



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Estudio multiespectral de radiación solar comprendido en el periodo 2003 – 2020 según datos satelitales de SORCE y GOES

Néstor Iván Moreno Roballo

Universidad Nacional de Colombia
Observatorio Astronómico Nacional
Facultad de Ciencias
Bogotá, Colombia
2023

Estudio multiespectral de radiación solar comprendido en el periodo 2003 – 2020 según datos satelitales de SORCE y GOES

Néstor Iván Moreno Roballo

Tesis presentada como requisito para optar al título de:
Magíster en Ciencias Astronomía

Director:

Prof. Benjamín Calvo-Mozo

Observatorio Astronómico Nacional, Colombia

Co-Director:

Ph.D. Juan Carlos Martínez Oliveros

Space Sciences Laboratory- University of California, Berkeley

Línea de Investigación:

Astrofísica Solar

Grupo de Investigación:

Astronomía, Astrofísica y Cosmología

Universidad Nacional de Colombia

Observatorio Astronómico Nacional

Facultad de Ciencias

Bogotá, Colombia

2023

Dedicatoria y lema

Le dedico el resultado de este trabajo a toda mi familia. Principalmente, a mi querida esposa y a mi hijo que son el amor de mi vida.

Cada día el sol ilumina un mundo nuevo.

Paulo Coelho

Agradecimientos

Me gustaría expresar mi sincero agradecimiento a todas las personas que me han apoyado en esta investigación y redacción de mi tesis.

En primer lugar, quisiera agradecer al profesor Benjamín Calvo Mozo del Observatorio Astronómico Nacional, Colombia por su asesoría en la ejecución de este trabajo en conjunto con los doctores Juan Carlos Martínez Oliveros de Space Sciences Laboratory- University of California, Berkeley. Su apoyo constante, aliento y valiosas discusiones que ayudaron a dar forma a mis ideas y a superar los desafíos que encontré en el camino. Sus perspectivas y comentarios contribuyeron significativamente a la calidad final de mi tesis.

Además, me gustaría expresar mis agradecimientos a mi hermano Carlos Vicente Moreno Roballo y a los profesores Jose Danilo Rairan Antoniles y Cesar Alexander Chacón Cardona de la Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas. Aprecio su amistad, apoyo mutuo y la generación de un ambiente de aprendizaje positivo.

No puedo pasar por alto el respaldo de mi familia y amigos. Su amor incondicional, su aliento constante y su comprensión. Agradezco sinceramente su apoyo emocional y su fe en mí, lo cual me ha impulsado a alcanzar mis metas.

Por último, pero no menos importante, quiero agradecer a MGM Ingenieria y Proyectos por el apoyo financiero que brindaron en uno de los semestres de la maestría.

Una vez más, quiero agradecer a todos los que contribuyeron de alguna manera a mi tesis. Sin su apoyo, este logro no habría sido posible. Estoy sinceramente agradecido por su participación y espero que mi trabajo contribuya de manera significativa al campo de estudio.

Con gratitud.

Néstor Iván Moreno Roballo

Resumen

Título en español: Estudio multiespectral de radiación solar comprendido en el periodo 2003–2020 según datos satelitales de SORCE y GOES

El presente estudio se centró en analizar la radiación solar en un periodo de tiempo que abarca desde 2003 hasta 2020, utilizando datos diarios satelitales proporcionados por SORCE (*Solar Radiation and Climate Experiment*) en diferentes bandas y GOES (*Geostationary Operational Environmental Satellite*) en rayos X; junto con los registros de número de manchas solares y eventos clase C, M y X. Se realiza una comparación analítica para entender los posibles factores que producen la variabilidad del ciclo solar y otra con la ayuda de inteligencia artificial más precisamente aprendizaje automático con redes neuronales de clasificación. Los datos se compilaron con una matriz de datos de entrada de 24×6075 y se etiquetan respecto a tres salidas binarias, A Sol calmo, B Sol con actividad moderada y C Sol con actividad fuerte. Los resultados obtenidos muestran una correlación de 90.3 % de concordancia de la totalidad de los datos. El 48.1 % de los datos tienen un comportamiento de Sol calmo, 41.3 % presentan una actividad solar moderada y el 1.0 % con actividad solar fuerte.

Palabras clave: Sol calmo, Sol activo, ciclo solar, manchas solares, fulguración solar, Satélite GOES, Satélite SORCE, aprendizaje automático, correlación de datos.

Abstract

Título en inglés: *Multispectral study of solar radiation included in the period 2003–2020 according to satellite data from SORCE and GOES*

The present study was focused on the analysis of the solar radiation in a period from 2003 to 2020, using daily satellite data provided by SORCE (Solar Radiation and Climate Experiment) in different bands and GOES (Geostationary Operational Environmental Satellite) in X-rays; together with the records of the number of sunspots and class C, M and X events. An analytical comparison is performed to understand the possible factors that produce the variability of the solar cycle and another with the help of artificial intelligence more precisely automatic learning with classification neural networks. The data were compiled with an input data matrix of 24×6075 and labeled with respect to three binary outputs, A quiet Sun, B Sun with moderate activity and C Sun with strong activity. The results obtained show a correlation of 90.3 % agreement of all the data. The 48.1 % of the data have a behavior of quiet Sun, 41.3 % present a moderate solar activity and 1.0 % sun with strong activity.

Keywords: *Quiet Sun, active Sun, solar cycle, sunspots, solar flare, GOES satellite, SORCE satellite, machine learning, data correlation*

Contenido

Agradecimientos	vii
Resumen	ix
1 Introducción	1
1.1 Estructura interna del Sol	1
1.2 Manchas solares	2
1.3 Ciclo solar	3
1.4 Fulguraciones solares	4
1.5 Satélites GOES y SORCE	6
1.6 Inteligencia Artificial	12
2 Instrumentación y datos	15
2.1 Satélite GOES	16
2.1.1 Sensor GOES/XRS B	17
2.1.2 Manchas solares	19
2.1.3 Fulguraciones clase C, M y X	20
2.2 Satélite SORCE	21
2.2.1 Sensor SORCE/XPS	21
2.2.2 Sensor SORCE/SOLSTICE	22
2.2.3 Sensor SORCE/SIM	23
2.2.4 Sensor SORCE/TIM	25
3 Comparación de bandas espectrales con datos satelitales de SORCE y GOES	27
3.1 Comparación manchas solares, SORCE/TIM, eventos clase C,M y X versus sensores GOES/XRS B, SORCE/XPS, SORCE/SOLSTICE y SORCE/SIM.	27
3.2 Comparación valor background sensor GOES/XRS B y eventos clase C,M y X versus fulguraciones clase X.	29
3.2.1 Evento 04/11/2003	31
3.2.2 Evento 06/09/2017	33

4	Inteligencia artificial: Modelo de clasificación en series de tiempo de 2003-2020 con datos satelitales de SORCE y GOES	35
4.1	Red neuronal	35
4.1.1	Matriz de datos	36
4.1.2	Arquitectura neuronal	37
4.1.3	Entrenamiento	38
4.1.4	Resultados	39
5	Conclusiones y discusión	43
5.1	Conclusiones	43
5.2	Discusión	45
6	Anexo: Algoritmo	46
	Bibliografía	51

1 Introducción

1.1. Estructura interna del Sol

El Sol es nuestra estrella principal, fuente de luz y energía; sus efectos son tan importantes en la Tierra que determina sostenibilidad de la vida como la conocemos. El Sol es una estrella que se encuentra a una distancia media equivalente de 149 597 870 km (Unidad Astronómica, au) de la Tierra; además es una estrella que se encuentra en la fase denominada secuencia principal, con un tipo espectral G2 y clase de luminosidad V. Sus principales propiedades físicas se encuentran en la tabla 1-1 :

Masa	$m = 1.989 \times 10^{30} \text{ kg}$
Radio	$R = 6.960 \times 10^8 \text{ m}$
Densidad media	$\bar{\rho} = 1409 \text{ kg/m}^3$
Densidad central	$\rho_c = 1.6 \times 10^5 \text{ kg/m}^3$
Luminosidad	$L = 3.9 \times 10^{26} \text{ W}$
Temperatura efectiva	$T_e = 5785 \text{ K}$

Tabla 1-1: Principales propiedades físicas del Sol. Tomado de Karttunen (1987)

La atmósfera solar está compuesta por zonas iniciando por su núcleo, seguido de la zona radiativa, tacoclina y zona convectiva; posteriormente la capa en el visible es la fotosfera, seguido de la cromosfera, región de transición y la corona solar. A continuación se describe cada una de ellas:

- Núcleo: Es la región más interna del Sol que va desde el centro hasta un 20 o 25 % del radio solar. En esta zona se encuentra cerca del 34 % de la masa del Sol; tiene una densidad de 150 g/cm^3 y una temperatura de aproximadamente $15 \times 10^6 \text{ K}$ (Goupil et al. 2011) en el centro de la configuración.
- Zona radiativa: Es nombrada zona radiativa porque la energía es transportada principalmente en forma de radiación. En esta zona la temperatura y la densidad decrecen hasta unos $1,5 \times 10^6 \text{ K}$ y a $0,2 \text{ g/cm}^3$ respectivamente. Contando el núcleo esta zona completaría un 70 % del radio solar (Abhyankar 1977).

- **Tacoclina:** La tacoclina es la zona de transición del Sol entre la zona interior radiativa, es decir donde el transporte de energía se lleva a cabo mediante radiación, y la zona de transporte de energía por convección que le rodea rotando de manera diferencial. El término tacoclina fue acuñado por Spiegel y Zahn (Spiegel y Zahn 1992). La tacoclina está a unos 210 Mm de profundidad o 0.7 radios solares desde el centro solar y su espesor es de unos 0.04 radios solares (28 Mm).
- **Zona convectiva:** Es la capa interna del Sol situada por encima de la tacoclina; en esta región los gases solares presentan una opacidad alta a los fotones, por tanto estos son absorbidos con facilidad y se convierten en un material opaco al transporte de radiación. Además la convección térmica se manifiesta en forma de celdas que transportan calor hacia la fotosfera (Abhyankar 1977).
- **Fotosfera:** La fotosfera es la zona visible del sol; puesto que el Sol es gaseoso, su fotosfera es algo transparente, esta puede ser observada hasta una profundidad de unos cientos de kilómetros antes de volverse completamente opaca. Normalmente, se considera que la fotosfera solar tiene unos 100 o 200 km de profundidad. La temperatura media de la fotosfera es de aproximadamente 5.800 k (Abhyankar 1977).
- **Cromosfera, región de transición y corona :** La cromosfera, región de transición y corona solar se pueden percibir durante un eclipse total de sol. La cromosfera es la zona más fría de sol; varía su temperatura de 4200 K a 20.000 K. En esta zona se presenta un fenómeno inexplicable pero nada comparable como la región de transición que tan solo con 200 km pasa de tener una temperatura de 20.000 K a 1.000.000 K. La corona solar puede variar su temperatura de 1.000.000 K, 2.000.000 K y hasta 20.000.000 K. La corona Solar no siempre está uniformemente distribuida a través de la superficie del Sol (Athay 1976).

1.2. Manchas solares

Las manchas solares son las manifestaciones más antiguas detectadas de actividad solar desde la invención del telescopio. Consiste en la presencia de una región oscura observable en la fotosfera, llamada umbra con una temperatura de aproximadamente 4000 K y alta concentración de campo magnético alrededor de 0.1 T ¹. A su alrededor la parte más clara, penumbra, con una temperatura de aproximadamente 5000 K. Las manchas solares que no exhiben penumbra se llaman poros (Vaquero y Vázquez 2009). Las manchas solares pueden crecer, cambian de dimensiones y luego desaparecer. Pueden durar solo unas pocas horas o días; o incluso meses para los grupos más intensos; desde una mancha unipolar individual a grupos de manchas bipolares más organizados; o incluso evolucionar hacia grupos de manchas solares inmensos y muy complejos con polaridades magnéticas mixtas en todo el grupo.

¹ $0.1 \text{ T} =$ Mil veces más grande que el campo magnético promedio de la fotosfera.

Los grupos de manchas solares más grandes pueden cubrir grandes franjas de la superficie del Sol y tener muchas veces el tamaño de la Tierra. A los grupos de manchas solares que son claramente visibles y observados se les asigna un número para registrar y rastrear oficialmente el grupo de manchas solares a medida que gira a lo largo del disco solar visible.²

La serie de tiempo del número de manchas solares se refieren al registro histórico de la cantidad de manchas solares en la superficie del Sol a lo largo del tiempo. Estas series de tiempo son una parte importante de la observación y estudio de la actividad solar. Por lo tanto, fue y sigue siendo utilizado como una información clave en muchos campos de la investigación, obviamente en física solar, pero también en estudios climáticos. El número relativo de manchas solares, según lo definido por R. Wolf (1851, 1856), se basa en la ecuación 1-1 donde K es el coeficiente del observador, N_s el número total de manchas solares y N_g el número de grupos de manchas solares (Clette et al. 2014).

$$R = K(10 \cdot N_g + N_s) \quad (1-1)$$

En esta tesis se utiliza la base de datos con el número observado de manchas solares proporcionado NOAA³ y la NASA⁴ ellos utilizan la fórmula ideada por Rudolph Wolf.

1.3. Ciclo solar

El ciclo solar, también conocido como ciclo de actividad solar, es un patrón regular de variación en la actividad del Sol. Hay pocas dudas de que el ciclo solar es de naturaleza magnética y es producido por procesos de dínamo dentro del Sol. Aunque los detalles sobre cómo, cuándo y dónde operan los procesos del dínamo aún son inciertos, varias características básicas están bien aceptadas por la comunidad científica y proporcionan un marco para comprender el ciclo solar. Por ejemplo las regiones magnéticas siguen siendo una de las razones más predominantes del magnetismo solar tal como se observan en la superficie del Sol. El número de manchas solares en un momento dado representa la actividad solar que aumenta y disminuye cíclicamente durante un período aproximado de 11 años. El aumento de la actividad solar incluye aumentos en las emisiones de rayos X y ultravioleta extremo del Sol que producen efectos en la atmósfera superior de la Tierra.

Las manchas solares también están disponibles en varios otros observatorios solares, con enlaces a gran parte de esos datos en NOAA. Si bien los observatorios individuales tienen brechas de datos, sus datos son muy útiles para ayudar a mantener la coherencia durante

²<https://www.swpc.noaa.gov/phenomena/sunspotssolar-cycle>.

³ NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration

⁴ NASA: National Aeronautics and Space Administration

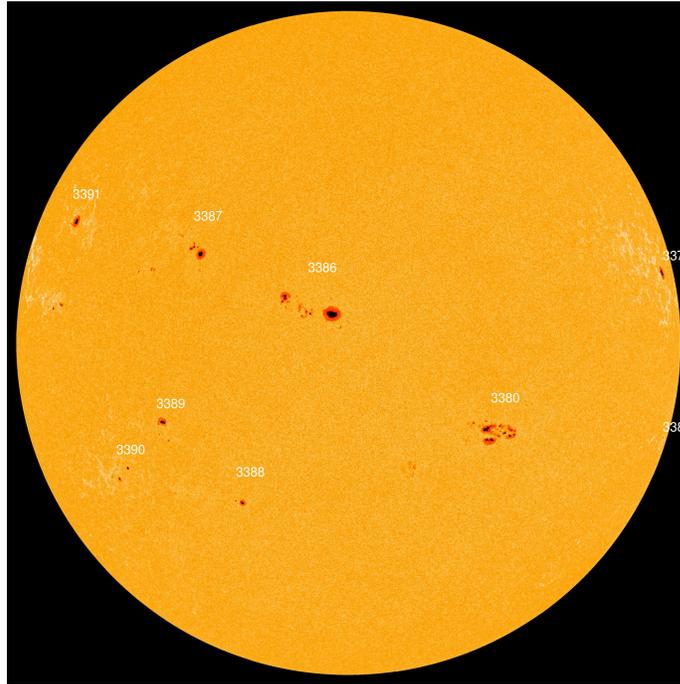


Figura 1-1: Manchas solares día 31 de julio de 2023: En este día se reportan 13 grupos de manchas solares, 81 número de manchas individuales y un número relativo de manchas solares $R=197$. Imágen tomada de <https://www.spaceweatherlive.com/es/archivo/2023/07/31/dayobs.html>

todo el intervalo desde 1874 hasta el presente. Estos conjuntos de datos tienen información adicional que no se refleja en el número de manchas solares, como la posición de las manchas solares sobre el disco solar. La distribución de la región de manchas solares con latitud ver figura 1-2 muestra que las manchas solares aparecen en dos bandas a cada lado del ecuador solar. Al comienzo de cada ciclo, aparecen manchas en latitudes superiores a $20\text{-}25^\circ$. A medida que avanza el ciclo, el rango de latitudes con manchas solares se amplía y la latitud central se desplaza lentamente hacia el ecuador, pero con una zona de evitación cerca del ecuador. Maunder lo ilustra en su famoso "Diagrama de la mariposa" (Hathaway 2010).

