



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE CIENCIAS

MODOS NORMALES DEL CICLO SOLAR

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

F Í S I C O

P R E S E N T A:

JOSÉ ANTONIO BORRAS GUTIÉRREZ



**DIRECTOR DE TESIS:
DRA. ANA LEONOR RIVERA LÓPEZ
2016**

Ciudad Universitaria, CDMX



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

*In science it often happens that scientists say: «You know
»that's a really good argument; my position is mistaken», and then they
would actually change their minds and you never hear that old view from
them again. They really do it. It doesn't happen as often as it should,
because scientists are human and change is sometimes painful. But it
happens every day. I cannot recall the last time something like that
happened in politics or religion.*

— Carl Sagan

AGRADECIMIENTOS

Investigación realizada gracias al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT) de la UNAM «IN10621» «Influencia de la actividad humana en el clima terrestre». Agradezco a la DGAPA-UNAM la beca recibida.

A la UNAM y a la Facultad de Ciencias por todos los conocimientos adquiridos y por la formación profesional que recibí de ellas.

En especial quiero agradecer a la Dra. Ana Leonor Rivera López por el apoyo recibido de su parte, así como por todo el esfuerzo y tiempo que dedicó para guiar la elaboración de este escrito.

A Ferrara Vázquez Martínez y a Juan Claudio Toledo por su invaluable apoyo y por haber contribuido de manera desinteresada con este proyecto.

A mis hermanos: Héctor y Tavo, a mis amigos, familia y seres queridos que hacen que valga la pena.

A mis padres. Esta meta se la dedico a ellos. Estoy profundamente agradecido por todo lo que han hecho por mí y por mis hermanos, y por el ejemplo que nos han dado.

RESUMEN

El Sol presenta variaciones en su actividad desde estadios quietos hasta momentos de grandes emisiones de material que afectan múltiples fenómenos terrestres. Para estudiar dicha actividad existen diversos indicadores que son el tema del presente trabajo. Entre los indicadores solares se recopilaron datos del número de manchas solares, el flujo solar a 10.7 cm, las llamaradas solares, el índice coronal, la irradiancia solar total, el Mg II, el área ocupada por manchas; índices geomagnéticos como Kp, Ap, aa, el índice auroral y otras mediciones terrestres. Todos los índices solares tienen una gran correlación entre ellos, con lo que se justificó utilizar el número de manchas solares como el indicador característico de la actividad solar. Se encontró que los índices geomagnéticos también tienen una alta correlación con la actividad solar, siendo el mejor Kp (con 0.82 de correlación con el número de manchas solares). Aunque en la literatura, es común el uso de la composición de núcleos de hielo de las capas polares y el ancho de los anillos de los árboles como índices de la actividad solar, en este trabajo se muestra una correlación baja de estos índices con el número de manchas solares. Para entender el ciclo de actividad solar se analizó el número de manchas solares en el dominio del tiempo, de la frecuencia y usando la técnica de descomposición en valores singulares (SVD) para encontrar sus modos normales. Actualmente estamos en el ciclo solar número 24. Los ciclos duran (10.7 ± 2.2) años. El ciclo más largo fue el 4 con 13.8 años y el más corto el 2 de tan solo 9.1 años. En promedio el máximo se alcanza a los (4.3 ± 1.1) años con una intensidad de (114 ± 40) manchas. El ciclo que más rápido ha llegado a su máximo es el 4 y el que ha crecido más lentamente el 7. El más intenso fue el 19 y el más débil el 6. En un ciclo solar típico hay (560 ± 250) días sin manchas. El ciclo con menos días sin manchas fue el 22 y el que tuvo mayores días sin ellas fue el 14. El espectro de los ciclos tiene una componente principal de frecuencia con una periodicidad de casi 11 años y un brusco decaimiento.

Uno de los fenómenos característicos de la actividad solar son las llamaradas solares. Aquí también se estudio usando SVD la transición de fase en imágenes del disco solar que presentan llamaradas solares. De los scree plots que arroja este último examen los mejores resultados dan una pendiente de -2.70 ± 0.09 para antes de que ocurra la llamarada, y de -2.574 ± 0.009 durante el curso de dicho fenómeno.

ABSTRACT

The Sun has variations in activity from quiet moments to high emissions activity that can affect multiple terrestrial phenomena. To study this activity there are several indicators that are the subject of this paper. Among the solar indicators compiled in this work are sunspot number, solar flux at 10.7 cm, solar flares, coronal index, total solar irradiance, Mg II, area occupied by spots; geomagnetic indices as Kp, Ap, aa, the auroral index and other terrestrial measurements. All solar indices have a high correlation between them, so it was validated to use the sunspot number as the characteristic indicator of solar activity. It was found that geomagnetic indices also have a high correlation with solar activity, being the best Kp (0.82 correlation with the sunspot number). Although in the literature, it is common to use the composition of ice cores from the polar caps and the width of tree rings as indices of solar activity, here is found a low correlation of these indices with the sunspot number. To understand the solar activity cycle, was analyzed the sunspot number in the time and frequency domains, and using the technique of singular value decomposition (SVD). We are currently in the solar cycle número 24. The cycles last (10.7 ± 2.2) years. Cycle 4 was the longest lasting 13.8 years, and cycle 2 was the shortest during only 9.1 years. On average the maximum is reached at (4.3 ± 1.1) years with an intensity of (114 ± 40) spots. Cycle 4 was the fastest, while cycle 7 was the slower. Cycle 19 was the most intense, and cycle 6 the weakest. In a typical solar cycle there is (560 ± 250) days without spots. Cycle 22 have the less spotless days, while cycle 14 had more days without sunspots. The spectrum of cycles has a main frequency component with a frequency of almost 11 years and a sharp decline. One of the characteristic phenomena of solar activity are solar flares. Here using SVD was studied the phase transition in the solar disk images that present solar flares. Scree plots give a slope of -2.70 ± 0.09 before a flare occurs, and 2574 ± 0.009 during the course of this phenomenon.

CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	1
2	ANTECEDENTES	3
2.1	La variabilidad del sol y sus parámetros asociados	3
2.1.1	Indicadores solares	3
2.1.2	Indicadores geomagnéticos	8
2.1.3	Otros indicadores terrestres	9
2.2	Técnicas de análisis	10
2.2.1	Correlación	10
2.2.2	Breve introducción a la técnica SVD	12
2.2.3	Los <i>scree diagrams</i> y su interpretación	13
3	OBJETIVO	15
4	MÉTODO	17
4.1	Recolección de datos	17
4.2	Comparación de los indicadores solares y terrestres a través de un análisis de correlación	17
4.3	Obteniendo los modos normales del ciclo solar	18
4.4	Análisis SVD en imágenes de llamaradas, una búsqueda de alerta temprana	19
5	RESULTADOS	23
5.1	Número de manchas e indicadores de la actividad solar.	23
5.1.1	Análisis de los ciclos de manchas solares	26
5.1.2	Las correlaciones de los datos solares	27
5.2	Indicadores Terrestres	29
5.3	Los modos normales de las manchas solares.	33
5.4	Modos normales en las imágenes de una llamarada solar.	36
5.4.1	Leyes de potencias en los <i>scree diagrams</i> .	36
5.4.2	La transición de una llamarada.	41
6	INTERPRETACIONES	43
7	CONCLUSIONES	45
	Apéndices	47
A	LISTA DE BOSQUES DE LOS DATOS DE ANCHO DE ANILLOS EN ÁRBOLES.	49
B	MÁS INFORMACIÓN SOBRE LAS IMÁGENES UTILIZADAS EN EL ESTUDIO DE LLAMARADAS.	51
C	PROGRAMAS DESARROLLADOS PARA EL ESTUDIO DE LOS DATOS.	55
	Referencias	57

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Promedios mensuales del flujo solar desde 1955 a 1995. Fuente: NOAA [5].	4
Figura 2	Imagen de manchas solares. Fuente SDO (http://sdo.gsfc.nasa.gov/data/)	5
Figura 3	Llamarada solar tomada con el instrumento AIA a 94 Angstroms. Imagen extraída con la herramienta http://heliviewer.org/ .	6
Figura 4	Observatorios geomagnéticos usados para la estimación del AE. Fuente: INGV [17]	9
Figura 5	Ejemplo de una gráfica de correlación $f(j)$ para dos funciones g y h como se define en Ec. 3 (correlación normalizada).	11
Figura 6	La línea de regresión reduce datos de dos dimensiones a una.	12
Figura 7	Descomposición SVD de una matriz A .	13
Figura 8	Secuencia de 4 imágenes de la misma región del disco solar provenientes del SDO (instrumento AIA), las imágenes son del 11/04/2013 y los horarios se indican en cada imagen. Las imágenes corresponden a la longitud de onda 094 Angstroms y fueron solicitadas en http://www.lmsal.com/get_aia_data .	19
Figura 9	Ejemplo de 3 matrices de 3×2 que se desdoblán formando la matriz M	20
Figura 10	Gráficas para los indicadores solares comparadas con el número de manchas.	23
Figura 11	Gráficas para los indicadores solares comparadas con el número de manchas.	24
Figura 12	Gráficas para los indicadores solares comparadas con el número de manchas.	25
Figura 13	Ciclos solares 4, 6, 7, 19, 22 y 23 en espacio real.	26
Figura 14	Análisis espectral de los ciclos 14, 19 y 22.	28
Figura 15	Gráfica simultánea del número de Wolf junto con (a) índice A_p (b) índice aa .	29
Figura 16	Gráfica simultánea del número de Wolf junto con (a) índice k_p (b) índice AE .	30
Figura 17	Gráfica del número de manchas y concentración de ^{18}O desde 1818 hasta 1997.	31

Figura 18	Gráfica del número de manchas y ancho de anillos en árboles en los bosques de USA y Rusia de 1819 a 1997. 32
Figura 19	Gráfica de la reconstrucción de la serie de número de manchas usando: (a) el primer modo (b) el segundo modo, (c) la suma de los 3 primeros modos y (d) la suma de los 5 primeros modos. 34
Figura 20	(a) Gráfica de la serie real del número de manchas (azul) emulada por la suma de los 5 primeros modos (ver Figura 19) y detrás el primer modo o tendencia general (k_1). (b) La diferencia entre la serie real del número de manchas y la serie reconstruida de los 5 primeros modos. 35
Figura 21	Scree Diagram resultado del análisis SVD del número de manchas. 35
Figura 22	Gráficas de y ajustes de recta para los datos de (a) preflare y (b) flare, de la llamarada del 11 de abril. 37
Figura 23	Gráficas de y ajustes de recta para los datos de (a) preflare y (b) flare, de la llamarada del 11 de abril. 38
Figura 24	Gráficas de y ajustes de recta para los datos de (a) preflare y (b) flare, de la llamarada del 11 de abril. 39
Figura 25	Gráficas de y ajustes de recta para los datos de (a) preflare y (b) flare, de la llamarada del 11 de abril. 40
Figura 26	Secuencia de resultados en el proceso de <i>ventanas</i> . 41
Figura 27	Información de la llamarada de abril. 51
Figura 28	Información de la llamarada de mayo. 52
Figura 29	Información de la llamarada de noviembre. 53
Figura 30	Información de la llamarada de diciembre. 54
Figura 31	Programa para calcular promedios de acuerdo a las rotaciones de Carrington. 55
Figura 32	Programa para descargar los archivos fts de manera automatizada. 55
Figura 33	Programa para calcular el SVD. 56

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Fechas y periodos de las imágenes sobre las cuales se obtiene el <i>scree plot</i> , los números entre paréntesis indican el total de imágenes del respectivo periodo. 21
Tabla 2	Características generales de los ciclos solares. 27
Tabla 3	Resumen de resultados para los <i>datos solares</i> . 28
Tabla 4	Resumen de resultados para los <i>datos geomagnéticos</i> . 30
Tabla 5	Resumen de resultados de análisis de correlación para los <i>datos de núcleos de hielo</i> . 32
Tabla 6	Resumen de resultados de análisis de correlación para los <i>anchos de anillos en árboles</i> . 33
Tabla 7	Resumen de resultados para los ajustes de recta. 36

ACRÓNIMOS

NOAA National Oceanic and Atmospheric Administration

SDO Solar Dynamics Observatory

AIA Atmospheric Imaging Assembly

SVD Singular Value Decomposition

TSI Irradiancia Solar Total

F107 Flujo solar a 10.7 cm

AE Auroral Electrojet

INGV Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia

SIDC Solar Influences Data Center

INTRODUCCIÓN

El Sol es una estrella con una actividad cíclica que pasa de estados donde hay pocas emisiones de material al exterior hasta momentos de grandes explosiones. Se ha tratado de relacionar este ciclo solar con fenómenos cíclicos de la Tierra, como el clima [1], la concentración de ozono en la estratosfera, las variaciones del contenido de partículas en la ionósfera, los períodos de lluvia y sequía, el crecimiento de los anillos de los árboles, las trazas de ^{14}C en la atmósfera, las perturbaciones geomagnéticas, las condiciones de propagación de onda corta, las comunicaciones vía satélite, las auroras boreales, etc. La potencia eléctrica de nuestras casas y negocios, las comunicaciones y los sistemas de navegación pueden sufrir interrupciones debidas a tormentas geomagnéticas causadas por variaciones del viento solar. Sin embargo, solo hay pruebas razonables de que en la Tierra las comunicaciones de onda corta y/o vía satélite parecen estar afectadas por las variaciones del flujo total de energía solar, por las intensas perturbaciones magnéticas y por cambios en el comportamiento del viento solar. Más aún, todavía no existe un modelo del Sol que permita predecir su actividad por lo que sigue siendo un tema de gran interés la descripción detallada del ciclo solar, tema central del presente trabajo.

Lo ideal sería contar con un modelo magnetohidrodinámico del sol que permitiera predecir su actividad. Sin embargo, las ecuaciones y modelos deterministas que existen, a pesar de ser bastante sofisticados, no incorporan todos los mecanismos que intervienen en el ciclo solar como la rotación diferencial del Sol, la circulación meridional, los movimientos convectivos de gran escala y la fusión termonuclear. Aunque se entiende el origen de la actividad solar global, no hay un modelo con el detalle necesario para establecer cuando habra o no una ráfaga solar [2].

Por ello se requiere otra perspectiva, que es más *estadística* u orientada al de procesamiento de señales y es el enfoque que se toma en este estudio.

Esta forma de atacar el problema es usual en la disciplina conocida como *sistemas complejos* y tiene la ventaja que permite inferir conclusiones generales de un sistema aún sin conocer de manera precisa los mecanismos que generan las señales típicas de dicho sistema. En particular, se utilizaron las técnicas de correlación y descomposición en valores singulares (SVD) para series de tiempo. Estas herramientas, aunque formales en su tratamiento matemático, tienen un

planteamiento sencillo y han probado ser útiles en distintas áreas de investigación[3].

El plan a seguir en este trabajo consiste primeramente en introducir algunos conceptos que son importantes para el ciclo solar, discutir los datos necesarios en el estudio y la procedencia de los mismos, así como las definiciones de las herramientas empleadas en el análisis de dichos datos. Se describirá entonces la metodología seguida, que consiste básicamente en cuatro partes: realizar la búsqueda de los datos de distintos observatorios y satélites, analizar la relación de distintas variables geofísicas con el número de manchas, calcular los modos normales que componen la serie del número de manchas y estudiar el comportamiento de las imágenes de una llamarada solar a través de la obtención de las gráficas conocidas como *scree diagrams*.

Posteriormente se presentan los resultados de los procedimientos y se discute su interpretación para finalmente recapitular señalando las conclusiones del proyecto.

ANTECEDENTES

2.1 LA VARIABILIDAD DEL SOL Y SUS PARÁMETROS ASOCIADOS

El Sol es una esfera de plasma en constante movimiento convectivo que tiene un diámetro de aproximadamente 110 veces el de la Tierra, cerca de 330,000 veces su masa y su temperatura en la corona es de millones de grados celsius. Dicho astro, es una estrella enana de color amarillo, miembro de uno de los más numerosos tipos de estrellas, las del tipo espectral G2. En su interior, la densidad y la presión son tan altas que alcanza una temperatura de 15 a 16 millones de grados, suficiente para que se produzcan reacciones nucleares que liberan energía. Con esto en mente, es fácil ver que la observación del sol no produce medidas estacionarias, sino que sus procesos de: convección, radiación, magnéticos, etc, dan lugar a toda una serie de complejos fenómenos a los que nos referiremos en su conjunto como actividad solar.

