entiéndase que puede ser bien líquido o bien gas) en movimiento que traslada el calor entre zonas con diferentes temperaturas. Un concepto muy sencillo, que por ejemplo podemos comprobar en una cocina a través del calentamiento de agua en una cacerola. El agua en contacto con la base de la cacerola asciende, mientras que el agua de la superficie, desciende, ocupando el lugar que dejó la caliente.

En tercer lugar, introducimos el concepto de plasma como un estado de la materia fluido similar al estado gaseoso pero en el que una determinada proporción de sus partículas están cargadas eléctricamente y no poseen equilibrio electromagnético. A raíz de ello, conducen bien la electricidad y sus partículas responden de manera eficaz a las interacciones electromagnéticas.

Una vez que hemos definido los conceptos indispensables, podemos pasar a entender el campo magnético estelar como aquel campo magnético producido por el movimiento del plasma conductor dentro de una estrella en la secuencia principal (región donde están la mayoría de las estrellas en un diagrama Hertzsprung-Russell). Este movimiento se crea por convección. El campo magnético ejerce una fuerza sobre el plasma, aumentando efectivamente la presión sin una ganancia comparable en la densidad. De ahí que la región magnetizada se eleve parcialmente con respecto al resto del plasma, hasta que alcanza la fotosfera (superficie luminosa que limita al astro) de la estrella. Esto crea las manchas solares y los bucles en la corona solar.

Para entender el origen del campo magnético terrestre, tenemos por ejemplo teorías como la teoría de la dinamo. Ésta nos dice que el campo magnético terrestre es debido esencialmente al desplazamiento de los iones de los metales fundidos que tenemos en la Tierra (concretamente en una región conocida como Núcleo Externo que ocupa entre los 2900 y los 5100 Km). Nuestro planeta, se comporta entonces como un imán gigantesco (dipolo magnético) con su polo norte y su polo sur magnético. El campo magnético cambia en dirección e intensidad de manera muy paulatina a lo largo del tiempo. Recordemos que estamos ante un campo vectorial y como tal tiene su propio módulo, dirección y sentido.

Encontramos que la radiación solar que llega al planeta Tierra es de una influencia significativa ya que provoca fenómenos como la variación diurna y las tormentas magnéticas. Entendemos la variación diurna como la variación del campo magnético terrestre en el orden de 10 a 100 nT. La causa es que durante el día la radiación solar ioniza la ionosfera. El resultado es la aparición de corrientes eléctricas que al desplazarse hacen surgir campos magnéticos que perturban al campo magnético terrestre.

Por otro lado, las tormentas magnéticas están dentro del contexto de las variabilidades bruscas en la radiación de partículas procedentes del Sol. A su vez causan modificaciones en la magnetosfera (capa más externa de la atmósfera) que cambian el campo magnético terrestre a nivel global provocando las tormentas magnéticas. Su duración es de unos pocos días y sus efectos son de consideración en la intensidad del campo magnético. Entre sus desastrosos efectos podemos encontrar: averías en satélites, interferencias en la transmisión de ondas de radio e interferencias en las líneas de transmisión, perjudicando las comunicaciones.

Hay que resaltar también que la atmósfera externa del Sol, no es estática, se mueve abandonando la estrella. La corona solar es un gas completamente ionizado, es decir, un plasma a muy baja densidad ( $\approx \frac{10^{-13}Kg}{m^3}$ ) y muy alta temperatura ( $\approx 2 \cdot 10^6 K$ ). Este movimiento de la corona es el llamado viento solar, el cual consiste esencialmente en electrones, protones y trazas de núcleos de helio. El viento solar se presenta como una “correa de transmisión” de posibles perturbaciones hacia el medio interplanetario y que eventualmente llegan a la Tierra. Su origen está en que las nombradas partículas pueden escapar de la atracción gravitatoria del Sol a causa de su gran energía cinética y de la elevada temperatura de la corona.

### **1.3. OBJETIVOS.**

Vamos a hacer el análisis del ciclo de actividad solar y su influencia en la Tierra. Para ello emplearemos una metodología de análisis basada en la transformada rápida de Fourier y en la función de correlación. Esta metodología es aplicada a largas series de medidas de parámetros solares (manchas solares) y terrestres (índices geomagnéticos y anomalía en la temperatura global media terrestre) para ver qué conclusiones se pueden extraer.



## **CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA DE ANÁLISIS.**

### **SUMMARY.**

Here, the mathematical tools used to analyze the observed parameters are described. One of them that had been used herein is the Fourier Transform, which is a mathematical transformation used to transform signals between the temporal (or spatial) domain to the domain of the frequency (or spatial frequency). It is a powerful mechanism that offers many applications in the fields of physics and engineering.

Furthermore, the signals used are discrete taking a value at the time that they are measured (sampled). As a result we use a mathematical tool known as Fast Fourier transform (Fast Fourier Transform) that is an efficient algorithm to compute the discrete Fourier transform (DFT) and its inverse (IDFT). The FFT is of great importance in a wide variety of applications, from digital signal processing and digital filtering, and also, in general, to solve partial differential equations. We have represented the power spectrum with the aim to locate what frequency corresponds to each peak (maximum) in the spectrum of the series under study.

We also use the cross-correlation function, which is a measure of the similarity between two signals, usually employed in order to find similar relevant features between unknown signals. It is a function of relative time (lag) between signals, and sometimes it is also called displaced scalar product.

## 2.1. TRANSFORMADA DE FOURIER.

Una de las herramientas matemáticas que se han empleado en el presente documento es la transformada de Fourier. Se trata de una transformación integral matemática usada para transformar señales entre el dominio temporal (o bien espacial) y el dominio de la frecuencia temporal (o espacial). Es un potente mecanismo que ofrece muchas aplicaciones en los campos de la física y la ingeniería. Tiene la propiedad de ser reversible, es decir, nos permite transformar de un dominio a otro dominio sin perder información.

Si disponemos de una función periódica en el tiempo (a saber, un sonido musical continuo pero no necesariamente sinusoidal), la transformada de Fourier puede facilitar el cálculo de un conjunto discreto de amplitudes complejas, llamadas coeficientes de las series de Fourier. Ellos definen el espectro de frecuencia de la señal del dominio-tiempo original.

La transformada de Fourier desde una definición puramente matemática es una aplicación que hace corresponder a una función  $f$  de valores definida en la recta real, con otra función  $g$  definida de la manera siguiente [2]:

$$g(\theta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} f(x) e^{-i\theta x} dx$$

siendo  $x$  la variable independiente del dominio temporal o espacial y  $\theta$  la variable independiente del dominio de frecuencias.

Hay que matizar que en nuestro caso particular vamos a trabajar con señales de duración finita, dado que en física tenemos datos reales que no pueden abarcar el intervalo infinito desde el punto de vista matemático idealizado. Además las señales son discretas ya que toman el valor en el momento que se las mide (muestrea). Como consecuencia empleamos la herramienta matemática conocida como transformada rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform*). Básicamente estamos ante un eficiente algoritmo que permite calcular la transformada de Fourier discreta (DFT) y también su inversa (IDFT) [3]. La FFT es de gran importancia en una amplia variedad de aplicaciones, desde el tratamiento digital de señales y filtrado digital en general a la resolución de ecuaciones en derivadas parciales.

La secuencia de  $N$  números reales  $x_0, \dots, x_{N-1}$  se transforma en la secuencia de  $N$  números complejos  $X_0, \dots, X_{N-1}$  mediante la DFT con la fórmula siguiente:

$$x_n = IDFT\{X_k\} = \frac{1}{N} (DFT\{X_k^*\})^*$$

dónde  $x_n$  es el resultado de la transformada inversa de Fourier correspondiente al punto  $X_k$  y  $*$  indica el complejo conjugado.

Para poder realizar la FFT, usamos en este trabajo el comando *fft* de *numpy* del lenguaje informático *Python* que realiza la transformada de Fourier de la señal de interés. Es de destacar que representamos el módulo al cuadrado de la transformada de Fourier de la señal a analizar, cuyo gráfico resultante se denomina espectro de potencia o densidad espectral de potencia (SP).

Calcular el espectro de potencia de una señal en el dominio temporal sirve para saber las frecuencias de las componentes de mayor potencia de la señal. Su medición es la distribución de valores de potencia como una función de la frecuencia. En el dominio de la frecuencia (temporal o espacial) esto es como se apuntó anteriormente el cuadrado de la magnitud de la FFT.

$$SP_v \propto |A(v)|^2$$

Aunque en las representaciones gráficas, en las que se quiere mostrar la información en amplitud, frecuentemente sólo se representa el módulo al cuadrado de la transformada de Fourier de la señal a analizar, y el gráfico resultante se conoce como espectro de potencia o densidad espectral de potencia (ver Figura 1 y Figura 2). Esencialmente nosotros en un caso genérico tenemos por ejemplo una función

$$x(t) = A \sin(2\pi f_0 t + \varphi)$$

donde  $A$  es la amplitud,  $t$  el tiempo,  $f_0$  la frecuencia y  $\varphi$  la fase inicial de la señal. Cuando nosotros representamos el espectro de potencia (módulo al cuadrado de la transformada de Fourier) tenemos que pasaremos al dominio de frecuencias

$$X^2(f) = A^2 \delta(f - f_0)$$

donde  $\delta(f - f_0)$  es la delta de Dirac evaluada en la frecuencia  $f_0$ , que representa el los máximo del espectro de potencias a la frecuencia  $f_0$ .

Dada una señal cualquiera podremos conocer como es su aspecto si hacemos dicha representación. Sabemos que tendremos un sumatorio de  $m$  funciones sinusoidales, de frecuencias angulares  $\omega_i$  y fases iniciales  $\varphi_i$  que nos permitirán emular la señal original.

$$x(t) = \sum_{i=1}^m A_i \sin(\omega_i + \varphi_i)$$

La amplitud se podrá obtener como la raíz cuadrada de la potencia de cada término del espectro de potencias y el periodo de cada máximo (pico) como la inversa de su frecuencia. Para obtener la fase bastará con considerar en el espectro de amplitud definido cómo el módulo de la función  $X(f)$  normalizado la posición de cada máximo y teniendo en cuenta la relación de las posiciones de los máximos con las posiciones de los elementos de la transformada de Fourier original. Entonces, sea  $T_j = fft(x_j)$  la posición del elemento  $j$ -ésimo de la transformada que a su vez coincide con la posición del respectivo elemento  $j$ -ésimo del espectro de potencias, tendremos que la fase de dicho elemento vendrá dada por

$$\varphi_j = \tan^{-1} \frac{Im(T_j)}{Re(T_j)}$$

### 2.1.1. EJEMPLOS REALIZADOS CON SEÑALES SIMULADAS.

A continuación se mostrarán ejemplos de señales generadas por el profesor Teodoro Roca y que se han intentado analizar para descubrir cómo son. Hay que señalar que este ejercicio se ha repetido con diferentes funciones y aquí sólo representamos algunos casos por simplicidad. A través de un programa de código abierto, *Python*, se ha generado su representación, su análisis de Fourier y su espectro de potencias. Con el fin de calcular la transformada de Fourier de cualquier señal a determinar en este trabajo, se empleó la función *fft* del módulo de *numpy*. A dicho resultado se le calculó el valor absoluto y se dividió el mismo entre el número de puntos que contenía la señal para calcular correctamente la amplitud de las señales (calibración). A su vez, a este último resultado se le elevó al cuadrado para poder obtener el espectro de potencias de la señal. Matizar además que se utilizaron sólo la mitad de los resultados en el programa original para la transformada de Fourier ya que la otra mitad es simétrica respecto a la primera y por tanto es redundante.

En el presente ejemplo se muestra una señal que contiene 32768 puntos. Esta señal es:

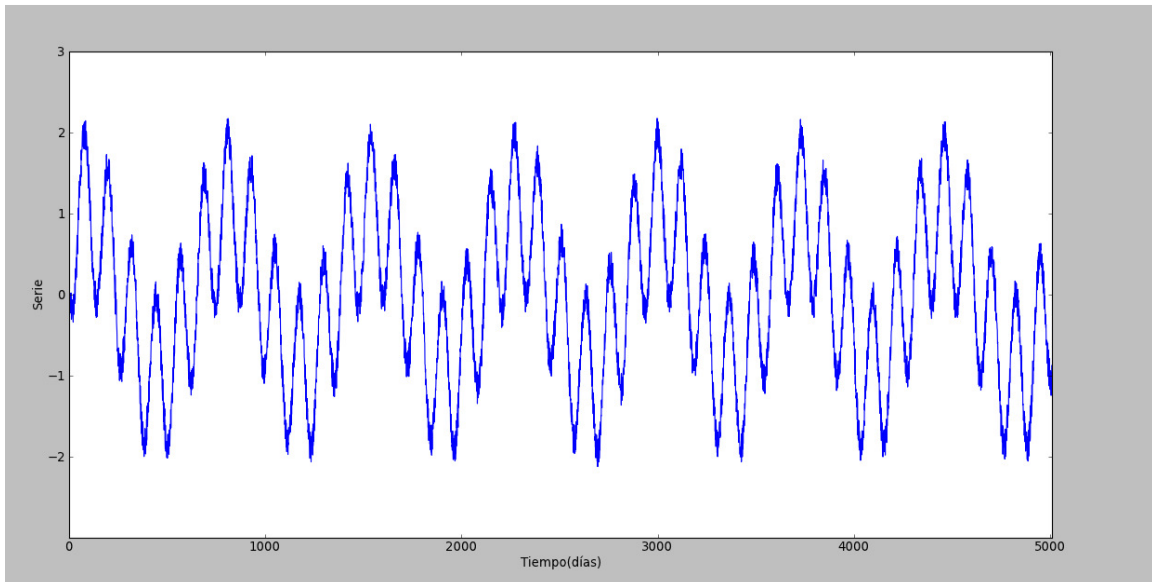


Figura 1. Señal de prueba. Para una mejor visualización, se han representado una ampliación de los 5000 primeros puntos.