1.4. Fulguraciones solares

Como se mencionó anteriormente el ciclo solar está ligado a las actividades magnéticas propias del Sol. Al inicio del ciclo se dice que el Sol es calmo, debido a que no se presentan manchas solares; pero este concepto de Sol calmo no es del todo cierto; la temperatura aumenta en la cromosfera y la corona mantiene su plasma de millones de grados, lo que implica que el magnetismo silencioso puede ser un actor principal en el calentamiento de la atmósfera exterior del Sol. Esto genera eventos como filamentos, espículas y *nano flares*. A medida que

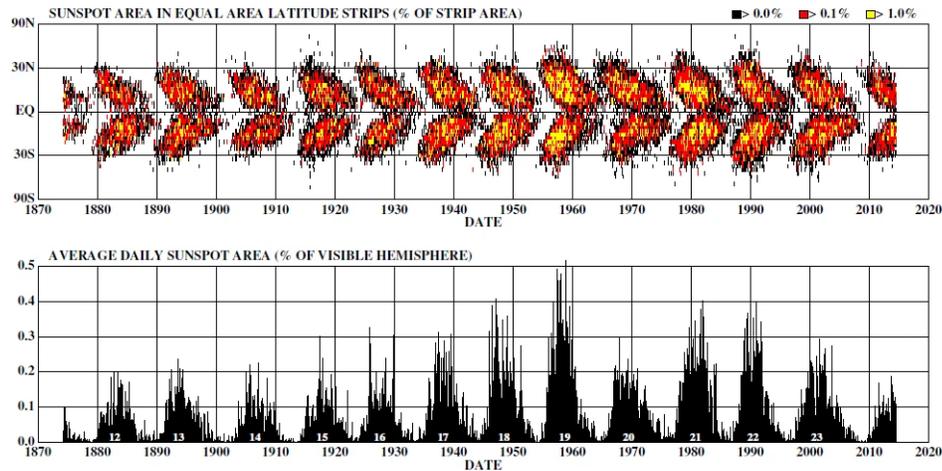


Figura 1-2: Ciclo solar: La imagen de parte superior muestra el diagrama mariposa; las manchas solares se forman en dos bandas, una en cada hemisferio iniciando aproximadamente a 25° desde el ecuador, luego a medida que se va acabando el ciclo migran hacia el ecuador. La imagen de la parte inferior representa el área promedio diaria de manchas solares para cada rotación solar desde mayo de 1874 en función del tiempo. Tomada de <https://link.springer.com/article/10.1007/lrsp-2015-4/figures/9>

avanza el ciclo, se dice que el Sol es dinámico; el número de manchas incrementa y de la misma manera se presenta aumento de la actividad solar incluyendo eventos de fulguraciones solares que se describe a continuación (Hathaway 2010)– .

Una fulguración solar, *flare* en inglés, se define como un evento explosivo repentino, rápido e intenso de liberación impulsiva de energía magnética por reconexión en una región activa compleja. Sin embargo, es mejor definir el fenómeno de *flare* observacionalmente; como un aumento de brillo de un amplio rango de emisiones diferentes a través del espectro electromagnético que ocurre en una escala de tiempo de minutos a horas. La mayoría de las manifestaciones parecen ser respuestas secundarias a el proceso de liberación de energía original, convirtiendo la energía magnética en energía de partículas (Schwenn 2006; Benz 2017).

Según Benz (2017) una fulguración se divide en las siguientes fases:

- Fase precursora: En esta fase la energía magnética se acumula lentamente en la corona solar. Este proceso puede durar unas cuantas horas a un par de días y es visible en rayos X suaves, EUV ⁵ y radio.
- Fase impulsiva: Aproximadamente 10^{38} electrones energéticos y a veces iones con la

⁵EUV: *Extreme ultraviolet*

misma cantidad de energía se aceleran, cuando la mayor parte de la energía de la fulguración ha sido liberada. La aparición de burbujas magnéticas en la cromosfera se puede observar en rayos X duros. Asimismo, quedan atrapadas algunas partículas de alta energía y producen emisiones intensivas en la banda de radio.

- Fase pico: Se denomina fase pico al rápido aumento en la intensidad de $H\alpha$. Las emisiones de $H\alpha$ alcanzan su máximo; en cuanto a la emisión de radio decimétrico se manifiesta en pulsaciones y se distribuye aún más.
- Fase de decadencia: El plasma coronal vuelve casi a su estado original, excepto en la corona alta ($> 1.2 R_{\odot}$), donde las eyecciones de plasma y las ondas de choque continúan acelerando las partículas, provocando ondas métricas, ráfagas de radio y eventos de partículas interplanetarias.

El modelo estándar de las fulguraciones solares considera a la reconexión magnética como el proceso físico responsable de la liberación de energía en una fulguración solar (ver figura 1-3, panel derecho). Las partículas se aceleran en la zona de reconexión y siguen las líneas magnéticas hacia la superficie y hacia el exterior en el espacio.

1.5. Satélites GOES y SORCE

Descripción general de los instrumentos de la serie GOES-R (16)

El satélite GOES ⁶ es uno de los satélites más utilizados en la comunidad científica, ofrecen una amplia gama de datos e información para la comunidad científica y meteorológica; los fenómenos ambientales de alto impacto como tormentas severas, huracanes, inundaciones, incendios, erupciones volcánicas y tormentas solares. Desde 1975, los satélites ambientales operativos geoestacionarios GOES han proporcionado imágenes y datos continuos sobre las condiciones atmosféricas y la actividad solar. Los productos de datos del GOES han dado lugar a pronósticos meteorológicos más precisos y oportunos y a una mejor comprensión de las condiciones climáticas a largo plazo. La NASA construye y lanza el GOES, y la NOAA los opera. (Goodman 2020)

Los satélites geoestacionarios giran alrededor de la Tierra en una órbita geosincrónica, lo que significa que orbitan el plano ecuatorial de la tierra a una velocidad que coincide con la rotación de la tierra. Esto les permite una posición fija en el cielo, permaneciendo estacionarios con respecto a un punto en el suelo. Los satélites GOES observan continuamente el hemisferio occidental desde aproximadamente 35,800 kilómetros sobre la tierra. Los satélites GOES se designan con una letra antes del lanzamiento y se les cambia el nombre con un número una vez que alcanzan la órbita geoestacionaria⁷.

⁶ GOES: Geostationary Operational Environmental Satellite

⁷<https://www.nesdis.noaa.gov/current-satellite-missions/history-of-noaa-satellites>

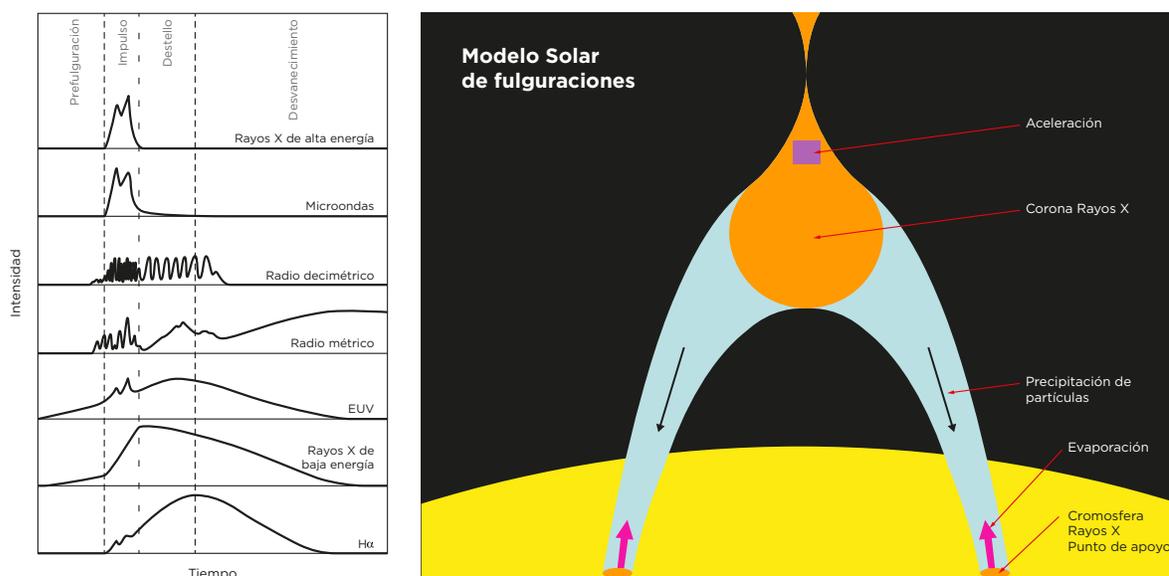


Figura 1-3: Perfil de intensidad en varias longitudes de onda para una fulguración y modelo de fulguraciones solares: A la izquierda se presenta la variación de la intensidad de una fulguración en varias longitudes de onda. La fase precursora suele durar pocos minutos, la fase impulsiva de 3 a 10 minutos, la fase de pico de 5 a 20 minutos y la fase de el decadencia varias horas. A la derecha modelo de fulguraciones solares. Líneas de campo magnético y plasma turbulento generados durante la reconexión magnética. Las partículas aceleradas que inciden en la cromosfera inferior más densa donde se producen y al alza pueden escapar al espacio interplanetario. Tomada y adaptada de <https://link.springer.com/article/10.1007/s41116-016-0004-3>

Hay tres clasificaciones de instrumentos de la serie GOES-R:

NADIR Pointing: Incluye los sensores ABI y GLM.

1. ABI: *Advanced Baseline Imager* es el instrumento principal de la serie GOES-R para obtener imágenes del clima, los océanos y el medio ambiente de la Tierra. ABI ve la Tierra con 16 bandas espectrales diferentes, incluidos dos canales visibles, cuatro canales de infrarrojo cercano y diez canales de infrarrojo. Estos diferentes canales (longitudes de onda) son utilizados por modelos y herramientas para indicar varios elementos en la superficie de la Tierra o en la atmósfera, como árboles, agua, nubes, humedad o humo. (Pearlman et al. 2022)
2. GLM: *Geostationary Lightning Mapper* es un detector de transitorios ópticos de infrarrojo cercano de un solo canal que puede detectar los cambios momentáneos en una

escena óptica, lo que indica la presencia de un rayo. GLM mide la actividad total de rayos (en la nube, de nube a nube y de nube a tierra) continuamente sobre las américas y las regiones oceánicas adyacentes con una resolución espacial casi uniforme de aproximadamente 10 km. (Gunshor et al. 2020)

SOLAR Pointing : Incluye los sensores EXIS y SUVI.

1. EXIS: *Extreme Ultraviolet and X-ray Irradiance Sensors* son fundamentales para comprender y monitorear la irradiancia solar en la atmósfera superior, es decir, el poder y el efecto de la radiación electromagnética del sol por unidad de área. El EXIS es capaz de detectar erupciones solares que podrían interrumpir las comunicaciones y reducir la precisión de la navegación, lo que afectaría a los satélites, las aerolíneas de gran altitud y las redes eléctricas de la Tierra. A bordo de EXIS hay dos sensores principales, el sensor ultravioleta extremo (EUVS) y el sensor de rayos X (XRS), que ayudan a los científicos a monitorear la actividad en el sol. (Chamberlin, Lu et al. 2009)

Parámetro	Requerimiento
Rango XRS	0.05 - 0.8 nm
Rango dinámico XRS	10^{-9} Wm^{-2} - 10^{-3} Wm^{-2}
Cadencia XRS	1 s
Rango EUVS	5 - 127 nm
Cadencia EUVS	≤ 30 s

Tabla 1-2: Especificaciones técnicas EXIS.

2. SUVI: *Solar Ultraviolet Imager* es un telescopio que monitorea el sol en el rango de longitud de onda ultravioleta extrema. Al observar el sol, SUVI puede compilar imágenes solares de disco completo durante todo el día. (Darnel et al. 2022)

Longitud de onda Å	Fenómenos observados
94	Regiones activas erupciones solares
131	Fulguraciones solares en Sol calmo
171	Región de transición y corona
195	Regiones activas y agujeros coronales fuertes fulguraciones
284	Regiones activas
304	Cromosfera, Prominencias regiones activas

Tabla 1-3: Canales espectrales SUVI.

In-Situ: Incluye los sensores SEISS y el MAG.

1. SEISS: *Space Environment In-Situ Suite* La información proporcionada por SEISS es fundamental para evaluar el riesgo de descarga electrostática y el peligro de radiación para los astronautas y los satélites. El conjunto de instrumentos SEISS consta del sensor de iones pesados energéticos (EHIS), los sensores de partículas magnetosféricas de alta y baja (MPS-HI y MPS-LO) y el sensor de protones solar y galáctico (SGPS). El conjunto de instrumentos también incluye la unidad de procesamiento de datos (DPU). Los datos de SEISS impulsan la porción de tormenta de radiación solar de las escalas de clima espacial de NOAA y otras alertas y advertencias y mejoran los pronósticos de partículas energéticas. (Kress, Rodriguez y Onsager 2020)
2. MAG: *Magnetometer* de la serie GOES-R proporciona mediciones del campo magnético del entorno espacial que controla la dinámica de las partículas cargadas en la región exterior de la magnetosfera. Estas partículas pueden ser peligrosas para las naves espaciales y los vuelos espaciales tripulados. Las mediciones del campo geomagnético son importantes para proporcionar alertas y advertencias a muchos clientes, incluidos los operadores de satélites. (Engebretson et al. 2018)

Descripción general de los instrumentos SORCE

El satélite SORCE ⁸ fue puesto en órbita el 25 de enero de 2003, el lanzamiento se hizo en un Pegasus (cohete) ⁹ acoplado a un avión de transporte L-1011. (Rottman 2002). Utiliza un diseño de impulso cero de tres ejes estabilizado por inercia que es capaz de apuntar con precisión para conocer observaciones científicas. El bus satélite incluye:

- Comunicaciones compatibles con la red terrestre de la NASA.
- Almacenamiento de datos científicos con capacidad de 24 horas.
- Seis alas de paneles solares para generación de energía.

La tabla 1-4 describe las especificaciones técnicas del satélite SORCE. Los productos de datos SORCE suministran valores de irradiancia promedio diarias y cada 6 horas informadas a una distancia solar media de 1 UA y velocidad relativa cero en la línea de visión con respecto al Sol. Los valores en la Tierra también se incluyen para que los investigadores climáticos los utilicen como entradas para sus modelos. (Woods y Leibacher 2023)

⁸ SORCE: *Solar Radiation and Climate Experiment*

⁹ Pegasus es el nombre de una familia de cohetes orbitales privados estadounidenses lanzados desde el aire usando un avión.

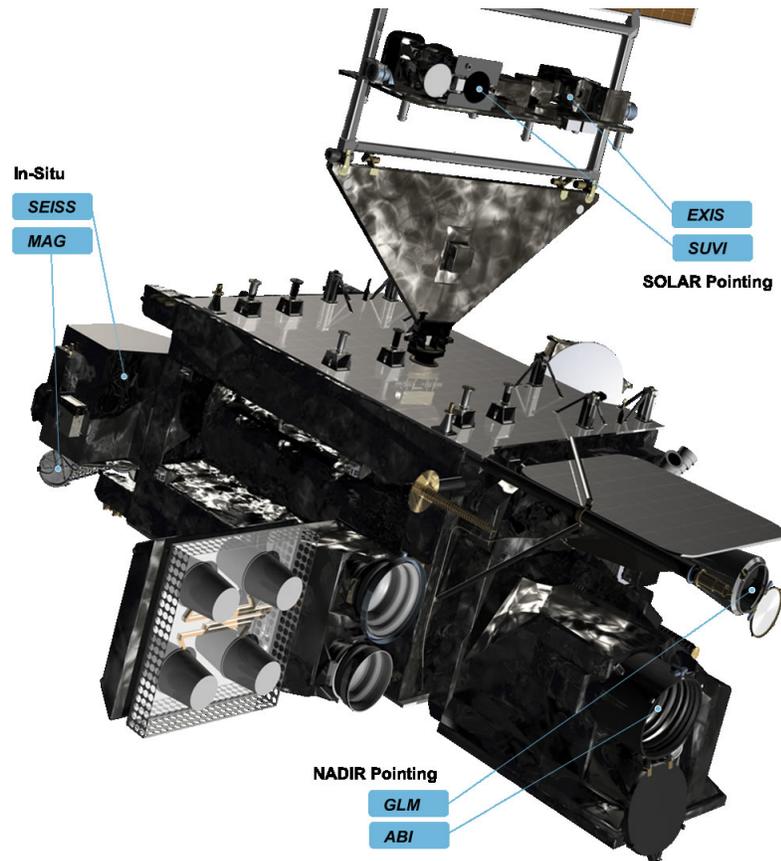


Figura 1-4: Instrumentos GOES R (16). La imagen corresponde al esquema general del GOES R (16), se muestra la ubicación de las tres clasificaciones de instrumentos científicos a bordo: *In-Situ* con los instrumentos SEISS y MAG, *SOLAR Pointing* con los instrumentos EXIS y SUVI, además de *NADIR Pointing* con los instrumentos GLM y ABI. Tomado de <https://www.goes-r.gov/spacesegment/instruments.html>

El objetivo principal de la misión SORCE es medir con precisión la radiación espectral solar en longitudes de onda en rayos X, ultravioleta, visible e infrarrojo cercano. La misión consta de cuatro canales ópticos separados, dos espectrómetros, un radiómetro y un fotómetro. En la Tabla 1-5 se describen los sensores XPS¹⁰, SOLSTICE¹¹, SIM¹² y TIM¹³ del satélite SORCE

¹⁰ XPS: Photometer System

¹¹ SOLSTICE: Solar Stellar Irradiance Comparison Experiment

¹² SIM: Spectral Irradiance Monitor

¹³ TIM: Total Irradiance Monitor

Satélite SORCE	Especificación técnica
Peso	290 kg
Potencia	348 W
Órbita	645 km
Dimensiones	1.57m Alto, 1.15m Diámetro

Tabla 1-4: Especificaciones técnicas

	XPS	SOLSTICE	SIM	TIM
Rango espectral	0.1-40 nm	115-310 nm	240-2400nm	0.1-2400nm
Resolución espectral	1-10 nm	1nm	1-27nm	N/A
Precisión absoluta	12-24 %	1.2-6 %	2 %	350 ppm
Canal óptico	Fotómetro	Espectómetro	Espectómetro	Radiómetro

Tabla 1-5: Especificaciones técnicas Sensores SORCE

En particular en este trabajo se realiza el estudio multiespectral de radiación solar comprendido en el periodo 2003 - 2020 con datos de los satélites GOES y SORCE; es así que para el satélite GOES se utilizó el sensor de rayos X el GOES/XPS y para el Satélite SORCE los sensores SORCE/XPS , SORCE/SOLSTICE, SORCE/SIM y SORCE/TIM.