Tras la invención del telescopio se logró observar más a detalle la presencia de manchas puntuales en él y se comenzó a llevar un registro de este fenómeno. Con el surgimiento de nuevas tecnologías, satélites y mejores telescopios comenzaron a tomarse nuevas medidas de la actividad solar .

2.1.1 Indicadores solares

A pesar de su variabilidad, la mayoría de los parámetros que se usan para medir la actividad solar (en este trabajo se consideran el número de manchas solares, el área de las mismas, el índice coronal, el flujo solar, el MgII, la irradiancia total) exhiben una periodicidad de 11 años, en promedio. Una de las primeras personas en estudiar este ciclo es el alemán Heinrich Schwabe (1789-1875), nos referiremos a estas repeticiones como ciclos solares y consideraremos su duración de cerca 11 años; pues a veces se toma el período de ciclo de 22 años, cubriendo dos inversiones del campo del dipolo magnético solar. Una de las variables de la actividad solar donde esta periodicidad resulta más evidente es el flujo solar en una longitud de onda de 10.7 cm (*flujo solar 10.7 cm*); como se observa en la Figura 1.

Flujo Solar 10.7cm

El flujo solar 10.7 cm (Figura 1) también conocido como índice $F_{10.7}$ es una medida que corresponde a la radiación proveniente del sol si se tiene un sistema de radar operando a 2800MHz; es decir, a una lon-

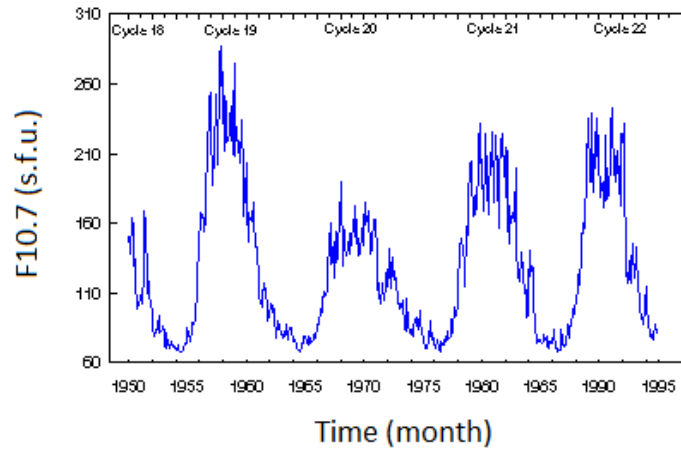


Figura 1: Promedios mensuales del flujo solar desde 1955 a 1995. Fuente: NOAA [5].

gitud de onda de 10.7cm. El índice F10.7 esta dado en unidades de flujo solar o sfu ($1\text{sfu} = 10^{-22}\text{m}^{-2}\text{Hz}^{-1}$). Las primeras mediciones se realizaron en Ottawa y los registros que se utilizaron en este trabajo abarcan desde febrero de 1947 a diciembre de 2014. Los datos de 1947 a 1996 son publicados por The National Research Council of Canada (NRC) [6], mientras que los valores del índice F10.7 que abarcan de 1996 a 2014 se obtuvieron del National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) [7].

El flujo solar es un indicador confiable de la actividad solar pues, a diferencia de otros indicadores, este no está sujeto a efectos subjetivos ni se ve afectado por el clima. Sin embargo, para hacer un buen análisis del comportamiento solar se requiere del mayor número posible de ciclos y el flujo solar sólo cuenta con aproximadamente 6 ciclos. Esta medición es relativamente reciente, pues viene de la radioastronomía pero existen otras como el *número de manchas* que tienen registros más antiguos y que podrían extender temporalmente nuestro análisis del ciclo solar.

Manchas Solares

Las primeras mediciones que se hicieron de la actividad solar vinieron tras la invención del telescopio. Si se observa la superficie solar se pueden ver regiones más oscuras que se van trasladando con los días y que se conocen como *manchas solares*(ver Figura 2).

Las manchas son regiones oscuras de la fotosfera, en donde el campo magnético es muy intenso (puede llegar a unos 4 000 gauss en manchas de gran tamaño). La presencia del campo magnético inhibe la circulación de material y las colisiones entre los componentes del mismo, por lo que el gas es varios miles de grados más frío que los

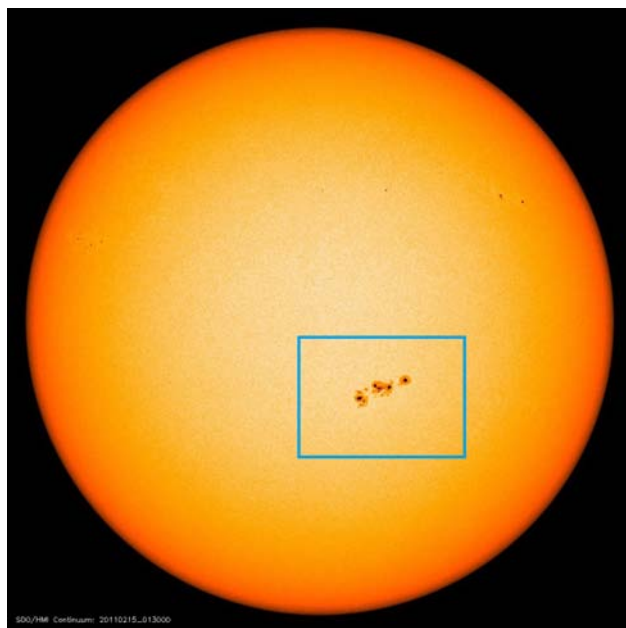


Figura 2: Imagen de manchas solares. Fuente SDO (<http://sdo.gsfc.nasa.gov/data/>)

alrededores y, por tanto, radia menos hacia el espacio, de ahí que se vean oscuras en contraste con su entorno más brillante. Las manchas solares generalmente crecen por varios días y duran desde varios días hasta varios meses. Las observaciones de las manchas solares revelaron primero que el Sol rota en un período de 27 días (visto desde la Tierra), y que el Sol tiene una rotación diferencial, las regiones ecuatoriales del Sol rotan más rápido (tardando solo 25 días) que las regiones polares (que rotan una vez cada 35 días). El número de manchas solares en el Sol no es constante, y cambia de acuerdo al ciclo de actividad solar.

Las manchas solares no son constantes, aparecen y mueren en cuestión de unos días y su conteo diario fue realizado esporádicamente por algunos astrónomos; pero no es sino hasta que el astrónomo sueco Rudolf Wolf idea en 1848 un sistema para el conteo de manchas solares, que se comienza un registro sistemático y diario de conteo con este sistema. Esta forma de conteo se conoce como el número de Wolf y se realiza con la siguiente expresión:

$$W = k(10g + f) \quad (1)$$

Donde:

- W es el número relativo de manchas (o número de Wolf)
- f es el número de manchas individuales
- g es el número de grupos de manchas solares
- k es un factor de escala variable

Los registros del número de Wolf se han continuado hasta la fecha. El número de manchas solares de Boulder es calculado por el NOAA Space Environment Center combinando los datos de varios observatorios para reportar un valor diario en el sitio de *Space Weather* [8]. Este índice está 25 % arriba del *número de manchas internacional* publicado diariamente por el Sunspot Index Data Center (SIDC) en Bélgica, que incorpora los datos de otros observatorios [9]. En este trabajo se utiliza el número de manchas internacional. De acuerdo a estos registros de manchas solares contamos con información de aproximadamente 24 ciclos solares. Para este estudio también hemos considerado número de manchas del hemisferio solar norte (R1) y del hemisferio solar sur (R2), obtenidos también del SIDC [9].

Área de manchas

Cuando se observan las manchas solares no sólo es posible hacer el conteo usando el número de Wolf u otro sistema; también se puede medir el área total de las manchas con respecto a su hemisferio. Para este parámetro, al igual que para el de llamaradas solares, se dispuso de los datos de NOAA en [7].

Llamaradas solares

Las llamaradas solares son destellos repentinos en la superficie solar (ver Figura 3). Cuando se detecta una llamarada solar, esta puede ser clasificada de acuerdo con su flujo de energía pico (medido en W/m^2) como A, B, C, M, o X. Las ráfagas son un fenómeno explosivo que se da en las llamadas regiones activas, regiones situadas sobre grupos de manchas en donde las líneas del campo magnético son cerradas, siendo éste muy intenso (varios miles de gauss) y sumamente complejo. Estas regiones corresponden a las zonas brillantes que se observan en las fotografías de rayos X. La razón de que sean tan brillantes es que contienen material a temperaturas sumamente altas que emiten rayos X.

En una ráfaga se libera una gran cantidad de energía en un tiempo

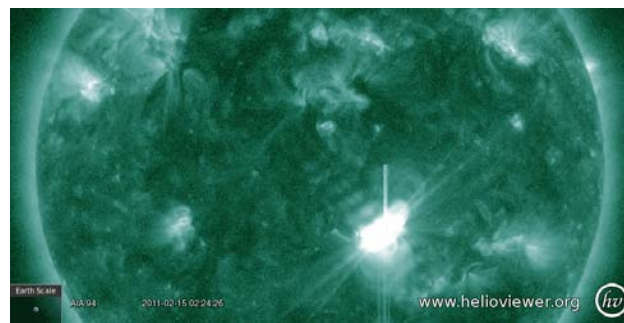


Figura 3: Llamarada solar tomada con el instrumento AIA a 94 Angstroms. Imagen extraída con la herramienta <http://heliviewer.org/>.

muy corto (hasta una décima parte de toda la energía que emite el Sol cada segundo, la cual es a su vez equivalente a unas cien millones de bombas H de 100 megatonnes cada una). La energía de una ráfaga nos llega a la Tierra en forma de radiación, partículas de alta energía y plasma rápido (1 000 km/s en lugar de los 450 km/s del viento solar normal).

Índice Coronal

El índice de actividad coronal mide la energía total emitida por la capa de la atmósfera más exterior del sol (la corona) a una longitud de onda de 530.3 nm. Los datos que se emplearon fueron registrados por el observatorio solar ubicado en el Pico de Lomnický de la República Eslovaca [10].

Irradiancia solar total

Una medida menos usual, pues no se considera tan variable como el resto, para la actividad solar es la *Irradiancia total solar* (TSI). La irradiancia es la potencia por unidad de área producida por el sol en forma de radiación electromagnética. La irradiancia puede ser medida en el espacio o en la superficie de la Tierra después de la absorción y dispersión de la atmósfera. La TSI es una medida de la potencia que incide en ángulo normal la superficie de la atmósfera terrestre. De aquí que sus unidades sean los watt sobre metro cuadrado ($\frac{W}{m^2}$). Como ya se dijo, las oscilaciones de esta medida son menos pronunciadas a comparación con otras medidas como el flujo solar por lo que se define a la *constante solar* como la TSI promedio, su valor es de $1366 \frac{W}{m^2}$. La serie utilizada de TSI en el análisis de datos es una serie de tiempo compuesta que fue construida en (Fröhlich, 1998) con la combinación de datos de los satélites Nimbus7 ERB y ACRIM1,2 y 3) [12].

Mg II

Desde mediados del siglo pasado, con la introducción del uso de satélites es posible medir con precisión, líneas espectroscópicas características de diferentes elementos presentes en la cromosfera del Sol. Entre ellas, la que muestra más claramente es la de Mg II. La proporción de Mg II se puede cuantificar usando el cociente de las líneas cromosféricas solares h y k que se encuentran entre 278 nm y 282 nm. Este cociente (MgII) es una medida robusta de la actividad cromosférica y ha mostrado ser una buena medida de las emisiones UV y EUV solares. Los datos que se trabajaron provienen de [16].

2.1.2 *Indicadores geomagnéticos*

El campo magnético de la Tierra presenta una serie de variaciones, como aquéllas asociadas al hecho de que el eje del dipolo no coincide con el de la rotación de nuestro planeta (principalmente la variación secular o de muy largo periodo), o como aquéllas debidas a variaciones en el sistema de corrientes eléctricas que fluyen en el interior de la Tierra. Hay igualmente variaciones debidas a la interacción del viento solar con el campo geomagnético, la cual da origen a algunas variaciones como la de 27 días, asociada a la rotación del Sol, y otras asociadas con la actividad solar. Además, se dan variaciones asociadas con el paso por la Tierra de un haz de viento solar de alta velocidad (dos o tres veces más rápido que el normal) generado en un hoyo coronal, y otros eventos de tipo explosivo como una ráfaga. Para monitorear las variaciones del campo geomagnético se mide una serie de índices, en los observatorios de todo el mundo. Los diferentes índices corresponden a diferentes parámetros relacionados con el estado del campo geomagnético.

Índices geomagnéticos Kp y Ap

Los índices geomagnéticos K miden los efectos de partículas solares en el campo magnético terrestre. Es una clasificación del rango de variación de la componente horizontal de campo más inestable en alguno de los 28 *niveles de perturbación*. Cada nivel de actividad se relaciona de manera prácticamente logarítmica a su correspondiente amplitud de la perturbación. Por su parte, el índice A varía de 0 a 400 y representa un índice K convertido a una escala lineal en nanoTeslas. Los valores utilizados, llamados índices Kp y Ap, son promedios de 13 observatorios y los datos publica NOAA [14] comienzan en el año de 1932.

Índice aa

Un índice global simple de la actividad magnética es obtenido en Francia a partir de los índices K de dos observatorios en Inglaterra y Australia, los cuales son casi antipodales. Este índice, es el índice de amplitud antipodal equivalente (aa). Una ventaja histórica de usar el índice aa es que estos índices han sido extendidos hacia el pasado a través de la actividad magnética de los magnetogramas de observaciones anteriores, los datos utilizados provienen de [15] y son más antiguos (de 1868 a 2010) que los índices Kp y Ap.

Auroral electrojet (AE)

Íntimamente asociadas con el campo geomagnético y su interacción con el viento solar están las auroras que iluminan las noches polares de las regiones situadas alrededor de los casquetes polares. Estas se

cuantifican con el *Auroral Electrojet Index*, AE, el cual está diseñado para proveer una medida global y cuantitativa de la actividad magnética de zona auroral producida por corrientes ionosféricas fluyendo debajo y dentro del óvalo auroral. Este índice se deriva de las variaciones geomagnéticas en la componente horizontal observada en 13 observatorios de la zona auroral en el hemisferio norte, ver Figura 4. La referencia a la que se recurrió para localizar los datos de AE es

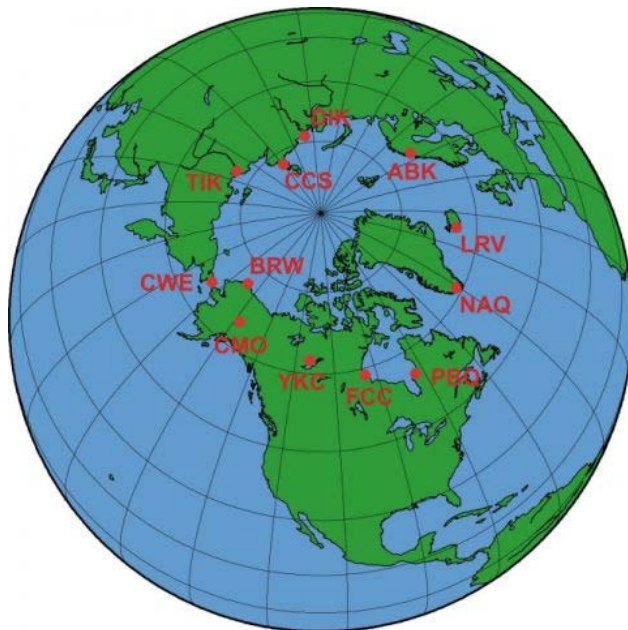


Figura 4: Observatorios geomagnéticos usados para la estimación del AE.
Fuente: INGV [17]

la página web del *World Data Center for Geomagnetism, Kyoto* [18]; los datos utilizados en el presente estudio abarcan de 1957 a 1987.

2.1.3 Otros indicadores terrestres

El uso de índices geomagnéticos o el ancho de anillos en los árboles puede extender temporalmente nuestro análisis pues se tienen registros más antiguos; sin embargo, las concentraciones de ciertos elementos o compuestos en el hielo permiten extender el análisis hasta cientos de años.

