

Análisis integrado del efecto producido por una fulguración solar en la Ionósfera terrestre a latitudes medias altas



Universidad Nacional de La Plata
Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas

Nahuel Aguirre

Directora: **Dra. Amalia M. Meza**

Firma y aclaración de la Directora:

Amalia M. Meza

Firma y aclaración de uno de los Jurados:

Francisco Azpilicueta

La Plata, Buenos Aires, Argentina

Diciembre de 2024

Resumen

El estudio se basó en el impacto de fulguraciones solares intensas sobre la ionósfera, utilizando datos de rayos X del satélite GOES para su caracterización y registro temporal de la misma, registros magnéticos obtenidos del Observatorio Geofísico de Trelew, y del cálculo del contenido total electrónico vertical (ν TEC) obtenido mediante las observaciones GPS de la estación más cercana al Observatorio, que se encuentra en la localidad de Rawson y de otras dos estaciones, que son las que se encuentran en las localidades de La Plata y Córdoba. Una fulguración es una condición única de laboratorio, en donde se genera una sobreirradiación por parte del sol que afectará inevitablemente a la atmósfera terrestre. Se puede interpretar su efecto sobre la alta atmósfera y el campo magnético, destacando que los resultados obtenidos permiten identificar ciertos patrones en el comportamiento de la ionosfera y el campo geomagnético, subrayando la complejidad de estos fenómenos y sus implicaciones para la meteorología espacial. El objetivo central es explorar cómo las rápidas variaciones en la radiación solar, provocadas por estas fulguraciones, afectan la atmósfera terrestre, especialmente la ionósfera y el campo magnético, teniendo en cuenta la ubicación del observatorio mencionado.

El análisis tuvo en cuenta las recomendaciones del Servicio Internacional de Índices Geomagnéticos (ISGI) para identificar el grado de perturbación del momento en el que ocurrió cada evento, también se realizó una inspección visual y la implementación de filtros para seleccionar las trazas más representativas del ν TEC. También se emplearon distintos tipos de ajustes, para analizar el aumento significativo tanto en el valor del campo magnético como en el valor del ν TEC producto de las fulguraciones, y la posterior disminución de dichos valores.

A partir de este análisis, se podrá determinar si los valores máximos de respuesta, tanto para el campo geomagnético como para el ν TEC, ocurrieron después del pico en X o si coincidieron temporalmente. También se podrá concluir qué tan relevante es el ángulo cenital solar en la significancia del efecto de la fulguración sobre el ν TEC, independientemente de su intensidad. Además, se identificará qué perfil ajustó mejor al decaimiento de $\delta\nu$ TEC, y que tan relacionado está esto con la hora del día en el que sucede cada evento. Finalmente, se especulará sobre la morfología de cada evento a partir de la velocidad de cambio de $\delta\nu$ TEC.

Índice

1. Introducción	5
2. Marco teórico	7
2.1. Fulguraciones solares	7
2.1.1. Campo magnético solar	8
2.1.2. Clasificación de Fulguraciones	11
2.1.3. Apagones de radio	14
2.1.4. Otros efectos	15
2.2. Campo geomagnético	15
2.2.1. Características generales	15
2.2.2. Elementos geomagnéticos	16
2.2.3. Estación geomagnética	17
2.2.4. Día tranquilo	17
2.2.5. Índices planetarios	17
2.2.6. Tormenta geomagnética	18
2.3. Ionósfera	20
2.3.1. Características generales	20
2.3.2. Ionósfera a latitudes medias	23
2.4. Efecto de una fulguración sobre el campo geomagnético	25
2.5. Efecto de una fulguración sobre la ionósfera	25
3. Metodología	28
3.1. Locación espacio-temporal	28
3.2. Selección de las fulguraciones a estudiar	29
3.3. Caracterización de los días de los eventos	30
3.4. Detección de las fulguraciones sobre el campo geomagnético	30
3.5. Detección de las fulguraciones sobre la ionósfera	31
4. Resultados y análisis	35
4.1. Determinación de los días tranquilos para los meses de diciembre y noviembre de 2001 y 2003 respectivamente	35
4.2. Características generales de ambos eventos	37
4.3. Análisis sobre la fulguración del 13 de diciembre de 2001	39
4.3.1. Respuesta del campo geomagnético ante la fulguración	39
4.3.2. Análisis de la fulguración sobre la ionósfera	47
4.4. Análisis sobre la fulguración del 4 de noviembre de 2003	59