La señal anterior consta de la suma de una senoide pura con una amplitud unidad, frecuencia  $\nu_0$  (y fase  $\varphi_0$ ) y de otra modulada en frecuencia. La forma matemática de dicha señal es:

$$A = \sin(2\pi(\nu_0 + \nu_m(t))t + \varphi_0) + \sin(2\pi\nu_1 t + \varphi_1) + \gamma(t)$$

con

$\nu_0 = \frac{0.5}{365} \text{días}^{-1} = 1.37 \cdot 10^{-3} \text{días}^{-1}$ ;  $\nu_1 = 6\nu_0$ ;  $\nu_m(t) = 5 \cdot 10^{-6} \sin\left(2\pi \frac{\nu_0}{5} t + \varphi_1\right)$   
; las fases aleatorias y  $\gamma(t)$  ruido aleatorio. El intervalo de muestreo es  $\Delta t = 1$  día y la duración de la señal es  $T = N \cdot \Delta t = 32768$  días.

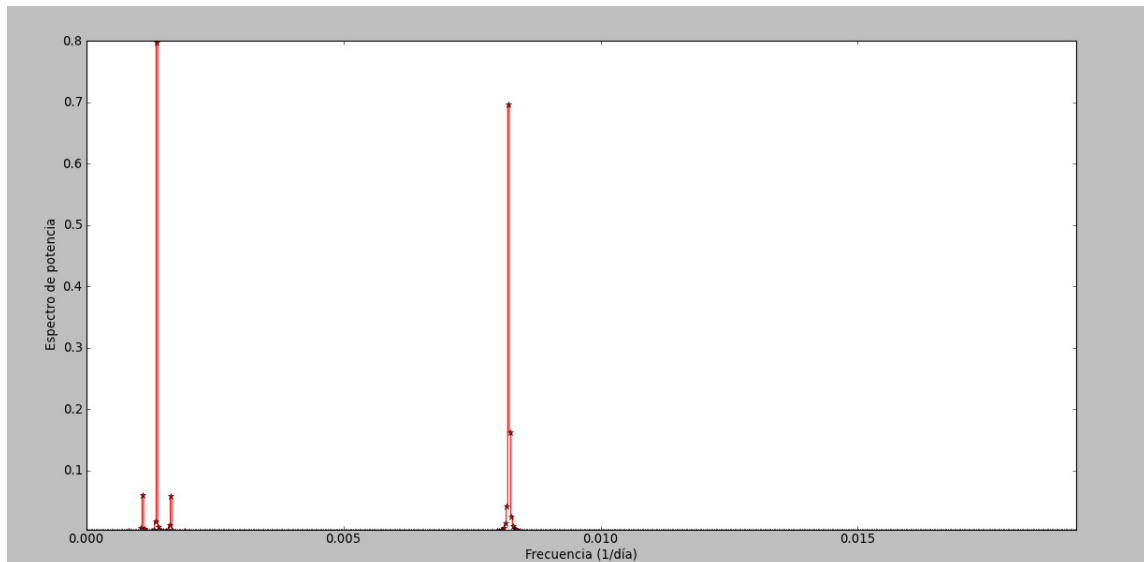


Figura 2. Ampliación del espectro de potencia de la señal de prueba mostrando ambas señales.

La precisión en cifras en la frecuencia y en el periodo de los picos viene limitada por la resolución en frecuencia del espectro  $\Delta\nu$  que solamente depende de la duración de la señal. Pero, dado que el periodo  $T = \frac{1}{\nu}$ , entonces  $\frac{\Delta T}{T} = \frac{\Delta\nu}{\nu}$ . Por lo tanto, despejando  $\Delta T$  (la resolución en periodo) tenemos que  $\Delta T = T^2 \Delta\nu$ . Como consecuencia tenemos que a periodos largos le corresponden incertidumbres grandes y viceversa.

En la Figura 2 tenemos que la resolución en frecuencia correspondiente es  $\Delta\nu = \frac{1}{N\Delta t} = 0.00003$  ciclos por día.

En el espectro de potencia si bien la senoide pura ofrece un solo pico de amplitud, frecuencia y fase muy cercanas a la introducida (ver Figura 2), la senoide modulada en frecuencia aparece como una serie de 3 picos separados por 0.00027 ciclos por día. Esta separación es justamente la introducida en la señal de modulación  $\left(\frac{\nu_0}{5}\right)$  y su amplitud es de  $\sqrt{0.8} \approx 0.9$  que es menor que el 1 introducido. Esto se explica por la potencia de los picos o bandas laterales que aparecen a ambos lados separados por  $\left(\frac{\nu_0}{5}\right)$ ; aquí en la Figura 2 se aprecian dos solamente pero hay más separados por el mismo intervalo de frecuencia y de amplitud decreciente.

Para poder determinar con precisión las frecuencias correspondientes a los máximos se empleó la función *peakdet* de *Python* creada por Eli Billauer [4], que calcula o detecta los picos de una función por encima de un cierto valor (tolerancia) que podemos elegir. La clave está en elegir un valor de tolerancia y el programa considera como máximos aquellos valores entre los cuales la distancia vertical es menor o igual a la tolerancia indicada. En la Tabla 1 se muestra la frecuencia en días<sup>-1</sup>, el periodo en días y su error, la potencia (en unidades arbitrarias) y la fase (en radianes) de los picos principales del espectro de potencias de la señal.

Frec.(ciclos/día)	Periodo (días)	Res. en periodo(días)	Potencia	Fase(rad)
0.00111	910	25	0.061	1.49505
0.00137	728	16	0.797	-1.12814
0.00165	607	11	0.058	-0.85890
0.00821	122.4	0.4	0.696	-3.04646

Tabla 1. Máximos del espectro de potencia. De izquierda a derecha aparece la frecuencia (en ciclos por día), el periodo (en días), la resolución (incertidumbre) en periodo (en días), la potencia (en unidades arbitrarias) y la fase (en radianes).

## 2.2. FUNCIÓN DE CORRELACIÓN.

La correlación cruzada (o a veces llamada "covarianza cruzada") es una medida de la semejanza entre dos señales (temporales o espaciales), usualmente empleada con el fin de encontrar características relevantes en una señal en un principio desconocida a través de la comparación con otra que sí se conoce. Es función del tiempo (o del espacio) relativo entre las señales, a veces también se la llama *producto escalar desplazado*, y tiene aplicaciones prácticas en muchos campos como en el reconocimiento de patrones y en criptoanálisis [5].

Dadas dos funciones discretas o señales  $f_i$  y  $g_i$  con  $i = 1 \dots N$ , la correlación cruzada se define como:

$$C_{fg} = (f \star g)_i = \sum_{j=-L}^{j=+L} f_j \star g_{i+j}$$

con  $L \leq N$  donde la sumatoria se realiza sobre valores enteros de  $j$ ; y el asterisco está indicando el complejo conjugado.  $L$  es el llamado *lag* o tiempo de retardo

Para realizar la correlación se ha empleado la función *correlate* de *numpy*, que realiza la correlación cruzada de dos secuencias unidimensionales. Ahora bien, *correlate* aplica la definición anterior de forma contraria, o sea

$$C_{fg} = \sum_j f_{i+j} g_j^*$$

Es más, en el presente trabajo se aplica la definición empleada por *correlate*, que es la función de correlación normalizada para que el máximo no pueda exceder del valor de la unidad.

$$C_{fg} = \sum_j \frac{f_{i+j} g_j^*}{\sqrt{\sum_j f_j^2 \sum_j g_j^2}}$$

De este modo podremos saber con una mera observación de la posición del máximo de la función cual es el *lag* (tiempo de retardo) entre ambas señales o entre particularidades que se encuentran en ambas señales.

### 2.2.1. EJEMPLO DE CORRELACIÓN CON SEÑALES CONOCIDAS.

Supongamos dos secuencias diferentes a las que llamaremos primera y segunda. En un caso general, si el *lag* es positivo nos indica si desplazamos la primera gráfica sobre la segunda que el suceso que representa la primera gráfica ocurre con anterioridad al segundo suceso. Si el *lag* es negativo habiendo desplazado la primera sobre la segunda tendremos que el suceso de la primera ocurre con posterioridad respecto a la segunda. Si el *lag* es cero tendremos que físicamente no hay ningún retardo y que ambas funciones son iguales o muy parecidas. Si desplazamos la segunda gráfica sobre la primera, la interpretación será análoga pero tomando como referencia la segunda gráfica.

Ahora consideraremos el caso concreto en que la primera es  $x(t) = \sin\left(t \frac{\pi}{32} + 0.3\right)$  y la segunda es  $y(t) = \sin\left(t \frac{\pi}{32} + 0.3 + \frac{\pi}{2}\right)$ .

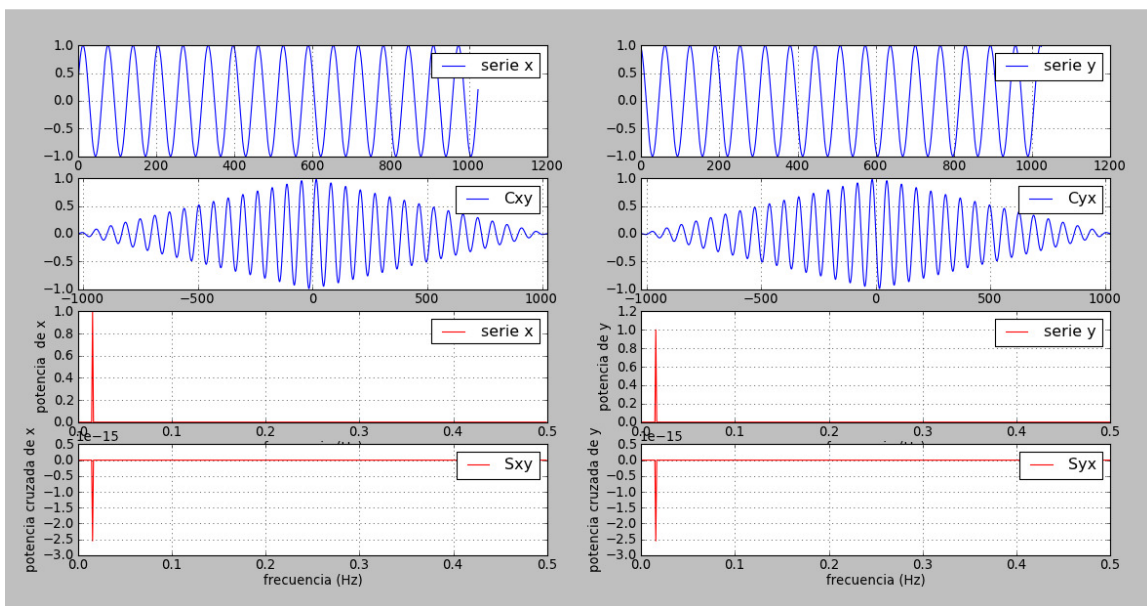


Figura 3. Correlaciones entre las dos funciones  $x(t)$  e  $y(t)$  discretas. Primero hemos dibujado las señales (1ª fila de la figura); luego calculamos las funciones de correlación  $C_{xy}$  (señal  $x$  sobre  $y$ ) y la  $C_{yx}$  (señal  $y$  sobre  $x$ ) y las dibujamos (2ª fila). Después determinamos los espectros de potencias de las funciones  $x(t)$  e  $y(t)$  y los dibujamos (3ª fila). Para finalizar, calculamos la transformada de Fourier de las funciones de correlación y también hacemos su representación (4ª fila).

Estas son dos señales de igual amplitud y frecuencia pero con diferente fase. Como podemos ver en la Figura 3 las funciones de correlación  $C_{xy}$  y  $C_{yx}$  (2ª fila de la figura) coinciden si tenemos en cuenta que una es la imagen especular de la otra. Los máximos absolutos de ambas funciones coinciden en +16 y -16 indicando que este es el adelanto/retraso temporal de una frente a la otra.