^{18}O en núcleos de hielo

Núcleos de hielo o *Ice cores* es el nombre que se le da a los cilindros de hielo donde se miden estas concentraciones. Los registros de la concentración del isótopo ^{18}O en los núcleos tomados en Nordaustlandet, Svalbard (localizada en el ártico) se extrajeron de [19] y se extienden hasta el año 1400 AD.

Metales pesados en núcleos de hielo

El cadmio, plomo y talio son los tres metales pesados cuyas concentraciones (en nanogramos por gramo) medidas en núcleos de hielos de Groenlandia se incluyeron al análisis a partir de los datos que proporciona NOAA en [20].

Carbono negro y ácido vanílico

El *Black carbon* (BC) se forma de la combustión incompleta de biomasa y combustibles fósiles. Químicamente el ácido vanílico (4-hidroxi-3-ácido metoxibenzoico) $C_8H_8O_4$ es un ácido dihidroxibenzoico derivado. En los núcleos de hielo de Groenlandia se miden éstos compuestos, la NOAA reporta las concentraciones anuales en unidades de nanogramos por gramo [21]. [21].

Ancho normalizado en anillos de árboles

El ancho de los anillos en los árboles es una medida relativamente antigua, pero también, es una variable que depende de varios factores como los parásitos, otros árboles cercanos o la temperatura del ambiente. Los datos, provenientes de [13], contienen registros de bosques (desde el año 1600) que se encuentran en: Argentina, Canadá, EU, Noruega, Nueva Zelanda, Rusia y Suecia. En total, dicha fuente contiene los datos de 31 bosques, pero las series utilizadas son los promedios de los bosques en cada país, siendo EU el de mayor muestra con 10 bosques. La lista completa de bosques de los que se tomaron las mediciones pueden revisarse en [13] o en la sección de Apéndices.

2.2 TÉCNICAS DE ANÁLISIS

El análisis de los datos de manchas se realiza en espacio real observando las variaciones como función del tiempo mediante estadísticas para lo que se utilizan la media, la desviación estándar, el sesgo y la kurtosis [22]. El análisis espectral se realiza en el espacio recíproco mediante la transformada de Fourier (FFT) de la señal en función de la frecuencia[22].

2.2.1 *Correlación*

La correlación de dos funciones, denotada por $\text{Corr}(f, g)$ se define como[23]:

$$\text{Corr}(g, h)(t) \equiv \int_{-\infty}^{+\infty} g(\tau + t)h(\tau) d\tau \quad (2)$$

La correlación de una función consigo misma se denomina *auto-correlación*. La ecuación anterior tiene una definición análoga para funciones discretas, la cual dadas dos funciones g_k y h_k se expresa como:

$$\text{Corr}(g, h)_j \equiv \sum_{k=0}^{N-1} g_{j+k} h_k = f(j) \quad (3)$$

Donde N es la longitud de las series y con $f(j)$ lo que queremos enfatizar es que la correlación es una función del índice libre j ; este índice se conoce como *lag* o *retardo*. El nombre proviene de que la idea básica de la correlación, la cual es comparar las dos señales g y h sobre los N puntos teniendo a la serie g retrasada k unidades con respecto a h . A la gráfica de $f(j)$ le denominaremos gráfica de correlación, en la Figura 5 se puede observar un ejemplo de estas gráficas. Este es el análisis que aplicaremos a nuestras series de tiempo tomando siempre a h como la serie del número de manchas y encontrando además, el punto máximo de la gráfica. De aquí en adelante, nos referiremos a este examen como *análisis de correlación* y a la ordenada y abscisa del punto máximo en la gráfica simplemente como *correlación* y *retardo*, respectivamente. La Figura 5 muestra un ejemplo de una gráfica de correlación con una correlación de 0.95 y un retardo de 0. En es-

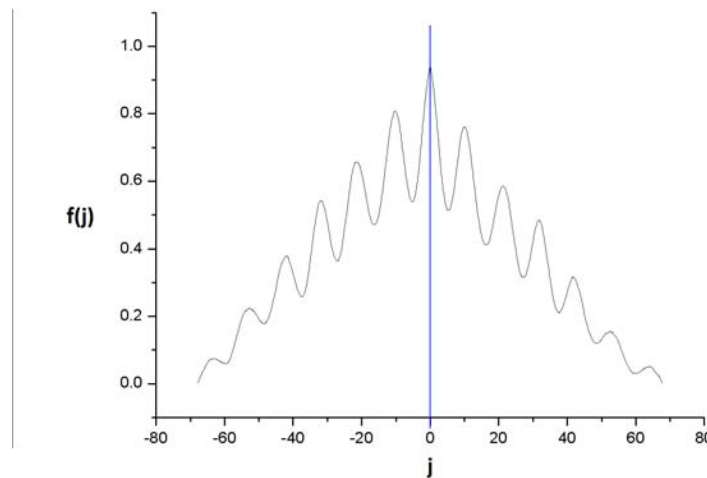


Figura 5: Ejemplo de una gráfica de correlación $f(j)$ para dos funciones g y h como se define en Ec. 3 (correlación normalizada).

te ejemplo la correlación está normalizada (el rango va de -1 a 1) y cuando este coeficiente de correlación normalizado equivale a 1 o -1 , las dos señales están perfectamente correlacionadas. El signo de la correlación indica la dirección de asociación, es decir, una correlación positiva sugiere que el cambio de una señal provocará cambios en la otra señal en la misma dirección; mientras que si el signo es negativo un incremento en una señal causaría un decremento en la otra.

2.2.2 Breve introducción a la técnica SVD

La descomposición en valores singulares, es una técnica para descomponer una matriz como el producto de varias matrices que exhiben propiedades interesantes y útiles de la matriz original. De acuerdo con [24], el SVD es una herramienta que se puede ver desde dos enfoques. Por un lado, es un método para transformar variables correlacionadas en un conjunto de variables no correlacionadas que manifiestan de mejor manera las relaciones de los datos. Al mismo tiempo, el SVD es un método para identificar y ordenar las direcciones sobre las cuales los datos exhiben la mayor variación. Como una ilustración de estas ideas, consideremos una regresión lineal de puntos en una gráfica (2 dimensiones), aquí, la recta ajustada es la mejor aproximación a los datos que reduce la dimensión de 2 a 1 (ver Figura 6). En este sentido, una vez que hayamos identificado donde está la

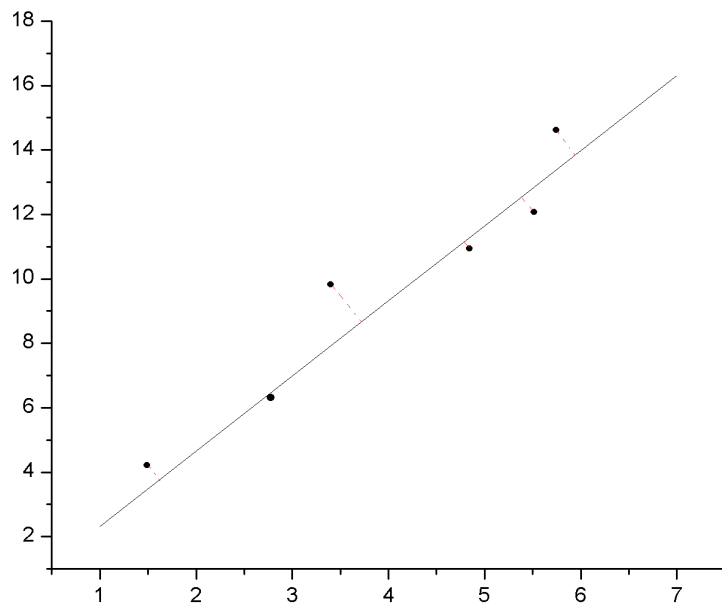


Figura 6: La línea de regresión reduce datos de dos dimensiones a una.

mayor variación es posible encontrar la mejor aproximación a los datos originales, usando menos dimensiones. Si dibujamos una línea perpendicular de cada punto a la línea de regresión (líneas punteadas en Figura 6) y tomamos la intersección de esas líneas como la aproximación a los datos originales, tendríamos entonces una representación reducida (en el sentido dimensional) de los datos pero que captura la mayor variación posible de los datos originales. Esta idea básica se conserva para más dimensiones en el SVD, con el cual, es posible obtener una representación reducida de los datos pero que expone propiedades que no necesariamente son evidentes a primera

vista. Analicemos ahora con más detalle cómo es que el SVD realiza la descomposición matricial.

La descomposición SVD y los modos normales.

El SVD está basado en un teorema de algebra lineal, el cual muestra que cualquier matriz rectangular A de dimensión $(m \times n)$ puede descomponerse como el producto de 3 matrices U , S y V^T de la siguiente manera[24]:

$$A_{mn} = U_{mm} S_{mn} V_{nn}^T \quad (4)$$

Donde U y V son matrices de dimensiones $m \times m$ y $n \times n$ con columnas ortogonales, es decir, $U^T U = I$ y $V^T V = I$; mientras que S es una matriz diagonal que contiene los elementos s_k llamados *valores singulares*. Por convención, la matriz S contiene los valores singulares en orden descendiente. La Figura 7 muestra un ejemplo de este tipo de

$$A_{mn} = U_{mm} S_{mn} V_{nn}^T = \begin{bmatrix} 3 & 1 & 1 \\ -1 & 3 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{-1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sqrt{12} & 0 & 0 \\ 0 & \sqrt{10} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{6}} & \frac{2}{\sqrt{6}} & \frac{1}{\sqrt{6}} \\ \frac{\sqrt{5}}{2} & \frac{-1}{\sqrt{5}} & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{30}} & \frac{2}{\sqrt{30}} & \frac{-5}{\sqrt{30}} \end{bmatrix}$$

Figura 7: Descomposición SVD de una matriz A .

descomposición para una matriz A de 2×3 . La matriz S muestra los valores singulares en la diagonal ordenados de manera descendiente ($S_1 = \sqrt{12}$ y $S_2 = \sqrt{10}$). Si A es una matriz formada por una serie de tiempo recorrida en cada renglón, las columnas de U y V contienen información relevante acerca de la matriz (serie) original. Cuando se hace un análisis temporal, los vectores columnas de V constituyen nuevos vectores de base para representar las diferentes series de tiempo y las columnas de U contiene los coeficientes asociados. Alternativamente, se puede hacer un análisis estructural, de tal manera que las columnas de U se interpretan como los nuevos vectores de base y las columnas de V como los coeficientes. Aquí abordaremos el aspecto temporal. Este es el punto de vista que nos interesa pues a este número reducido de series que reproducen de mejor manera la serie de tiempo original es a lo que nos referiremos como *modos normales*.

2.2.3 Los scree diagrams y su interpretación

Cada componente reconstruido o modo, es responsable por una parte de la varianza de la serie de tiempo original, que se cuantifica con la *varianza parcial* $\lambda_k = s_k^2$, donde s_k son los valores singulares

mencionados en la sección anterior. Al ordenar estas varianzas parciales y graficarlas se obtiene una representación conocida como *scree diagram*. Los *scree diagrams* suelen graficarse en escala log-log lo que permite interpretar los distintos modos como una tendencia, un componente oscilatorio o ruido aleatorio. Inclusive, si el comportamiento mostrado en dicho diagrama es lineal, es posible deducir una ley de potencias como las que suelen observarse en los análisis espectrales de Fourier. Esto nos permite una interpretación más del SVD como un examen análogo al análisis espectral de Fourier, con la diferencia que Fourier descompone en modos fijos que son senos y cosenos, mientras que el SVD descompone en una base que es *dato-adaptiva*. Lo que queremos decir con esto es que Fourier puede inducir una periodicidad en los resultados debido a que está construido a partir de senos y cosenos; el SVD puede evitar este problema construyendo bases para la serie de acuerdo a los datos.

A pesar de esta diferencia en la técnica, si el comportamiento mostrado en el *scree diagram* es lineal, es posible interpretar los distintos modos como una tendencia, un componente oscilatorio o ruido aleatorio y deducir una ley de potencias como las que suelen observarse en los análisis espectrales de Fourier. Es decir, se puede clasificar como ruido browniano, ruido blanco o ruido rosa a *scree diagrams* con pendiente -2, 0 y -1, respectivamente (el ruido rosa también es conocido como $1/f$). Esta pendiente del *scree diagram* también es importante porque nos habla de la auto-correlación (la correlación de una serie consigo misma) de la serie. Un ruido blanco puede entenderse como una señal completamente aleatoria (sin auto-correlación), un ruido browniano es más regular, rígido, o periódico y el ruido $1/f$ es un comportamiento intermedio de los dos anteriores.

OBJETIVO

En la introducción, así como a lo largo del texto hemos establecido que el objetivo general de este trabajo es estudiar la actividad solar. A continuación señalaremos de manera más puntual las metas específicas del presente trabajo:

1. Utilizando el análisis de correlación de los indicadores de actividad solar se pretende validar al número de manchas como un buen parámetro para caracterizar la actividad solar en general.
2. Se busca emplear la correlación entre el número de manchas y los demás indicadores terrestres (índices geomagnéticos, anillos de árboles y materiales en las capas polares) para extender el rango de medición y hacer un juicio sobre la validez de dichas mediciones como variables asociadas a la actividad solar.
3. Obtener los modos normales de las manchas solares e inferir tendencias y comportamientos a partir de los resultados.
4. Estudiar la transición de fase en las imágenes del disco solar de llamaradas solares, explorando la posibilidad de una alerta temprana.

MÉTODO

Como hemos señalado, el problema se abordó con una perspectiva del procesamiento de señales y los sistemas complejos, y en este sentido, las técnicas utilizadas son principalmente: *la correlación y la descomposición en modos de una serie de tiempo mediante el análisis SVD*. Los detalles de estas técnicas y de los datos del presente estudio se abordan en la sección de Antecedentes, a continuación discutiremos la metodología que se siguió.

4.1 RECOLECCIÓN DE DATOS

La primer parte consistió en la minería de datos de los registros solares y terrestres a usar como series de tiempo y de las imágenes de llamaradas solares.

La mayoría de las series de tiempo fueron obtenidas de los archivos que NOAA publica en línea de forma gratuita y las imágenes de llamaradas se deben al satélite SDO y corresponden al instrumento AIA. Se descargaron datos de: manchas solares, área de manchas solares, índice coronal, flujo solar (F107), MgII, irradiancia solar, llamaradas solares, índices geomagnéticos (Kp, Ap, aa y AE), núcleos de hielo y ancho de anillos en los árboles. Los datos de núcleos de hielo y ancho de anillos cuentan con resolución anual, los datos de AE son mensuales y el resto de series de tiempo tienen resolución diaria. Más información acerca de estos indicadores o de las fuentes de donde proceden pueden revisarse en la sección de Antecedentes. Los primeros datos que se estudiaron fueron las series de la actividad solar.

4.2 COMPARACIÓN DE LOS INDICADORES SOLARES Y TERRESTRES A TRAVÉS DE UN ANÁLISIS DE CORRELACIÓN

Algo inherente en todos los registros de la actividad solar es el hecho de que son medidos; no de toda la superficie solar, sino de la región que se observa desde la Tierra. Con el objetivo de remover dicho efecto de la discusión, el primer cálculo sobre estos datos consistió en promediar cada una de las series con respecto a las rotaciones de Carrington; es decir, todas las series de actividad solar tenían una resolución diaria pero para cada indicador se obtuvieron los promedios de cada rotación, dejando una resolución de casi 27 días en todas las series. En lo subsecuente nos referiremos a este grupo de series de tiempo (los promedios de: el número de Wolf, el flujo solar 10.7 cm,

el área de manchas, la irradiancia total solar, el índice coronal y la razón MgII) como *datos solares* excluyendo los datos de llamaradas que son imágenes. Los promedios se obtuvieron con un código de *Python* que también calculaba la desviación estándar y estos *datos solares* se graficaban de forma simultánea con el número de Wolf, pues si existe una tendencia muy fuerte en los datos, esta debería ser apreciable simplemente de las gráficas de estas series.