4.4.1. Respuesta del campo magnético ante la fulguración	59
4.4.2. Análisis de la fulguración sobre la ionósfera	61
5. Conclusiones	66
6. Trabajos a futuro	67
A. Descripción de los códigos	73
A.1. Visualización de la Actividad Solar en Rayos X desde un Archivo FITS para los días 13 de diciembre de 2001 y 4 de noviembre de 2003	73
A.2. Ajuste por Mínimos Cuadrados sobre el decaimiento de la variación del campo geomagnético	76
A.3. Ajuste por Mínimos Cuadrados sobre el decaimiento del ν TEC	78

1. Introducción

El presente trabajo se enfocó en la selección y análisis de fulguraciones solares intensas, y como estas afectan a la ionósfera y campo magnético terrestre, utilizando datos de rayos X proporcionados por el satélite GOES y registros magnéticos obtenidos en el Observatorio Geofísico de Trelew, además de utilizar los valores calculados del ν TEC (contenido total electrónico vertical) a partir de las observaciones GPS (Global Positioning Satellite) obtenidas por 3 estaciones cercanas al observatorio mencionado, las cuales se ubican en las localidades de Rawson, La Plata y Córdoba, siendo la estación de Rawson la más cercana. La elección de dicho observatorio se debió a que la Tesis se encuentra bajo el marco del "Programa de fortalecimiento y difusión de la ciencia en las dependencias de la Facultad para Estudiantes de la FCAG (Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas)", donde el Observatorio Geofísico de Trelew forma parte de las dependencias de la FCAG.

Para abordar dicho estudio se analizó cómo estos eventos episódicos alteran las condiciones del plasma ionosférico, modificando la conductividad ionosférica y por ende el patrón de corriente, afectando así el campo magnético terrestre. Específicamente, se busca identificar y analizar las fulguraciones más intensas y estudiar su impacto en la atmósfera ionizada, utilizando un enfoque integral que considere parámetros solares, interplanetarios, ionosféricos y geomagnéticos. Además, se pretende adaptar herramientas numéricas para comprender las señales que describen las variabilidades espacio-temporales de estos fenómenos. Dado, el lugar sobre la superficie terrestre a analizar, el efecto de las fulguraciones solares sobre la ionósfera y el campo geomagnético es en latitudes medias. Para ello, se han seleccionado dos fulguraciones pertenecientes al ciclo solar 23, que cumplen con los requerimientos necesarios para el análisis, los cuales se explicitarán en la Metodología.

Estos eventos tienen un impacto significativo en la ionización de las capas más bajas de la inósfera, por lo que a su vez puede influir en su densidad electrónica y en la variabilidad del campo geomagnético. Por lo tanto, el estudio de las fulguraciones solares es un gran aporte para la física espacial, ya que contribuye a mejorar los modelos y pronósticos en el ámbito de la meteorología espacial. De esta manera, comprender estas interacciones es crucial para predecir y mitigar posibles efectos adversos en sistemas tecnológicos, como los sistemas de navegación, redes eléctricas y de comunicación.

Los datos magnéticos del Observatorio Geofísico de Trelew se obtuvieron en la página web de INTER-MAGNET, donde estos datos fueron calculados por el magnetómetro de dicho observatorio. Mientras que los valores del ν TEC fueron calculados a partir de las observaciones registradas por las estaciones GNSS ubicadas en estos lugares, La Plata, Córdoba y Rawson, que se encuentran en regiones cercanas al observatorio mencionado.