Figura 1-5: Instrumentación SORCE. La imagen corresponde a la instrumentación del satélite SORCE, iniciando a la izquierda con el sensor SIM, sensor SOLSTICE, sensor TIM y por ultimo el sensor XPS. Tomado de <https://lasp.colorado.edu/sorce/instruments/>

1.6. Inteligencia Artificial

La Inteligencia Artificial (IA) es un campo de estudio y desarrollo de tecnologías que busca crear sistemas y programas capaces de realizar tareas. La IA se basa en la idea de simular ciertos aspectos del pensamiento humano y la toma de decisiones a través de algoritmos y modelos matemáticos. Una rama de la IA es el aprendizaje automático (ML)¹⁴, es utilizada en diferentes campos como el reconocimiento de patrones, estadística computacional entre otros; los datos existentes se utilizan para clasificar, predecir o responder a datos futuros. El aprendizaje automático es importante en áreas como el reconocimiento facial, el filtrado de spam y otras donde no es factible, o incluso posible, escribir algoritmos para realizar una tarea (Rouhiainen 2018).

A continuación se presentan la nomenclatura de los elementos de aprendizaje automático.

Datos: El aprendizaje automático se basa en la utilización de datos como fuente de información. Los datos se utilizan para entrenar los modelos de aprendizaje automático y evaluar su rendimiento.

Modelo: Un modelo de aprendizaje automático es una representación matemática o computacional que captura las relaciones entre los datos de entrada y las salidas deseadas. El modelo se entrena utilizando datos de entrenamiento para aprender patrones y realizar predicciones o tomar decisiones basadas en nuevos datos.

Algoritmos de aprendizaje: Los algoritmos de aprendizaje automático son los procedimientos o métodos utilizados para entrenar y ajustar los modelos. Estos algoritmos pueden optimizar patrones en un sistema de estudio y realizar cambios en los parámetros del modelo para mejorar su rendimiento.

Características: Las características son las variables o rasgos que se extraen de los datos y se utilizan como entrada para el modelo de aprendizaje automático. Estas características pueden ser de naturaleza numéricas, categóricas o textuales que representan las propiedades relevantes de los datos y ayudan al modelo a aprender patrones y realizar predicciones.

Conjunto de entrenamiento y conjunto de prueba: Para entrenar y evaluar un modelo de aprendizaje automático, se dividen los datos en conjuntos de entrenamiento y prueba. El conjunto de entrenamiento se utiliza para entrenar el modelo, mientras que el conjunto de prueba se utiliza para evaluar el rendimiento del modelo en datos no vistos previamente.

Entrenamiento: Un sistema que asigna una entrada a una salida necesita entrenamiento, esto

¹⁴ML: *Machine Learning*

para hacerlo de manera correcta o útil. Así como las personas necesitamos capacitación para realizar algún tipo de tarea específica. En cierto modo, esto es como un ajuste de curvas o una regresión. Si tenemos suficientes pares de entrenamiento, entonces el sistema debería ser capaz de producir salidas correctas cuando se introducen las entradas. El aprendizaje automático utiliza en especial dos tipos de técnicas principales: Aprendizaje supervisado (como clasificación y regresión) y el aprendizaje sin supervisión (como agrupación).

Optimización: La optimización se refiere al proceso de ajustar los parámetros del modelo para minimizar la función de pérdida. Los algoritmos de optimización se utilizan para encontrar los valores óptimos de los parámetros del modelo.

Evaluación y métricas de rendimiento: Para evaluar la calidad de un modelo de aprendizaje automático, se utilizan diversas métricas de rendimiento, como la precisión, el error cuadrático medio, entre otros. Estas métricas proporcionan una medida objetiva del rendimiento del modelo en diferentes tareas.

Estos elementos trabajan en conjunto para permitir que los modelos de aprendizaje automático aprendan de los datos, generalicen los patrones encontrados y realicen predicciones o tomen decisiones en nuevos datos no vistos previamente. El proceso de entrenamiento y ajuste del modelo se repite iterativamente hasta que se logre un rendimiento satisfactorio. (Paluszek y Thomas 2016).

Seleccionar el algoritmo correcto parece complejo, debido a que existen variedad de algoritmos de aprendizaje automático supervisados y no supervisados y cada uno adopta un enfoque diferente para el aprendizaje. Encontrar el algoritmo correcto se basa en parte en prueba y error. Los modelos altamente flexibles tienden a sobre ajustar los datos al modelar variaciones menores que podrían ser ruido. Los modelos simples son más fáciles de interpretar pero pueden tener menor precisión. Por lo tanto, elegir el algoritmo correcto requiere compensar un beneficio con otro, incluida la velocidad, la precisión y la complejidad del modelo. La prueba y el error son el núcleo del aprendizaje automático, si un enfoque o algoritmo no funciona se debe probar con otro. Los tipos de aprendizaje automático se pueden ver en la Figura 1-6.

En la literatura científica se encuentran aplicaciones en el campo de la astrofísica solar con técnicas de aprendizaje automático (Benson et al. 2020) *Forecasting Solar Cycle 25 Using Deep Neural Networks*, (Sadykov 2019) *Predicting Solar Flares Using Machine Learning: Advances and Challenges*, (Lin et al. 2023) *Prediction of solar wind speed by applying convolutional neural network to potential field source surface (PFSS) magnetograms*, (Ali et al. 2023) *Predicting Solar Proton Events of Solar Cycles 22-24 using GOES Proton Soft X-Ray - Flux Statistics*, entre otros.

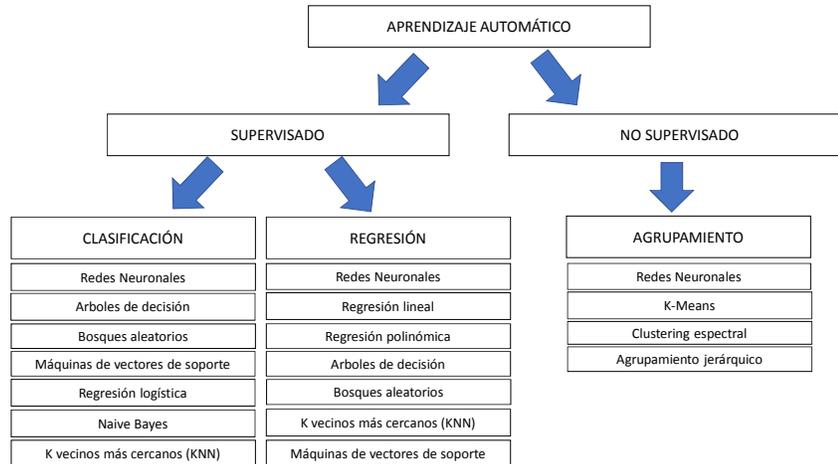


Figura 1-6: Tipos de aprendizaje automático. A la izquierda entrenamiento supervisado con técnicas de clasificación y regresión describiendo los algoritmos mas utilizados; a la derecha entrenamiento no supervisado con técnica de agrupamiento y con descripción de algunos algoritmos. Adaptada de <https://la.mathworks.com/help/stats/machine-learning-in-matlab.html>

En esta tesis se dedica el capítulo cuatro en la implementación del uso de IA, se enfatiza en el desarrollo de aprendizaje automático usando el lenguaje de programación MATLAB R2020a ; en particular se usa la herreamiento de trabajo *Statistics and Machine Learning Toolbox*, la cual permite realizar clasificación de datos de interés. Otra opción es programar en PYTHON; este también tiene herramientas similares (Raschka y Mirjalili 2019).

Los datos de entrada son la series temporales de tiempo de los satélites GOES y SORCE, en el periodo comprendido 2003 - 2020; se obtiene un modelo de aprendizaje supervisado de clasificación, con el uso de redes neuronales y al aquí denominado algoritmo de agrupamiento. Al final se realiza una discusión con respecto de la efectividad de utilizar el aprendizaje automático en servicio de la astrofísica solar y en el caso puntual como se pueden interpretar los resultados encontrados con las variaciones del ciclo solar.

2 Instrumentación y datos

Para realizar el estudio multiespectral de radiación solar de la presente investigación, analizamos el conjunto de datos del satélite GOES y el satélite SORCE. La Figura 2-1 representa la instrumentación utilizada por los satélites, especificando el rango en longitud de onda y la región dentro del espectro de radiación.

El conjunto de datos del satélite GOES representa el valor “background” diario en serie de tiempo desde 17/08/1997 hasta 31/12/2019 del sensor GOES/XRS en la banda de 0.1 a 0.8 nm, junto con el valor diario de número de manchas solares y número de eventos clase C, M y X.

Por otro lado, el conjunto de datos del satélite de radiación solar y clima SORCE, con datos promedio diarios en cada uno de los sensores, valores de irradiancia a 1 UA y series de tiempo que van desde 15/05/2003 hasta 31/12/2019 para los sensores XPS, SOLSTICE, SIM y TIM. A continuación se describen cada uno de ellos:

1. GOES/XRS B: Mide flujo en rayos X en la banda larga de 0.1 a 0.8nm.
2. SORCE/XPS: Mide irradiancia solar en rayos x y ultravioleta de disco completo, con rango de 0.05 a 39.95 nm, resolución de 1nm, cadencia temporal con valor diario en series de tiempo y de minutos para fulguraciones solares.
3. SORCE/SOLSTICE: Mide la irradiancia solar en ultravioleta. Rango de 115 a 310 nm, resolución de 1nm, cadencia temporal con valor diario en series de tiempo y de minutos para fulguraciones solares.
4. SORCE/SIM: Mide la irradiancia en ultravioleta, visible y en infrarrojo, con rango de 240 a 2416 nm , resolución de 1 a 27nm, cadencia temporal con valor diario en series de tiempo
5. SORCE/TIM: Mide la irradiancia solar total. Rango de 0.1 a 2440 nm con una precisión absoluta estimada de 350 ppm (0,035 %).

Con el propósito de encontrar correlaciones entre el sensor de GOES/XRS y el sensor SORCE/XPS, se estudian dos eventos con fulguraciones clase X correspondientes al ciclo solar 23 y 24.

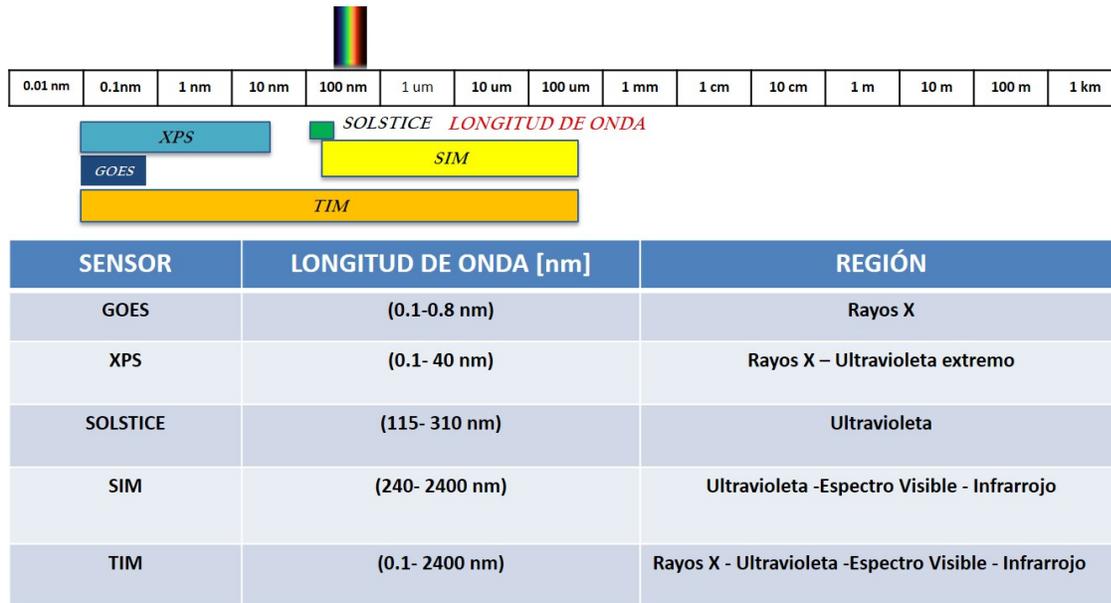


Figura 2-1: Instrumentación. La figura muestra los rangos espectrales de los sensores GOES y SORCE utilizados en el desarrollo del proyecto.

2.1. Satélite GOES

Como se evidenció en el capítulo anterior el satélite GOES tiene una serie de instrumentos que proveen datos atmosféricos, hidrológicos, oceánicos, climatológicos terrestre, climatológico espacial y del clima solar. El conjunto de datos utilizados se limita a los suministrados por el sensor XRS, el cual toma mediciones al sol en series temporales de irradiancia integrada; adicionalmente se emplean los registros de manchas solares y número de eventos clase C, M y X.

Es importante aclarar que en cada satélite GOES tiene dos sensores de rayos X (XRS) que proporcionan información flujos de rayos X solares para las bandas de longitud de onda de 0,05 a 0.4 nm (canal corto) y de 0.1 a 0.8 nm (canal largo).

El primer paso consiste en descargar la información de los datos anuales en la página principal del NOAA en la pestaña *data* y en el link archivos de texto más antiguos. Posteriormente se organiza la información por año y se realizan ajustes como la conversión de fecha juliana a fecha día, mes y año, también como la necesidad de convertir el valor de flujo *background* dado en A,B, C, M o X de acuerdo a la clasificación GOES y convertirlo en notación científica; este procedimiento es repetitivo año por año y en lo cual es necesario consolidar la información en una única tabla. Posterior a tener una tabla consolidada y organizada se importan los datos al lenguaje de programación *Matlab*, en ella se seleccionan las columnas de interés y se utiliza la herramienta *workspace* para realización de gráficos, análisis estadísticos entre

otros. En las siguientes subsecciones se explica a detalle los datos utilizados y se realizan las respectivas interpretaciones.

2.1.1. Sensor GOES/XRS B

Una fulguración es catalogada por GOES usando una letra mayúscula que representa el orden de magnitud de su valor máximo de flujo de energía, seguido de su respectivo coeficiente; la correspondencia entre letras, también conocidas como clases GOES, y el orden de la magnitud del flujo máximo se da en la Tabla 2-1. (Hanslmeier 2010)

Flujo [Wm^{-2}]	Clase GOES	Escala
10^{-8}	A	Menor
10^{-7}	B	Moderado
10^{-6}	C	Fuerte
10^{-5}	M	Severa
10^{-4}	X	Extrema
10^{-3}	$X \geq 10$	Extrema mayor

Tabla 2-1: Clasificación GOES: Asignación de clasificación GOES para fulguraciones solares según flujo medido en la banda de 0.1 a 0.8 nm.

El sensor GOES/XRS cuenta con dos canales el XRS A de 0.05 a 0.4 nm canal corto y XRS B de 0.1 a 0.8 nm canal largo; se elige el canal XRS B de 0.1 a 0.8 nm por que es menos ruidoso que el canal XRS A. El flujo medido por minuto define la energía solar de las fulguraciones solares de acuerdo a su clasificación GOES Tabla 2-1. En este caso, dado que el sensor XRS B trabaja a una tasa por minuto con el objetivo de percibir fulguraciones, estas mediciones son ideales para monitoreo en tiempo real. En esta subsección se estudian los eventos de los días 04-11-2003 y 06-09-2017 del ciclo solar 23 y 24; que hacen parte del listado *IPS Radio & Space Services* de grandes fulguraciones solares.

Como el propósito principal de la investigación es realizar un estudio mutiespectral de radiación solar, se hace necesario depurar la información diaria en minutos del sensor XRS B por un valor *background* diario desde el año 1997 a 2020. En este caso se estudian la serie de tiempo, ver figura 2-2 donde se encuentra una curva de características similares al ciclo solar y en la que se puede apreciar como el valor *background* al inicio del ciclo solar 23 tiene clasificación GOES A, en una escala de actividad solar menor, luego aumenta suavemente a clasificación B moderado hasta llegar a su máximo en clasificación C fuerte en el año 2001, luego decrece a clasificación B moderado y llega a su valor mínimo en el año 2008 por valores

por debajo de la clasificación A; algo similar ocurre en el ciclo solar 24 pero comparado con el ciclo anterior este presenta una señal mas baja teniendo un máximo en el año 2014 en clasificación B. Se realiza una línea de tendencia de polinomio grado 6, esta curva resulta útil para definir inicio, valor máximo y fin de ciclo solar.

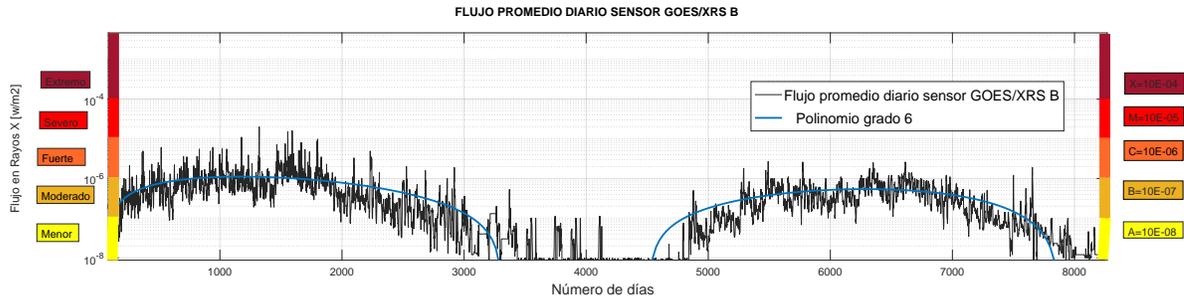


Figura 2-2: Flujo en rayos X y línea de tendencia. La respuesta de flujo en rayos X muestra el valor background diario en escala semi logarítmica para el flujo en rayos X desde 17/08/1997 hasta 31/12/2019 del sensor XRS en la banda de 0.1 a 0.8 nm. En cuanto a la línea de tendencia, ilustra gráficamente la tendencia utilizando un polinomio de grado seis para la serie de datos del flujo de rayos X.

2.1.2. Manchas solares

Los datos de manchas solares, se obtuvieron desde enero 1998 hasta diciembre de 2019; ellas cubren la mayor parte de los ciclos solares 23 y 24. La base de datos de las manchas solares diarias consta de 571678 manchas solares; encontrando que de los 8375 días 1626 no presentaron manchas solares y en los que se destacan los inicios y finales de los ciclos solares relacionado como sol calmo. Se desarrollo el método de promedio suavizado con la ayuda del lenguaje de programación MATLAB, esto con la finalidad de reducir el ruido en el conjunto de datos de las manchas solares, lo que resulta útil para analizar los datos de los ciclos solares 23 y 24. En la Figura 2-3 se relaciona el número de manchas solares versus el promedio suavizado del número de manchas solares.