Matizar que en las gráficas que se presentan para la correlación, se considera el tiempo origen del tiempo en el eje horizontal en el cero y por lo tanto deberemos determinar los máximos partiendo del punto central de la correlación cruzada. Importante recalcar que dicho punto corresponde a un desplazamiento (*lag*) cero.

## **CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE DATOS SOLARES.**

### **SUMMARY.**

The number of sunspots in the photosphere varies with a period of around 11 years. In a couple of spots located in the solar northern hemisphere, there is a spot that leads his companion in the direction of rotation; in turn, it has a magnetic field in the opposite direction (polarity) to the follower in the southern hemisphere. At the start of each cycle of 11 years, the polarity of the magnetic field of the couple of sunspots at each hemisphere is reversed. All this leads to the point that a complete solar cycle, including magnetic polarity, lasts for about 22 years. Because a sunspot lasts roughly as much a few months, the 22-year solar cycle shows the most stable and durability occurred in the sunspot processes.

We have analyzed a yearly average time series of the number of daily sunspots and we have found that the frequency or period of solar activity cycle is not constant. If we analyze separately the two halves in which we divide the original series, it shows that the two halves can be mismatched in either amplitude, frequency and phase along these 317 years of duration of this signal. Therefore, neither cycles have the same duration or the same maximum value. Among the most exceptional cases, it was detected by E. Maunder in 1893 that for 70 years, between 1645 and 1715, the sunspots almost disappeared.



### **3.1. EL SOL.**

El Sol es una estrella de tipo espectral G de la secuencia principal que forma parte del conjunto de 200.000 millones de estrellas de nuestra galaxia. Sin embargo, para nosotros es la más importante debido a que a una distancia relativamente pequeña, en escalas astronómicas, de aproximadamente 150 millones de kilómetros, se encuentra la Tierra y constituye el principal aporte de energía para nuestro ecosistema.

Se considera que este astro tiene una edad cercana a 4.500 millones de años. Actualmente pasa por la etapa intermedia de su vida. Se encuentra en una etapa estable y de larga duración debido a que su estructura cambia a un ritmo muy lento ( $\approx 10^9$  años) marcado por los ritmos de las reacciones termonucleares que suceden en su interior que convierten el hidrógeno en helio.

### **3.2. EL CICLO DE ACTIVIDAD SOLAR.**

Por actividad solar se entiende el conjunto de variaciones espacio-temporales que acontecen en el Sol conectadas o que tienen su explicación en el campo magnético solar. Básicamente se trata de variaciones en la energía y en otros parámetros que se observan en las tres capas observables del Sol: la fotosfera, la cromosfera y la corona. El mencionado acontecimiento tiene fenómenos asociados que pueden trasladarse hacia nuestro planeta en forma de un conjunto de partículas y radiación a través del llamado viento solar.

La actividad solar se muestra claramente por medio de las manchas solares que aparecen sobre la superficie del Sol, en su fotosfera. Pese a que las manchas solares ya habían sido detectadas con anterioridad, siglos atrás de la presente época, no hubo corroboración de las mismas hasta la invención del telescopio astronómico en el año 1610.

Una de sus características fundamentales es que poseían una duración y un tamaño variable. Sería Rudolph Wolf quien en 1855 confirmaría que el número de apariciones de las mentadas manchas gozaban de una periodicidad de 11 años. Además inventó el llamado n° de Wolf (que mezcla el número de manchas y su área) para describir el índice de actividad del Sol [6].

En 1859 Richard Carrington corroboró que el Sol poseía una rotación diferencial. Sucede que el Sol presenta una rotación más rápida en el ecuador que en los polos. Aparte pudo confirmar que la latitud media en la que aparecen las manchas varía con el tiempo. En el inicio del ciclo las manchas surgen cerca de latitudes solares altas de alrededor de 30°-40°. Conforme progresa el mismo, aparecen progresivamente a menor latitud (cada vez con mayor acercamiento al ecuador solar) [7].

De las parejas de manchas ubicadas en el hemisferio norte solar, hay una mancha que dirige a su compañera en la dirección de rotación que a su vez tiene un campo magnético en sentido contrario (polaridad) al de la de su homóloga dominante del hemisferio sur. En el inicio de cada ciclo de 11 años el sentido del campo magnético de las manchas solares dominantes de cada hemisferio se invierte. Todo esto nos lleva a que el ciclo solar completo, incluyendo la polaridad magnética, dura unos 22 años.

Igualmente, las manchas solares se suelen dar en la misma latitud en cada hemisferio simultáneamente. Debido a que una mancha solar dura aproximadamente hasta unos cuantos meses, el ciclo solar de 22 años muestra los procesos estables y de mayor durabilidad acaecidos en el Sol.

Destacar que no todos los ciclos tienen la misma duración ni tampoco la intensidad de la energía radiada es la misma. Entre los casos más excepcionales encontramos el detectado por E. Maunder en 1893. Él demostró que durante 70 años, entre 1645 y 1715 hubo una supresión en la aparición de manchas solares. Estudios paleontológicos realizados por otros autores señalan que se dieron mínimos semejantes al de Maunder en la antigüedad [7]. En la Figura 4 se puede comprobar como varía el llamado número de manchas (una versión moderna del número de Wolf) con el tiempo desde 1600 aproximadamente. También puede comprobarse como los máximos de los ciclos no son iguales en su amplitud ni en su duración.

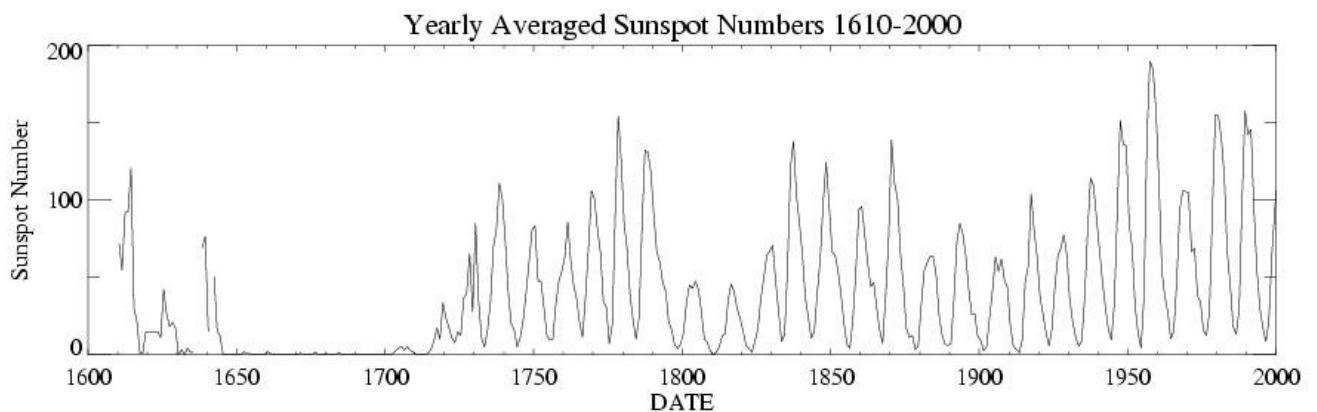


Figura 4 [8]. Valor medio anual del número total de manchas solares frente al tiempo (años) desde 1610 hasta 2000. Se puede observar como durante el siglo XVII hay un mínimo en el ciclo de actividad solar (mínimo de Maunder). También se puede apreciar el mínimo de Dalton entre 1790 y 1830, donde también hubo un periodo de baja actividad solar. De igual manera se aprecia otro periodo de mínimos a principios del siglo XX y parece repetirse a principio del siglo XXI.

En este trabajo se ha analizado como varía el Número de Manchas Solares en media anual en función del tiempo. Para ello se han utilizado datos públicos tomados de la red en la página del SILSO (Sunspot Index and Long-term Solar Observations) disponibles en la página <http://sidc.oma.be/silso/datafiles>, en concreto el archivo “Yearly mean total sunspot number [1700 - now]” [9]. A continuación ofrecemos un análisis de estos datos con las gráficas correspondientes al espectro de potencias de dichas manchas solares entre los años 1700 hasta 2015 (Figura 5 y Figura 7).

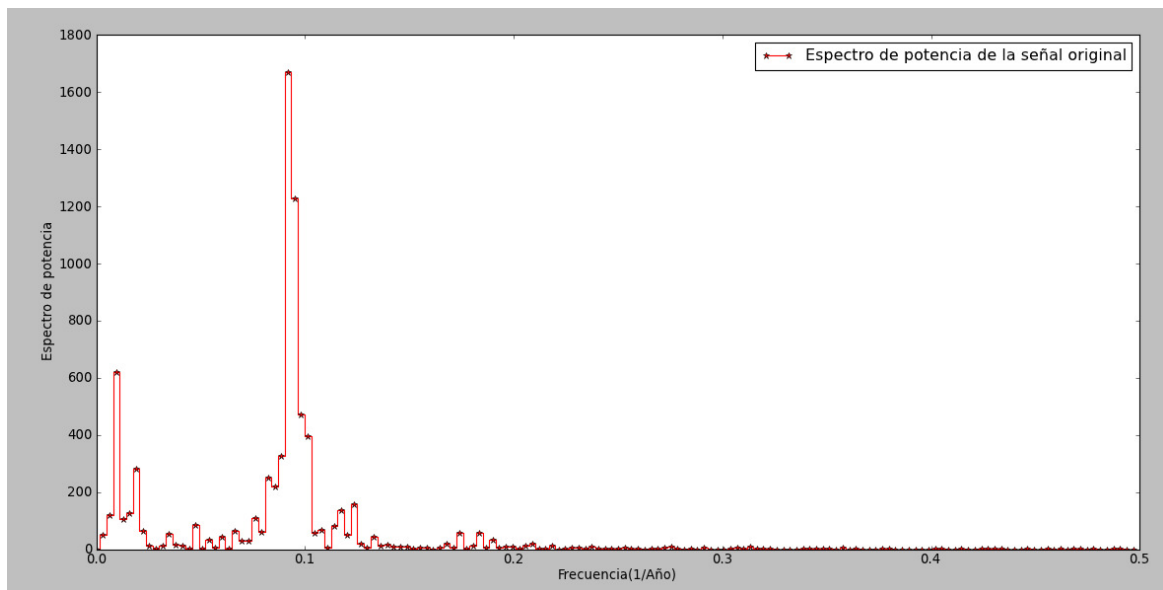


Figura 5. Espectro de potencia del número de manchas solares que va desde 1700 hasta 2015.

Cuando se analiza dicha serie con la FFT y se calcula su espectro de potencia se obtiene el gráfico de la Figura 5. Se pueden apreciar dos picos predominantes en el espectro de potencias, los cuales presentan una amplitud de  $\sqrt{620.136} \approx 24.9$  y  $\sqrt{1670.444} \approx 40.9$  y un periodo de aproximadamente de 110 y 10.9 años respectivamente (ver Tabla 2). Para el pico de mayor amplitud tenemos que coincide aproximadamente con el tiempo de un siglo que tarda aproximadamente en producirse los mínimos en la emisión de las manchas solares (mínimo de Maunder, de Dalton...). Por otra parte el segundo periodo de cambio está alrededor de 11 años (en concreto 10.9 años), lo que nos transmite la corroboración de que las manchas tienen un periodo de variabilidad de 11 años. Cada 11 años se producen los cambios más significativos y por ello se ve claramente que la potencia es mucho mayor.

A la derecha del máximo del pico de frecuencia menor (con potencia de 620.14) tenemos otro correspondiente a un periodo de 53 años y a una potencia de 281.21. Teniendo en cuenta que la resolución en periodo es de aproximadamente unos 30 años para un pico y para el otro de 8 años podemos concluir que se trata del mismo máximo pero modulado en frecuencia y amplitud. El hecho de no poder contar con un intervalo temporal mayor con suficientes datos que nos permitan determinaciones más precisas es la causa de que no tengamos una mejor resolución en periodo.

A la izquierda del pico mayor (con potencia de 1670.444) aparece un máximo con un periodo 13.2 años y su derecha aparecen otros de amplitud mucho menor correspondiente a periodos de 8.54 y 8.10 años que nos dan información sobre que la señal está modulada en periodo y en amplitud. En consecuencia será normal encontrar variaciones mucho menos significativas con periodos menores (ver Tabla 2).

Resolución en frecuencia:0.003 ciclos/año  
Tolerancia picos:33.40888

Frec.(ciclos/año)	Periodo (años)	Res. en periodo(años)	Potencia	Fase(rad)
0.009	110	30	620.14	2.892
0.019	53	8	281.21	2.436
0.035	28.7	2.5	53.71	0.771
0.047	21.1	1.3	86.13	-1.203
0.060	16.6	0.8	43.47	-1.405
0.066	15.1	0.7	64.03	0.402
0.076	13.2	0.5	109.99	0.730
0.092	10.9	0.4	1670.44	2.017
0.120	8.54	0.22	137.41	-0.841
0.123	8.10	0.20	159.21	1.549
0.133	7.52	0.17	44.21	-2.937
0.174	5.72	0.10	59.34	2.041
0.184	5.43	0.09	56.51	-1.207

Tabla 2. Máximos del espectro de potencia de las manchas solares. De izquierda a derecha aparece la frecuencia (en ciclos por año), el periodo (en días), la resolución en periodo (en años), la potencia (en nº de manchas solares al cuadrado) y la fase (en radianes).