Durante las fulguraciones solares estudiadas, tanto el campo magnético como el ν TEC experimentaron incrementos significativos en cuestión de minutos, seguido de un decaimiento, y es en torno a estos efectos donde se llevó acabo el análisis. Dentro de los métodos aplicados para el análisis podemos destacar las

recomendaciones sugeridas por el ISGI para determinar si los eventos surgieron en un denominado "día tranquilo", además de inspecciones y análisis visuales.

Luego, se aplicó un ajuste tanto al decaimiento de la variabilidad del campo geomagnético como al de la variabilidad del el ν TEC para determinar sus coeficientes de decaimiento. En particular, sobre $\delta\nu$ TEC se probaron dos tipos de ajustes (perfil α , vinculado al coeficiente de recombinación y el perfil β , vinculado al coeficiente de attachment) para identificar el coeficiente que mejor represente su decaimiento. También, sobre $\delta\nu$ TEC, se calculó su variabilidad temporal.

Básicamente, la tesis quedó estructurada de la siguiente manera:

Introducción, donde se presentó de forma breve y general los principales contenidos abordados a lo largo del trabajo.

Marco teórico, donde se abordó información general sobre tres temas principales. Comenzando por las fulguraciones solares, se analizan su definición, cómo se forman, los fenómenos asociados, la influencia del campo magnético solar en estos eventos, los distintos tipos de clasificación y las consecuencias que pueden generar en nuestro planeta, por ejemplo, las tormentas geomagnéticas. Luego, el campo geomagnético, donde se describen sus características generales, la magnitud en la superficie, como está conformado, su generación, la definición de sus componentes magnéticas, así como los objetivos de las estaciones geomagnéticas y las definiciones de día tranquilo y de los índices planetarios. Finalmente, la ionósfera, donde se describen sus características generales, su composición, las diferentes subcapas, cómo se forman sus constituyentes, y el papel que desempeña en la propagación de ondas de radio y, por ende, en las comunicaciones.

Metodología, donde se detalló paso a paso la selección de las dos fulguraciones solares a estudiar, junto con la descripción de los métodos empleados, considerando la estación de Trelew, su ubicación, el momento del año y el rango horario. Además, se explica detalladamente cómo se obtuvieron los datos magnéticos y los datos del ν Tec, así como el proceso de análisis de estos datos, incluyendo el detalle de las expresiones utilizadas.

Resultados y análisis, donde se presentan en detalle los resultados y el análisis (descrito en la metodología) de la fulguración solar del 13 de diciembre de 2001, incluyendo gráficos para cada etapa del análisis y cuadros comparativos. También se realizó un análisis similar para la fulguración del 4 de noviembre de 2003.

Conclusiones, donde luego de analizar los resultados obtenidos, se pudo identificar patrones clave en el impacto de las fulguraciones solares sobre la ionósfera y el campo magnético terrestre. Además, al ajustar los datos con los distintos perfiles y calcular su velocidad de cambio, las diferencias observadas entre ambos eventos subrayan la complejidad de estos fenómenos y la importancia de un enfoque integrado para su interpretación.

Finalmente, se presentan los trabajos a futuro, los cuales consisten en iniciativas y estudios que podrán desarrollarse a partir de los resultados obtenidos y en el análisis realizado en esta tesis, como mejorar la cobertura de las fulguraciones, tanto temporal como espacialmente.