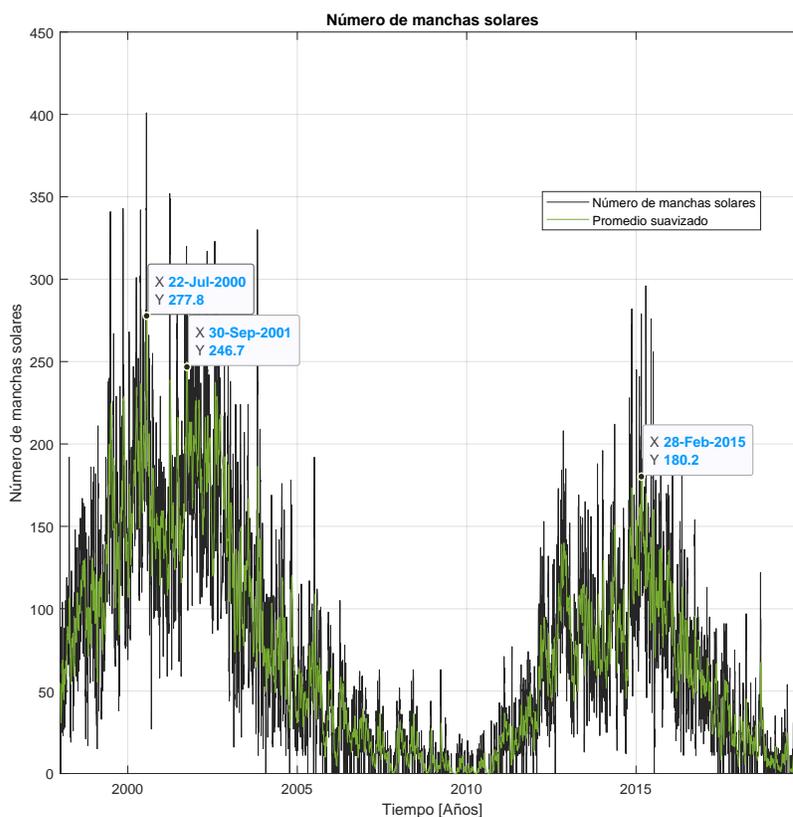


Figura 2-3: Número de manchas solares diarias y promedio suavizado. El gráfico en color negro representa el número de manchas solares diarios y en color verde el número de manchas promedio suavizado. Se encuentran dos máximos promedio de manchas solares para el ciclo solar 23 de 277 el día 22 de julio de 2000 y 248 el día 30 de septiembre 2001 y un máximo promedio de manchas solares de 180 el día 28 de febrero de 2015, para el ciclo solar 24.

2.1.3. Fulguraciones clase C, M y X

Los datos de fulguraciones solares del sensor GOES/XRS B, se obtuvieron desde enero 1998 hasta diciembre de 2019; en la figura 2-4 se encuentra el número de eventos diario para las clases C, M y X; donde es notorio ver que para la clase C el número de eventos por día o por año exhibe el comportamiento del ciclo solar típico de 11 años. Debido que para las clases M y X el número de eventos es menor, la tendencia del ciclo solar no es tan evidente. La base de datos de las fulguraciones investigadas consta de 22854 eventos de los cuales 89,81 % son eventos clase C, 9,45 % eventos clase M y el 0,74 % eventos clase X.

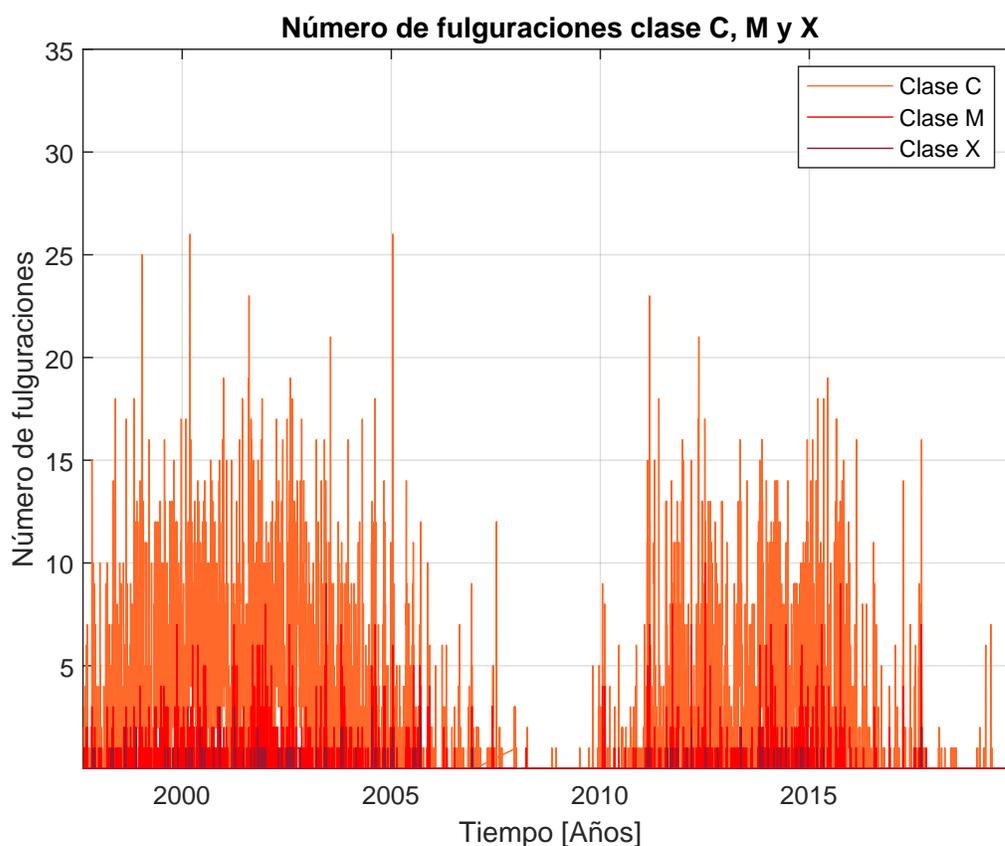


Figura 2-4: Número de fulguraciones clase C,M y X. Al inicio de los ciclos solares 23 y 24 el número de fulguraciones clase X es nula. Pero a medida de que avanza el ciclo solar se intensifican en los máximos solares. Para las clases C y M, encontrar fulguraciones incluso en Sol calmo, es un indicador de que el Sol se mantiene activo todo el tiempo.

2.2. Satélite SORCE

Los productos de datos SORCE están disponibles para acceso público mediante descarga directa o acceso interactivo en el sitio *web SORCE Interactive Data Access* ¹; en el caso puntual de este trabajo se realiza la descarga directa de la información en archivos de texto. De la misma manera como se realizó para el satélite GOES, la información de los datos del satélite SORCE se ajustan datos como la conversión de fecha juliana a fecha día, mes y año. Posterior a tener una tabla por sensor consolidada y organizada se importan los datos al lenguaje de programación *Matlab*, en ella se seleccionan las columnas de interés y se utiliza la herramienta *workspace* para realización de gráficos, análisis estadísticos entre otros.

La anomalía más significativa de la nave espacial SORCE fue la degradación de la capacidad de su batería; ocurrió en julio de 2013, cuando comenzó la brecha de datos más grande de SORCE, las observaciones solares normales se reiniciaron en marzo de 2014. La misión SORCE finalizó el 25 de febrero de 2020 después de completar más de 17 años de observaciones (Snow et al. 2022; Woods y Leibacher 2023).

2.2.1. Sensor SORCE/XPS

El instrumento SORCE/XPS está diseñado para medir irradiancia en rayos X y ultravioleta desde 0.1 a 40 nm. Funciona con un mecanismo de rueda de doce foto-diodos, que contiene tres componentes de variabilidad; dos espectros de referencia para el Sol calmo, región activa y un tercer espectro de componente de fulguraciones (Woods y Elliott 2022).

La figura 2-5 muestra gráficos de serie de tiempo de 2003 a 2020, para longitudes de onda centradas en 0.5nm, 1.65 nm, 7.95nm, 24.95 y 39.95nm. Los dos espectros de referencia estáticos para Sol calmo y Sol dinámico se utilizan para modelar las variaciones diarias en los 17 años. Al evaluar las gráficas, es notorio ver que las diferentes curvas tienen tendencia similar al ciclo solar de aproximadamente 11 años.

FISM2 ² es un modelo irradiancia espectral solar de 0,01 a 190 nm con espacios espectrales de 0,1 nm y tasa por minuto. FISM2 se basa en datos SORCE/XPS, SDO EVE ³ y SORCE/SOLSTICE (Chamberlin, Eparvier et al. 2020). Al igual que el sensor GOES/XRS B, se estudian los eventos de los días 04-11-2003 y 06-09-2017 para longitud de onda centrada en 0.55nm. En el siguiente capítulo se realiza una comparación de los eventos con los sensores GOES/XRS, SORCE/XPS y manchas solares.

¹<https://lasp.colorado.edu/sorce/data/>

²*The Flare Irradiance Spectral Model-Version 2*

³*El experimento de variabilidad (EVE) - Observatorio de Dinámica Solar (SDO)*

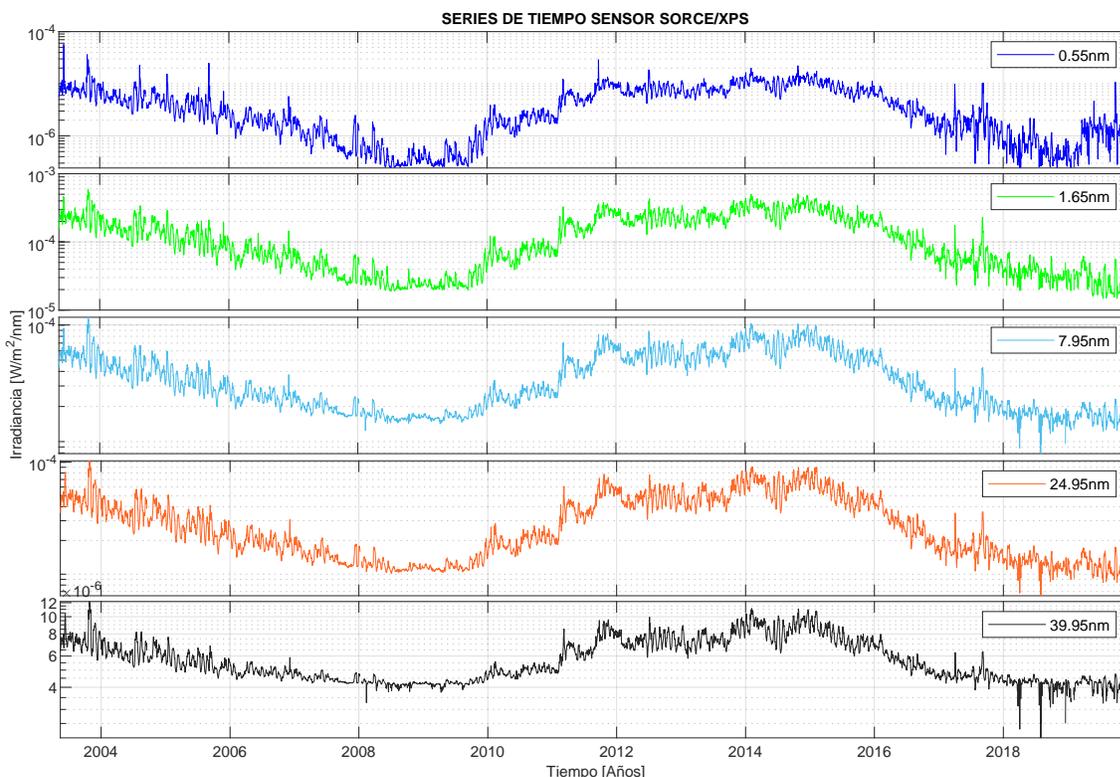


Figura 2-5: Flujo en series de tiempo adquiridas con el sensor SORCE/XPS en las longitudes de onda 0.55 nm, 1.65nm, 7.95 nm, 24.95nm y 39.95 nm como se muestra en el gráfico.

2.2.2. Sensor SORCE/SOLSTICE

SORCE/SOLSTICE consiste en un espectrómetro de rejilla de dos canales el FUV⁴ de 115 a 200 nm y MUV⁵ de 200 a 300 nm; capaz de apuntar al Sol o a estrellas seleccionadas. La luz ingresa al espectrómetro a través de una abertura de entrada, que se selecciona para observaciones solares de 0,1 mm de diámetro o para observaciones estelares de 16 mm de diámetro. SORCE/SOLSTICE mide la irradiancia espectral de 115 nm a 300 nm con una resolución de 0,1 nm para el Sol y entre 1,1 y 2,2 nm para las estrellas. Los blancos estelares, observados con las mismas ópticas y detectores empleados para las mediciones solares, son esenciales porque establecen correcciones a largo plazo en la calibración del instrumento. El instrumento SORCE/SOLSTICE muestra que la técnica de calibración establece la respuesta del instrumento como una función del tiempo a lo largo de la misión SORCE y produce una serie temporal de datos solares corregidos por efectos instrumentales con una precisión de aproximadamente el 1%. Las mediciones de SOLSTICE se realizan utilizando un par

⁴FUV: Ultravioleta lejano

⁵MUV: Ultravioleta medio

de espectrómetros idénticos el SOLSTICE A y el SOLSTICE B. Cada espectrómetro está alojado y montado de forma independiente en el banco óptico de la nave espacial y puede funcionar en cualquiera de los dos modos. Su diseño fue descrito en detalle por McClintock, G. J. Rottman y Woods SoPh (2005)

Los rayos ultravioleta son relevantes para la capa ozono terrestre; se utiliza datos de SORCE/SOLSTICE para investigar la variabilidad del espectro Solar. La figura 2-6 muestra gráficos de serie de tiempo de 2003 a 2020, para FUV longitudes de onda centradas de 115.48nm a 179.48 nm, con espacios espectrales de 10 nm. Al evaluar las gráficas, es notorio ver que las diferentes curvas tienen tendencia similar al ciclo solar de aproximadamente 11 años. En los gráficos se identifica la brecha ocurrida entre julio de 2013 y marzo de 2014; producto de la anomalía por degradación de la capacidad de su batería.

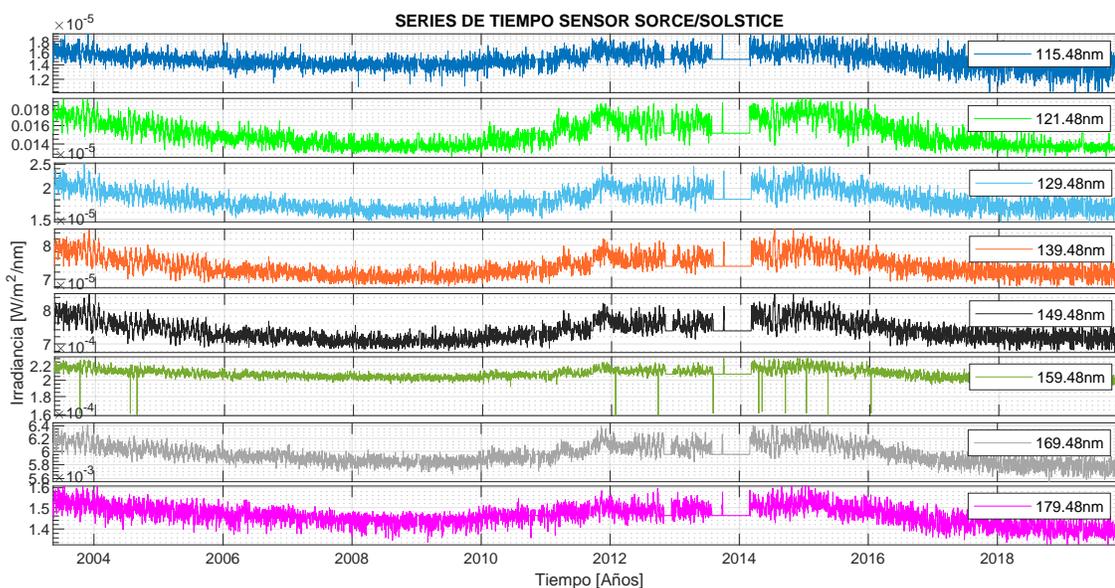


Figura 2-6: Flujo en series de tiempo adquiridas con el sensor SORCE/SOLSTICE en las longitudes de onda 115.48 nm, 121.48nm, 129.48 nm, 139.48nm, 149.48 nm, 159.48 nm, 169.48 nm y 179.48 nm como se muestra en el gráfico.

2.2.3. Sensor SORCE/SIM

SORCE/SIM es un espectrómetro de mediciones de irradiancia espectral solar en el infrarrojo visible y en el infrarrojo cercano. La cobertura de longitud de onda es principalmente de 300 a 2400 nm, con un canal adicional para cubrir la región espectral ultravioleta de 200-300 nm

para superponerse con *SORCE/SOLSTICE*. Comprender la variabilidad dependiente de la longitud de onda en todo el rango de longitud de onda de *SIM* es de importancia primordial para los estudios de cambio climático a largo plazo en la Tierra. *SIM* es un espectrómetro de prisma *Fery* de un solo elemento óptico. En este plano focal utilizan cuatro foto-diodos detectores y un radiómetro para detectar radiación solar. *SIM* contiene dos espectrómetros completamente independientes e idénticos para proporcionar redundancia y capacidad de autocalibración (Harder et al. 2005)

La figura 2-7 muestra gráficos de serie de tiempo de 2003 a 2020, para longitudes de onda centradas en 240.02nm, 450.23nm, 1298nm, 1593nm, 2005.15nm y 2401.15nm. A medida que se incrementa el valor en longitud de onda, es menos evidente observar una tendencia similar al ciclo solar.