De hecho, podemos comprobar que la frecuencia o periodo del ciclo no es constante sin más que analizar por separado las dos mitades en las que podemos dividir la serie original. La Figura 6 muestra ambas mitades y ya puede verse que, aunque presentan ciclos de periodos alrededor de 11 años, no coinciden ni en amplitud, ni en frecuencia ni en fase a lo largo de estos 317 años de duración de esta señal.

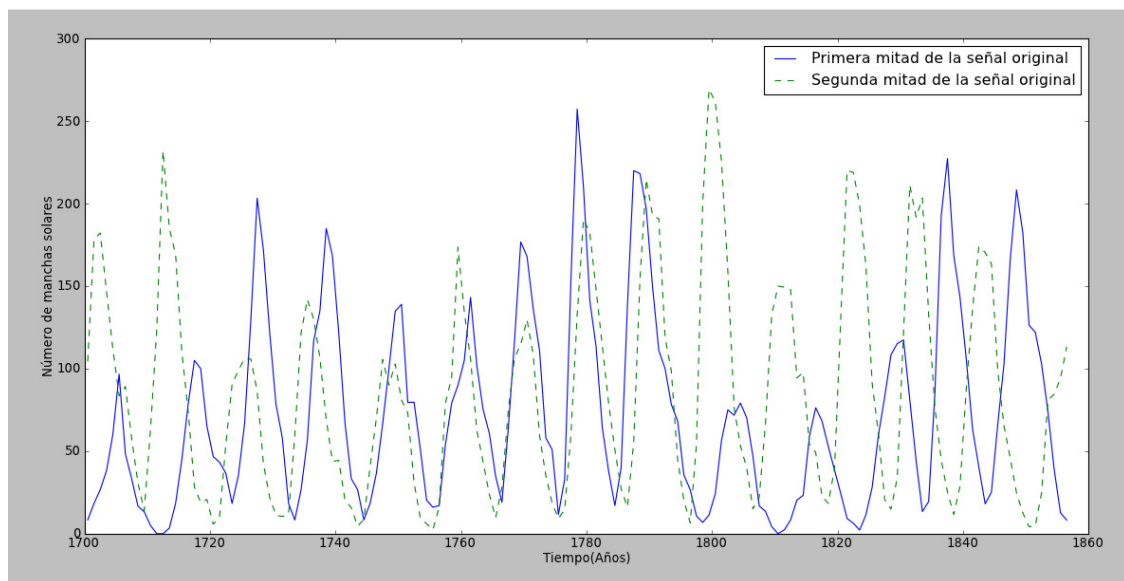


Figura 6. Representación de las dos mitades de la señal original.

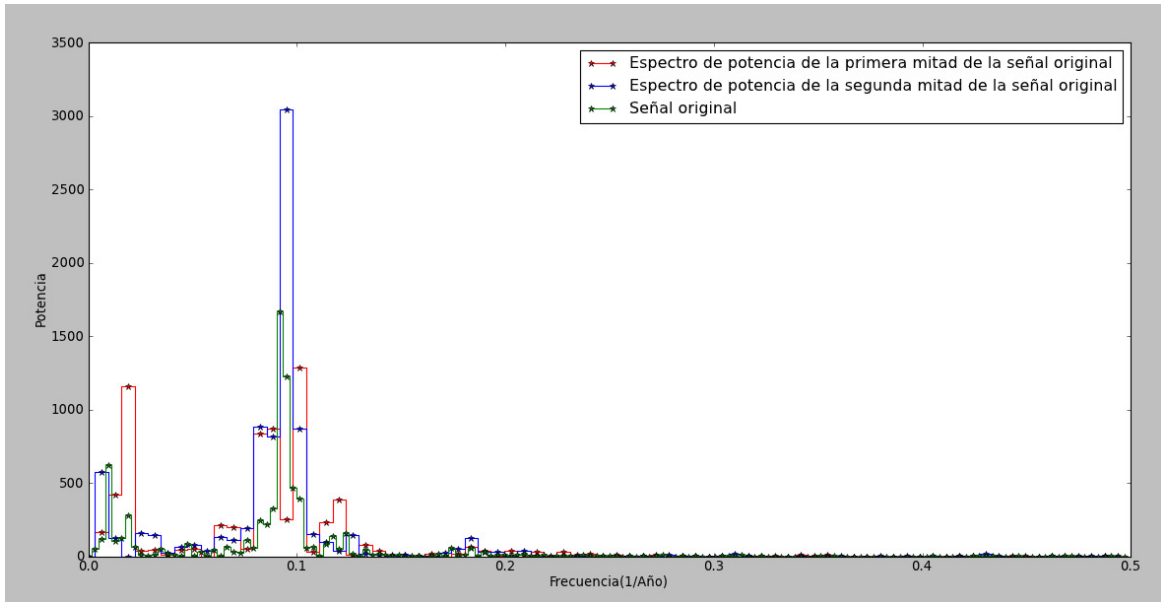


Figura 7. Espectro de potencia de la primera mitad de la señal original (en rojo), de la segunda mitad de la señal original (en azul) y de la señal original (en verde). Se observa como las posiciones de los máximos tienden a ser muy parecidas pero no iguales lo que da cuenta de la similitud entre ambas mitades de la señal. No obstante, sus diferencias indican la duración variable del ciclo tanto en frecuencia (periodo) como en amplitud.

```

Máximos primera mitad espectro de potencias de las manchas solares
Resolución en frecuencia:0.006 ciclos/año
Tolerancia picos: 25.75828
Frec.(ciclos/año) Periodo (años) Res. en periodo(años) Potencia Fase(rad)
0.019 53 17 1157.53 2.405
0.051 19.8 2.3 50.24 2.909
0.063 15.8 1.5 213.85 3.049
0.088 11.3 0.8 873.31 -1.797
0.101 9.9 0.6 1287.91 0.328
0.120 8.3 0.4 391.01 -3.001
0.133 7.5 0.3 79.25 -2.907
0.184 5.45 0.18 63.24 -0.376
0.203 4.94 0.15 40.69 1.635
Máximos segunda mitad espectro de potencias de las manchas solares
Resolución en frecuencia:0.006 ciclos/año
Tolerancia picos: 60.87554
Frec.(ciclos/año) Periodo (años) Res. en periodo(años) Potencia Fase(rad)
0.006 160 150 573.13 1.668
0.025 40 9 159.99 -1.718
0.082 12.2 0.9 882.58 -0.098
0.095 10.5 0.7 3043.78 2.962
0.127 7.9 0.4 148.31 2.875
0.184 5.47 0.18 128.00 -1.752

```

Tabla 3. Máximos de los espectros de potencias de las dos mitades de la señal del espectro de manchas solares. De izquierda a derecha aparece la frecuencia (en ciclos por año), el periodo (en años), la resolución en periodo (en años), la potencia y la fase (en radianes).

En la Tabla 3 se exponen los máximos de los espectros de potencia de ambas mitades. Para la primera mitad tenemos un máximo principal correspondiente a una potencia de 1177.53 que además tiene un periodo de 53 años y una resolución en periodo de unos 17 años. El segundo máximo está formado por dos picos de 873.31 y 1287.91 pero teniendo en cuenta que sus periodos son de 11.3 y 9.9 años con resoluciones de 0.8 y 0.6 años respectivamente podemos concluir que se trata de un único máximo.

La segunda mitad no presenta tantos picos destacados y por ellos se amplió la tolerancia de los picos a 60.87554. Tenemos dos picos: uno con una potencia de 573.13, un periodo de 160 años y un segundo formado por dos picos de 882.58 y 3043.78; con periodos de 12.2 y 10.5 años; y resoluciones en periodo de 0.9 y 0.7 años respectivamente (la resolución en periodo nos indica que estamos ante un sólo pico en el segundo máximo)

Con todo esto se puede concluir que tenemos básicamente dos picos principales en el espectro de manchas solares: uno que se produce en un intervalo de tiempo entre 30 y 60 años aproximadamente y un segundo correspondiente con el intervalo de tiempo de 11 años durante el cual cambia la cantidad de manchas solares.

# CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE DATOS TERRESTRES.

## SUMMARY.

For the variations in the geomagnetic field measurable indices are defined, called geomagnetic indices. The first one mentioned in this document is the geomagnetic K index which indicates alterations in the horizontal component of Earth's magnetic field through an integer in the range from 0 to 9 (1 indicates a period of calm and 5 or more indicates a geomagnetic storm). It is calculated from peak fluctuations of the horizontal component of the magnetic field observed in a magnetometer, at a particular Earth's location, over a three-hour interval. The K index was introduced by Julius Bartels in 1938.

From this index two others are also defined and used in geomagnetism: the so-called Aa and Ap indices. In units of nT the first one is defined from K observations taken at two antipodal observatories, while the second one is defined using the K measurement in magnetic storms. In this chapter, we analyze yearly averages of the three indices looking for its similarities and differences.

Furthermore, the average yearly temperature of the planet as measured by the Climatic Research Unit (CRU) of the University of East Anglia and found in <https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/temperature/HadCRUT4-gl.dat> [10].

#### 4.1. ÍNDICES GEOMAGNÉTICOS: AA, AP Y K.

El campo magnético terrestre conocido también con el nombre de campo geomagnético, es el campo magnético existente en la región comprendida entre el núcleo y el límite de la Tierra donde se encuentra con el viento solar, una corriente de partículas energéticas que emana del Sol. Su magnitud en la superficie de la Tierra varía de 25 a 65  $\mu\text{T}$  (microteslas). Para mostrar de forma ilustrativa como podría ser su estructura global, hay que considerar que se puede aproximar al campo creado por un dipolo magnético inclinado un ángulo de aproximadamente 10 grados con respecto al eje de rotación terrestre. No obstante, al contrario que el campo de un imán, el campo magnético de la Tierra varía con el tiempo a causa de su mecanismo de generación por el movimiento de aleaciones de hierro fundido en el núcleo externo de la Tierra (la llamada geodinamo).

Por otro lado, el polo norte magnético se desplaza, pero de una manera tan lenta que permite a las brújulas ser útiles a los navegantes. Cada ciertos intervalos de tiempo de durabilidad variable (cientos de miles de años en promedio) el campo magnético terrestre se invierte (polo norte y sur magnéticos permutan su emplazamiento). Con todo, tenemos una región por encima de la ionosfera —con una extensión de varias decenas de miles de kilómetros en el espacio— nombrada magnetosfera. La mentada capa preserva a la Tierra de los rayos cósmicos que destruirían la atmósfera externa, incluyendo la capa de ozono, que protege a la Tierra de los rayos UV (ultravioleta) solares.

Para conocer las variaciones habidas en el campo geomagnético se definen unos índices medibles, llamados índices geomagnéticos. El primero de los que se va a hablar en el presente documento es el índice geomagnético K que indica las alteraciones en la componente horizontal del campo magnético terrestre a través de un número entero en el rango de 0 a 9 (1 indica un período de calma y 5 o más indica una tormenta geomagnética). Se calcula a partir de las fluctuaciones máximas de la componente horizontal del campo magnético observada en un magnetómetro, en un lugar de la superficie de la Tierra determinado, durante un intervalo de tres horas. El índice K fue introducido por Julius Bartels en 1938 [11].

Los siguientes 13 observatorios, que se encuentran entre 46 y 63 grados norte y latitud geomagnética sur, contribuyen en la determinación de los índices planetarios: Lerwick (Reino Unido), Eskdalemuir (Reino Unido), Hartland (Reino Unido), Ottawa (Canadá), Fredericksburg (USA), Meannook (Canadá), Sitka (EEUU), Eyrewell (Nueva Zelanda), Canberra (Australia), Lovo (Suecia), Rude Skov (Dinamarca), Wingst (Alemania), y Witteveen (Países Bajos) [12].

Cabe matizar que el índice K medido varía en 28 pasos de 0 (silencio) a 9 (muy perturbado) con partes fraccionadas expresadas en tercios de una unidad. Un valor de K igual a 27, por ejemplo, significa 2 y  $2/3$  o 3; un valor de K igual a 30 significa 3 y  $0/3$  o 3 exactamente; y un valor K igual a 33 significa 3 y  $1/3$  o 3+. La media aritmética de los



valores de K escalados en los 13 observatorios enumerados anteriormente da el índice de actividad magnética global Kp [12].