Una vez que se observó de las gráficas como se compara el comportamiento de los datos con el número de manchas (de Wolf), el siguiente paso fue entonces, buscar una evidencia más cuantitativa de dicha relación a través de un *análisis de correlación*, mismo que se realizó utilizando el software OriginPro 8. Ya con los datos solares analizados, después se repitió el mismo estudio, es decir que se compararon directamente las gráficas de cada serie contra el número de Wolf y se realizó un análisis de correlación de cada índice con el número de Wolf, para los indicadores geomagnéticos. La idea es que, si el número de manchas tiene fuerte correlación con el resto de *datos solares* podemos tomar este indicador solar como representante de la actividad solar en general y utilizarlo para buscar alguna influencia del sol sobre los demás indicadores (terrestres y geomagnéticos), así como para analizar los modos de vibración de la actividad solar en general. Los primeros indicadores en analizarse fueron los índices geomagnéticos Kp, Ap, aa y AE pues sería razonable esperar una influencia de la actividad sobre dichos indicadores dado que estos miden los efectos de las partículas solares sobre el campo magnético terrestre, pero también se incluyen en este estudio los registros de núcleos de hielo y el ancho de los anillos en árboles. La ventaja con los núcleos de hielo y el ancho de los anillos es que contienen datos muy antiguos, sobre estos datos se realizó el mismo análisis que en los *datos solares* y geomagnéticos con la única diferencia que aquí la resolución de las series es anual.

4.3 OBTENIENDO LOS MODOS NORMALES DEL CICLO SOLAR

Toda esta primera parte del procedimiento brinda un panorama general de la relación que guardan las distintas series de tiempo y valida al número de manchas como un buen indicador de la actividad solar, por lo que la siguiente parte del procedimiento consistió en evaluar los parámetros estadísticos y de transformada de Fourier de cada ciclo individual, además de realizar un examen de modos normales sobre los datos de número de Wolf usando SVD.

4.4 ANÁLISIS SVD EN IMÁGENES DE LLAMARADAS, UNA BÚSQUEDA DE ALERTA TEMPRANA

La última parte del estudio consistió en aplicar el análisis SVD a las imágenes de llamaradas solares; para esto, se consiguieron imágenes del satélite SDO (instrumento AIA) en regiones del disco solar y fechas que presentarían una llamarada solar. Las imágenes con las que se trabajó para cada flare tienen formato .fts, fueron tomadas en longitud de onda 094 Angstroms y abarcan periodos de aproximadamente cuatro horas espaciadas entre sí 12 segundos, lo que se traduce en cerca de 1200 imágenes para cada llamarada. Una representación de dicha secuencia de imágenes (para una llamarada con fecha 11/abr/2013) se puede observar en la Figura 8.

La descarga y análisis de estas imágenes constituye la parte más

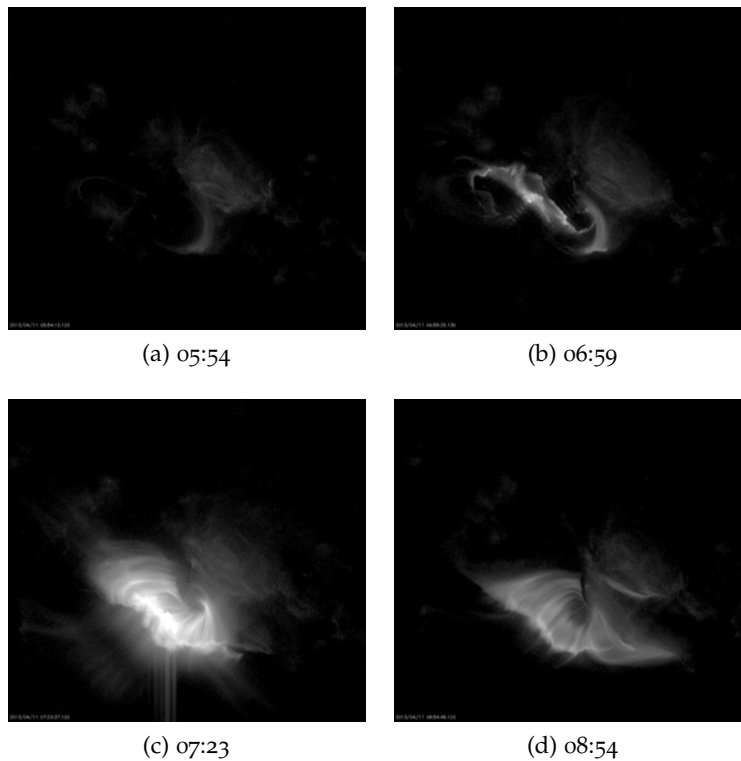


Figura 8: Secuencia de 4 imágenes de la misma región del disco solar provenientes del SDO (instrumento AIA), las imágenes son del 11/04/2013 y los horarios se indican en cada imagen. Las imágenes corresponden a la longitud de onda 094 Angstroms y fueron solicitadas en [http:// www.lmsal.com/ get_aia_data](http://www.lmsal.com/get_aia_data) .

elaborada del método por lo que se tratara de discutir con el mayor detalle posible. Después de solicitar los datos en el enlace: http://www.lmsal.com/get_aia_data/ , se recibe una lista de urls conteniendo los archivos .fts y la descarga de estos se realizó de manera automatizada creando un texto con la lista de las direcciones para

luego descargarlos usando la librería `urllib` de Python. De aquí, se tienen una secuencia de imágenes `.fts` para cada llamada las cuales fueron manejadas con un código de Python. La principal función de dicho código es leer los archivos y desdoblar las matrices, es decir, cada archivo `.fts` contiene un arreglo de datos con dimensión de $n \times m$ (típicamente n y $m \sim 550$) el cual se reacomoda poniendo cada renglón al final del anterior para formar un sólo renglón de dimensión $1 \times nm$ ($\sim 550^2$), este desdoble se realiza para cada imagen, y se guardan en una nueva matriz M , la cual tiene por renglones cada una de las imágenes. La Figura 9 muestra un ejemplo ilustrativo de este proceso de *desdoblamiento* para formar dicha matriz M .

Esta nueva matriz contiene la información de la llamada y sobre es-

$$\begin{pmatrix} 1 & 9 \\ 6 & 0 \\ 4 & 7 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 2 & 8 \\ 5 & 1 \\ 4 & 1 \end{pmatrix} \longrightarrow M = \begin{pmatrix} 1 & 9 & 6 & 0 & 4 & 7 \\ 2 & 8 & 5 & 1 & 4 & 1 \\ 0 & 7 & 7 & 0 & 3 & 5 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & 7 \\ 7 & 0 \\ 3 & 5 \end{pmatrix}$$

Figura 9: Ejemplo de 3 matrices de 3×2 que se desdoblan formando la matriz M

ta matriz se calcula el análisis SVD (tomado de la librería `numpy.linalg`). Los valores singulares que arroja el SVD se emplean para para obtener la gráfica conocida como *scree plot* en escala log-log. De esta manera, se obtuvieron 4 *scree plots* correspondientes a llamadas con fechas de 11/04/2013, 17/05/2013, 03/11/2013 y 31/12/2013 que abarcan periodos de 2 horas aproximadamente. Estos periodos de tiempo contienen imágenes de la llamada (como en la Figura 8) y nos referiremos a ellos como periodos *flare*, pero también se analizaron imágenes sobre periodos de tiempo que anteceden a la llamada y que llamaremos *pre-flare*. Por ejemplo, las imágenes de flare con fecha 11/04/2013 abarcan de las 06:55:01 a las 08:54:59, y las correspondientes imágenes de pre-flare comprenden de las 04:55:01 a las 06:54:49; las fechas y los lapsos exactos se muestran en la tabla 1, mientras que las regiones precisas del disco solar que fueron analizadas se muestran en los Apéndices.

En total, se obtuvieron 4 *scree plots* de pre-flare y 4 de flares para poder contrastar el comportamiento antes y durante una llamada solar. Esta prueba se realizó también para una región cualquiera del

Fecha	Periodo Pre-flare	Periodo Flare
11/04/2013	04:55:01 - 06:54:49 (559)	06:55:01 - 08:54:59 (569)
17/05/2013	06:50:01 - 08:40:49 (555)	08:41:01 - 10:39:49 (590)
03/11/2013	03:30:01 - 04:59:49 (465)	05:00:01 - 6:29:49 (540)
31/12/2013	20:00:01 - 21:44:49 (450)	21:45:01 - 23:44:49 (434)

Tabla 1: Fechas y periodos de las imágenes sobre las cuales se obtiene el *scree plot*, los números entre paréntesis indican el total de imágenes del respectivo periodo.

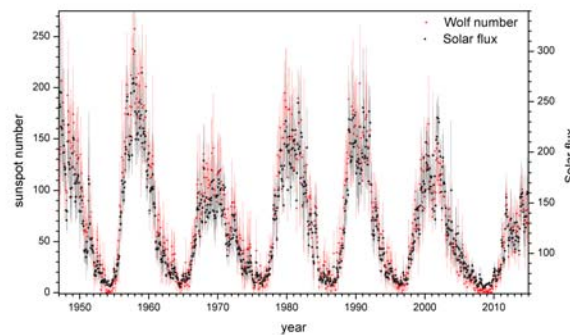
disco solar que sirve de control y el paso siguiente fue el de extender los datos de la flare del 11 de abril a 8 horas (en vez de las 4 del análisis recién descrito) para así poder tomar subconjuntos de 4 horas en dichas imágenes; subconjuntos que llamaremos *ventanas*. La idea de formar estas *ventanas* es la de buscar el momento en que los datos cambian su comportamiento, o más específicamente, rastrear el momento en el *scree diagram* sufre un cambio abrupto.

Este último examen se realizó sólo para la llamarada del 11 de abril de 2013; para ello, estas ventanas se separaron en intervalos de cerca de 15 minutos lo que resulta en aproximadamente 16 ventanas al barrer las 8 horas de imágenes y para cada una de las ventanas se calculó el análisis SVD que hemos discutido. Después se ordenaron cronológicamente las gráficas resultantes del SVD en cada ventana buscando observar algún cambio en el comportamiento antes de que ocurra la llamarada, alguna evidencia de alerta temprana.

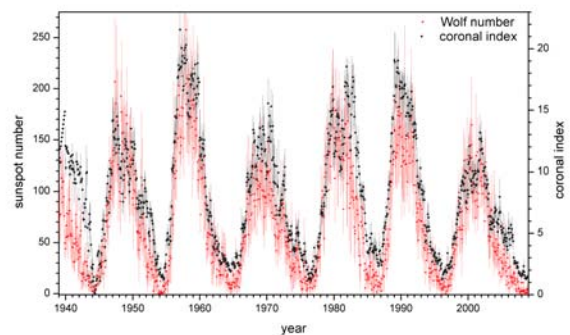
RESULTADOS

5.1 NÚMERO DE MANCHAS E INDICADORES DE LA ACTIVIDAD SOLAR.

Al promediar los registros de indicadores solares sobre cada rotación solar como se discute en la sección de *Método* se obtienen los *datos solares* cuyas gráficas se muestran en las Figuras 10, 11 y 12; todas las gráficas de la misma contienen también el número de manchas y lo que se sugiere de dicha figura es que los indicadores solares en general siguen muy cerca la tendencia del número de manchas.

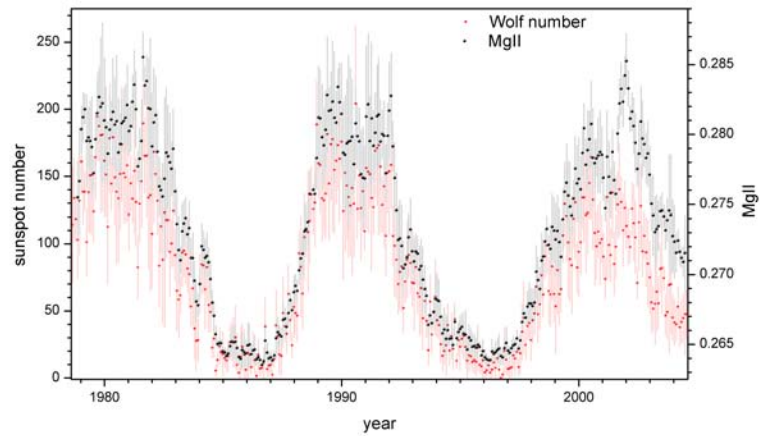


(a) Número de Wolf y Flujo solar

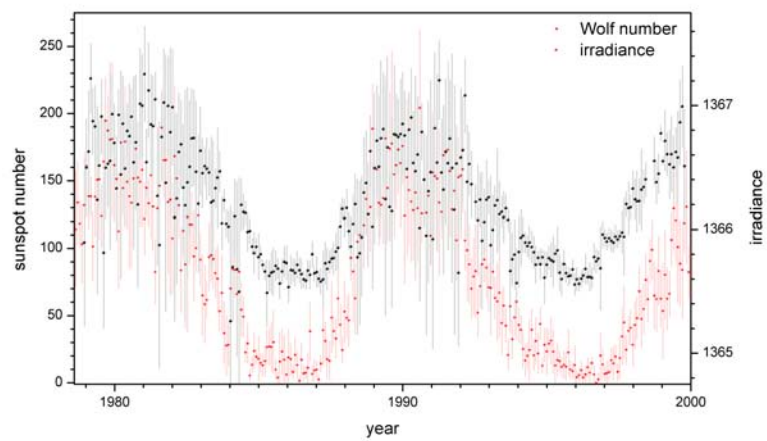


(b) Número de Wolf e índice coronal

Figura 10: Gráficas de los indicadores solares (a) F107 y (b) índice coronal comparadas con el número de manchas.

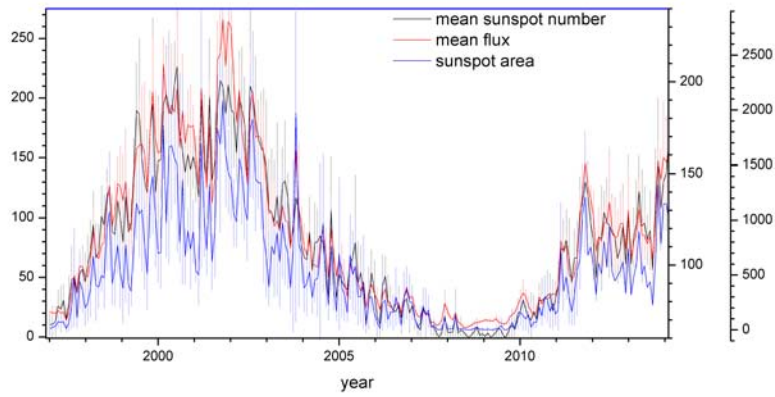


(a) Número de Wolf y MgII

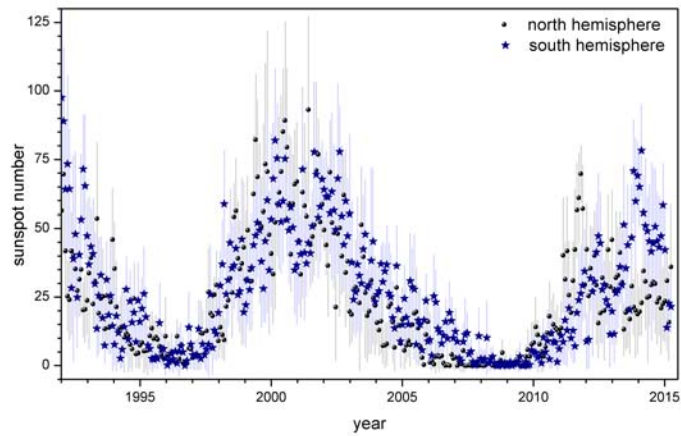


(b) Número de Wolf y TSI

Figura 11: Gráficas de los indicadores solares (a)MgII y (b)TSI comparadas con el número de manchas.



(a) Número de Wolf, Área de las manchas y Flujo solar



(b) Número de Wolf hemisferio norte y Número de Wolf en hemisferio sur

Figura 12: Gráficas de los indicadores solares (a) Área y F₁₀₇ comparadas con el número de manchas. En (b) se comparan el número de manchas del hemisferio norte y del hemisferio sur del disco solar.

5.1.1 Análisis de los ciclos de manchas solares

A partir de los datos reportados para el número promedio mensual suavizado de manchas solares por el SIDC se construyó la Tabla 2, las columnas de dicha tabla muestran los valores de: número de ciclo solar, mes y año de inicio del ciclo, la duración del ciclo en meses, el valor mínimo de manchas en el ciclo, la fecha del máximo valor, el valor máximo de manchas del ciclo, el lapso en meses desde el máximo al mínimo, el porcentaje de días sin manchas y los días sin información del ciclo; respectivamente.