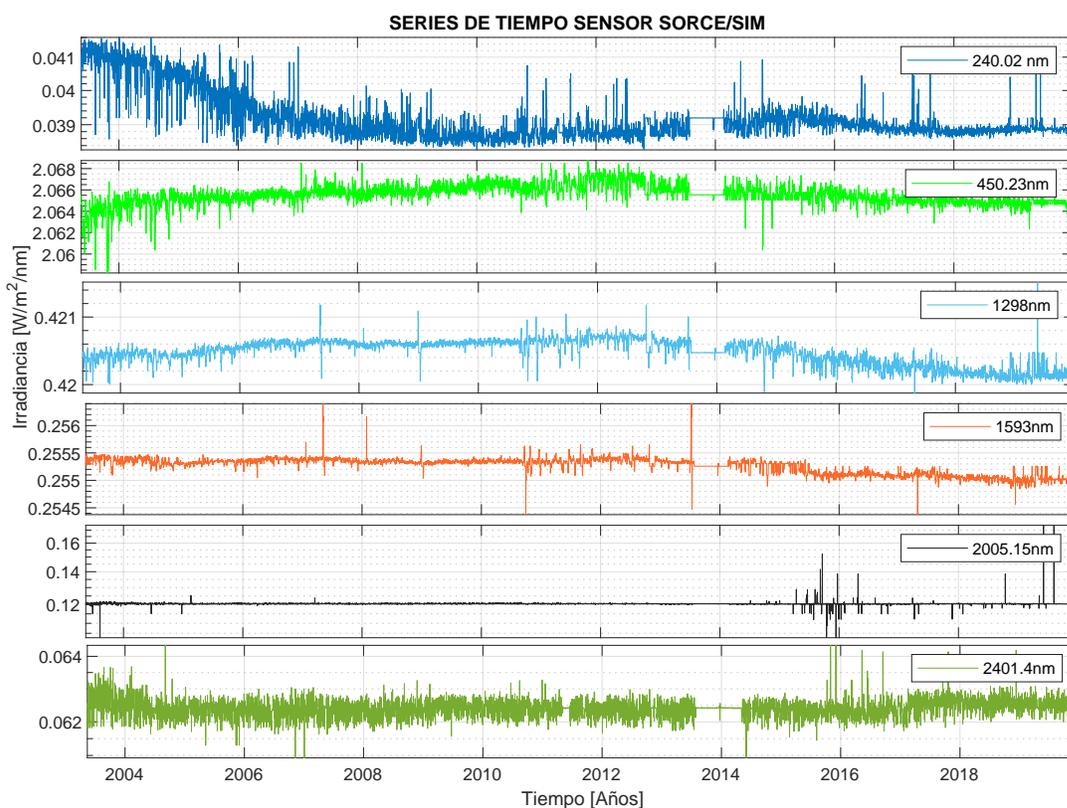


Figura 2-7: Flujo en series de tiempo adquiridas con el sensor *SORCE/SIM* en las longitudes de onda 240.02 nm, 450.23nm, 1298 nm, 1593 nm, 2005.15 nm y 2401.4 nm como se muestra en el gráfico.

2.2.4. Sensor SORCE/TIM

Las observaciones de irradiancia espectral SORCE, cubren el rango de longitud de onda de 0.1 a 2400 nm. El SORCE/TIM contiene cuatro radiómetros de sustitución eléctrica, que se calientan eléctricamente para mantener constante temperatura mientras que un obturador modula la luz del sol incidente determinando la potencia radiativa absorbida por la cavidad de los radiómetros (Kopp y Lawrence 2005).

La Figura 2-8 muestra la irradiancia solar espectral del día 06 de septiembre de 2017; en longitudes de onda entre 0.1 nm y 2416 nm con una resolución espectral efectiva de 1 nm. Este espectro continuo tiene características de absorción y emisión. las longitudes de onda más largas se originan en la parte baja de la fotosfera y al progresar hacia longitudes de onda más cortas, la emisión se origina cada vez más arriba en la atmósfera solar, hasta que en las longitudes de onda más cortas la emisión proviene predominantemente de la cromosfera. con algunas líneas de temperatura más altas que se originan en la región de transición solar. Se calculó la integral bajo la curva con el lenguaje de programación MATLAB, definida por la función la irradiancia solar espectral, dando como resultado 1321 W/m^2 , que indica un 97% del valor irradiancia solar total.

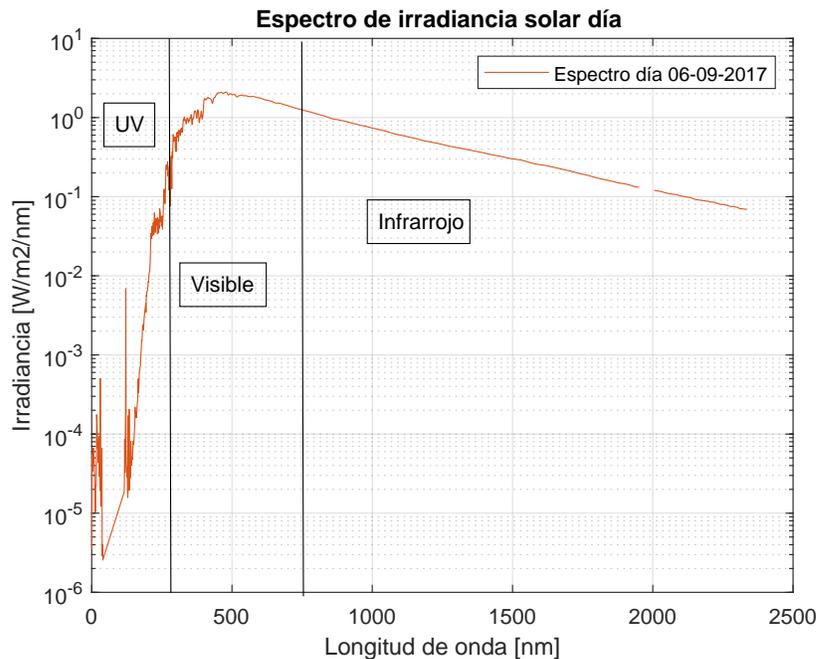


Figura 2-8: Espectro de irradiancia TIM. La gráfica muestra cómo varía la irradiancia solar en función de la longitud de onda el día 06 de septiembre de 2017.

Adicional a encontrar los valores diarios de irradiancia espectral; SORCE/TIM mide la radiación solar total, integrado sobre todo el disco solar y todo el espectro solar. Valores de irradiancia a 1 UA y series de tiempo que van en el periodo del 2003 a 2020. La irradianción solar total que llega a la parte superior de la atmósfera terrestre es de 1361 W/m^2 (Kopp y Lawrence 2005).

Como se observa en la Figura 2-9, la respuesta en color azul muestra la curva de tendencia de los datos diarios de irradiancia espectral; se utilizó modelo Gaussiano SVM ⁶ que es un algoritmo de aprendizaje supervisado que se empleo con la finalidad de suavizar la señal y pronosticar la brecha de datos no disponibles producto de la degradación de la capacidad de la batería. Al utilizar SVM, se llenan los huecos de datos faltantes en la curva de irradiancia de manera más precisa en comparación con métodos más simples de interpolación. El modelo SVM realizado en Matlab tiene un RMSE ⁷ de 0.28135 con un tiempo de entrenamiento de 5.79 segundos.

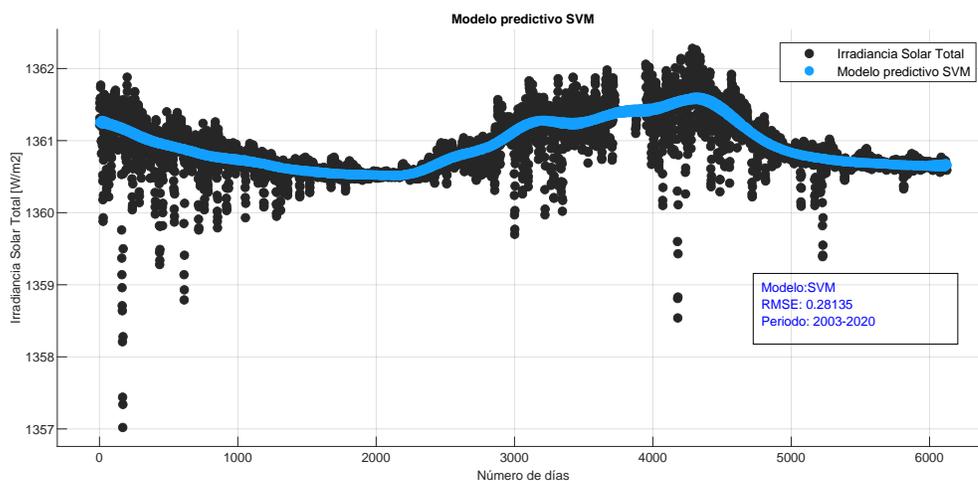


Figura 2-9: Series de tiempo sensor SORCE/TIM y curva de tendencia. El gráfico en color negro representa la irradiancia solar total. En ella se observa datos dispersos, ruido y huecos. Para suavizar la señal y predecir la brecha de datos; se utilizó un modelo predictivo SVM en color azul, con parámetros de ajuste Kernel con función de base radial gaussiana.

⁶SVM: Support vector machine

⁷RMSE: Error de raíz cuadrada media

3 Comparación de bandas espectrales con datos satelitales de SORCE y GOES

En este capítulo se enfatiza en la importancia de estudiar la variabilidad del Sol, se realiza comparación analítica para entender los posibles factores que la producen. Los datos del pronóstico oficial del número de manchas solares proporcionado por NOAA y la NASA, la irradiancia solar total con series de tiempo SORCE/TIM y el número de eventos clase C, M y X; se compara con diferentes flujos espectrales de series de tiempo del GOES/XRS B, SORCE/XPS, SORCE/SOLSTICE, SORCE/SIM. Se estudia como el exceso de manchas solares durante el ciclo solar esta directamente relacionado con el aumento en flujo en rayos X, ultravioleta, radiación visible e infrarrojo cercano y en el incremento de aproximadamente el 0.1 % de la constante solar remitida por los valores de irradiancia Solar total. Además de analizar como la dinámica solar influye en la probabilidad de que se presenten eventos clases C, M y X. Se analizan dos eventos con fulguraciones clase X correspondientes al ciclo solar 23 y 24 con los sensores GOES/XRS y SORCE/XPS.

3.1. Comparación manchas solares, SORCE/TIM, eventos clase C,M y X versus sensores GOES/XRS B, SORCE/XPS, SORCE/SOLSTICE y SORCE/SIM.

La irradiancia solar total promedio en la parte superior de la atmósfera terrestre se estima en alrededor de 1365 [W/m²]. Esta cifra es conocida como la constante solar y representa la cantidad de energía solar que llega a cada metro cuadrado de la atmósfera terrestre. Los eventos solares se clasifican en diferentes clases según su intensidad. La clasificación más común utilizada para los eventos solares es la clasificación de fulguraciones solares, que se divide en las clases A, B, C, M y X, siendo la clase X la más fuerte. Los eventos solares de clase C son de intensidad moderada, mientras que los eventos de clase M y X son más fuertes y pueden tener un impacto significativo en las comunicaciones y en la actividad geomagnética de la Tierra. Tanto los instrumentos GOES/XRS B como los instrumentos

de SORCE/XPS, SORCE/SOLSTICE y SORCE/SIM; , proporcionan mediciones precisas de flujo de irradiancia solar en diferentes longitudes de onda; con valores promedio diario para estudios de variabilidad solar y valores por minuto para análisis de fulguraciones solares.

En la Figura **3-1**, se puede ver cómo los gráficos de la izquierda; manchas solares, irradiancia solar total del SORCE/TIM y número de eventos clase C, M y X; presentan un comportamiento similar, fluctuaciones, desde un mínimo solar, hasta un máximo solar. Durante el mínimo Solar, año 2009 el número de manchas solares es de tan solo 10, el número de eventos clase X es de 2 y el valor promedio de irradiancia solar total es de valor 1360.5 [W/m²]. Mientras durante el máximo Solar año 2014 el valor de número de manchas solares es de 30, el número de eventos clase X es de 20 y el valor promedio de irradiancia solar total es de valor 1361.5 [W/m²]. Adicionalmente los gráficos de la derecha compuestos por los flujos en Rayos X, ultravioleta, radiación visible e infrarrojo cercano con los datos de los sensores GOES/XRS B, SORCE/XPS, SORCE/SOLSTICE y SORCE/SIM; presentan fluctuaciones, desde un mínimo solar, hasta un máximo solar en rayos X, ultravioleta y radiación visible. Pero sus variaciones son menos notorias, casi con un comportamiento lineal en infrarrojo cercano.

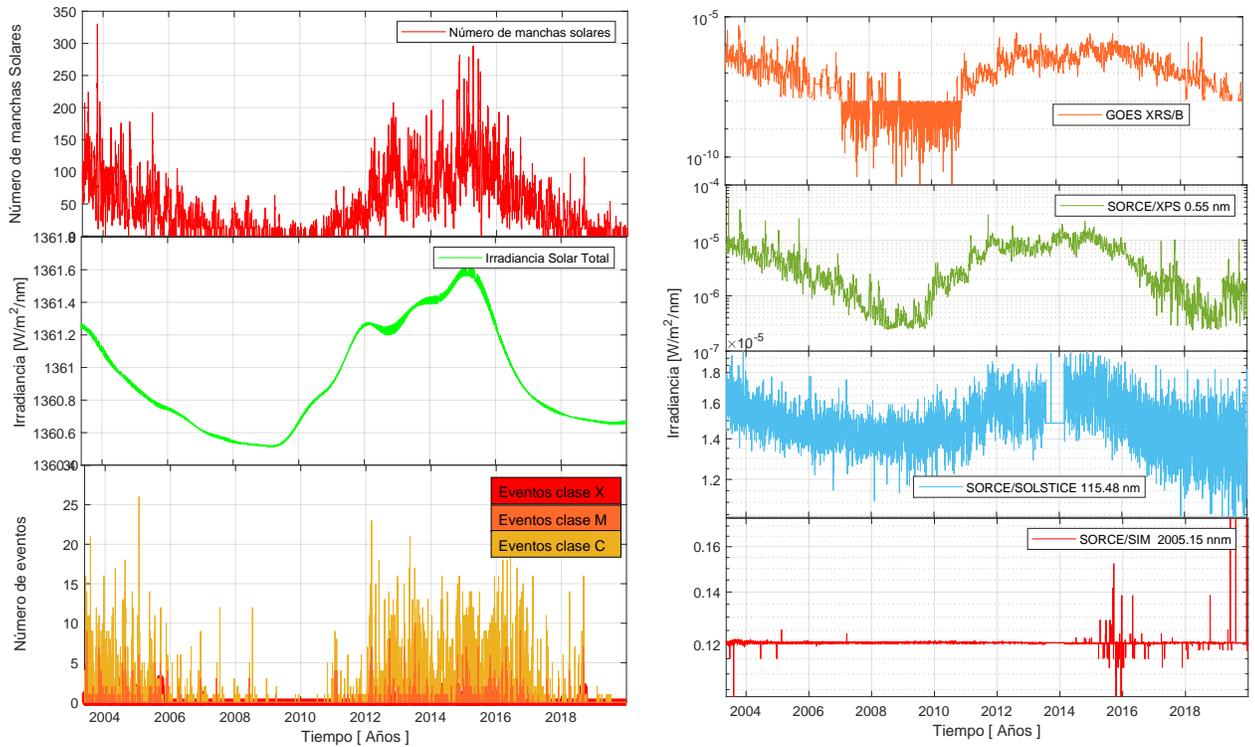


Figura 3-1: Comparación multiespectral: Manchas solares, irradiancia solar total del SORCE/TIM y número de eventos clase C, M y X versus Flujo GOES/XRS B, SORCE/XPS 0.55 nm, SORCE/SOLSTICE 115.48 nm y SORCE/SIM 2005.15 nm

3.2. Comparación valor background sensor GOES/XRS B y eventos clase C,M y X versus fulguraciones clase X.

En la Tabla 3-1 se analiza como de los 6075 días del periodo estudiado 15-05-2003 a 31-12-2019; 3119 días corresponden a Sol calmo, o Sol con dinámica menor; se encontró que para este caso no existen reportes de evento clase X, pero es notorio ver, como el término Sol calmo no esta bien definido; los 402 eventos clase C y 23 eventos clase M indican que el Sol en todo momento incluso durante los períodos de baja actividad solar, sigue siendo una estrella activa con procesos continuos de fusión nuclear en su núcleo y fenómenos magnéticos en su atmósfera. La dinámica solar, aunque disminuida, siempre está presente y sigue siendo objeto de estudio y monitoreo. Por otra parte se puede ver como a medida de que va aumentando la dinámica solar de clase B dinámica moderada y clase C dinámica fuerte, el número de eventos con fulguraciones clase X, se presentan en aproximadamente en un 1 %.

A continuación se realiza una lista resumen, ver Tabla 3-2 de grandes fulguraciones solares en el periodo 2003 a 2020, adaptada de *IPS Radio & Space Services*; adicionalmente se presenta el valor *background* día GOES/XRS B con su respectiva clasificación. De acuerdo con el análisis de resultados se encuentra que existe mayor probabilidad de encontrar fulguraciones mayores a X 10 cuando el valor *background* día presenta una dinámica solar fuerte o clasificación GOES C.

# de días	Clase GOES	# de eventos clase C	# de eventos clase M	# de eventos clase X
3119	A	402	23	0
2792	B	8989	735	54
167	C	1063	375	47

Tabla 3-1: Comparación GOES/XRS B y eventos clase C,M y X.

Fecha	Fulguración	Clase GOES día	Valor background día GOES/XRS B
04-11-2003	X 28+	C	2.30×10^{-6}
07-09-2005	X 17	C	1.00×10^{-6}
29-10-2003	X 10	C	3.30×10^{-6}
06-09-2017	X 9.3	B	1.40×10^{-7}
05-12-2006	X 9.0	B	4.10×10^{-7}

Tabla 3-2: Grandes fulguraciones solares periodo 2003-2020.