El índice Aa es un simple índice de actividad geomagnética global que se mide en nT (nanotesla), que se calcula a partir de los índices de K medidos en dos observatorios aproximadamente localizados uno en las antípodas del otro. Hoy en día los observatorios utilizados son el observatorio de Hartland en Reino Unido y el de Canberra en Australia. Su principal ventaja al usar índices Aa para fines de investigación es que las series de tiempo se extienden hacia atrás en el tiempo más que cualquier otro índice geomagnético. Igualmente, hasta la fecha los valores se obtienen y se hacen semanalmente disponibles, dando lugar a una disponibilidad en tiempo real mayor que cualquier otro índice. [13]

El tercer índice, Ap, se define como el valor máximo más temprano ocurrido en un plazo de 24 horas obtenido por el cómputo del promedio de 8 valores del índice Ap tomados sucesivamente cada tres horas durante una tormenta geomagnética incluso sin tener en cuenta el inicio y la finalización de la tormenta en horario de tiempo universal diario. A lo largo de muchos años, los valores de Ap proporcionan una medida del máximo de la perturbación geomagnética que es útil para identificar las grandes tormentas geomagnéticas en orden cronológico (por fecha y hora de inicio) y por la amplitud de la más grande a la más pequeña. Los valores que más antigüedad tienen datan del año 1932. [14]

Para analizar estos índices a lo largo del tiempo se han utilizado las series de valores contenidas en la red en [ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/GEOMAGNETIC\\_DATA/APSTAR](ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/GEOMAGNETIC_DATA/APSTAR) [15] y en [ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/GEOMAGNETIC\\_DATA/AASTAR](ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/GEOMAGNETIC_DATA/AASTAR) [16] abiertas al público en general. Los ficheros utilizados son “apindex”, en los que vienen los valores del índice Kp, Ap y las manchas solares desde 1932 hasta 2011; y el fichero “aaindex” que contiene los valores del índice Aa de forma diaria desde 1868 hasta 2010.

En el fichero “apindex” se ofrece la suma de los ocho índices Kp para el día con una precisión de un tercio más cercano de una unidad. Dicho valor de la suma va a representarse en las gráficas con el nombre de “K”. Se resalta que para obtener el verdadero valor de Kp para un día habría que dividir entre 80 ya que tenemos la suma de ocho valores y el resultado está multiplicado por diez.

En la Figura 8 se hace una representación de los índices Aa, Ap y de K para poder visualizar si existe una relación entre los máximos de dichas magnitudes. Así mismo debemos matizar que los datos se han medido de forma diaria pero para una mejor visualización se han pasado los días a años decimales.

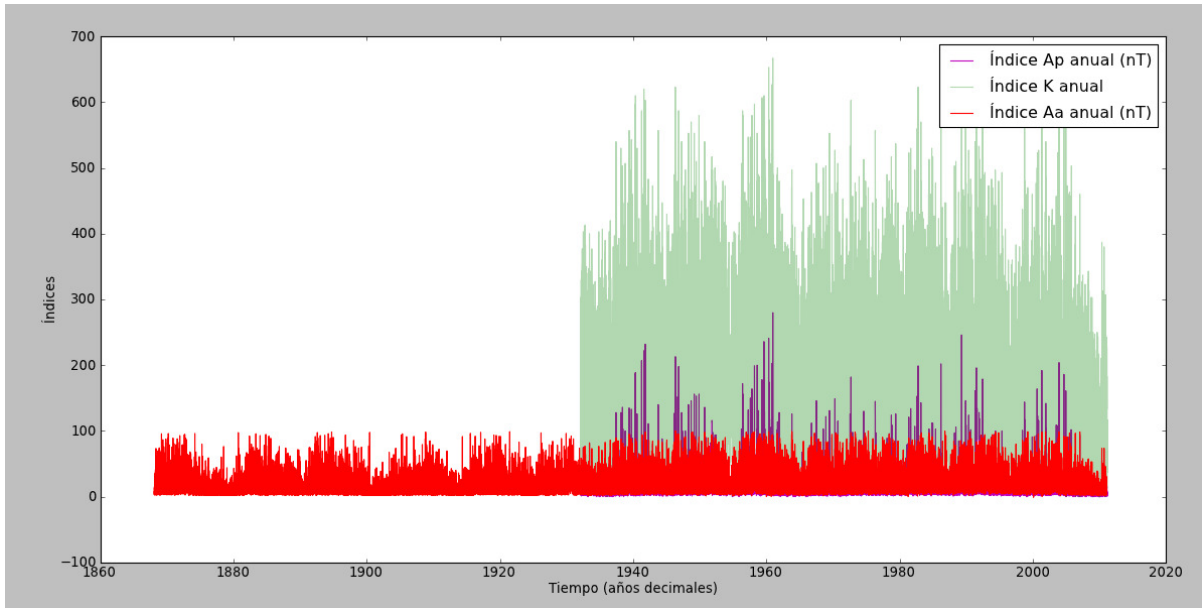


Figura 8. Índices  $A_p$  (en nT),  $K$  (suma de los ocho índices  $K_p$  para el día expresado con una precisión de un tercio más cercano de una unidad) y  $A_a$  ( en nT) diarios frente al tiempo convertido a años decimales. (Ver texto).

Se puede apreciar como existe una correspondencia entre los máximos de los tres índices. El análisis de Fourier de estos tres índices en la Figura 9 nos proporcionará mayor información.

Nótese que la frecuencia y la resolución de la misma se da en las tablas en  $\text{días}^{-1}$ , ya que originalmente los datos fueron tomados en días. El periodo y la resolución en periodo se ofrecen en años porque así es más entendible.

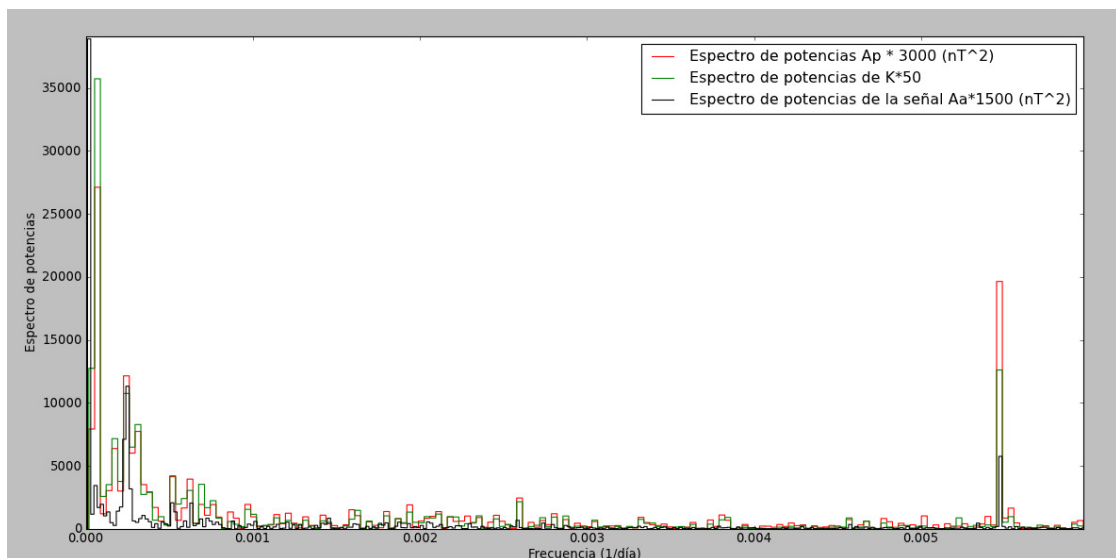


Figura 9. Espectros de potencias de los índices geomagnéticos  $A_p$  (en  $\text{nT}^2$ ),  $K$ ,  $A_a$  (en  $\text{nT}^2$ ) multiplicados por 3000, 50 y 1500 respectivamente para equilibrar las amplitudes en la representación y que se pudieran observar todas las magnitudes de interés. Esta representación es una ampliación que contiene a los tres máximos que destacan claramente. Se observa una clara coincidencia en los picos para la misma frecuencia de los tres máximos principales. Hay que resaltar que para saber cuál sería la potencia verdadera de los máximos del índice  $K$  tendríamos que dividir entre  $80^2$ , de acuerdo con el criterio indicado anteriormente en el texto.

Máximos índice Aa  
 Resolución en frecuencia: 0.007 ciclos/año  
 Tolerancia picos: 3.7

Frec.(ciclos/año)	Periodo (años)	Res. en periodo(años)	Potencia (nT <sup>2</sup> )	Fase(rad)
0.007	143	143	25.92	1.714
0.091	11.0	0.8	7.55	-2.916
2.2	0.45	0.03	3.84	-2.950

Tabla 4. Máximos del espectro de potencias del índice Aa. De izquierda a derecha aparece la frecuencia (en ciclos por año), el periodo (en años), la resolución en periodo (en años), la potencia (en nT<sup>2</sup>) y la fase (en radianes).

Para el espectro de potencias del índice Aa se observan tres máximos predominantes en el espectro tales que presentan una potencia de 25.92, 7.55 y 3.84 nT<sup>2</sup> de izquierda a derecha y un periodo temporal de 143, 11 y 0.45 años respectivamente.

Máximos índice Ap  
 Resolución en frecuencia: 0.011 ciclos/año  
 Tolerancia picos: 2.4

Frec.(ciclos/año)	Periodo (años)	Res. en periodo(años)	Potencia (nT <sup>2</sup> )	Fase(rad)
0.026	38	16	9.04	-2.904
0.088	11.4	1.4	4.05	-2.812
1.825	0.55	0.04	6.54	-2.541

Tabla 5. Máximos del espectro de potencias del índice Ap. De izquierda a derecha aparece la frecuencia (en ciclos por año), el periodo (en años), la resolución en periodo (en años), la potencia (en nT<sup>2</sup>) y la fase (en radianes).

Para el espectro de potencias del índice Ap, se observan tres señales predominantes en el espectro de potencias tales que presentan una potencia de 9.04, 4.05 y 6.54 nT<sup>2</sup> de izquierda a derecha y un periodo temporal de 38, 11.4 y 0.55 años respectivamente.

Máximos índice K  
 Resolución en frecuencia: 0.011 ciclos/año  
 Tolerancia picos: 150.0

Frec.(ciclos/año)	Periodo (años)	Res. en periodo(años)	Potencia	Potencia/80 <sup>2</sup>	Fase(rad)
0.026	38	16	714.36	0.112	-2.845
0.088	11.4	1.4	214.92	0.034	-2.803
1.825	0.55	0.04	252.14	0.040	-2.428

Tabla 6. Máximos del espectro de potencias del índice K. De izquierda a derecha aparece la frecuencia (en ciclos por año), el periodo (en años), la resolución en periodo (en años), la potencia, la potencia dividida entre 80<sup>2</sup> (para saber la potencia real) y la fase (en radianes).

Para el espectro de potencias del índice K observan tres señales predominantes en el espectro de potencias tales que presentan una amplitud de 714.36, 214.93 y 252.14 de izquierda a derecha y un periodo temporal de 38, 11.4 y 0.55 años respectivamente.

El primer máximo en los índices Ap y K tiene un periodo de 38 años pero teniendo en cuenta la resolución de 16 años este máximo podría corresponder a un periodo de unos 22 años que es lo que dura el ciclo solar completo incluyendo la polaridad magnética. Se presenta una posible discrepancia con el índice Aa ya que su periodo rondaría los 143 años pero teniendo en cuenta la resolución en periodo de 143 años para este caso concluiríamos que la variación puede corresponder al intervalo de tiempo de 38 años como los otros dos índices.

Vemos también que la respuesta de los tres índices ronda en torno a 11 años para el segundo pico corresponde al tiempo en que tarda en variar el número de manchas solares.

Tenemos un tercer pico que para los tres índices se corresponde aproximadamente con un periodo de medio año. Este tercer pico no se puede asociar con ningún periodo conocido de la actividad solar. Probablemente es un efecto espurio (ruido) debido a la forma de medir estos índices.

#### **4.2. TEMPERATURA MEDIA TERRESTRE.**

Hoy en día no se pone en duda que la temperatura media global de la Tierra está aumentando tal y como se muestra en la Figura 10. Ahora bien, la causa de dicho aumento en la temperatura de nuestro planeta madre es lo que más controversia genera. Tenemos que gran parte de la comunidad científica predice que con más de un 90% de certeza el aumento de la temperatura tiene su origen en los gases de efecto invernadero tales como el CO<sub>2</sub>. En este contexto se enmarcan las actividades antropogénicas que se desarrollan a través del despoje de los terrenos de todo tipo de plantas forestales junto con el aumento cada vez mayor de la industria a favor de la quema de combustibles fósiles como pudieran ser el petróleo o el carbón [17]. Estos últimos, en su combustión liberan CO<sub>2</sub> que es un gas que absorbe radiación fuertemente en el infrarrojo lejano del espectro electromagnético (zona asociada con el calentamiento térmico) de forma que atrapa este calor dentro de la atmósfera [18].