2. Marco teórico

2.1. Fulguraciones solares

Una fulguración solar ([Hargreaves \[1992\]](#)) (solar flare) o erupción solar es un intenso flujo de radiación que proviene de la liberación de energía magnética la cual se asocia a las manchas solares. La actividad solar se ve constantemente afectada por la actividad de su campo magnético, el cual sufre la inversión de sus polos aprox. cada 11 años (diciembre 1990, diciembre 2001, diciembre 2012, diciembre 2023, etc). Además, presenta cambios cíclicos en la cantidad de manchas solares que se ven en su fotosfera y también en el flujo de la radiación solar registrada en la ventana de los 10.7 cm. Estas cantidades se utilizan como indicadores para el nivel de actividad solar, ya sea alta (picos o valores máximos) o baja (valles o valores mínimos). La cantidad de energía liberada es equivalente a millones de bombas nucleares explotando todas al mismo tiempo. Se ven como zonas brillantes en el Sol y pueden durar de minutos a horas. El material se calienta a varios millones de grados en solo minutos y se emite radiación a través de prácticamente todo el espectro electromagnético. Este evento libera fotones (o luz) en casi todas las longitudes de onda del espectro aunque las principales formas de observarlo son en X y en el óptico ([Bai and Sturrock \[1989\]](#)). En el lado iluminado de la Tierra, la fuente dominante de ionización es la radiación solar UV. Es por ello que las fulguraciones solares son eventos únicos para analizar la respuesta de la atmósfera ionizada a las perturbaciones de corta escala de tiempo en la radiación solar. Algunas fulguraciones solares (en su mayoría más fuertes) pueden lanzar enormes nubes de plasma solar al espacio que llamamos eyección de masa coronal. Cuando una eyección de masa coronal llega a la Tierra, puede causar una tormenta geomagnética y mostrar auroras intensas. En síntesis las fulguraciones solares emiten rayos ultravioleta lejanos junto con rayos X suaves y duros que penetran más profundamente en la atmósfera, ionizando temporalmente la regiones más profundas (es decir de menor altura).

Las fulguraciones solares, se clasifican de acuerdo al brillo de rayos X emitido en el rango de longitud de onda de 1 a 8 Angstroms ([Bai and Sturrock \[1989\]](#)). De esta manera existen cinco diferentes clases: Clase A, Clase B, Clase C, Clase M y Clase X. En una subsección aparte describiremos con mas detalle la clasificación de las fulguraciones.

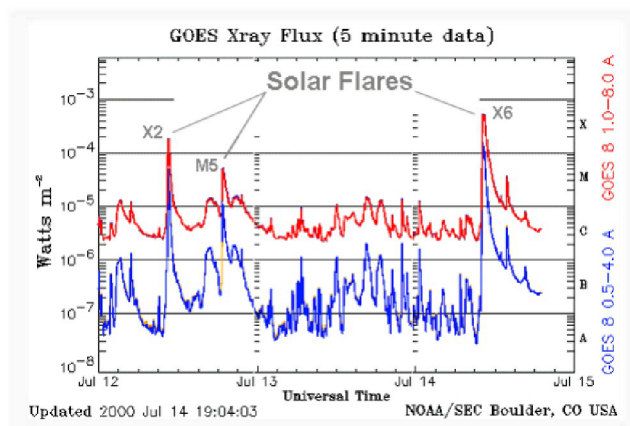


Figura 1: Fulguraciones de una intensidad considerable, M5, X2 y X6, entre el 12 y 14 de julio del 2000. Fuente: [SolarMonitor](#)

Las fulguraciones solares a menudo se asocian con otros fenómenos solares, como las manchas solares (ver figura 2) y las prominencias solares. Las manchas solares son regiones oscuras y más frías en la superficie del Sol que son causadas por una intensa actividad magnética. Mientras que la superficie del Sol está a una temperatura de aproximadamente 5778 K (5504,85°C), las manchas solares están a una temperatura de entre 1500 K a 2000 K (1226,85°C a 1726,85°C), esto se debe a que la intensa actividad magnética provoca que el proceso convectivo se detenga, por lo que el material caliente de abajo no asciende (Stix [2002]). Una mancha solar puede llegar a tener un diámetro de hasta 12000 kilómetros (casi tan grande como el diámetro de nuestro planeta), pero un grupo de manchas solares puede alcanzar los 120000 kilómetros de extensión. Las prominencias solares (Apushkinskij et al. [1996]) son grandes estructuras de plasma en bucle que se extienden hacia afuera desde la superficie del Sol.