Adpatada de <https://www.spaceweather.com/solarflares/topflares.html>.

3.2.1. Evento 04/11/2003

La fulguración del 4 de noviembre de 2003 fue especialmente intensa y se clasificó como la número 1 de la lista Grandes llamaradas solares desde 1976 compilada por *IPS Radio & Space Services* del *Space Weather* una fulguración solar X 28+ según listado, lo que la convirtió en una de las fulguraciones más poderosas jamás registradas. Esta fulguración en particular causó interrupciones en las comunicaciones de radio y sistemas de navegación por satélite, y también provocó auroras visibles.

Medir el valor máximo de una fulguración solar es tema de discusión; se puede medir a través de diferentes sensores y depende básicamente del tipo de radiación o emisión que se esté considerando. Las fulguraciones solares son eventos explosivos que liberan una enorme cantidad de energía en forma de radiación electromagnética y partículas cargadas; son eventos que pueden durar minutos e incluso horas. Por tal motivo para estudiar una fulguración se hace necesario la descarga de datos del día en minutos o segundos dependiendo el sensor.

Es importante señalar que el estudio y la medición de las fulguración solares de esta investigación se lleva a cabo mediante observaciones de los sensores GOES XRS/B, SORCE/XPS en las bandas centradas 0.55nm y 1.95 nm en rayos X y SORCE/SOLSTICE en la banda 115.95 nm en ultravioleta. En la Tabla 3-3 se muestran los resultados del evento 4 de noviembre de 2003 con los diferentes sensores; los datos presentan diferencias mínimas inicio, pico y final del evento y una diferencia de amplitud de flujo debido a la toma de diferentes bandas. En la Figura 3-2 y Figura 3-3, se comparan los datos registrados por ambos sensores en rayos X.

Banda espectral	Sensor	Inicio	Pico	Final	Flujo [W/m ²]
0.1-0.8 nm	GOES/XRS B	19:28	19.49	23:59	0.0028
0.55 nm	SORCE/XPS	19:25	19:45	23:59	0.0042
1.95 nm	SORCE/XPS	19:32	19:45	23.08	0.0012
115.95 nm	SORCE/SOLSTICE	19:32	19.43	20:39	0.00018

Tabla 3-3: Evento 04/11/2003, medido por GOES/XRS B, SORCE/XPS y SORCE/SOLSTICE. Se uso criterio "dos *sigma*" para el calculo de umbral de inicio y fin de la fulguración.

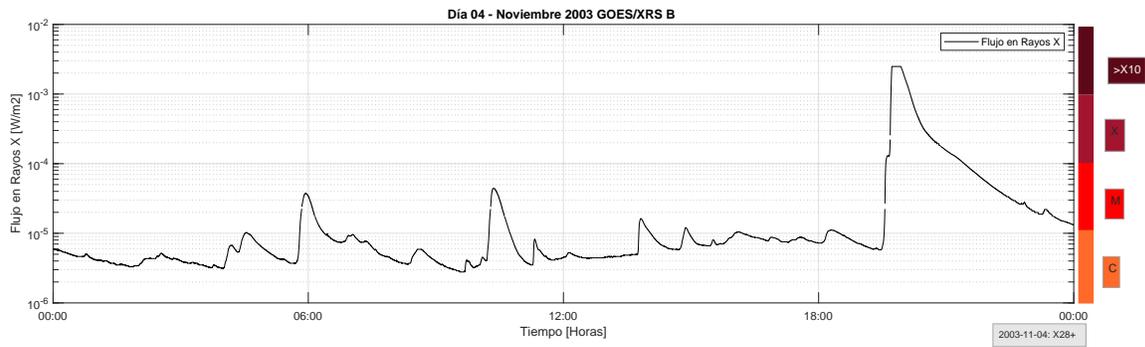


Figura 3-2: Evento 04 de Noviembre de 2003 GOES/XRS 0.1nm -0.8 nm.



Figura 3-3: Evento 04 de Noviembre de 2003 SORCE/XPS 0.55nm.

<https://lasp.colorado.edu/lisird/>

3.2.2. Evento 06/09/2017

El 6 de septiembre de 2017, el Sol emitió dos fulguraciones clase X en la región activa 2673. La primera fulguración de clase X de X2.2 alcanzó su punto máximo a las 09:10 UT y el segundo de X9.3, la cual inicio a las 11:53 UT, alcanzando su máximo a las 12:02 UT.

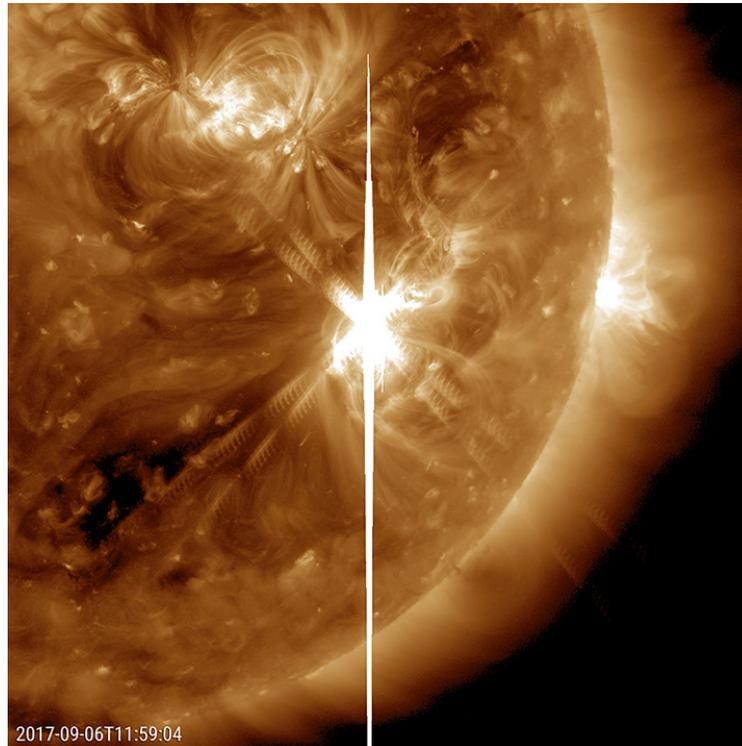


Figura 3-4: Fulguración del 06 de Septiembre de 2017 a las 11:59:04 UT. La línea vertical brillante causadas por el destello brillante de la fulguración; tomado de <https://sdo.gsfc.nasa.gov/gallery/main/item/837>

Banda espectral	Sensor	Inicio	Pico	Final	Flujo [W/m^2]
0.1-0.8 nm	GOES/XRS B	11:53	12:02	23:25	0.0014
0.55 nm	SORCE/XPS	11:53	12:01	22:12	0.0011
1.95 nm	SORCE/XPS	11:55	12:01	16:29	0.00038
115.95 nm	SORCE/SOLSTICE	11:54	11:56	12.48	0.000046

Tabla 3-4: Evento 06/09/2017, medido por GOES/XRS B, SORCE/XPS y SORCE/SOLSTICE. Se uso criterio "dos *sigma*" para el calculo de umbral de inicio y final de la fulguración.

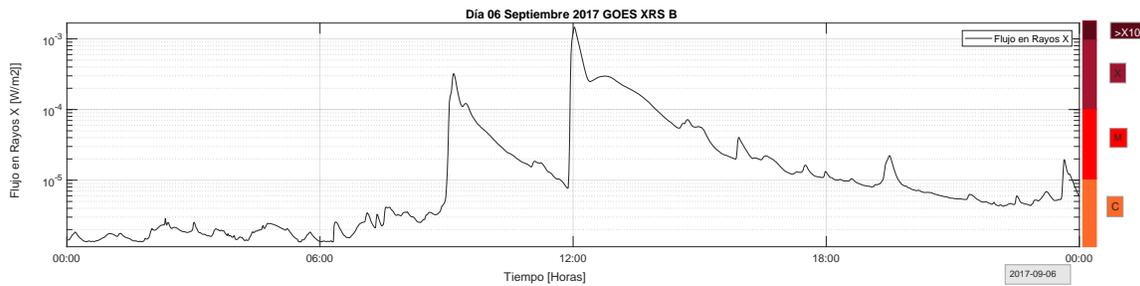


Figura 3-5: Evento 06 de Septiembre de 2017 GOES/XRS 0.1nm -0.8 nm.

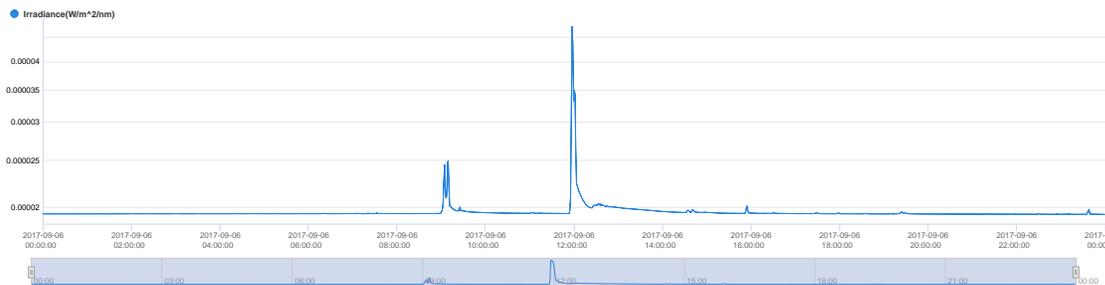


Figura 3-6: Evento 06 de Septiembre de 2017 SORCE/SOLSTICE 115.95nm.

<https://lasp.colorado.edu/lisird/>

4 Inteligencia artificial: Modelo de clasificación en series de tiempo de 2003 -2020 con datos satelitales de SORCE y GOES

En este capítulo se desarrolla un algoritmo de IA, utilizando aprendizaje automático supervisado con redes neuronales de clasificación. Los resultados obtenidos dependieron en gran medida de la interpretación y validación de conocimientos propios del estudio del Sol. Sin embargo, se utiliza la IA como herramienta valiosa en esta investigación y así comprender de una forma numérica la correlación de las series de tiempo de número de manchas solares, número de eventos clase C, M y X, datos GOES y SORCE y sus efectos en la variabilidad solar en el periodo 2003 - 2020.

4.1. Red neuronal

La técnica mas apropiada para cumplir con el objetivo de esta investigación son las redes neuronales de aprendizaje automático supervisado. A continuación, se presentan los criterios que llevaron la selección de esta técnica:

- Datos: Las redes neuronales pueden manejar grandes volúmenes de datos. A medida que aumenta la cantidad de datos de entrenamiento, las redes neuronales pueden aprender patrones más precisos.
- Tipos de datos: Las redes neuronales pueden manejar una amplia variedad de tipos de datos, incluyendo datos numéricos, categóricos y de texto. Esto las hace versátiles y aplicables a una amplia gama de problemas y dominios.
- Algoritmo: En el contexto de las redes neuronales, se pueden utilizar diferentes algoritmos para abordar problemas de clasificación, regresión y agrupamiento.

Si bien las redes neuronales pueden ser poderosas en el aprendizaje automático supervisado, también es importante considerar el tamaño y la calidad de los datos disponibles, la

complejidad del problema y la disponibilidad de recursos computacionales para entrenar y desplegar modelos de redes neuronales.

4.1.1. Matriz de datos

En el contexto de las redes neuronales, la matriz de datos se refiere a la estructura de datos utilizada para almacenar y representar los datos de entrada y etiquetado utilizados para entrenar y evaluar la red neuronal. En el caso del aprendizaje supervisado, utilizado en el presente trabajo se tiene una matriz de datos con la siguiente estructura:

Matriz de datos de entrada: Conformada por una matriz de 24×6075 datos; las filas de la matriz representan las muestras individuales de las variables. Las columnas de la matriz representan los valores día de las diferentes variables de entrada en el periodo 15-05-2003 a 31-12-2019. Las variables de entrada utilizadas en la matriz de datos se da en la Tabla 4-2

Etiquetado de datos: En las redes neuronales en MATLAB, el término etiquetado o *target* se refiere a la salida deseada o etiqueta asociada a cada entrada en un problema de aprendizaje supervisado. En otras palabras, el etiquetado es el valor objetivo que se espera que la red neuronal prediga o clasifique para una determinada entrada.

De acuerdo a las 24 variables de entrada que son de tipo series de tiempo; se establece como etiquetado a la única clasificación oficial que es la suministrada por GOES. En este caso se definen tres salidas de la siguiente manera:

- Etiquetado A: Sol calmo. Los valores GOES XRS/B con orden de magnitud 10^{-8} , se define como estado 1 0 0.
- Etiquetado B: Sol con actividad moderada. Los valores GOES XRS/B con orden de magnitud 10^{-7} , se define como estado 0 1 0.
- Etiquetado C: Sol con actividad fuerte. Los valores GOES XRS/B con orden de magnitud 10^{-6} , se define como estado 0 0 1.

La red neuronal aprende a partir de estos ejemplos y ajusta sus pesos internos para minimizar la diferencia entre las salidas predichas y los etiquetado reales.

Número de variables	Variable
1	Irradiancia Solar Total [W/m ²]
2	Número de manchas solares
3	Número de eventos clase C
4	Número de eventos clase M
5	Número de eventos clase X
6	Flujo SORCE/XPS banda 0.55nm [W/m ²]
7	Flujo SORCE/XPS banda 1.65nm [W/m ²]
8	Flujo SORCE/XPS banda 7.95nm [W/m ²]
9	Flujo SORCE/XPS banda 24.95nm [W/m ²]
10	Flujo SORCE/XPS banda 39.95nm [W/m ²]
11	Flujo SORCE/SOLSTICE banda 115.48nm [W/m ²]
12	Flujo SORCE/SOLSTICE banda 121.48nm [W/m ²]
13	Flujo SORCE/SOLSTICE banda 129.48nm [W/m ²]
14	Flujo SORCE/SOLSTICE banda 139.48nm [W/m ²]
15	Flujo SORCE/SOLSTICE banda 149.48nm [W/m ²]
16	Flujo SORCE/SOLSTICE banda 159.48nm [W/m ²]
17	Flujo SORCE/SOLSTICE banda 169.48nm [W/m ²]
18	Flujo SORCE/SOLSTICE banda 179.48nm [W/m ²]
19	Flujo SORCE/SIM banda 240.02nm [W/m ²]
20	Flujo SORCE/SIM banda 450.23nm [W/m ²]
21	Flujo SORCE/SIM banda 1298nm [W/m ²]
22	Flujo SORCE/SIM banda 1593nm [W/m ²]
23	Flujo SORCE/SIM banda 2005.15nm [W/m ²]
24	Flujo SORCE/SIM banda 2401.4nm [W/m ²]

Tabla 4-1: Variables de entrada.

4.1.2. Arquitectura neuronal

*Neural Pattern Recognition*¹ es una aplicación de MATLAB que proporciona diferentes opciones para crear arquitecturas de redes neuronales, a través de la interfaz gráfica de usuario. La red neuronal seleccionada es ideal para clasificar las entradas en un conjunto de categorías objetivo.

Aquí una descripción general de cómo se creó la arquitectura de red neuronal utilizando *Neural Pattern Recognition* :

¹*Neural Pattern Recognition*: Reconocimiento de patrones neuronal

1. Se abre la *Neural Pattern Recognition* en MATLAB.
2. Se importan datos de matriz de entrada llamada *input* de 24×6075 y matriz *targets* llamada etiquetado GOES. Ver [4-1](#)

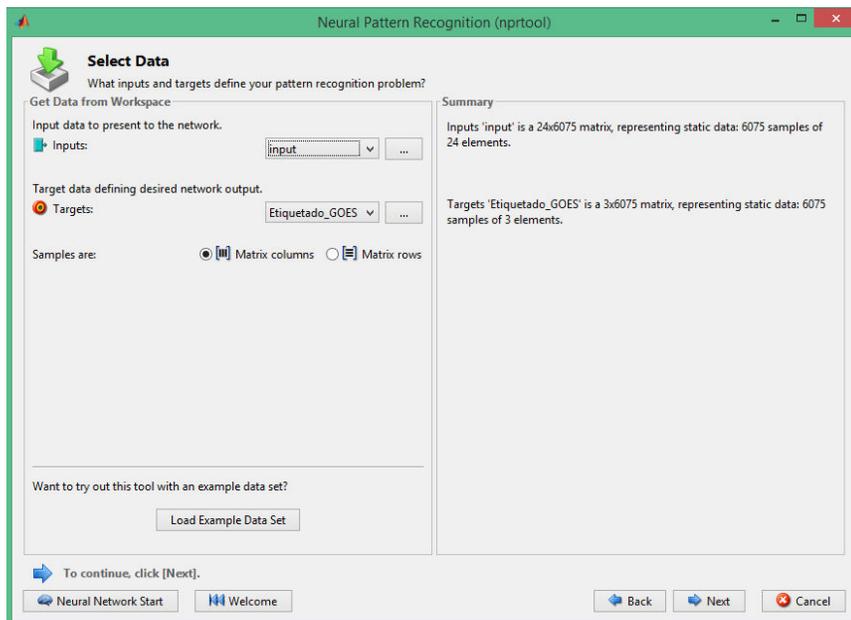


Figura 4-1: Matriz de entrada y etiquetado.

3. Una vez cargados los datos, se configura el número de capas ocultas; este paso se debe modelar varias veces por ensayo y error. Ver arquitectura neuronal en la Figura [4-2](#).