De acuerdo con el IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) en su última publicación “Cambio Climático 2014” [19], entre los impactos esperados para nuestro planeta tenemos que los ecosistemas naturales y humanos se ven afectados claramente en todos los continentes y en los océanos. Asimismo, en gran cantidad de regiones, el aumento en la disparidad del cambio de la ocurrencia de las precipitaciones al igual que el del derretimiento de la nieve afecta a los sistemas hidrológicos (aquellos relacionados con la distribución del agua continental y marina). Por añadidura se nos presentan problemas en que la flora y la fauna terrestres y marinas han modificado sus lugares de hábitat, así como las migraciones y sus relaciones con otras especies. Finalmente, se señala que muchos estudios basados en una amplia gama de regiones y cultivos, destacan que los impactos negativos han sido más comunes que los positivos.

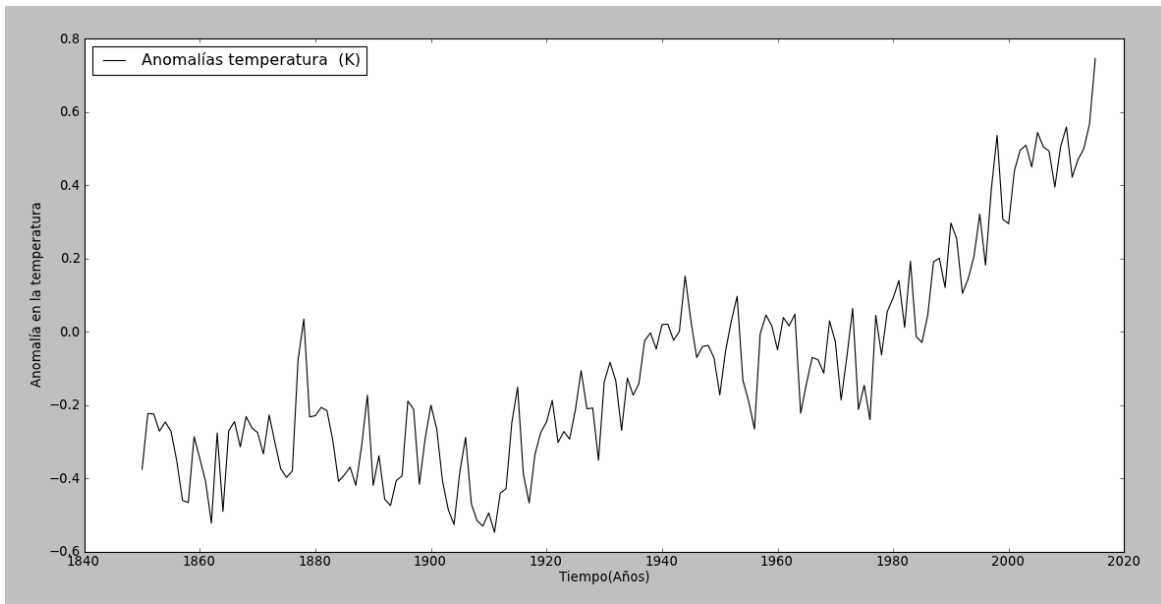


Figura 10. Anomalías en la temperatura media (Kelvin) frente al tiempo (años). Ha sido obtenida a partir de datos públicos contenidos en la página web <https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/temperature/HadCRUT4-gl.dat> [10].

En la Figura 10 queda evidenciado como la anomalía en la temperatura media (la temperatura media usual es de 289.15 K) ha tenido un aumento especialmente pronunciado a partir de la década de 1970 hasta la actualidad. Aunque se observa una fluctuación en la anomalía media en el pasado, ésta se ha hecho positiva desde la década de los 90 lo que sugiera que existe un aumento en la temperatura de forma gradual.

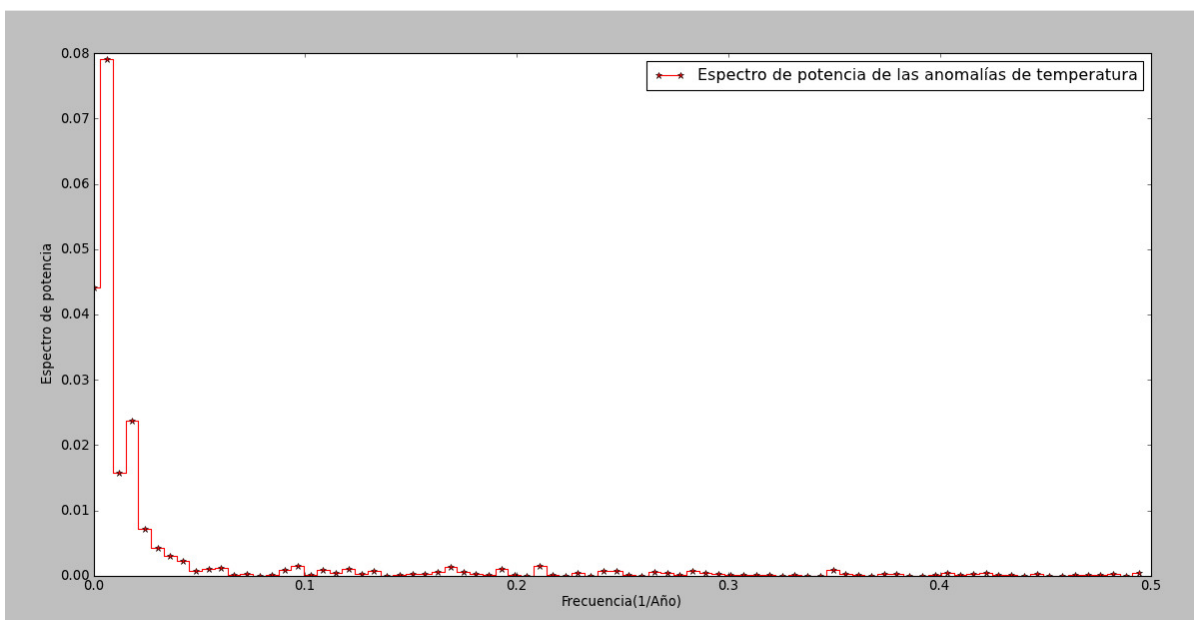


Figura 11. Espectro de potencia de las anomalías de temperatura.

Frec.(ciclos/año)	Periodo (años)	Res. en periodo(años)	Potencia(K <sup>2</sup> )	Fase(rad)
0.006	166	170	0.079	1.59465
0.018	55	18	0.024	-2.69770

Tabla 7. Máximos del espectro de potencias de las anomalías de temperatura. De izquierda a derecha aparece la frecuencia (en ciclos por año), el periodo (en años), la resolución en periodo (en años), la potencia (en K<sup>2</sup>) y la fase (en radianes).

Una análisis de Fourier de esta señal nos muestra que hay dos máximos principales para las temperaturas: con potencias de 0.079 K<sup>2</sup> (amplitud de 0.28 K) y 0.024 K<sup>2</sup> (amplitud de 0.15 K) para periodos de 166 años y 55 con una resolución de 170 y 18 años respectivamente. No hay ninguna correspondencia con los periodos solares de 11 años y de 22 años descritos con anterioridad. Añadir que el primer máximo corresponde a la variación general de la señal analizada.

Nos interesa ver qué cambios podemos apreciar periodos próximos a 11 años (correspondiente a una frecuencia de 0.091 años aproximadamente). Para conseguir este objetivo seguimos el siguiente procedimiento. Primeramente ajustamos un polinomio de grado 3 a las anomalías de temperatura anuales tal y como se muestra en la Figura 12. Para ello usamos la función *polyfit* de *numpy*.

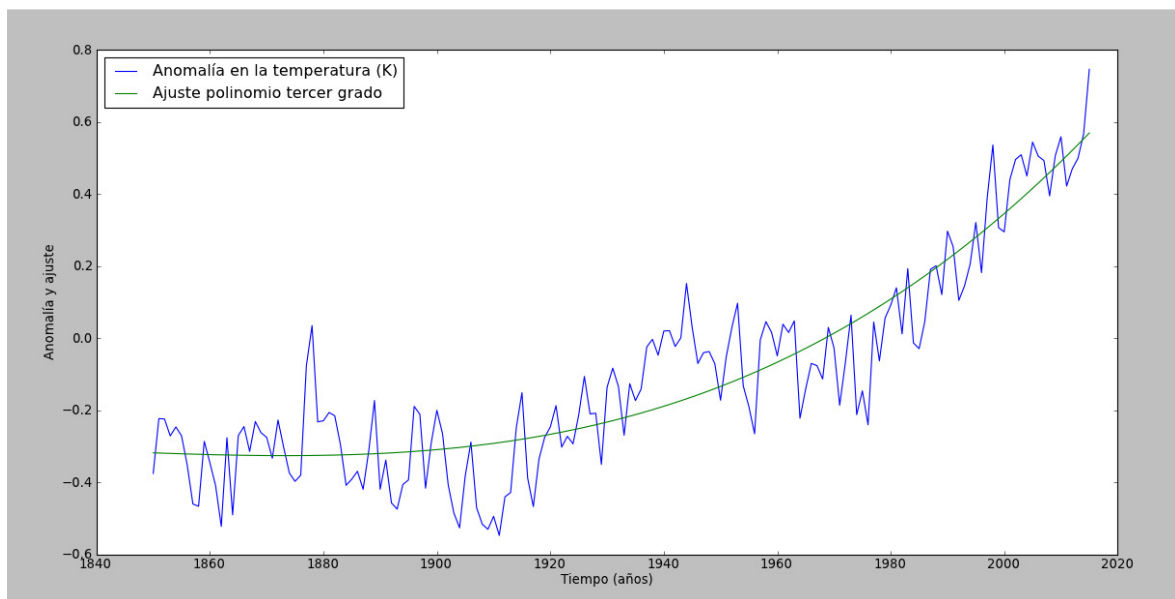


Figura 12. Anomalía en la temperatura (en azul) y el polinomio de tercer grado ajustado por mínimos cuadrados.

Ahora hacemos la diferencia entre los datos reales de la anomalía de la temperatura menos el ajuste del polinomio de tercer grado. De este modo, cuando ahora presentemos el espectro de potencia de la diferencia podremos observar mejor los máximos en torno a la frecuencia de  $0.091 \frac{1}{\text{años}}$  al haberle extraído los picos mayores del espectro de potencias de la Figura 11. Dicho espectro de potencias se muestra en la Figura 13.

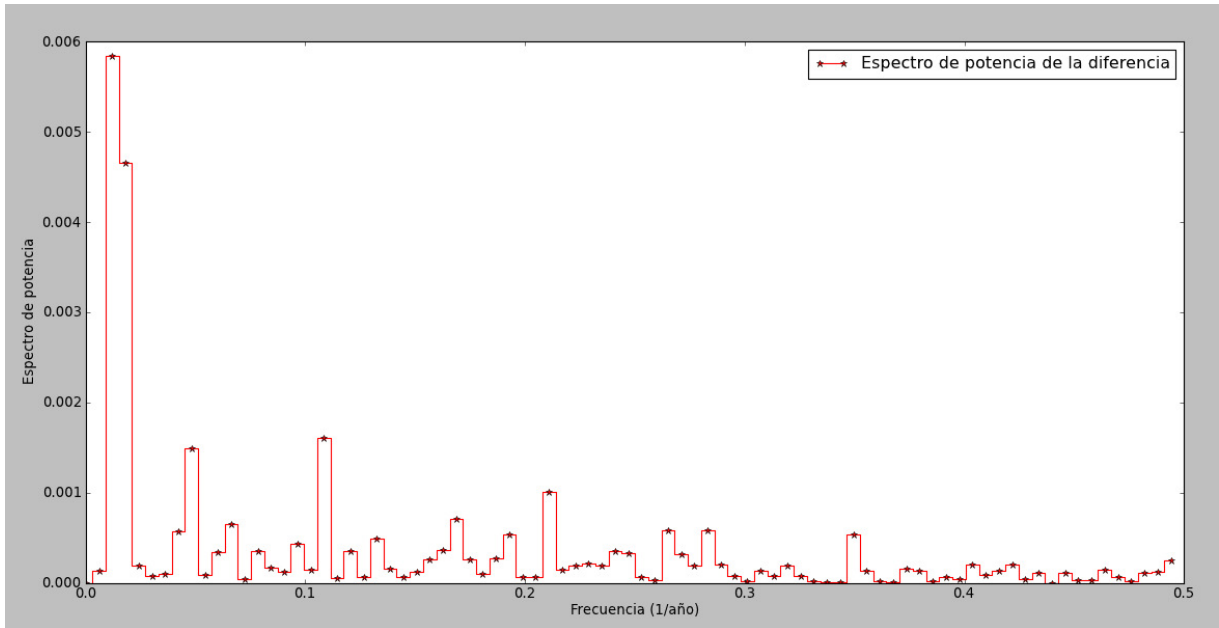


Figura 13. Espectro de potencia de la diferencia entre las anomalías en la temperatura global media y polinomio de grado 3 ajustado (ver Figura 12).