También, se graficaron todos los ciclos y en la Figura 13 se presentan algunos en espacio real. A partir de estos datos se encuentra que un ciclo dura (10.7 ± 2.2) años. El ciclo más largo fue el 4 con 13.8 años y el más corto el 2 de tan solo 9.1 años. En promedio el máximo se alcanza a los (4.3 ± 1.1) años con una intensidad de (114 ± 40) manchas. El ciclo que más rápido ha llegado a su máximo es el 4 y el que ha crecido más lentamente el 7. El más intenso fue el 19 y el más débil el 6. En un ciclo solar típico hay (560 ± 250) días sin manchas. El ciclo con menos días sin manchas fue el 22 y el que tuvo mayores días sin ellas fue el 14.

Al realizar un análisis espectral de los ciclos se encuentran gráficas

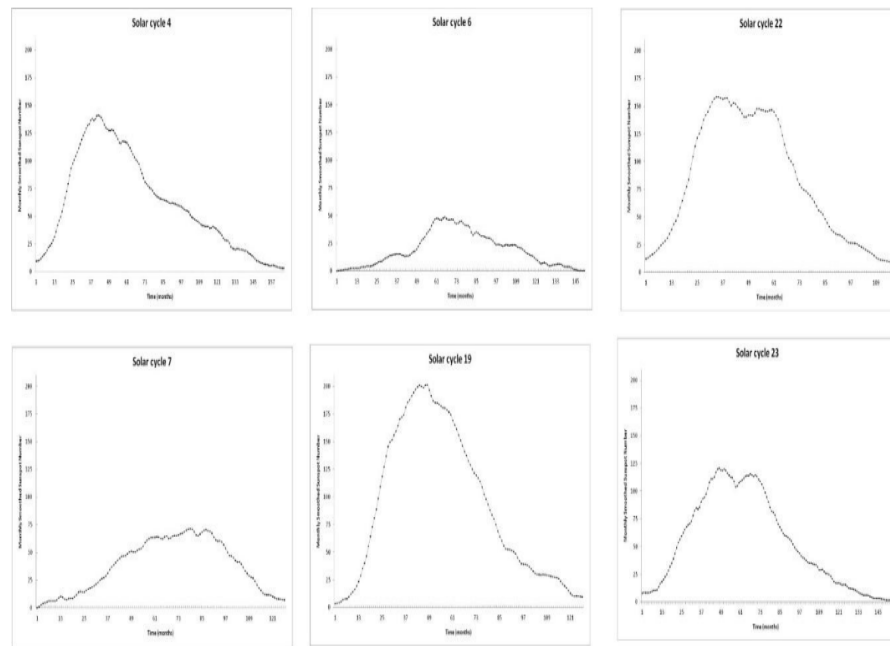


Figura 13: Ciclos solares 4, 6, 7, 19, 22 y 23 en espacio real.

como las mostradas en la Figura 14. Los análisis de densidad espectral de potencia (PSD) en dB muestran que todos los ciclos tienen una componente principal de frecuencia con un brusco decaimiento mostrando una periodicidad de casi 11 años. De acuerdo a este análisis

Ciclo	Inicio	Meses	mín	Fecha del máx	Máx	Lapso	d nulos	d faltantes
1	3-1755	136	8.4	6-1761	86.5	76		
2	6-1766	109	11.2	9-1769	115.8	40		
3	6-1775	112	7.2	5-1778	158.5	36		
4	9-1784	165	9.5	2-1788	141.2	42		
5	5-1798	152	3.2	2-1805	49.2	82		
6	12-1810	150	0.0	5-1816	48.7	66		
7	5-1823	127	0.1	11-1829	71.5	79	17.5	841
8	11-1833	117	7.3	3-1837	146.9	41	9.9	1352
9	7-1843	150	10.6	2-1848	132.0	56	11.9	573
10	12-1855	136	3.2	2-1860	98.0	51	13.9	0
11	3-1867	142	5.2	8-1870	140.3	42	22.1	0
12	12-1878	136	2.2	12-1883	74.6	61	21.3	0
13	3-1890	144	5.0	1-1894	87.9	47	19.0	0
14	2-1902	139	2.7	2-1906	64.2	49	24.2	0
15	8-1913	121	1.5	8-1917	105.4	49	16.7	0
16	8-1923	122	5.6	4-1928	78.1	57	13.3	0
17	9-1933	126	3.5	4-1937	119.2	44	10.1	0
18	2-1944	123	7.7	5-1947	151.8	40	10.4	0
19	4-1954	127	3.4	3-1958	201.3	48	8.7	0
20	10-1964	141	9.6	11-1968	110.6	50	7.2	0
21	6-1976	124	12.2	12-1979	164.5	43	7.5	0
22	9-1986	117	12.3	7-1989	158.5	35	6.0	0
23	5-1996	152	8.0	3-2000	120.8	47	14.7	0

Tabla 2: Características generales de los ciclos solares.

el ciclo más intenso fue el 19. El PSD de los ciclos mostrados en la Figura 14 parecen tener una tendencia lineal (una ley de potencias) aunque con mucho ruido.

5.1.2 Las correlaciones de los datos solares

Con el siguiente examen realizado, conocido como análisis de correlación, se apoya esta idea; los valores de correlación, retardo y los años que abarcan cada uno de los *datos solares*, se muestran en la Tabla 3. El indicador de esta tabla que se denomina *hemisferios* se refiere a la correlación entre el número de Wolf medido para las manchas en el hemisferio norte del sol y el número de Wolf resultado de las manchas en el hemisferio sur del sol. En el resto de indicadores la

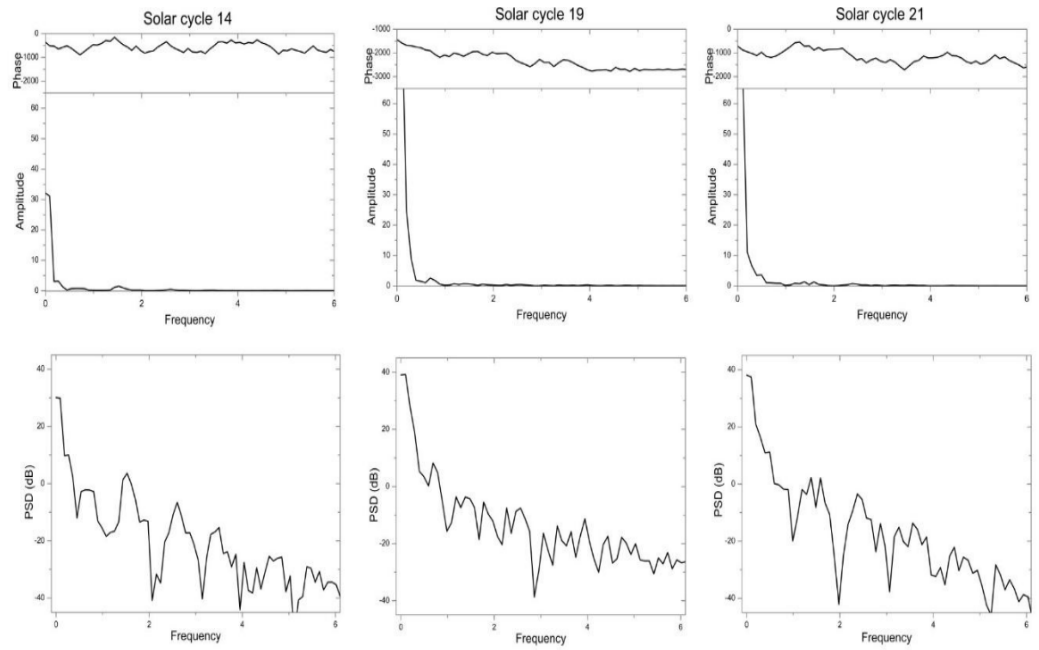


Figura 14: Análisis espectral de los ciclos 14, 19 y 22.

correlación se hace contra el número de Wolf total (de ambos hemisferios solares).

Indicador	Periodo	Correlación	Retardo
Área	1997-2014	0.96772	0
I. Coronal	1939-2008	0.96017	-0.07467
F107	1947-2014	0.95652	0
Hemisferios	1992-2015	0.86482	0
MgII	1979-2004	0.84969	0
Irradiancia	1979-1999	0.81087	0

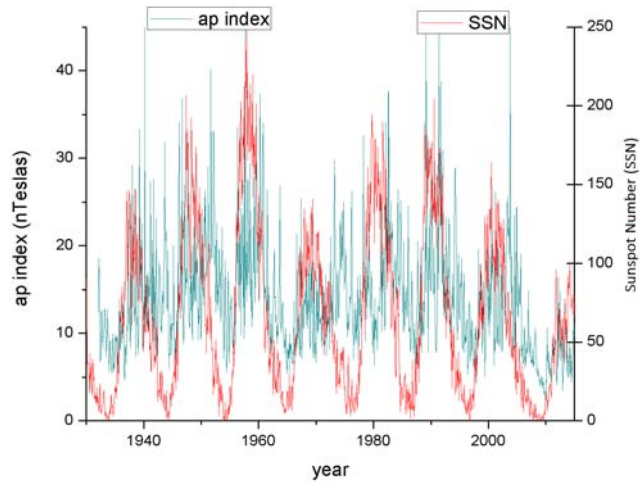
Tabla 3: Resumen de resultados para los *datos solares*.

Podemos decir que, en general, las correlaciones son buenas pues el valor más bajo es de 0.81 y, más allá de que este resultado sea o no intuitivo, lo que muestran los resultados de la Tabla 3 es que el número de Wolf es un buen representante de la actividad solar en general, y como tal, puede utilizarse para buscar la influencia del sol sobre otras variables de medidas terrestres.

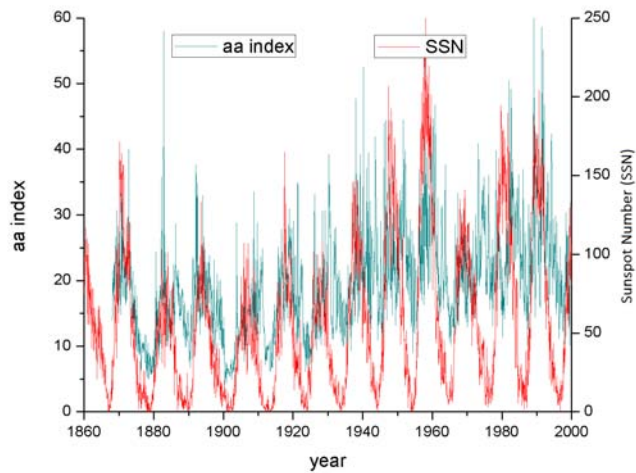
5.2 INDICADORES TERRESTRES

Indicadores geomagnéticos

A partir de las gráficas de los datos geomagnéticos se pudo observar que estos índices tienen un comportamiento similar al del número de manchas, dichas gráficas se pueden observar en las Figuras 15 y 16. Al analizar la correlación que tienen estos *datos geomagnéticos* con



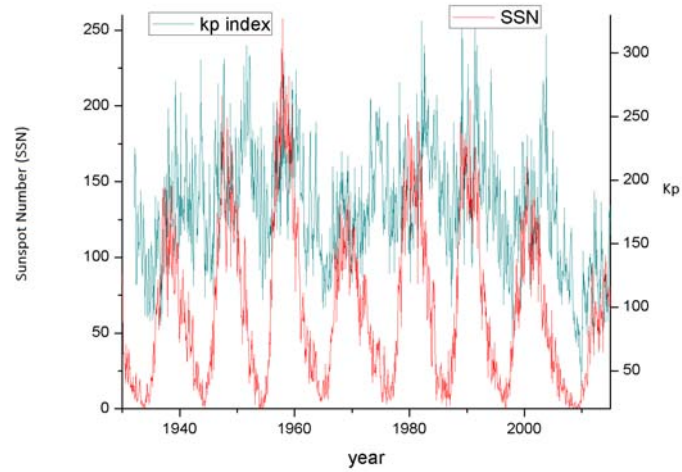
(a)



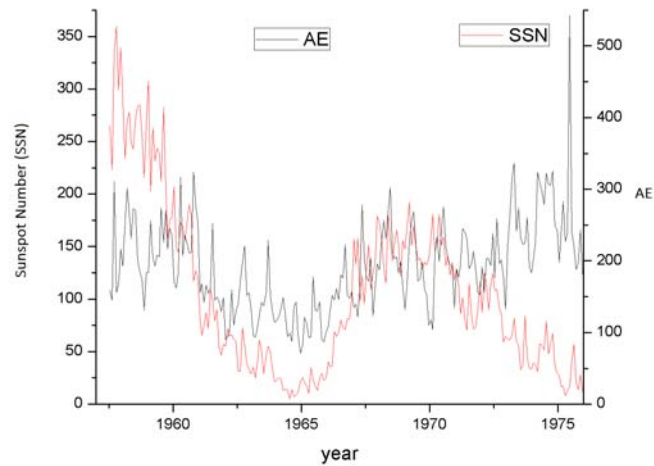
(b)

Figura 15: Gráfica simultánea del número de Wolf junto con (a) índice Ap (b) índice aa.

el número de Wolf se obtienen los resultados mostrados en la Tabla 4. Como ya hemos dicho los datos de estos indicadores fueron promediados de acuerdo a sus rotaciones de Carrington (~ 27 días), es



(a)



(b)

Figura 16: Gráfica simultánea del número de Wolf junto con (a) índice kp (b) índice AE.

Indicador	Periodo	Correlación	Retardo
Kp	1932-2015	0.82222	-0.5974
Ap	1932-2015	0.80817	-0.5974
aa	1868-2010	0.81982	-0.59741
AE	1957-1975	0.8151	-0.1667

Tabla 4: Resumen de resultados para los *datos geomagnéticos*.

decir, en la Tablas 3 y 4 la resolución de los datos es de 27 días, excepto los datos de Auroral Electrojet (AE) que son mensuales y estas

representan las unidades del retardo (27 días para Kp,Ap,aa y meses para AE). Acerca de esta última tabla podemos decir que los resultados son bastante consistentes entre sí y muestran una correlación alta (~ 0.8).

Núcleos de hielo y ancho de anillos.

Por otro lado, las gráficas de los datos de núcleos de hielo y de anchos de anillos de árboles no exhiben de manera tan obvia, en comparación con los datos solares y geomagnéticos, alguna relación con el número de manchas (ver Figuras 17 y 18).

Aún así la correlación puede existir y el análisis de correlación para

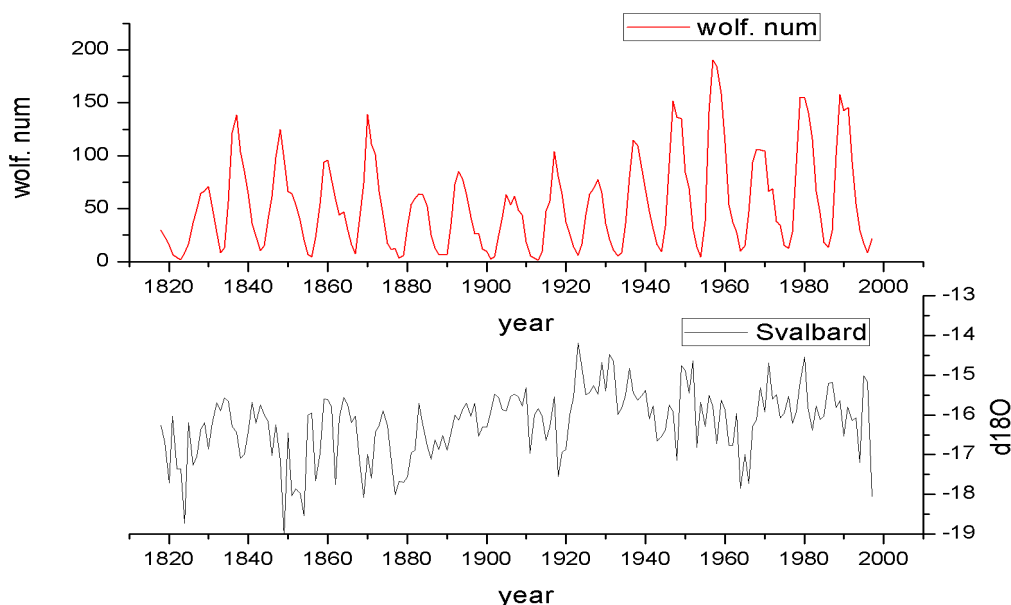


Figura 17: Gráfica del número de manchas y concentración de ^{18}O desde 1818 hasta 1997.

los datos de núcleos de hielo y ancho de anillos se muestran en las Tablas 5 y 6, en dichas tablas, la resolución de los datos es anual, esto es relevante pues se refleja en las unidades del retardo. En particular, para los *datos de núcleos de hielo*, se observa que los datos del isótopo ^{18}O son los que presentan mayor relación (~ 0.77), o más precisamente anti-correlación pues los valores son negativos, con el número de manchas. Además, los datos de los núcleos de hielo de los glaciares de Svalbard y Vostok son consistentes pues presentan prácticamente el mismo valor de correlación. Las concentraciones de cadmio, plomo, talio, carbono y ácido vanílico tienen correlaciones bajas y representarían indicadores poco confiables de la actividad solar antigua.