4.1.3. Entrenamiento

Después de configurar la arquitectura de la red neuronal, se ajusta los valores de preparación de la siguiente manera:

- Entrenamiento 70 %
- Validación 15 %
- Prueba 15 %

El proceso de entrenamiento consiste en asociar cada pareja de entradas con la salida correspondiente. En el entrenamiento se evalúa la diferencia entre la salida de la red neuronal y el valor que se espera, y por medio de algoritmos para el ajuste de los pesos de las conexiones de la red, estos se modifican, hasta hacer que el error llegue a un valor considerado adecuado. En la pestaña Train Network ² ver Figura [4-3](#), el entrenamiento se realiza con un algoritmo

²Train Network: Entrenamiento neuronal

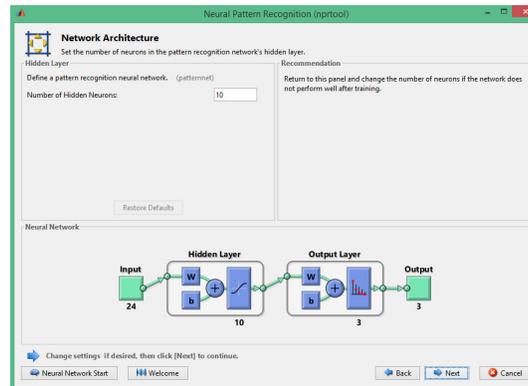


Figura 4-2: Arquitectura neuronal: Se calcula el número de neuronas por ensayo y error; encontrando que al aumentar el número de capas ocultas y llegar a 10 el error no disminuye más. Es posible entrenar el modelo con más neuronas, pero como resultado se obtiene un sobre ajuste de entrenamiento y un calculo de error similar a cuando se modela con 10 neuronas.

de optimización de gradiente *Scaled Conjugate Gradient*³, que es un método de entrenamiento que utiliza información del gradiente para ajustar los pesos de la red neuronal; además se utiliza *cross-entropy*⁴ para evaluar la diferencia entre las distribuciones de probabilidad.

4.1.4. Resultados

En este momento se considera que se han definido las funciones de activación, y se prueban realizando variaciones de la cantidad de neuronas por capas, con el objetivo único de reducir el error. El porcentaje de error indica la fracción de muestras que están mal clasificadas. Un valor de 0 significa que no hay errores de clasificación, 100 indica el máximo de errores de clasificación. En la Tabla 4-2 se realiza una comparación de los errores obtenidos variando el número de neuronas. Como resultado se tiene que al colocar diez neuronas el error disminuye a 0.097; la elección del número óptimo de neuronas en una red neuronal es un proceso empírico que depende del problema específico y de la cantidad y calidad de los datos de entrenamiento. La relación entre el número de neuronas y el rendimiento de la red es influenciada por reducción del error seguida de sobre ajuste. De esta manera se entiende que la secuencia de ensayos y modificaciones a la red es apropiada.

Los resultado de entrenamiento indica 41 iteraciones, para 24 entradas, 10 neuronas de capa oculta y 3 salidas esperadas. En la Figura 4-4, se muestra las matrices de entrenamiento, validación, prueba y total. Cada columna de la matriz de resultados representan una clase

³*Scaled Conjugate Gradient*: Gradiente conjugado escalado

⁴*cross-entropy*: Entropía cruzada

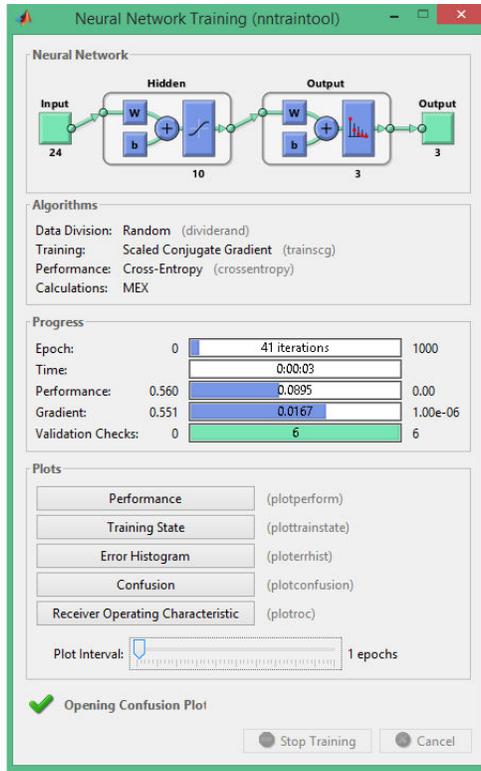


Figura 4-3: Entrenamiento.

diferente, y los valores en las filas indican la probabilidad o la pertenencia de la entrada a cada clase. La correlación de 90.3 % de concordancia de la totalidad de los datos. El 48.1 % de los datos tienen un comportamiento de A Sol calmo, 41.3 % B Sol actividad solar moderada y el 1.0 % Sol con actividad solar fuerte.

Número de neuronas	Error %
1	18.9 %
2	16.8 %
5	10.8 %
10	9.7 %
20	9.7 %
50	10.4 %
100	11.3 %

Tabla 4-2: Número de neuronas versus error %: El número de neuronas elegido es 10. La relación entre el número de neuronas y el error sigue una curva en forma de U, donde inicialmente el aumento en el número de neuronas mejora el rendimiento, pero después de cierto punto, agregar más neuronas conduce a un sobre ajuste que empeora el rendimiento.

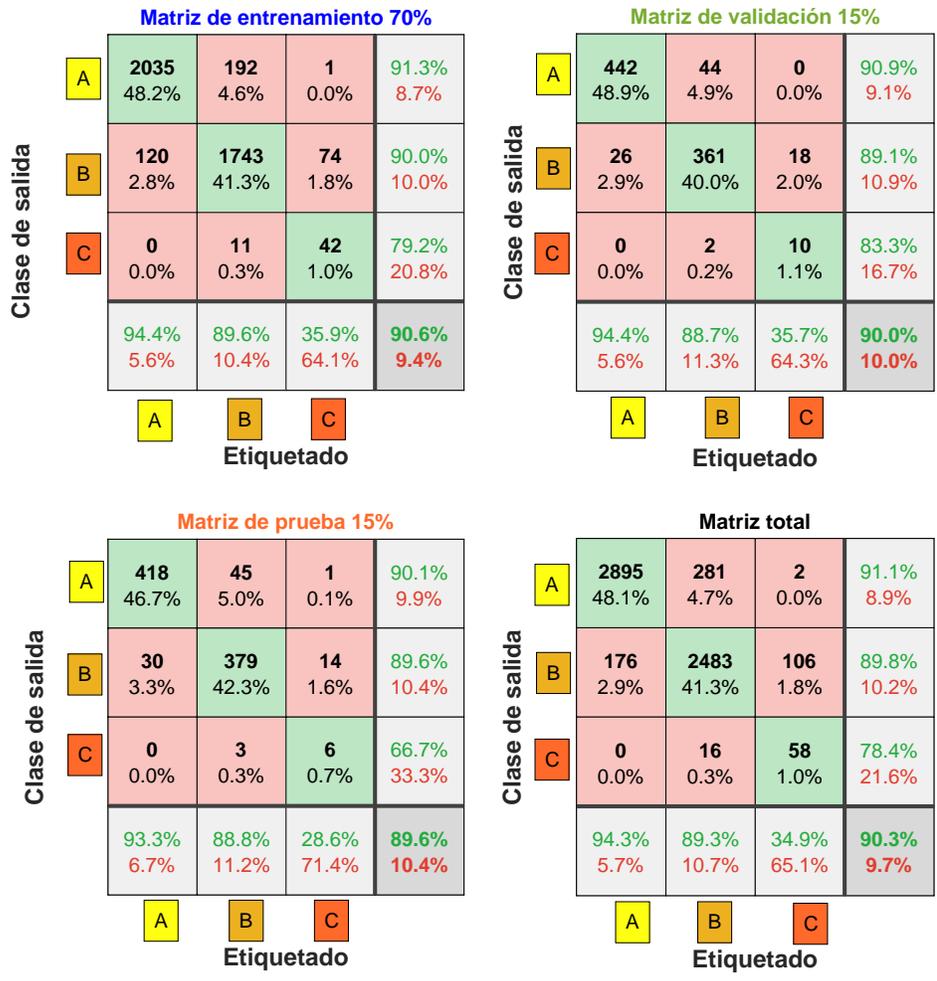


Figura 4-4: Matriz de resultados. La matriz de resultados indica la clasificación de los datos generados por la red neuronal para las 24 variables de entrada y su evaluación del rendimiento del modelo; para entrenamiento, validación, prueba y matriz total.

5 Conclusiones y discusión

5.1. Conclusiones

Este trabajo se centró en el estudio multiespectral de radiación solar en un periodo de tiempo que abarca desde 2003 hasta 2020, es decir, por un intervalo de tiempo mayor al periodo de actividad solar (del orden de 11 años), utilizando datos diarios satelitales proporcionados por SORCE (*Solar Radiation and Climate Experiment*) en diferentes bandas y GOES (*Geostationary Operational Environmental Satellite*) en rayos X, junto con los registros de número de manchas solares y eventos clase C, M y X. En particular, se abordó el tema de la variabilidad Solar en el periodo estudiado, en diversas bandas espectrales.

En la primera parte de esta tesis presentamos algunos aspectos fenomenológicos como las manchas solares, el ciclo solar, fulguraciones, entre los que más destacamos, así como los satélites GOES y SORCE cuyos datos utilizamos, y unos aspectos pertinentes a la denominada inteligencia artificial.

En el segundo capítulo usamos el número de Wolf como un indicador de la actividad solar, la cual se graficó en función del tiempo, y notamos que el ciclo 23 puede declararse como un ciclo con dos máximos; por ello la interpolación que se hizo con un polinomio de grado 10, curva verde en la figura 2-3, no nos da un periodo como el estándar sino apreciablemente superior, del orden de 13.9 años, indicando que debe usarse un análisis de Fourier o de Wavelets, pero esto a su vez requiere información de un intervalo de tiempo mucho mayor.

Además, como la actividad solar tiene incidencia en las fulguraciones solares, se vio la importancia de utilizar los datos satelitales del GOES y del SORCE, en particular los sensores GOES/XRS B, SORCE/XPS, SORCE/SOLSTICE, SORCE/SIM y SORCE/TIM, así como herramientas de inteligencia artificial (IA) con manejo de software como por ejemplo el aplicativo de MATLAB denominado *Neural Pattern Recognition*.

La descarga de datos y procesamiento de señales fue el paso a seguir en el desarrollo del proyecto; es por esto, que determinar la cadencia de datos a utilizar requiere un análisis previo. Para estudiar la variabilidad solar, basta con el valor *background* diario; incluir valores por segundos, significa realizar descarga de información diaria lo que implica mayor tiempo de descarga y capacidad computacional. Del sensor GOES/XRS B flujo de rayos X de 0.1

a 0.8 nm (canal largo) se utilizó su clasificación con doble propósito; primero para definir la magnitud de fulguraciones que es como normalmente se usa y luego para clasificar la ubicación *background* del día y encontrar los estados; A Sol calmo o menor, B Sol dinámico moderado y C Sol dinámico fuerte. Para los sensores del satélite SORCE datos por minutos para SORCE/XPS en rayos X y SORCE/SOLSTICE en ultravioleta, para fulguraciones y SORCE/XPS, SORCE/SOLSTICE, SORCE/SIM y SORCE/TIM con valores *background* diario en análisis de variabilidad solar.

Se realizó una comparación analítica con el número de manchas solares, irradiancia solar total con series de tiempo SORCE/TIM y el número de eventos clase C, M y X; encontrando que la variabilidad está directamente relacionadas con el ciclo solar de aproximadamente 11 años; el aumento y disminución de flujo espectral es evidente para las bandas (0.1 -0.8 nm), GOES/XRS B, (0.1 -40 nm), SORCE/SOLSTICE (115 - 315 nm). Este comportamiento de variabilidad Solar no es notorio para los flujos reportados por el sensor SORCE/SIM; los gráficos muestran que a medida que se acerca al infrarrojo la curva es cada vez más lineal. Por otra parte se realizó correlación con el valor *background* GOES/XRS B con eventos C, M y X versus fulguraciones clase X. Se concluye que cuando se tiene; A Sol calmo o menor, el término Sol calmo no esta bien definido, los 402 eventos clase C y 23 eventos clase M, indican que el Sol en todo momento incluso durante los períodos de baja actividad solar, presenta dinámica; para esta clasificación no se presentaron eventos clase X en el periodo estudiado. Por lo contrario a medida que avanza el ciclo solar y la clasificación *background* aumenta a B Sol dinámico moderado y C Sol dinámico fuerte; el número de eventos con fulguraciones clase X, se presentan en aproximadamente 1 % de la totalidad de eventos C,M y X. Adicionalmente se encuentra que las fulguraciones ≥ 10 se encuentran justamente cuando el valor *background* es C Sol dinámico fuerte. Para los eventos de los días 04/11/2003 y 06/09/2017 existe correlación en el reporte de los sensores GOES/XRS B Y SORCE/XPS en la banda 0.55 nm y 1.95 nm; se establece que los sensores en rayos X, son ideales para estudio de fulguraciones. El SORCE/SOLSTICE en la banda 115.95 nm en ultravioleta, indica los pulsos altos cuando se presentan fulguraciones, pero no es buena medida para determinar inicio, pico y final de la fulguración.

Otra conclusión, parte del análisis multispectral de radiación solar del sensor SORCE/TIM, que tiene dos características particulares; la primera en el cálculo del espectro de irradiancia solar diario, que utiliza valores espectrales de 0.1 a 2440 nm, y que al calcular la integral bajo la curva da como resultado 1321 W/m², que indica un 97 % del valor irradiancia solar total. La segunda y más importante que la anterior, el SORCE/TIM mide la radiación solar total, integrado sobre todo el disco solar y todo el espectro solar; valores de irradiancia a 1 UA y series de tiempo que van en el periodo del 2003 a 2020, que llega a la parte superior de la atmósfera terrestre de 1361 W/m² con variaciones que cambian ligeramente debido a las fluctuaciones en la actividad solar.

Por último se desarrolló un algoritmo de clasificación con técnicas de IA, más precisamente, aprendizaje automático supervisado con redes neuronales. Los resultados obtenidos ayudan comprender de una forma numérica la correlación de las series de tiempo de número de manchas solares, número de eventos clase C, M y X, datos GOES y SORCE y sus efectos en la variabilidad solar en el periodo 2003 - 2020. Se realizó una matriz de 24×6075 datos, en el periodo 15-05-2003 a 31-12-2019. De acuerdo a las 24 variables de entrada que son de tipo series de tiempo; se establece como etiquetado a la única clasificación oficial que es la suministrada por GOES. Etiquetado A Sol calmo o menor, etiquetado B Sol dinámico moderado y etiquetado C: Sol dinámico fuerte. Los resultados obtenidos muestran una correlación de 90.3% de concordancia de la totalidad de los datos. El 48.1% de los datos tienen un comportamiento de Sol calmo, 41.3% presentan una dinámica Solar moderada y el 1.0% Sol dinámico fuerte. El porcentaje de error del 9.7% indicó la fracción de muestras que están mal clasificadas; en este sentido y pensando en los resultados obtenidos de la correlación analítica se concluye que el error está relacionado a los flujos en infrarrojo, que a medida que se va incrementado la señal de la variabilidad solar es más lineal.

5.2. Discusión

Es posible seguir trabajando en el desarrollo de algoritmos de IA, para aplicarlos no solamente para clasificar, sino también en predicción de próximos ciclos solares y en predicción de fulguraciones solares.

Se puede realizar un análisis más detallado de como el valor *background* del GOES/XRS B, en su ubicación del ciclo Solar, A Sol calmo, B Sol con actividad moderada y C Sol con actividad fuerte; puede inferir en determinar, cuando existe mayor probabilidad de que se presenten fulguraciones clase X.

La simulación que se trabajó aquí considera un espacio numérico. De poder incluir fotografías del Sol a diferentes bandas; se puede analizar con mayor detalle, como la variabilidad solar está relacionada directamente con el número de manchas solares.