Ahora se ofrecen los máximos del espectro de potencias de la Figura 13.

Resolución en frecuencia: 0.006 ciclos/año  
Tolerancia picos:0.00012

Frec.(ciclos/año)	Periodo(años)	Res. en periodo(años)	Potencia(K <sup>2</sup> )	Fase(rad)
0.012	80	40	0.0058	-0.70405
0.048	21	3	0.0015	-2.20574
0.066	15.1	1.4	0.0006	-0.86644
0.078	12.8	1.0	0.0004	-1.17890
0.096	10.4	0.6	0.0004	2.08728
0.108	9.2	0.5	0.0016	-0.48765
0.120	8.3	0.4	0.0004	2.41249
0.133	7.5	0.3	0.0005	-2.93627
0.169	5.93	0.21	0.0007	1.82846
0.193	5.19	0.16	0.0005	2.05829
0.211	4.74	0.14	0.0010	1.32824
0.241	4.15	0.10	0.0004	2.45835
0.265	3.77	0.09	0.0006	-2.04683
0.283	3.53	0.08	0.0006	1.19892
0.319	3.13	0.06	0.0002	0.40920
0.349	2.86	0.05	0.0005	2.72132
0.373	2.68	0.04	0.0002	-2.66650
0.404	2.48	0.04	0.0002	3.08415
0.422	2.37	0.03	0.0002	-3.11865
0.464	2.16	0.03	0.0001	0.30049

Tabla 8. Máximos del espectro de potencia de la diferencia. De izquierda a derecha aparece la frecuencia (en ciclos por año), el periodo (en años), la resolución en periodo (en años), la potencia (en K<sup>2</sup>) y la fase (en radianes).

En primer lugar para una frecuencia de  $0.012 \frac{1}{\text{años}}$  correspondiente a un periodo de 80 años tenemos un pico de  $0.0058 \text{ K}^2$ . Si hacemos la raíz cuadrada tenemos una amplitud de  $0.076 \text{ K}$  (Kelvin).

En segundo lugar para una frecuencia de  $0.048 \frac{1}{\text{años}}$  correspondiente a un periodo de 21 años (que tiene una resolución en periodo de 3 años) tenemos un pico de  $0.0015 K^2$ . Si hacemos la raíz cuadrada tenemos una amplitud de  $0.039 K$  (Kelvin). para un periodo que puede corresponderse con el de 22 años del ciclo solar completo, incluyendo polaridad magnética.

En tercer lugar para una frecuencia de  $0.108 \frac{1}{\text{años}}$  correspondiente a un periodo de 9.2 años (que tiene una resolución en periodo de 0.5 años) tenemos un pico de  $0.0016 K^2$ . Si hacemos la raíz cuadrada tenemos una amplitud de  $0.04 K$  (Kelvin). para un periodo que puede corresponderse con el de 11 años de variación de la cantidad de manchas solares.

Asimismo, se puede ver que para una frecuencia de  $0.211 \frac{1}{\text{años}}$  correspondiente a un periodo de 4.74 años tenemos un cuarto pico destacable de  $0.0010 K^2$ . Si hacemos la raíz cuadrada tenemos una amplitud de  $0.032 K$  (Kelvin) que no coincide con ningún periodo de la actividad solar.

Así pues el efecto debido a los ciclos solares es de aproximadamente una décima parte de los máximos encontrados en el espectro de potencias de la Figura 11. Podríamos decir que aunque se aprecian cambios en periodos cercanos al ciclo solar, estos no han tenido una gran repercusión en el intervalo de tiempo desde 1850 hasta 2015 donde ha habido más de  $1 K$  de variación en la anomalía media global de temperaturas.



## **CAPÍTULO 5. RELACIÓN ENTRE LOS DATOS SOLARES Y LOS TERRESTRES.**

### **SUMMARY.**

Using the function of correlation between geomagnetic indices and sunspots one can see which of the two events occurs earlier. Considering that the geomagnetic indices show similar power spectra, it is enough to analyze one of them (in this case Aa) to make an analysis of correlation between geomagnetic indices and sunspots.

We found that the index Aa varies approximately 432 days before the variation of sunspots. Therefore one could possibly use the index Aa as a predictor of the cycle of solar activity.

The correlation between the average temperature anomaly in the overall and sunspots is also made. No relationship cause and effect between the number of sunspots and the anomaly in global mean temperature can be made.

## 5.1. CORRELACIÓN ENTRE LOS ÍNDICES GEOMAGNÉTICOS Y LAS MANCHAS SOLARES.

Por medio de la función *correlate* de *scipy* de *Python* tal y como se indica en el apartado 2.2. podemos obtener la función de correlación entre los índices geomagnéticos y el número de manchas solares. Hay que señalar que como quiera que el índice Aa se calcule a partir de K, podemos deducir que estos dos índices están correlacionados. Es más, se comprobó en el apartado 4.1. que a su vez los tres índices geomagnéticos (Aa, Ap y K) descritos tienen un pico con el mismo periodo de 11 años (coincidente con el periodo de variabilidad de las manchas solares). Así pues nos basta en este apartado con poner la correlación entre uno de los índices cualquiera (función x) con las manchas solares (función y).

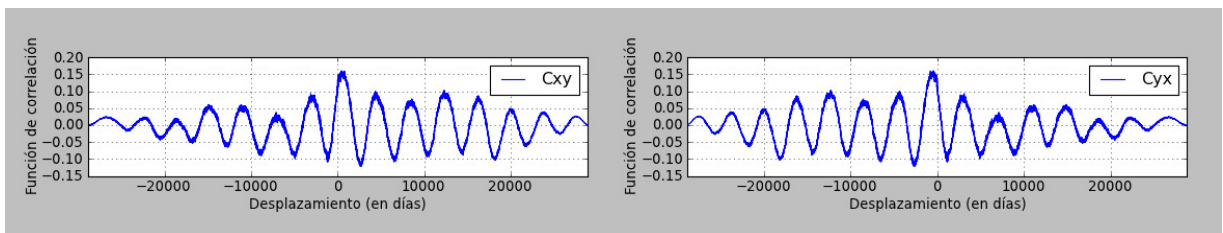


Figura 14. Correlación índice Aa-manchas solares. Las funciones de correlación se disponen de la siguiente manera:  $C_{xy}$  es el desplazamiento del espectro del índice Aa sobre el espectro de las manchas solares y  $C_{yx}$  es el desplazamiento del espectro de las manchas solares sobre el índice Aa.

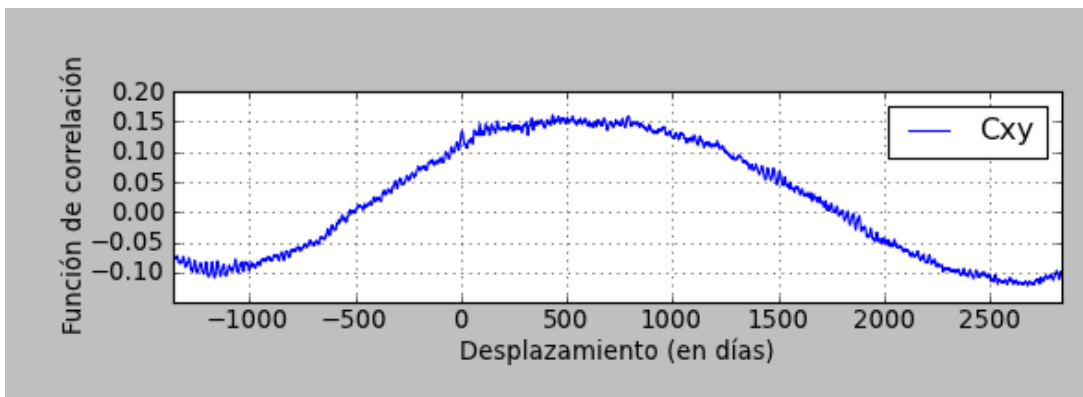


Figura 15. Ampliación de la Figura 14 (izquierda) donde puede verse el desplazamiento del espectro del índice Aa sobre el espectro de las manchas solares entorno al máximo.

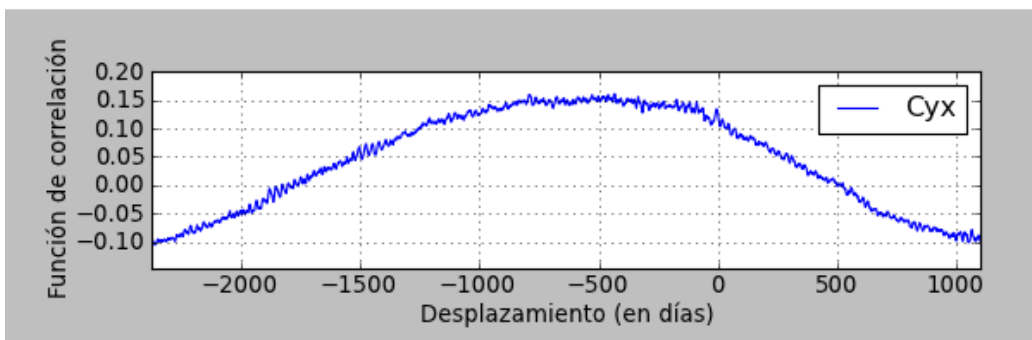


Figura 16. Ampliación de la Figura 14 (derecha) del desplazamiento del espectro de las manchas solares sobre el espectro del índice Aa entorno al máximo.

En la Figura 15 tenemos que el máximo determinado a partir del punto central de la correlación cruzada (origen del desplazamiento) tiene un lag positivo de 432 días (1.2 años aproximadamente) y dicho máximo vale 0.16. Esto nos indica que el índice Aa varía 432 días antes de la variación de las manchas solares. Por otro lado, en la Figura 16 tenemos que el máximo se encuentra en un desplazamiento de -432 días de valor 0.16. Esto nos permite corroborar que el índice Aa adelanta 432 días aproximadamente antes que la variación de las manchas solares (tengamos en cuenta que ahora hemos desplazado el espectro de las manchas solares sobre el espectro del índice geomagnético).

Se ve por las gráficas que cuando hay cambios en los índices geomagnéticos, esto se refleja en un lapso de tiempo de aproximadamente 1.2 años en cambios en la cantidad de manchas solares.

## 5.2. CORRELACIÓN ENTRE LAS ANOMALÍAS EN LA TEMPERATURA MEDIA TERRESTRE Y LAS MANCHAS SOLARES.

Aquí vamos a intentar resolver cuanto tiempo tarda en notar nuestro planeta cambios en la temperatura debido a la variación de las manchas solares. Para ello calculamos la correlación entre los espectros de la anomalía en la temperatura de la Figura 10 (función x) y las manchas solares (función y).

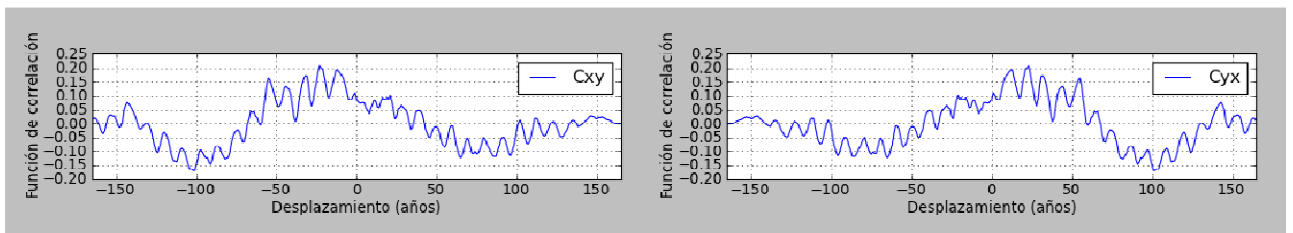


Figura 17. Correlación índice manchas solares-anomalía en la temperatura media global. Las funciones de correlación se disponen de la siguiente manera:  $C_{xy}$  es del desplazamiento del espectro de las manchas solares sobre el espectro de la anomalía en la temperatura y  $C_{yx}$  es el desplazamiento del espectro de la anomalía en la temperatura sobre el espectro de las manchas solares.

En la figura de la izquierda tenemos que el máximo determinado a partir del punto central de la correlación cruzada (origen del desplazamiento) tiene un lag negativo de -23 años y dicho máximo vale 0.21. Esto nos indica que aparece una variación en la cantidad de manchas solares 23 años después de una variación en la temperatura de la Tierra. Por otro lado, en la figura de la derecha tenemos que el máximo se encuentra en un desplazamiento de 23 años con un valor 0.21. Esto nos permite decir que en un principio no existe una relación causa-efecto entre la variación de manchas solares y la temperatura global terrestre. No obstante, se hace imprescindible un estudio estadístico de la significancia del valor de la correlación alcanzada de 0.21.