Por otro lado tenemos que el sol constantemente se encuentra emitiendo plasma, lo que se conoce como el viento solar, que consiste en una corriente de partículas cargadas que fluye hacia afuera desde el Sol en todas las direcciones, cuando aparece alguna fulguración este viento puede pasar de una velocidad media de 400 km/seg a 1000 km/seg. La aparición de fulguraciones solares afecta a la dinámica de la atmósfera solar y del viento solar (Mann et al. [1989]).

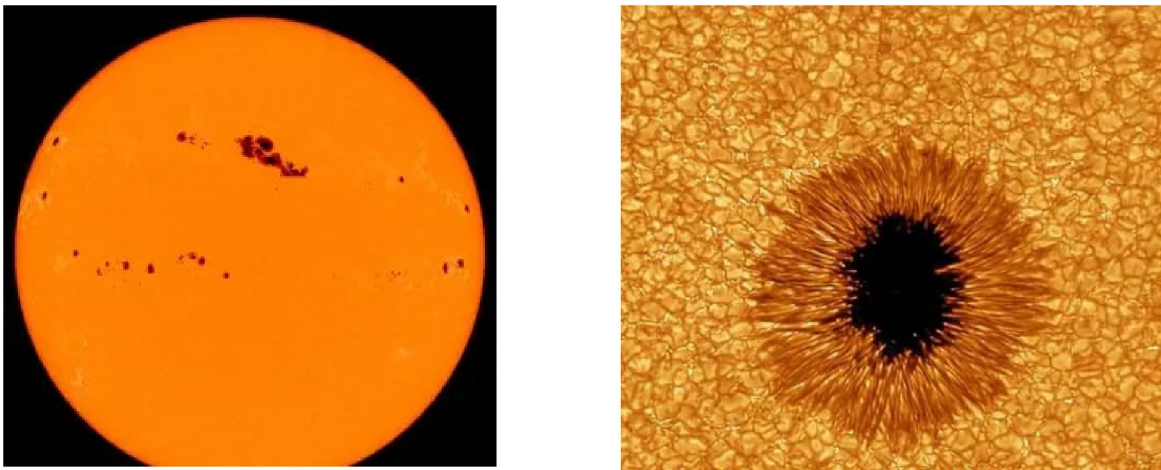


Figura 2: Manchas solares captadas el 29/3/2001 a las 01:36 UT (Fuente. SOHO (ESA/NASA)) (izquierda). Mancha solar capturada por el observatorio solar Big Bear en California (derecha).

2.1.1. Campo magnético solar

Las erupciones solares son causadas principalmente por la interacción entre el campo magnético y el plasma en la atmósfera del Sol. El campo magnético del Sol es generado por el movimiento de partículas cargadas dentro del interior solar, es decir, el Sol es un fluido en rotación, por lo tanto generará su campo gracias este efecto dinamo (Piddington [1983]). En el caso de nuestra estrella, tiene un campo magnético sumamente grande y complejo, el promedio del campo del Sol es de aproximadamente 1 Gauss (100000 nT), casi dos veces más fuerte que el campo magnético promedio de la superficie de la Tierra (de aproximadamente 0.5 Gauss, teniendo en cuenta que este varía entre los 0.25 y 0.65 Gauss). Debido a que la superficie del