6 Anexo: Algoritmo

```

function [y1] = myNeuralNetworkFunction(x1)
%MYNEURALNETWORKFUNCTION neural network simulation function.

% [y1] = myNeuralNetworkFunction(x1) takes these arguments:
%   x = 24xQ matrix, input #1
% and returns:
%   y = 3xQ matrix, output #1
% where Q is the number of samples.

%#ok<*RPMT0>

% ===== NEURAL NETWORK CONSTANTS =====

% Input 1
x1_step1.xoffset = [1360.51366878262;0;0;0;0;2.4206775606217e-07;1.47590117194341e-
05;7.88381385063985e-06;6.41957058178377e-06;2.07466723622929e-06;1.03934943404728e-
05;0.0127104948612053;1.46734952170181e-05;2.33223621738734e-05;6.76726319656385e-
05;0.000159082656929569;0.000555567472380726;0.00132991947444358;0.038278582;
2.05823083333333;0.41987525;0.2543759;0.102843305;0.0609324025];
x1_step1.gain = [1.80645280874935;0.00606060606060606;0.0769230769230769;0.2;
0.666666666666667;35445.9509067791;3442.46663546918;18414.8719206613;
20756.2283877007;197799.813419091;219193.531067462;294.873687505244;
188415.638466744;57190.1603150226;113746.429497981;27153.6872623002;
22346.8497502013;7167.29252742498;601.479097248048;190.016230552967;
1217.39659737649;987.690902132172;28.1461819809691;586.605307751475];
x1_step1.ymin = -1;

% Layer 1
b1 = [-1.5715336558114667564;-0.41587093610096620422;-1.1119466609811283764;
0.050775330271343926958;-0.27821642337898971897;0.54228615073958896797;
-0.66351451391393767576;-1.4979244668629032589;-1.6252454351009504308;
1.4924447088983978649];
IW1_1 = [-0.13452192488556150018 -0.76532883310041810443 -0.83597199904548358251
-0.5355259815745607721 0.16052521543274347882 -0.15023826697516598494
-0.095423179870648536238 0.35357149183147168481 -0.39134933357184698011
-0.1420169222516060592 -0.43278595887627163696 0.3565491231013783735
0.51681730785576862619 0.30314404647140430482 0.073477046834505455042
-0.0035320380192892888473 -0.043541753232283833541 -0.56590017870781206266
-0.47613388310055937414 -0.19096630182704849021 0.13586004369850490647
-0.1113356509776910197 0.24480523807240453515 -0.1746108543474242103;
0.93678725475566659853 1.4973420341869696504 0.35676904412119814225
0.40579324066371935675 -0.40424999310462139679 -0.9367303562870842315
0.51506670115132868748 -0.26481265374017615155 -0.044552622789560847316
0.44402833630360988293 -0.49704139423304860568 -0.25291456580641435981
-0.26442138663165154489 0.0054258452602359060618 0.091323433118189842328
0.6155477222995235431 0.13983993165612793041 0.0085339977836058952126
-0.4859269605899851352 -0.038844488653929212796 -0.80344415400824187312
-0.39650148356729120191 -0.88002567347086868565 -0.057206812024451381138;
0.28704199908379007811 -0.87930338515272665756 -0.68983075189702425245
-0.17306788424234462176 0.089681265744715035759 -0.088006702704809453008
0.27622867538103096363 -0.083485995978659133243 0.36181265763759740128
-0.49988187759745938976 -0.17396405786610832922 -0.34174451685418572033
-0.29380746203021873564 0.055948835349472113287 -0.34025754864379514908
0.33220127467348975481 0.14205095822636087943 -0.25709338410748711068

```

-0.10388840925277806337 0.010152041994735884478 0.091001696382183819289 ✓
 0.64156432092432746916 0.40558468361346222686 -0.24582617071932766351; ✓
 -0.97957080341402857915 -0.4665572028361207324 -0.027497842005674122401 ✓
 -0.37852175363084483717 -0.26008244949988895689 -0.19061153104917266665 ✓
 -0.29992545058515579504 -0.6621621225418612422 -0.33562890455925153965 ✓
 0.064693612636129368965 -0.17370243168362362041 0.12791677201468829028 ✓
 -0.34023846795234941043 -0.04591866324147801659 0.32408117849653494957 ✓
 -0.082035004685456242024 -0.40550890112493420681 -0.27830991605016525137 ✓
 0.10479495946304535903 -0.34799443284910647201 0.99790722082973992713 ✓
 -0.15445475705925454379 -0.13963358030329323101 -0.40627790084881781896; ✓
 -0.48548944620735889899 -0.89065011635987467731 -0.58854608224665305727 ✓
 0.90149061773128924546 -0.1885282365022694917 0.37315938106797907903 ✓
 -0.62223205114424895434 0.28306237150169305528 0.22158113955618463642 ✓
 -0.094426569279342162377 -0.39679201589797497007 -0.11300372814677743516 ✓
 -0.10332453251027350072 -0.1614592090415188641 0.27520786388762885633 ✓
 -0.14420140380252591261 -0.30701727260692807109 0.16511410088872197077 ✓
 -0.25166177143707363362 -0.30635579018031938725 0.10775357841925525815 ✓
 0.41928140131117447309 0.20786958627274995659 0.29689296012084720466; ✓
 0.31060746786895493399 0.59390678859336876183 0.81202306085361641852 ✓
 0.58697855452849945213 0.16405440038581234341 -0.28404039433493810662 ✓
 -0.092572564446668836879 -0.43164621976179173846 -0.20283817387587968484 ✓
 0.050613932472452514977 0.41795557847404934959 -0.27714701820772491558 ✓
 0.31295728874031264466 0.26803198945503881045 -0.045703483609657487297 ✓
 0.49590131850388186052 -0.0056916430517501385988 0.024836973563576697499 ✓
 0.1068714177533525711 0.36565410373396667332 -0.23829761174095215326 ✓
 0.3817073041957858015 -0.21815492501010547155 -0.10173588800216978867; ✓
 0.16400561130276053445 0.6795120673178954851 0.025025317873638226046 ✓
 0.38718601457217705075 0.56146436571031976825 0.35237298019691093431 ✓
 1.0230782570751006944 0.82686959063624354549 0.26428353912345148302 ✓
 0.43604900125396162114 0.67494868341295188863 0.3368401952355911666 ✓
 -0.17073491721886960293 -0.18371278206477945072 0.3061822466073929605 ✓
 0.14307797100586797101 0.0045466944980076442334 -0.095711901192258808102 ✓
 0.56351540424985280264 -0.68139064725166365033 -0.28163815593521984715 ✓
 0.36808353262413695539 0.39096047123871735529 0.0087495159265867580856; ✓
 -0.86363652154289549667 -1.2751854979024699333 -0.84000742757048341147 ✓
 0.5446493304782636935 0.87392788820385536308 0.15224290485779631843 ✓
 -0.10363065514207471518 0.51868051663185754663 -0.11336667115447050802 ✓
 -0.010123241254461729302 0.16794832355465283413 0.20122879283311090326 ✓
 -0.1038021021567555463 0.3910089212084834065 -0.07052033407814529975 ✓
 -0.14489335338151340671 0.50616191874555249708 0.52370226196157598775 ✓
 0.025195774342148931357 0.83847964594386481529 1.4702894306856841844 ✓
 0.44820779418283313023 0.54650429531403976746 0.37223027348338810771; ✓
 0.090651805934511581198 0.6481032365048713384 0.12325753767473880684 ✓
 0.16888929166121913195 0.043491819786655741553 0.47486305799219430401 ✓
 0.60911008461168880679 0.59748104351392450351 -0.12786871538741609311 ✓
 -0.29568042985612963403 0.03104851563054488936 -0.15608779869878736113 ✓
 -0.12225559899449144063 -0.30840942929430326114 -0.013393560349519370578 ✓
 0.32570189697643886495 -0.20277742761917388892 0.54763060971518873199 ✓
 -0.17089597028474320939 0.10510436163126513076 0.29277363925602817307 ✓
 -0.15175372502596348734 0.62263545993122548783 0.1657091056631890269; ✓
 0.47794637137863921206 0.00044127223361679933974 -0.3991875517963067721 ✓
 0.31266673184765825244 0.096847008434503403795 -0.29998421696799254521 ✓
 -0.02675758911358303016 -0.58935768725714721139 0.37763305540681246786 ✓
 -0.39425476585463370416 -0.23141100772503150895 0.47494073517591600675 ✓
 0.13812802960312980938 -0.19985268440196171658 -0.041065162786674484774 ✓

```

0.42029534249918187871 -0.39585355402869054631 -0.13413475450492784447✓
-0.30778439595451984045 -0.006958812860498485818 0.24387603383110129096✓
-0.19814848623987510456 0.508408517450147035 0.15660266522472568451];

% Layer 2
b2 = [0.3041504796556715462;-0.66253251667004409153;-0.55770872724937903264];
LW2_1 = [1.5731015811569082352 -2.225508218163197327 0.52681271990325806431✓
1.0740069431187460047 0.40462212294572474924 -1.7601436915537693739✓
-0.22074469145637545808 2.0471648402388611387 0.49326025487536806491✓
0.27343837689026256887;0.22803328739739020525 0.59878371013535003353✓
-0.78947898364570612273 0.72453337744838564038 -1.2033365500829316108✓
-0.54354272056696029125 -0.1539300728502873139 -1.911583284259595894✓
0.46179704063043575113 0.084328671960156878495;-0.31782837697313337522✓
1.2454573341473142989 -1.3643283629403779589 -0.41484682961729896222✓
0.22407271967849123895 0.57473930125206507125 0.83952610774621927447✓
-0.071760980473032823235 0.32606468446771053049 0.015272526875146689301];

% ===== SIMULATION =====

% Dimensions
Q = size(x1,2); % samples

% Input 1
xp1 = mapminmax_apply(x1,x1_step1);

% Layer 1
a1 = tansig_apply(repmat(b1,1,Q) + IW1_1*xp1);

% Layer 2
a2 = softmax_apply(repmat(b2,1,Q) + LW2_1*a1);

% Output 1
y1 = a2;
end

% ===== MODULE FUNCTIONS =====

% Map Minimum and Maximum Input Processing Function
function y = mapminmax_apply(x,settings)
y = bsxfun(@minus,x,settings.xoffset);
y = bsxfun(@times,y,settings.gain);
y = bsxfun(@plus,y,settings.ymin);
end

% Competitive Soft Transfer Function
function a = softmax_apply(n,~)
if isa(n,'gpuArray')
a = iSoftmaxApplyGPU(n);
else
a = iSoftmaxApplyCPU(n);
end
end
function a = iSoftmaxApplyCPU(n)
nmax = max(n,[1,1]);
n = bsxfun(@minus,n,nmax);

```

```
numerator = exp(n);
denominator = sum(numerator,1);
denominator(denominator == 0) = 1;
a = bsxfun(@rdivide,numerator,denominator);
end
function a = iSoftmaxApplyGPU(n)
nmax = max(n,[],1);
numerator = arrayfun(@iSoftmaxApplyGPUHelper1,n,nmax);
denominator = sum(numerator,1);
a = arrayfun(@iSoftmaxApplyGPUHelper2,numerator,denominator);
end
function numerator = iSoftmaxApplyGPUHelper1(n,nmax)
numerator = exp(n - nmax);
end
function a = iSoftmaxApplyGPUHelper2(numerator,denominator)
if (denominator == 0)
    a = numerator;
else
    a = numerator ./ denominator;
end
end

% Sigmoid Symmetric Transfer Function
function a = tansig_apply(n,~)
a = 2 ./ (1 + exp(-2*n)) - 1;
end
```

Bibliografía

- Abhyankar, K. D. (mar. de 1977). “A Survey of the Solar Atmospheric Models”. En: *Bulletin of the Astronomical Society of India* 5, pág. 40.
- Ali, Aatiya et al. (mar. de 2023). “Predicting Solar Proton Events of Solar Cycles 22-24 using GOES Proton & Soft X-Ray Flux Statistics”. En: *arXiv e-prints*, arXiv:2303.05446, arXiv:2303.05446. DOI: [10.48550/arXiv.2303.05446](https://doi.org/10.48550/arXiv.2303.05446). arXiv: [2303.05446](https://arxiv.org/abs/2303.05446) [astro-ph.SR].
- Athay, R. Grant (1976). “Introduction”. En: *The Solar Chromosphere and Corona: Quiet Sun*. Dordrecht: Springer Netherlands, págs. 1-30. ISBN: 978-94-010-1715-2. DOI: [10.1007/978-94-010-1715-2_1](https://doi.org/10.1007/978-94-010-1715-2_1). URL: https://doi.org/10.1007/978-94-010-1715-2_1.
- Benson, B. et al. (mayo de 2020). “Forecasting Solar Cycle 25 Using Deep Neural Networks”. En: *Solar Phys.* 295.5, 65, pág. 65. DOI: [10.1007/s11207-020-01634-y](https://doi.org/10.1007/s11207-020-01634-y). arXiv: [2005.12406](https://arxiv.org/abs/2005.12406) [astro-ph.SR].
- Benz, Arnold O. (dic. de 2017). “Flare Observations”. En: *Living Reviews in Solar Physics* 14.1, 2, pág. 2. DOI: [10.1007/s41116-016-0004-3](https://doi.org/10.1007/s41116-016-0004-3).
- Chamberlin, P. C., F. G. Eparvier et al. (dic. de 2020). “The Flare Irradiance Spectral Model-Version 2 (FISM2)”. En: *Space Weather* 18.12, e02588, e02588. DOI: [10.1029/2020SW002588](https://doi.org/10.1029/2020SW002588).
- Chamberlin, P. C., G. Lu et al. (abr. de 2009). “Using the Flare Irradiance Spectral Model (FISM) to study the response of the Earth, Mars and Moon to Solar Flares”. En: *EGU General Assembly Conference Abstracts*. EGU General Assembly Conference Abstracts, pág. 5970.
- Clette, Frédéric et al. (dic. de 2014). “Revisiting the Sunspot Number. A 400-Year Perspective on the Solar Cycle”. En: *Space Sci. Rev.* 186.1-4, págs. 35-103. DOI: [10.1007/s11214-014-0074-2](https://doi.org/10.1007/s11214-014-0074-2). arXiv: [1407.3231](https://arxiv.org/abs/1407.3231) [astro-ph.SR].
- Darnel, Jonathan M. et al. (2022). “The GOES-R Solar UltraViolet Imager”. En: *Space Weather* 20.4. e2022SW003044 2022SW003044, e2022SW003044. DOI: <https://doi.org/10.1029/2022SW003044>. eprint: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/2022SW003044>. URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2022SW003044>.
- Engebretson, M. J. et al. (2018). “MMS, Van Allen Probes, GOES 13, and Ground-Based Magnetometer Observations of EMIC Wave Events Before, During, and After a Modest Interplanetary Shock”. En: *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 123.10, págs. 8331-8357. DOI: <https://doi.org/10.1029/2018JA025984>. eprint: <https://arxiv.org/abs/1805.08111>.

- [//agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/2018JA025984](https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/2018JA025984). URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2018JA025984>.
- Goodman, Steven J. (2020). “Chapter 1 - GOES-R Series Introduction”. En: *The GOES-R Series*. Ed. por Steven J. Goodman et al. Elsevier, págs. 1-3. ISBN: 978-0-12-814327-8. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814327-8.00001-9>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128143278000019>.
- Goupil, M J et al. (ene. de 2011). “Open issues in probing interiors of solar-like oscillating main sequence stars 1. From the Sun to nearly suns”. En: *Journal of Physics: Conference Series* 271.1, pág. 012031. DOI: [10.1088/1742-6596/271/1/012031](https://doi.org/10.1088/1742-6596/271/1/012031). URL: <https://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/271/1/012031>.
- Gunshor, Mathew M. et al. (jul. de 2020). “GOES-R series ABI Imagery artifacts”. En: *Journal of Applied Remote Sensing* 14, 032411, pág. 032411. DOI: [10.1117/1.JRS.14.032411](https://doi.org/10.1117/1.JRS.14.032411).
- Hanslmeier, Arnold (2010). *The sun and space weather*. Vol. 18. Springer.
- Harder, J. et al. (ene. de 2005). “Solar spectral irradiance variability comparisons of the SORCE SIM instrument with monitors of solar activity and spectral synthesis”. En: *Mem. Societa Astronomica Italiana* 76, pág. 735.
- Hathaway, David (dic. de 2010). “The Solar Cycle”. En: *Living Reviews in Solar Physics* 7. DOI: [10.12942/lrsp-2010-1](https://doi.org/10.12942/lrsp-2010-1).
- Kopp, Greg y George Lawrence (ago. de 2005). “The Total Irradiance Monitor (TIM): Instrument Design”. En: *Solar Phys.* 230.1-2, págs. 91-109. DOI: [10.1007/s11207-005-7446-4](https://doi.org/10.1007/s11207-005-7446-4).
- Kress, Brian T., Juan V. Rodriguez y Terrance G. Onsager (2020). “Chapter 20 - The GOES-R Space Environment In Situ Suite (SEISS): Measurement of Energetic Particles in Geospace”. En: *The GOES-R Series*. Ed. por Steven J. Goodman et al. Elsevier, págs. 243-250. ISBN: 978-0-12-814327-8. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814327-8.00020-2>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128143278000202>.
- Lin, Rong et al. (abr. de 2023). “Prediction of solar wind speed by applying convolutional neural network to potential field source surface (PFSS) magnetograms”. En: *arXiv e-prints*, arXiv:2304.01234, arXiv:2304.01234. DOI: [10.48550/arXiv.2304.01234](https://doi.org/10.48550/arXiv.2304.01234). arXiv: [2304.01234 \[astro-ph.SR\]](https://arxiv.org/abs/2304.01234).
- Paluszek, M. y S. Thomas (2016). *MATLAB Machine Learning*. Apress. ISBN: 9781484222492. URL: <https://books.google.com.co/books?id=jy75vQAACAAJ>.
- Pearlman, Aaron et al. (jul. de 2022). “Geostationary operational environmental satellite-R advanced baseline imager reflective solar band absolute validation using Sonoran desert scenes”. En: *Journal of Applied Remote Sensing* 16, 034530, pág. 034530. DOI: [10.1117/1.JRS.16.034530](https://doi.org/10.1117/1.JRS.16.034530).
- Raschka, Sebastian y Vahid Mirjalili (2019). *Python Machine Learning, 3rd Ed.* 3.^a ed. Birmingham, UK: Packt Publishing. ISBN: 978-1789955750.

- Rottman, Gary (2002). *SORCE: Solar Radiation and Climate Experiment*. Goddard Space Flight Center.
- Rouhiainen, L. (2018). *Artificial Intelligence: 101 Things You Must Know Today About Our Future*. CreateSpace Independent Publishing Platform. ISBN: 9781982048808. URL: <https://books.google.com.co/books?id=P3fSDwAAQBAJ>.
- Sadykov, V. M. (dic. de 2019). "Predicting Solar Flares Using Machine Learning: Advances and Challenges". En: *AGU Fall Meeting Abstracts*. Vol. 2019, SH34B-05, SH34B-05.
- Schwenn, Rainer (ago. de 2006). "Space Weather: The Solar Perspective". En: *Living Reviews in Solar Physics* 3.1, 2, pág. 2. DOI: [10.12942/lrsp-2006-2](https://doi.org/10.12942/lrsp-2006-2).
- Snow, Martin et al. (jul. de 2022). "SORCE SOLSTICE: Validation of Seventeen Years of UV Solar Spectral Irradiance Observations". En: *44th COSPAR Scientific Assembly. Held 16-24 July*. Vol. 44, pág. 1555.
- Spiegel, E. A. y J. -P. Zahn (nov. de 1992). "The solar tachocline." En: *Astron. Astrophys.* 265, págs. 106-114.
- Vaquero, J.M. y M. Vázquez (2009). *The Sun Recorded Through History*. Astrophysics and Space Science Library. Springer New York. ISBN: 9780387929514. URL: <https://books.google.com.co/books?id=lmj4sgEACAAJ>.
- Woods, Thomas N. y Joshua Elliott (mayo de 2022). "Solar Radiation and Climate Experiment (SORCE) X-Ray Photometer System (XPS): Final Data-Processing Algorithms". En: *Solar Phys.* 297.5, 64, pág. 64. DOI: [10.1007/s11207-022-01997-4](https://doi.org/10.1007/s11207-022-01997-4).
- Woods, Thomas N. y John W. Leibacher (feb. de 2023). "The Solar Radiation and Climate Experiment (SORCE) Mission: Final Calibrations and Data Products". En: *Solar Phys.* 298.2, 25, pág. 25. DOI: [10.1007/s11207-023-02125-6](https://doi.org/10.1007/s11207-023-02125-6).