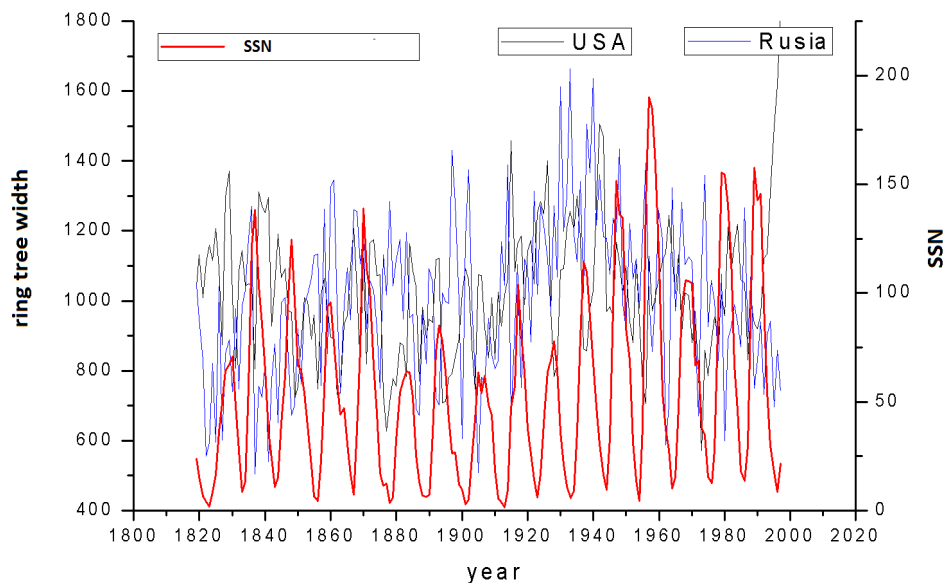


Figura 18: Gráfica del número de manchas y ancho de anillos en árboles en los bosques de USA y Rusia de 1819 a 1997.

Indicador	Periodo	Correlación	Retardo (años)
Cadmio (metales pesados)	1818-2002	0.62638	12
Plomo (metales pesados)	1818-2002	0.64364	12
Talio (metales pesados)	1818-2002	0.6627	12
Carbono	1818-2002	0.63287	39
Ácido Vanílico	1818-2002	0.6645	0
^{18}O (Svalbard)	1818-1997	-0.77711	0
^{18}O (Vostok)	1818-1991	-0.77808	0

Tabla 5: Resumen de resultados de análisis de correlación para los *datos de núcleos de hielo*.

Respecto al ancho de anillos en los árboles; la primera columna de la Tabla 6 se refiere al país cuya serie de ancho de anillos en árboles fue correlacionada con el número de manchas y los resultados indican una consistencia en el valor de la correlación para los distintos países, misma que no es tan alta como en los indicadores geomagnéticos pero es regular, muy cercana a la correlación del ^{18}O en los núcleos de hielo.

Indicador	Periodo	Correlación	Retardo (años)
Canadá	1818-1991	0.7885	1
Nueva Zelanda	1818-1991	0.77549	4
Rusia	1819-1997	0.78385	4
Noruega	1819-1997	0.79317	9
Suecia	1819-1997	0.78558	3
EU	1819-1997	0.77907	-4
Argentina	1818-1986	0.78319	0

Tabla 6: Resumen de resultados de análisis de correlación para los *anchos de anillos en árboles*.

5.3 LOS MODOS NORMALES DE LAS MANCHAS SOLARES.

Hasta este punto se ha validado al número de Wolf como un indicador característico de la actividad solar en general y se han presentado los resultados de un primer examen sobre la influencia de dicho indicador sobre otras medidas. Ahora, discutiremos los resultados de los modos normales del número de manchas. Como sabemos, el análisis SVD calcula las series de tiempo principales (modos normales) que componen a la serie de tiempo original y en teoría, al sumar todos los modos se puede reconstruir a la serie original.

En la Figura 19 se muestran el primer modo, el segundo modo, la suma de los 3 primeros modos y la suma de los 5 primeros modos. El primer modo representa la tendencia de la serie; de esta tendencia podemos decir que se mantiene relativamente plana durante la primera mitad pero en la segunda mitad se eleva con respecto al valor promedio de 40 (ver Figura 19a). Del segundo modo de vibración surge la conocida periodicidad de 11 años y podemos interpretar a la suma de los 5 primeros modos como una reconstrucción de la serie de número de manchas que no contiene el ruido (sin las más pequeñas variaciones).

La Figura 20 expone más claramente este punto pues muestra en una sola gráfica: el primer modo, la suma de los primeros 5 y la serie original. En la Figura 20b se grafica la diferencia de la serie original y la reconstrucción de los 5 primeros modos; es decir, obtenemos la discrepancia entre ambas series.

Otra gráfica que es representativa del análisis SVD es el *scree diagram*, el obtenido para el número de manchas se presenta en la Figura 21. Aquí, podemos notar cualitativamente una pendiente cercana a -1 en su parte más lineal esto se discutirá un poco más en la sección de Interpretaciones.

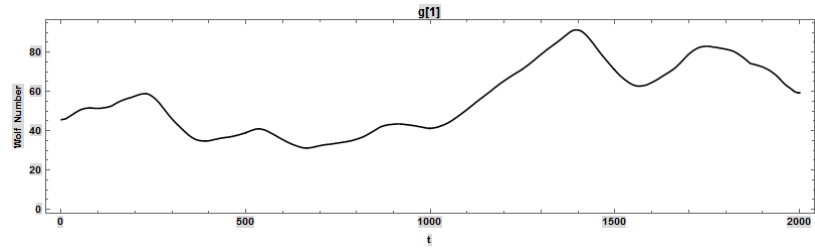
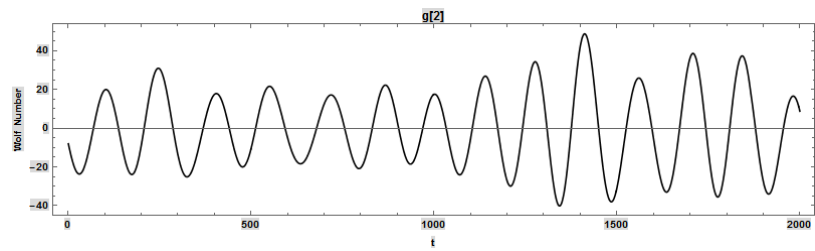
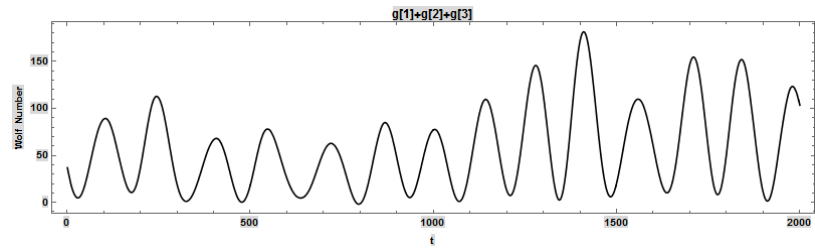
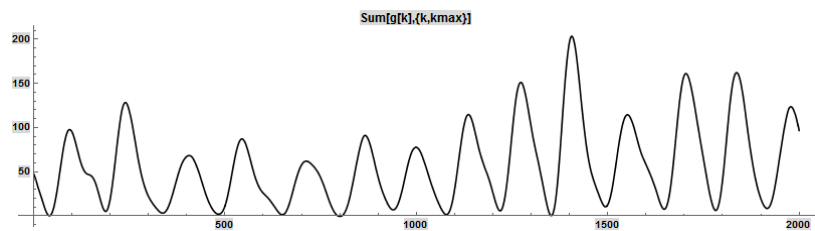
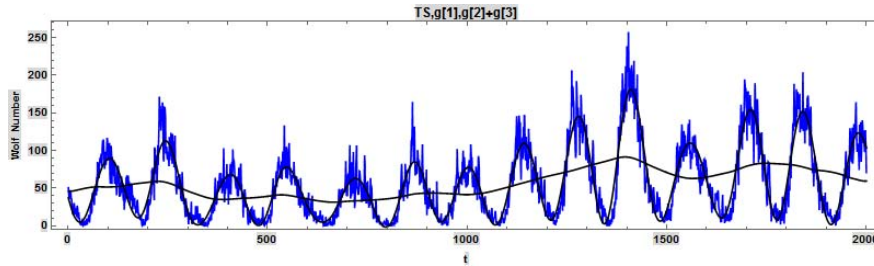
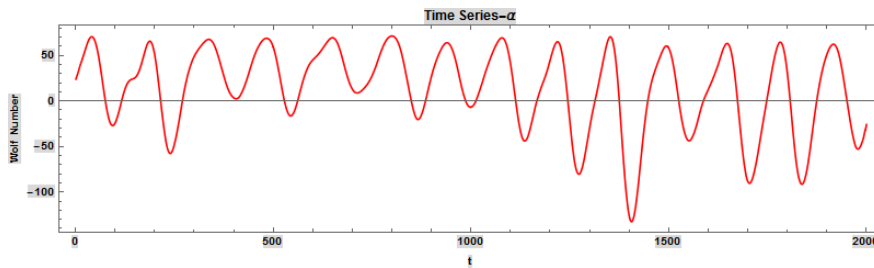
(a) k_1 (b) k_2 (c) $k_1 + k_2 + k_3$ (d) $k_1 + k_2 + k_3 + k_4 + k_5$

Figura 19: Gráfica de la reconstrucción de la serie de número de manchas usando: (a) el primer modo (b) el segundo modo, (c) la suma de los 3 primeros modos y (d) la suma de los 5 primeros modos.



(a) Serie original del número de manchas, $k_1 + k_2 + k_3 + k_4 + k_5$ y k_1 .



(b) Serie original - $(k_1 + k_2 + k_3 + k_4 + k_5)$

Figura 20: (a) Gráfica de la serie real del número de manchas (azul) emulada por la suma de los 5 primeros modos (ver Figura 19) y detrás el primer modo o tendencia general (k_1). (b) La diferencia entre la serie real del número de manchas y la serie reconstruida de los 5 primeros modos.

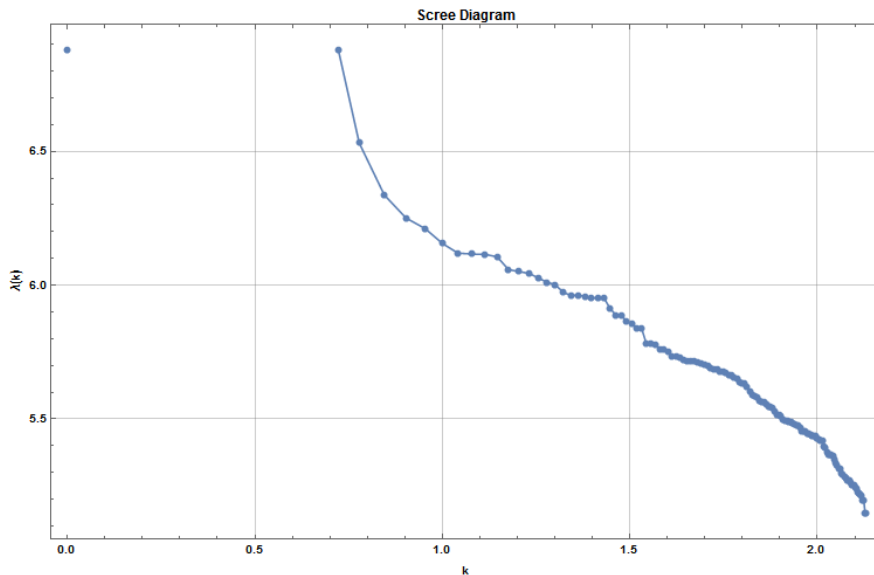


Figura 21: Scree Diagram resultado del análisis SVD del número de manchas.

5.4 MODOS NORMALES EN LAS IMÁGENES DE UNA LLAMARADA SOLAR.

Como hemos discutido en la sección de *método*, el análisis de las llamaradas solares consta de dos partes: la primera, que se compone de los *scree diagrams* de cuatro llamaradas y la segunda que consta de la secuencia de *scree diagrams* en una de las llamaradas para estudiar la transición.

5.4.1 Leyes de potencias en los *scree diagrams*.

Acerca de la primer parte del análisis de llamaradas se tienen los resultados que se muestran en las Figuras 22, 23, 24 y 25.

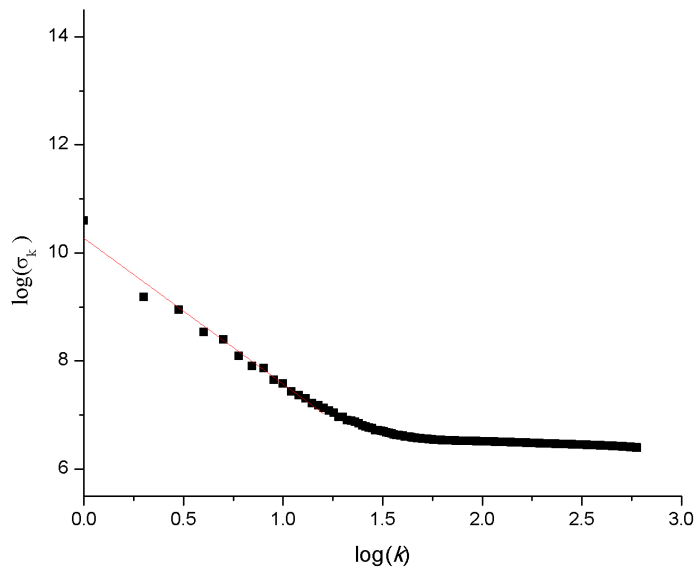
Estas 4 figuras (8 gráficas) presentan un ajuste de recta en la primera sección de datos que muestran un comportamiento lineal. En la Tabla 7 se ofrece un resumen de estos resultados al ajustar las rectas de cada gráfica. La primera columna (Llamarada) indica la llamarada de la que se trata, señalada por el mes en que ocurrió, las siguientes dos columnas presentan los valores de pendiente y r^2 antes de que ocurra la llamarada (Preflare) y los valores de la gráfica durante la llamarada se muestran en las columnas señaladas como *Flare*. A la abscisa de la gráfica donde se muestra el codo de la gráfica (el cambio de pendiente) lo hemos denominado *el punto de quiebre* y los valores de estos se muestran en las columnas marcada como *P.q.* en la Tabla 7. Estos puntos de quiebre se reportan sólo con 2 cifras significativas. De aquí, podemos notar que el valor de la pendiente sí se modifica

Llamarada	Preflare			Flare		
	Pendiente	r^2	P.q.	Pendiente	r^2	P.q.
abril	-2.70 ± 0.10	0.981	1.2	-2.574 ± 0.01	0.998	2.1
mayo	-2.12 ± 0.03	0.991	1.7	-2.77 ± 0.02	0.995	2.1
noviembre	-2.11 ± 0.03	0.993	1.6	-2.08 ± 0.02	0.996	1.6
diciembre	-2.42 ± 0.04	0.984	1.8	-2.51 ± 0.01	0.997	2.1

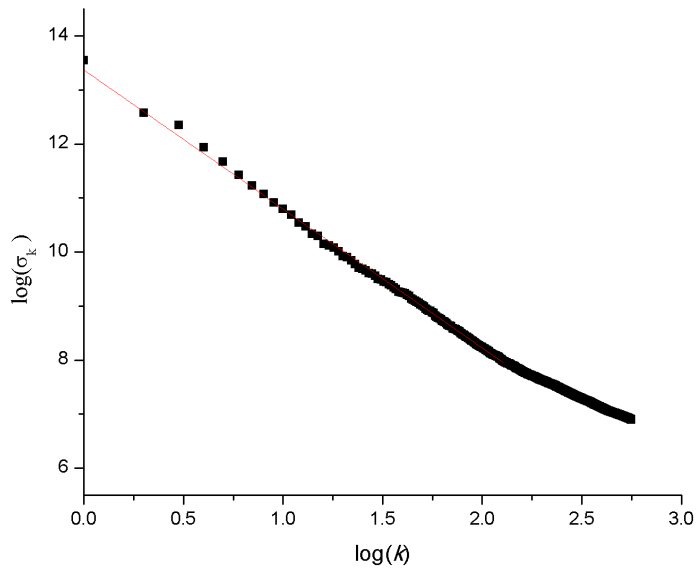
Tabla 7: Resumen de resultados para los ajustes de recta.

antes y durante la llamarada; sin embargo, parece no ser consistente, al menos para esta pequeña muestra, en si aumenta o disminuye.