# CAPÍTULO 6. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS Y PROPUESTAS DE MEJORA FUTURAS.

## SUMMARY.

We found that although the peak of 11 years is present in both the Aa spectrum and the one of the number of sunspots, the Aa signal precedes the solar cycle in 15 months (1.25 years). Therefore, if this correlation is statistically significant Aa index could be used in predicting the solar activity cycle. This result agrees with the one found by others (see De Meyer [20]). In this chapter we discuss the results found in this work with others found in the literature.

We find opinions and studies of several scientists commenting on the Sun's influence on Earth's climate with contradictory conclusions.

In this work we see how effectively every 11 years there is a change in the variability of sunspots with a relative maximum at a time. This maximum is very small and that can not be the explanation of the observed variation in the Earth's temperature.

One of the future research lines that could arise from this TFG is through for example the study of solar irradiance and the use of the probability integral to improve the statistical interpretation of correlations. We also could improve the results using the Pearson product-moment correlation coefficient.

Such improvements could develop avenues of research to distinguish more accurately if anthropogenic influence outweighs or vice-versa solar activity on climate change.

## 6.1. DISCUSIÓN Y PROPUESTAS.

Encontramos como de acuerdo con Frans de Meyer, del Institut Royal Meteorologique de Belgique, que comenta en su trabajo del 2006, *The geomagnetic aa index as a precursor of solar activity*, que aunque el pico de 11 años en el espectro del índice Aa se corresponde con la línea de manchas solares en el tiempo, este índice precede en unos 15 meses (1.25 años) al ciclo solar [20]. Por tanto, si esta correlación es estadísticamente significativa el índice Aa podría emplearse en la predicción del ciclo de actividad solar. Por el contrario, no parece que exista un fenómeno de causa-efecto en este caso; o sí existe, los datos utilizados no lo manifiestan así.

Encontramos opiniones y estudios de científicos que comentan acerca de la influencia del Sol en el clima terrestre. Ahora bien dicha influencia es mayormente significativa para unos investigadores que para otros.

Por una parte, Eugene Parker, astrofísico solar cuya *alma mater* es la Michigan State University comenta en el año 2000 como desde 1860-80 el Sol ha aumentado su actividad hasta 1950 derivando en una tendencia al aumento de temperatura. Ahora bien, en aquel tiempo empezó a producirse CO<sub>2</sub> en la atmósfera cosa que no se hizo notable hasta 1950. A causa de ello, él comenta acerca de un antes y un después de 1950. Antes de esa fecha el aumento de la temperatura se podría explicar por el incremento en la actividad solar pero después de 1950 a causa de la nivelación de la actividad solar (no hubo cambios destacables en el Sol) la mayor parte del calentamiento se debe a la actividad humana [21].

Habibullo Ismailovich Abdusamatov, supervisor director del Laboratorio de Estudios Espaciales de San Petersburgo Observatorio de Púlkovo de la Academia de Ciencias de Rusia realizó la siguiente afirmación:

“el calentamiento global no resulta de la emisión de gases de efecto invernadero a la atmósfera, sino a partir de un nivel inusualmente alto de radiación solar y un largo, de casi todo el siglo pasado - crecimiento en su intensidad” [22].

Tal y como se puede deducir de la afirmación comentada en el párrafo anterior, contradice claramente que el aumento de la temperatura media terrestre sea debida a la influencia que el ser humano por medio de sus actividades entre las que se encuentra la emisión de CO<sub>2</sub>.

En este trabajo hemos podido comprobar cómo efectivamente cada 11 años se produce un cambio en la variabilidad de las manchas solares con un máximo relativo cada vez. Dicho máximo hemos visto que no puede ser el causante de la variación observada en la temperatura terrestre. La razón está en la inexistencia de una relación causa-efecto entre el número de manchas solares y la temperatura global terrestre ya que hemos obtenido que las variaciones en la temperatura terrestre ocurren 23 años antes de una variación en el número de Wolf.

Una de las consecuencias que se podrían derivar de este Trabajo de Fin de Grado es la mejora del mismo a través por ejemplo del estudio de la irradiancia solar así como del empleo de la integral de probabilidad para la mejora de la interpretación estadística de las correlaciones.

Se plantea que se podrían desarrollar vías de investigación para distinguir con mayor exactitud si la influencia antropogénica tiene más peso que la actividad solar o

viceversa en el cambio climático. Cuestión que cómo ya se ha comprobado tiene diversos tratamientos según importantes astrofísicos o instituciones de carácter gubernamental a nivel internacional.

Vivimos en una época que necesita encontrar una solución ante un problema que afecta a toda la humanidad cómo es el cambio climático y el claro aumento en la anomalía de la temperatura media global. Aunque es cierto que se presenta una amplia cantidad de investigadores que niegan la influencia de la actividad solar en el clima, existen importantes figuras a nivel científico que exponen lo contrario.

Personalmente, pienso que estamos ante un tema complejo que requiere un mínimo de rigurosidad y prudencia a la par que combina entrega y entusiasmo para encontrar los resultados que de verdad nos puedan ofrecer una descripción de nuestro futuro. El Sol es claramente nuestra fuente de energía esencial, sin la cual ni animales, plantas o humanos podríamos estar aquí y por otra parte la Tierra en estos momentos todavía es nuestra “vivienda”. Una vivienda habitable debe tener unas condiciones mínimas de limpieza y de aseo para que no desarrollemos infecciones o enfermedades. Se plantea pues, que ya que cómo individuos por regla general queremos que nuestra casa sea habitable, ello debe extrapolarse a las conciencias de todos (científicos, empresarios...) para que en el futuro no caigamos en el ocaso del deterioro de la raza humana.

También conviene no olvidar que estamos en ciencia y que solamente podemos creer en aquello que se ha demostrado. Por eso esa división de opiniones en torno a un tema de tal importancia como el cambio climático debe desaparecer para garantizar un pronóstico real sobre qué enfrenta la humanidad.

# CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES.

## SUMMARY.

In this TFG we have studied solar activity and its influence on the Earth starting from essentially the data of the SILSO of the sunspots between 1700 and 2015 [9], the data of the geomagnetic indices of the NOAA [15], [16] and the data of the global temperature anomaly [10]. The following conclusions have been reached:

- a) The maximum occur in the occurrence of sunspots (Wolf number) in cycles of approximately 11 years. Specifically we have obtained a peak with a period of 10.9 years, a resolution in a period of 0.4 years and a power of 1670.44.
- b) We have been able to verify that the frequency or period of the cycle of solar activity is not constant neither in period or in amplitude.
- c) Geomagnetic indices show cycles similar to those of sunspots. It follows that between the occurrence of sunspots and variations in the earth's geomagnetic field are related.
- d) Using the cross correlation between the Wolf number and the index the geomagnetic index Aa is obtained that the latter varies 1.2 years before the variation of the sunspots. Therefore the relationship is not a simple cause effect and we must think of a complex relation of phenomena between them. However, it is possible that it can be used as a predictor of the solar activity cycle.
- e) There is no cause-effect relationship between the number of sunspots and global terrestrial temperature.

## 7.1. CONCLUSIONES.

En este Trabajo de Fin de Grado se ha estudiado la actividad solar y su influencia en la Tierra partiendo esencialmente de los datos del SILSO de las manchas solares entre 1700 y 2015 [9], de los datos de los índices geomagnéticos del NOAA [15], [16] y de los datos de la anomalía global de la temperatura [10]. Se ha llegado a las siguientes conclusiones:

- a) Se producen los máximos en la aparición de las manchas solares (número de Wolf) en ciclos de aproximadamente 11 años. Concretamente hemos obtenido un pico con un periodo de 10.9 años, una resolución en periodo de 0.4 años y una potencia de 1670.44.
- b) Hemos podido comprobar que la frecuencia o periodo del ciclo de actividad solar no es constante ni en periodo ni en amplitud.
- c) Los índices geomagnéticos muestran ciclos parecidos al de las manchas solares. De ello se puede deducir que entre la aparición de las manchas solares y las variaciones en el campo geomagnético terrestre están relacionados.
- d) Utilizando la correlación cruzada entre el número de Wolf y el índice el índice geomagnético Aa se obtiene que este último varía 1.2 años antes de la variación de las manchas solares. Por lo tanto la relación no es sencilla de causa efecto y debemos pensar en una compleja relación de fenómenos entre ellos. No obstante, cabe la posibilidad de que se pueda utilizar como predictor del ciclo de actividad solar.
- e) No existe una relación causa-efecto entre el número de manchas solares y la temperatura global terrestre.



## BIBLIOGRAFÍA.

- [1] (06/2016) HATHAWAY, D.H., *The Solar Cycle*, Living Rev. Solar Phys., 7, 1: <http://solarphysics.livingreviews.org/Articles/lrsp-2010-1/download/lrsp-2010-1Color.pdf>
- [2] (05/2016) Transformada de Fourier, Wikipedia: [https://es.wikipedia.org/wiki/Transformada\\_de\\_Fourier](https://es.wikipedia.org/wiki/Transformada_de_Fourier)
- [3] (05/2016) ORAN BRIGHAM, E., *The fast Fourier transform and its application* (1988), Prentice Hall
- [4] (05/2016) BILLAUER, Eli, *Peakdet*: <http://www.billauer.co.il/peakdet.html>
- [5] (05/2016) Correlación cruzada, Wikipedia: [https://es.wikipedia.org/wiki/Correlaci%C3%B3n\\_cruzada](https://es.wikipedia.org/wiki/Correlaci%C3%B3n_cruzada)
- [6] (05/2016) La observación diaria del Sol, La actividad solar, Astrogea: [http://astrogea.org/divulgacio/sol\\_activitat.htm](http://astrogea.org/divulgacio/sol_activitat.htm)
- [7] (05/2016) CASADO, J.C. and SERRA-RICART, M., *Actividad 6.- Seguimiento de la Actividad Solar*. Disponible en: <http://www.iac.es/adjuntos/www/actividad-solar.pdf>
- [8] (05/2016) Yearly Average Sunspot Numbers by NASA: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ssn\\_yearly.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ssn_yearly.jpg)
- [9] (05/2016) Página web con el número de manchas solares anual desde 1700 hasta ahora: [http://sidc.oma.be/silso/DATA/SN\\_y\\_tot\\_V2.0.txt](http://sidc.oma.be/silso/DATA/SN_y_tot_V2.0.txt)
- [10] (05/2016) Página web con los datos con la anomalía global de la temperatura entre 1850 y 2015: <https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/temperature/HadCRUT4-gl.dat>
- [11] (05/2016) BARTESLS, J., HECK, N.H. & JOHNSTON, H.F., *The Three-hour-range index measuring geomagnetic activity* (1939), TeMAE, 44, 4M.
- [12] (05/2016) Página web con la descripción de los datos del fichero “apindex”: [ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/GEOMAGNETIC\\_DATA/APSTAR/apindex.fmt](ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/GEOMAGNETIC_DATA/APSTAR/apindex.fmt)
- [13] (05/2016) Major magnetic Storms 1868-2007 According to the AA\*criteria, NOAA <https://www.ngdc.noaa.gov/stp/geomag/aastar.html>
- [14] (05/2016) Major magnetic Storms 1932-2007 According to the Ap\* Criteria: <https://www.ngdc.noaa.gov/stp/geomag/apstar.html>
- [15] (04/2016) Página web con los datos con los índices geomagnéticos Kp, Ap y de las manchas solares de forma diaria desde 1932 hasta 2007: [ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/GEOMAGNETIC\\_DATA/APSTAR](ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/GEOMAGNETIC_DATA/APSTAR)

- [16] (04/2016) Página web con los datos con el índice geomagnético Aa de forma diaria desde 1868 hasta 2011: [ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/GEOMAGNETIC\\_DATA/AASTAR](ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/GEOMAGNETIC_DATA/AASTAR)
- [17] (05/2016) ¿Qué es el calentamiento global?, Cambioclimate.com: <http://cambioclimateglobal.com/que-es-el-calentamiento-global>
- [18] (05/2016) ¿Cómo sabemos que el CO<sub>2</sub> produce calentamiento?: <http://www.skepticalscience.com/translation.php?a=133&l=4>
- [19] (05/2016) “Cambio climático 2014, Impactos, adaptación y vulnerabilidad. Resumen para responsables de políticas”, IPCC: [https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg2/ar5\\_wgII\\_spm\\_es.pdf](https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg2/ar5_wgII_spm_es.pdf)
- [20] (06/2016) DE MEYER, F., *The geomagnetic index Aa as a precursor solar activity* (2006), Royal Meteorological Institute: [http://www.meteo.be/meteo/download/de/520427/pdf/rmi\\_scpub-1117.pdf](http://www.meteo.be/meteo/download/de/520427/pdf/rmi_scpub-1117.pdf)
- [21] (06/2016) Euroconferencia “*The Solar Cycle and Terrestrial Climate*”, 25-30 de septiembre, Santa Cruz de Tenerife, año 2000: <http://www.iac.es/gabinete/iacnoticias/2-2000/16.pdf>
- [22] (06/2016) *Russian academic says CO2 not to blame for global warming*, Russia, RIA Novosti, (15 de enero de 2007).