El punto de quiebre en las flares de abril, mayo y diciembre aumenta, i.e. la recta de ajuste por mínimos cuadrados abarca una zona más amplia, i.e. la correlación de la región flare es mayor. Las pendientes exhiben valores entre -2 y -3 lo cual está asociado a un ruido browniano y esto se interpreta como una memoria de largo alcance del sistema, una alta autocorrelación de los datos, describe una serie de tiempo en que los datos dependen fuertemente del tiempo anterior.

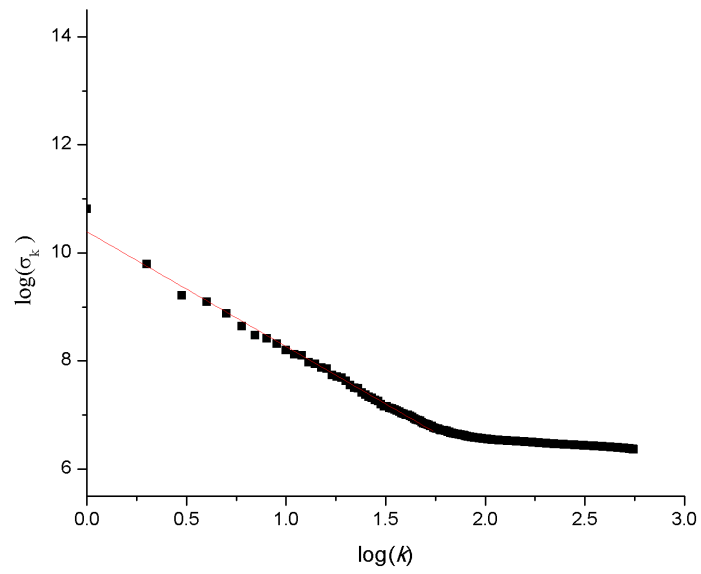


(a) Preflare

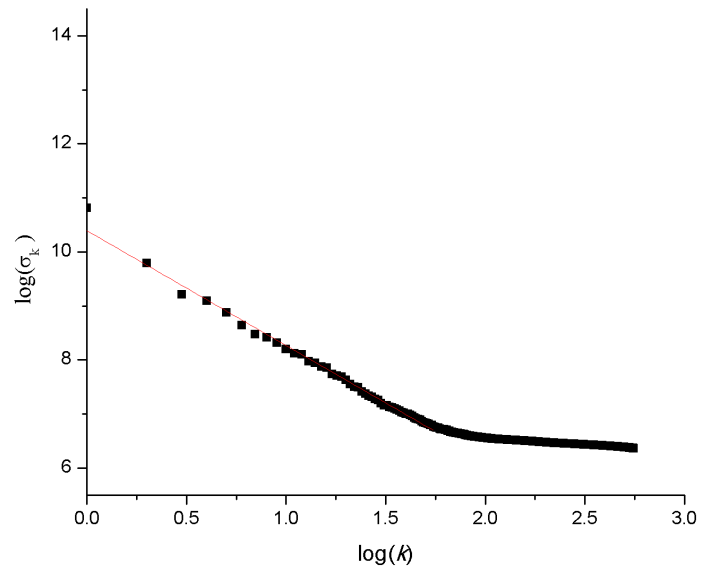


(b) Flare

Figura 22: Gráficas de y ajustes de recta para los datos de (a)preflare y (b)flare, de la llamarada del 11 de abril de 2013.

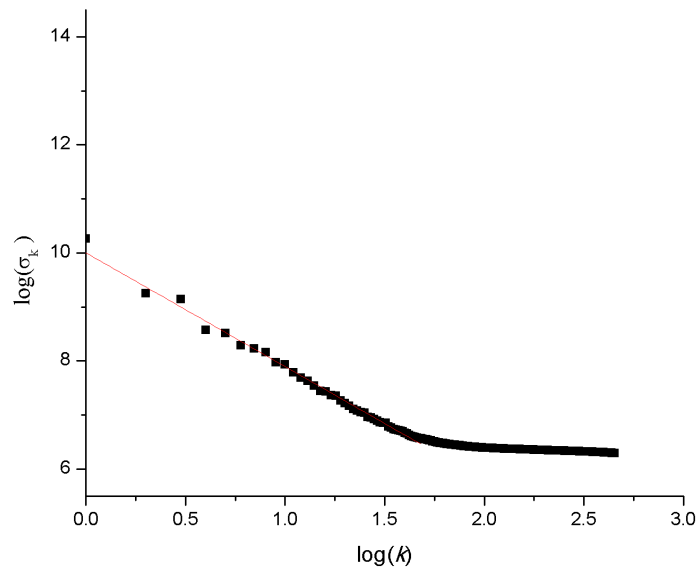


(a) Preflare

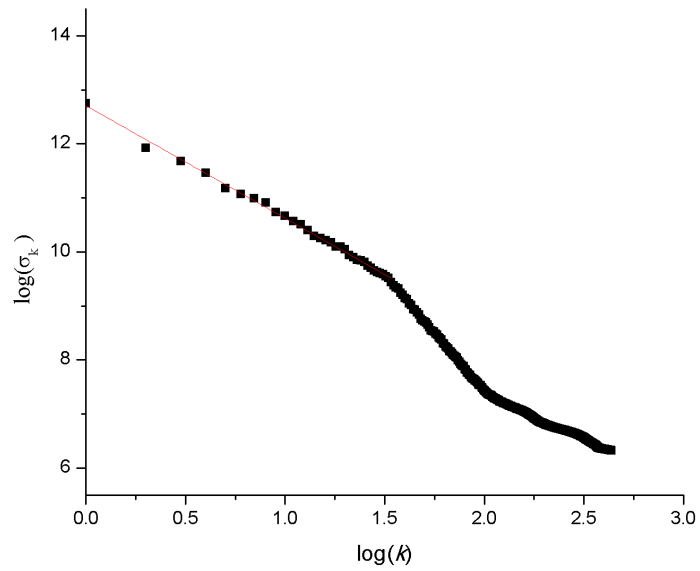


(b) Flare

Figura 23: Gráficas de $\log(\sigma_k)$ y ajustes de recta para los datos de (a) preflare y (b) flare, de la llamarada del 17 de mayo de 2013.

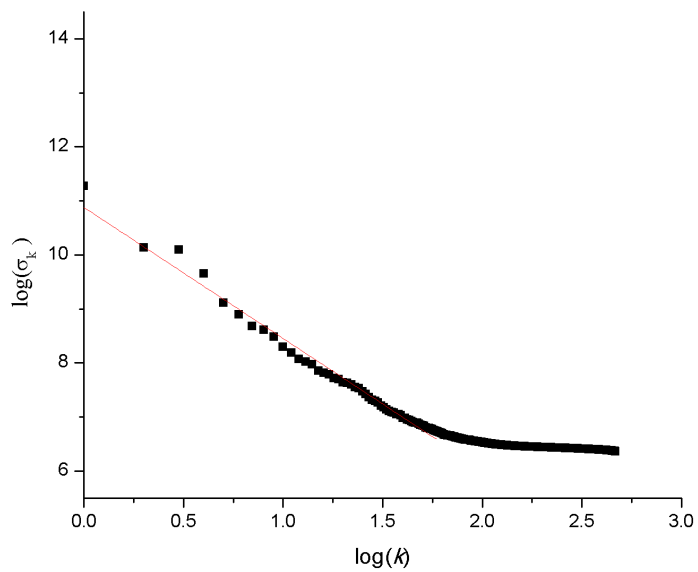


(a) Preflare

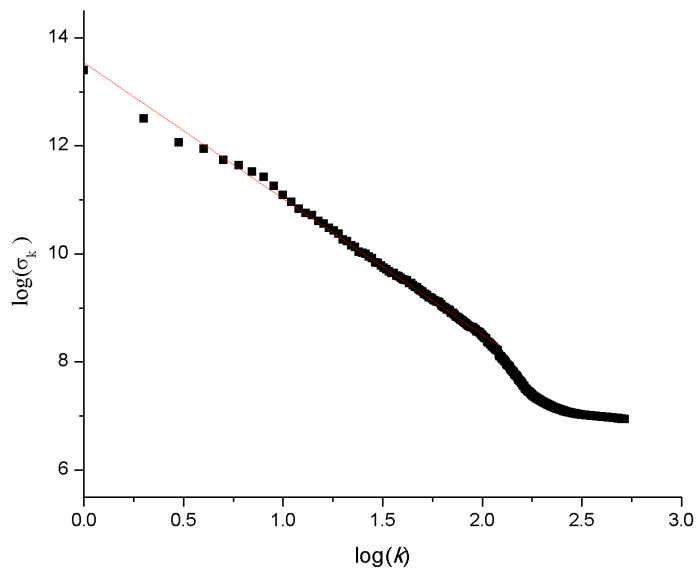


(b) Flare

Figura 24: Gráficas de y y ajustes de recta para los datos de (a)preflare y (b)flare, de la llamarada del 3 de noviembre de 2013.



(a) Preflare



(b) Flare

Figura 25: Gráficas de y y ajustes de recta para los datos de (a) preflare y (b) flare, de la llamarada del 13 de diciembre de 2013.

5.4.2 *La transición de una llamarada.*

Por otro lado, la segunda parte del estudio de llamaradas (la secuencia de *scree diagrams*) que estudia el proceso de formación de una llamarada arroja los resultados que se presentan en la Figura 26.

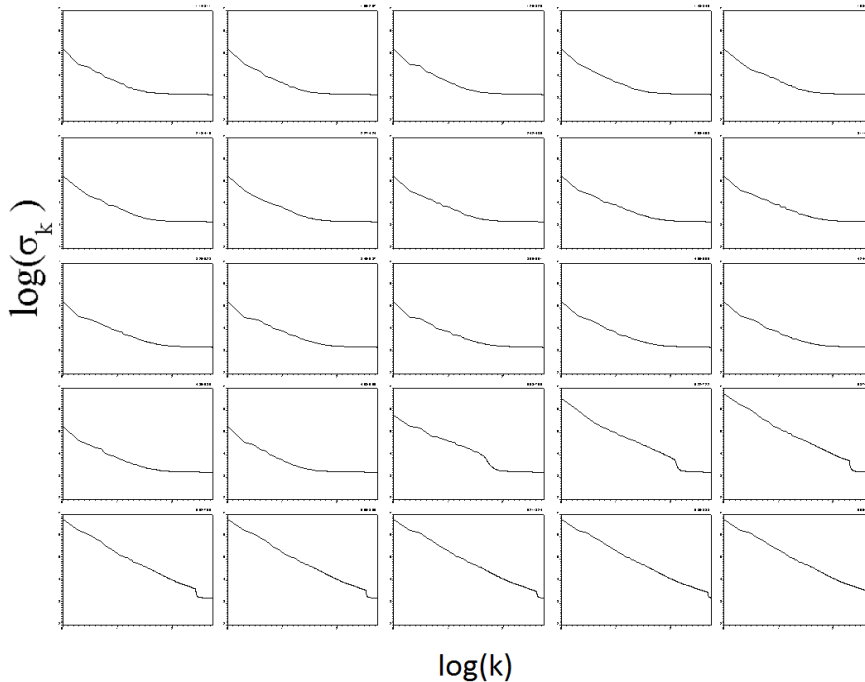


Figura 26: Secuencia de resultados en el proceso de *ventanas*.

De dicha Figura 26, se puede observar que la sucesión de gráficas se mantiene relativamente constante en su comportamiento hasta la gráfica número 18, que corresponde a la ventana con periodo de tiempo 5:08-7:05 hrs. y que muestra el primer cambio evidente y abrupto en el comportamiento general (de exponenciales decreciente a tener una parte fuertemente lineal). Cabe señalar que la llamarada de esta fecha comienza cerca de las 6:59 por lo que la ventana de la gráfica 18 (la gráfica donde se nota el cambio) es la primer ventana que contiene la llamarada pues la ventana anterior tiene un periodo de 4:53-6:50 hrs.

Tanto de este análisis, como del anterior, podemos observar un claro cambio en los *scree diagrams* que podría llegar a ser cuantificable. Sin embargo, para este primer intento de análisis con la sucesión de diagramas, no parece existir una señal de alerta temprana; claro que, las ventanas están separadas entre sí cerca de 15 minutos y por lo tanto esa es nuestra resolución de alerta temprana.

INTERPRETACIONES

- En las Figuras 10, 11 y 12 se observa una alta correlación con el número de manchas solares y diversos parámetros de la actividad solar como el flujo solar F_{107} , el índice coronal, la intensidad de la línea espectral de MgII, la irradiancia solar total, y el área ocupada por las manchas solares.
- Las correlaciones de los distintos parámetros de actividad solar con el número de manchas solares (Tabla 3) son altas de 0.81 a 0.96 y no presentan retardo. Estas correlaciones altas significan que cuando una señal tiende a subir la otra también y cuando una baja la otra también, el retardo nulo significa que coinciden además en los tiempos en que se alcanzan los máximos o mínimos (sin desfase). Estos resultados justifican la elección del número de manchas solares como indicador la actividad solar.
- Respecto a los indicadores geomagnéticos Kp, Ap, aa y AE presentan una buena relación con el número de manchas solares (Figuras 15 y 16), la cual se cuantifica con correlaciones de entre 0.808 y 0.822 (Tabla 4). Los retardos (que se pueden interpretar como un desfase de las señales) son de 0.597 (casi medio mes) para los parámetros Kp, Ap y aa y de 0.1667 (aproximadamente 5 días) para el AE.
- En los núcleos de hielo (Figura 17) ya no hay una correlación con el número de manchas (Tabla 5) respaldado por correlaciones bajas (de cerca de 0.6) y retardos de varios años para la mayoría de los materiales excepto el ^{18}O que no tiene desfase (en años) con respecto al número de manchas y que tiene una correlación mayor (cerca de -0.77) con el número de manchas. El signo negativo refleja una anti-correlación (si una señal sube la otra disminuye).
- Los anchos de anillos en árboles tienen correlaciones con el número de manchas solares cercanas a 0.78 (Figura 18 y Tabla 6) lo que resulta similar a los núcleos de hielo que contienen ^{18}O pero el retardo en los anchos de anillos de árboles es muy variable (entre -4 y 9 años). Debido a estas bajas correlaciones consideramos que no es tan buen *proxi* de la actividad solar utilizar la composición química de los núcleos de hielo y el ancho de los anillos de los árboles, parámetros que comúnmente se usan para extender en el pasado las series de tiempo de la actividad solar.

- Del análisis espectral del número de manchas solares (Figura 14) se observa que parece haber una tendencia lineal, aunque con mucho ruido. La pendiente de dicha recta es cercana a -1 , la cual corresponde a un ruido rosa, o $1/f$. Este tipo de tendencia caracteriza series de tiempo invariantes de escala.
- Los modos normales del número de manchas solares (Figura 19) muestran la tendencia general de los datos con el primer modo y la más fuerte periodicidad (de aproximadamente 11 años) con el segundo modo. Bastan 5 modos de la descomposición para reconstruir la serie original (Figura 20).
- El scree diagram del número de manchas solares (Figura 21) sí muestra una tendencia lineal del tipo $1/f$. Esto indica un fenómeno que es invariante de escala, es decir, que si uno toma fragmentos de la serie del número de manchas éstos son idénticos estadísticamente a la serie original.
- En cuanto al análisis de imágenes de llamaradas usando SVD se tienen pendientes entre -2.11 y -2.70 (Tabla 7). Hay un cambio estadísticamente significativo de comportamiento en los *scree diagrams* antes y durante la llamarada (Figuras 22-25). Este cambio se expone más detalladamente en el análisis de la transición mediante el uso de *ventanas* (Figura 26).

CONCLUSIONES

1. Hemos mostrado que a pesar de que existen una gran cantidad de parámetros que miden la actividad solar, la mayoría de ellos tienen el mismo comportamiento y esto valida al número de manchas como un indicador característico de la actividad solar en general.
2. Los índices geomagnéticos son indicadores terrestres que pueden asociarse muy bien a la actividad solar pues no sólo tienen gráficas similares, sino que presentan una correlación alta, después sigue el ancho de anillos en árboles y el ^{18}O . La concentración del resto de materiales en núcleos de hielo muestran una mala correlación.

La correlación no implica causalidad, pero, la aportación de estos resultados es que brindan una rápida evaluación de la calidad de estos indicadores como herramientas para la inferencia del comportamiento solar pasado o futuro y no suelen encontrarse tantos y tan diferentes indicadores comparados con un mismo valor, quizás por toda la recolección de datos que es necesaria.

3. El análisis del número de manchas en modos normales nos muestra la tendencia general de la serie y un tipo de señal $1/f$
4. Por último, respecto al estudio de llamaradas solares podemos decir que el cambio de comportamiento al ocurrir una llamarada es claro, pero la investigación debe seguirse sobre todo en la dirección de generar más estadística que permita resultados más firmes. Se debe buscar también, si los resultados no dependen de la intensidad, tamaño, o duración de la llamarada. Continuar en estas direcciones puede tener relevancia por el hecho de que este análisis es nuevo y al momento no existe una forma eficiente de predecir las llamaradas.

APÉNDICES



LISTA DE BOSQUES DE LOS DATOS DE ANCHO DE ANILLOS EN ÁRBOLES.

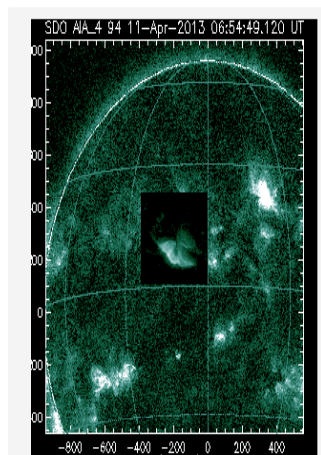
1. Canadá
 - Campbell
 - Mt Cain
2. Nueva Zelanda
 - Moa Park
 - Ahaura
 - Rahu Saddle
 - Takapari
3. Argentina
 - Lago Escondido
 - Rio Moate
 - Valle de Andorra
4. Noruega
 - Forfjorddalen
 - Stonglandseidet
 - Vikran
5. Rusia
 - Kola Peninsula
 - N. Yakutia
 - Lukunska
 - Lower Lena
 - Adycha
6. Suecia
 - Nonshaugen
 - Central Mts.
 - Skuleskogen
 - Tannsjö
7. EU
 - Sheenjak River

- Cordova
- Ellsworth Glacier
- Exit Glacier
- Lower Twin
- Miner's Well
- Rock Glacier
- Tebenkof Glacier
- Wittier canal
- Wolverine Glacier

B

MÁS INFORMACIÓN SOBRE LAS IMÁGENES UTILIZADAS EN EL ESTUDIO DE LLAMARADAS.

Las siguientes figuras muestran más información (para cada llamarada) respecto a la radiación en rayos X durante la secuencia de imágenes y la región del disco solar de donde fueron tomadas las mismas.



STARTTIME	2013-04-11T04:55:00
ENDTIME	2013-04-11T08:55:00
REFTIME	2013-04-11T23:44:24
XCEN	-192
YCEN	288

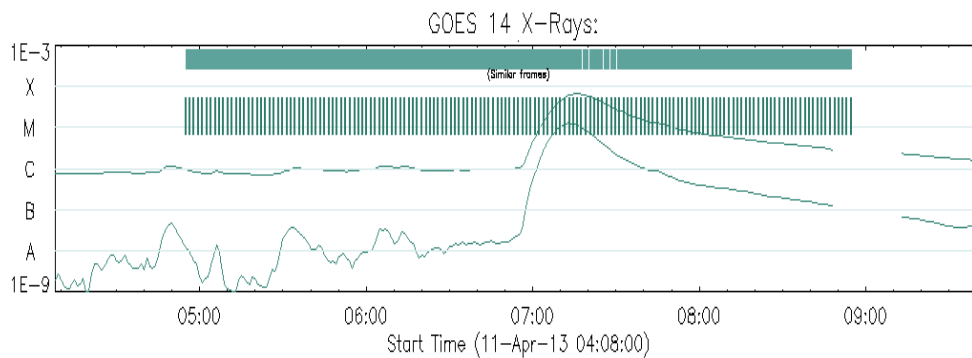
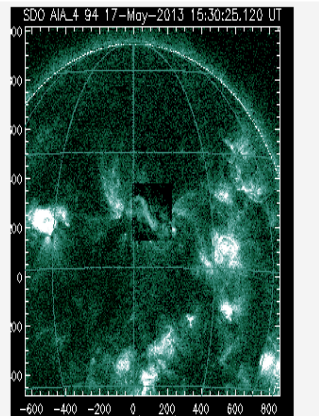


Figura 27: Información de la llamarada de abril.



STARTTIME	2013-05-17T14:30:00
ENDTIME	2013-05-17T16:30:00
REFTIME	2013-05-17T23:43:47
XCEN	115
YCEN	269

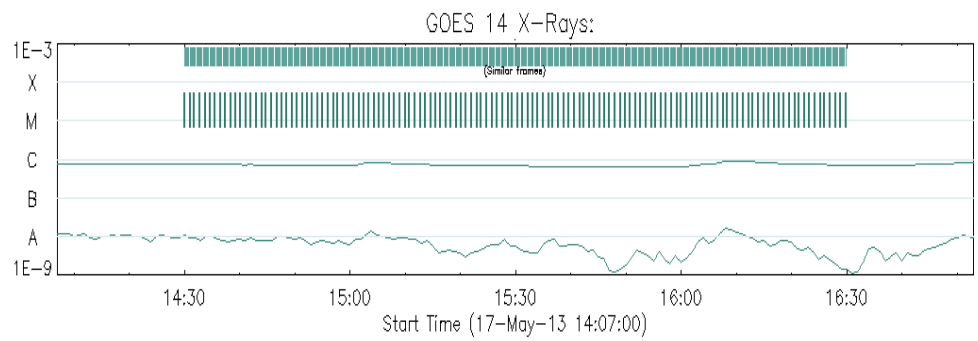
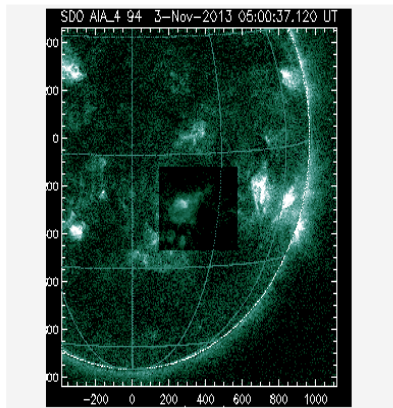


Figura 28: Información de la llamarada de mayo.



STARTTIME	2013-11-03T03:30:00
ENDTIME	2013-11-03T06:30:00
REFTIME	2013-11-03T23:41:11
XCEN	365
YCEN	-288

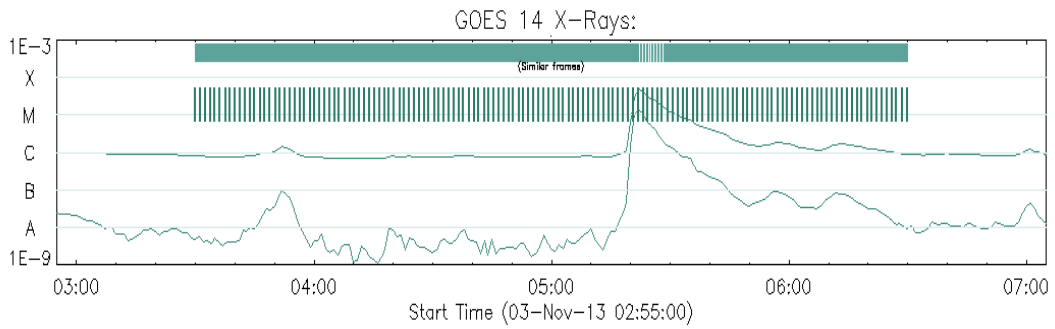
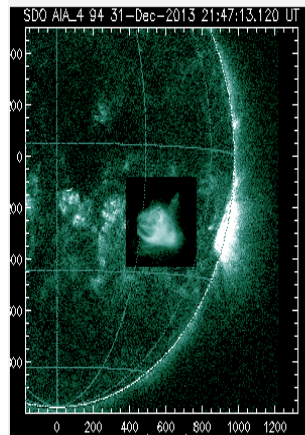


Figura 29: Información de la llamarada de noviembre.



STARTTIME	2013-12-31T19:45:00
ENDTIME	2013-12-31T23:45:00
REFTIME	2013-12-31T23:43:59
XCEN	576
YCEN	-249.5

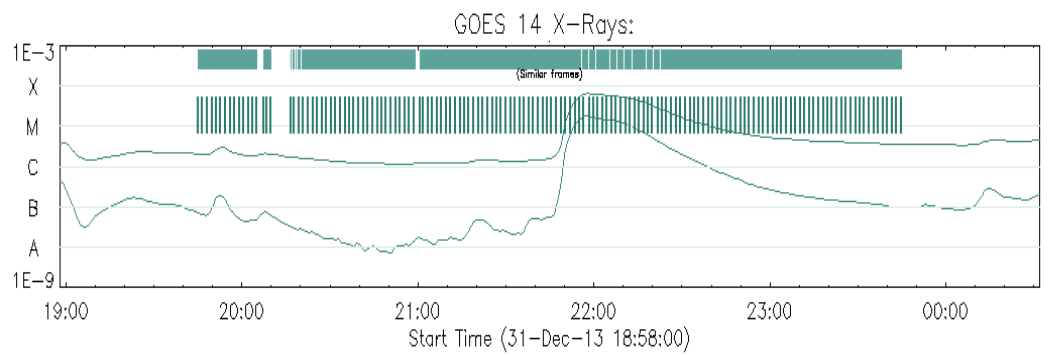


Figura 30: Información de la llamarada de diciembre.

PROGRAMAS DESARROLLADOS PARA EL ESTUDIO DE LOS DATOS.

Todos los códigos fueron escritos en Python.

```
import pandas as pd
import numpy as np
import csv

# importamos manchas_hemisferio.csv que es el archivo con los datos.

df=pd.read_csv('manchas_hemisferio.csv', sep=',',header=None)
datos=df.values
columnas=datos.T

#convertimos en arreglos las columnas de datos que nos interesan
manchas_sur=columnas[-1]
manchas_norte=columnas[-2]
manchas=columnas[-3]

#importamos las fechas de los inicios de los ciclos de carrington
bf=pd.read_csv('carrington_rotation_1992.csv', sep=',',header=None)
carrington=bf.values
carrington=carrington.T

#obtenemos los promedios y desviación std. desde la última coincidencia hasta la siguiente
serie=[] ; error=[] ; i=4; cont=0
for fecha in fechas_c[1:313]: #aqui se pone la ultima coincidencia de fecha a buscar
    j=i
    while True:

        #print(i)
        i=i+1
        if np.array_equal(fecha , fechas_d[i]):

            serie.append( np.mean(manchas[j:i+1]))
            error.append( np.std(manchas[j:i+1]) )
            break

#escribimos en un archivo

myfile = open('manchas_suma.csv', 'wb')
wr = csv.writer(myfile, quoting=csv.QUOTE_ALL)
wr.writerow(serie)
```

Figura 31: Programa para calcular promedios de acuerdo a las rotaciones de Carrington.

```
import re
import urllib
base_url = "http://sdwww.lmsal.com/sdmedia/ssw/media/ssw/ssw_client/data/ssw_service_160403_204722_26654/ssw_cutout"
#el base_url es la dirección que se obtiene al pedir la información del AIA por correo

f = open("raw.dat")
#raw.dat es un archivo conteniendo la lista de direcciones web

for line in f: result = re.search("[0-9]*_[0-9]*_AIA_94_.fts",line)
    if result != None:
        fname = result.group(0)
        urllib.request.urlretrieve(base_url+fname, "./%s" % fname)
```

Figura 32: Programa para descargar los archivos fts de manera automatizada.

```
import glob
import pyfits
import numpy as np
import numpy.linalg
import matplotlib.pyplot as plt

lista_names=glob.glob('*.fts')
orden=sorted(lista_names)

A=[]
for name in orden:

    hdulist = pyfits.open(name)
    datos= hdulist[0].data
    datos= datos[20:-1,1:-1]      #se recorta la orillas de la imagen
    datos = datos.flatten()
    A.append(datos)

A=np.asarray(A)

s = numpy.linalg.svd(A, compute_uv=False)    # se calcula el SVD y se obtiene el vector s
                                             # con los valores singulares

f = open('Svector_pre.txt', 'w')
for item in s:
    f.write("%s\n" % item)
```

Figura 33: Programa para calcular el SVD.

REFERENCIAS

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Gray, L.J. et.al., *Solar influences on climate*. Rev. Geophys, 2010
- [2] Paul Charbonneau, *Dynamo Models of the Solar Cycle*, Living Rev. Solar Phys. 7, 2010
- [3] Deprettere F., *SVD and Signal Processing: Algorithms, Analysis and Applications*. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1988.
- [4] Clette, Svalgaard, Vaquero, Cliver, *Revisiting the Sunspot Number, A 400-Year Perspective on the Solar Cycle*, 2014.
- [5] <https://www.ngdc.noaa.gov/stp/solar/flux.html>
- [6] ftp://ftp.geolab.nrcan.gc.ca/data/solar_flux/daily_flux_values/
- [7] <ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/warehouse/>
- [8] SpaceWeather.com, reporte del número de manchas de Boulder, NOAA Space Environment Center. <http://www.swpc.noaa.gov/>
- [9] SIDC, RWC Belgium, World Data Center for the Sunspot Index, Royal Observatory of Belgium. <http://sidc.oma.be/>
- [10] ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/SOLAR_DATA/SOLAR_CORONA/INDEX/docs/
- [11] C.Fröhlich y Judith Lean, *Total Solar Irradiance Variations*, 1998.
- [12] ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/SOLAR_DATA/SOLAR_IRRADIANCE/
- [13] <http://www.climatedata.info/proxies/data-downloads/>
- [14] ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/GEOMAGNETIC_DATA/INDICES/KP_AP/
- [15] ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/GEOMAGNETIC_DATA/AASTAR/
- [16] ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/SOLAR_DATA/SOLAR_UV/UVCOMPOSITE/NOAMgII_dat.txt
- [17] http://roma2.rm.ingv.it/en/themes/23/geomagnetic_indices/26/auroral_electroject_indices
- [18] <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/>
- [19] <ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/paleo/icecore/polar/svalbard/>

- [20] <ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/paleo/icecore/greenland/act2metals2008.txt>
- [21] <ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/paleo/icecore/greenland/d4-2007carbon.txt>
- [22] A. L. Rivera, y M. Aparicio, *El ciclo solar en espacio real, recíproco y fase*, Memorias del VIII Encuentro de Participación de la Mujer en la Ciencia, Centro de Investigaciones en Óptica, León, Gto., México, trabajo FMCT15 (2011) ISBN: 978-607-95228-0-3.
- [23] William H. Press, Brian P. Flannery, Saul A. Teukolsky, William T. Vetterling. *Numerical Recipes in C: The Art of Scientific Computing*. Cambridge University Press, 1992.
- [24] Kirk Baker, *Singular Value Decomposition Tutorial*, 2005.
- [25] D.P. Berrar, W. Dubitzky, M. Granzow, eds., *Singular value decomposition and principal component analysis In A Practical Approach to Microarray Data Analysis*, 2003.
- [26] Richards J.A., *Remote Sensing Digital Image Analysis*, New York: Springer-Verlag, 1993.
- [27] Berry M.W., Dumais S.T., O'Brien G.W. *Using linear algebra for intelligent information-retrieval.*, Siam Review, 1995