Sol es aproximadamente 12000 veces más grande que la superficie terrestre, la influencia general del campo magnético del Sol es inmensamente grande. De hecho, el campo magnético del Sol se extiende largas distancias en el espacio, más allá del planeta más lejano, Neptuno, incluso interactuando con cuerpos transneptunianos. Esta extensión del campo magnético del Sol se conoce como Campo Magnético Interplanetario (Interplanetary Magnetic Field, IMF) (Arghavani et al. [1985]). El viento solar lleva al Campo Magnético Interplanetario hacia los planetas y más allá. Por lo que el viento solar y el Campo Magnético Interplanetario interactúan con el campo magnético de nuestro planeta. En general, el campo magnético del Sol tiene una forma básica parecida a la del campo de la Tierra, o parecida al campo de un simple imán de barra. Sin embargo, superpuestos sobre este campo básico (llamado un campo dipolo), hay una serie de campos locales mucho más complejos, que varían con el tiempo. Los lugares en donde el campo magnético del Sol es especialmente fuerte se llaman regiones activas (Hagyard et al. [1984]), y con frecuencia producen manchas solares. El campo magnético local alrededor de una gran mancha solar puede ser tan fuerte que supera ampliamente los 1000 Gauss (100000000 nT), mucho mayor que el campo promedio del Sol.

El Sol se encuentra en estado de plasma, que es básicamente gas a unas temperaturas muy altas. Y al ser “gaseoso” hace que no toda la estrella rote a la misma velocidad, haciendo que en el ecuador la velocidad sea mucho mayor debido a la conservación del momento angular. Este movimiento diferencial (el cual podemos ver en la figura 3) es el principal causante de las variaciones de su campo magnético. El Ecuador del Sol tarda 25 días en dar una vuelta completa, en comparación con los 35 días que tarda en latitudes más polares (esto lo podemos ver en la figura 4). Ya que el Ecuador se está moviendo más rápido que otras zonas, esto hace que las líneas de campo se entrelacen entre sí a lo largo del tiempo.

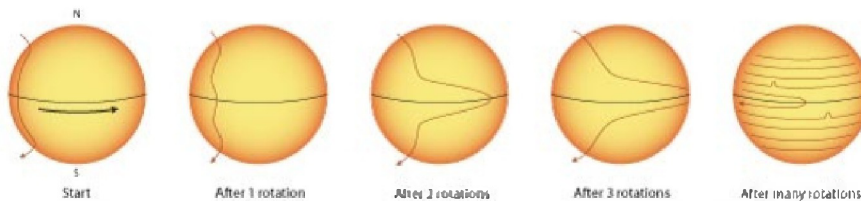


Figura 3: La rotación del campo magnético del Sol. Fuente: NASA/ IBEX.

El campo magnético solar cambia constantemente y puede retorcerse y enredarse en ciertas regiones, creando áreas de intensa actividad magnética (Hagyard et al. [1984]). Cuando las líneas del campo magnético se entrelazan (esto hace que el Sol se comporte como una gigante dinamo magnética), pueden someterse a un proceso llamado reconexión magnética. Esto se da cuando las líneas del campo magnético se rompen y se vuelven a conectar, liberando una gran cantidad de energía en el proceso. Esta energía se convierte en energía cinética, calienta el plasma circundante acelerando las partículas cargadas y generando una intensa radiación a través del espectro electromagnético.



Figura 4: Rotación del Sol. Fuente: Planetario Galileo Galilei - Buenos Aires

La liberación de energía durante una fulguración solar es proporcional a la cantidad de energía magnética almacenada en las líneas de campo magnético retorcidas. Cuanto más retorcido y estresado esté el campo magnético, más poderosa será la fulguración.

La intensidad del campo magnético va disminuyendo según nos alejamos de su superficie. Esta disminución es de manera inversamente proporcional al cubo de la distancia, por lo que en la Tierra este valor teóricamente debería rondar los 0.01 nT. Sin embargo, varias mediciones han demostrado que la intensidad es 100 veces mayor que la predicha teóricamente. Esto se debe a la acción del plasma que se encuentra en el medio interplanetario, que es capaz de inducir corrientes eléctricas que generan a su vez campos magnéticos.

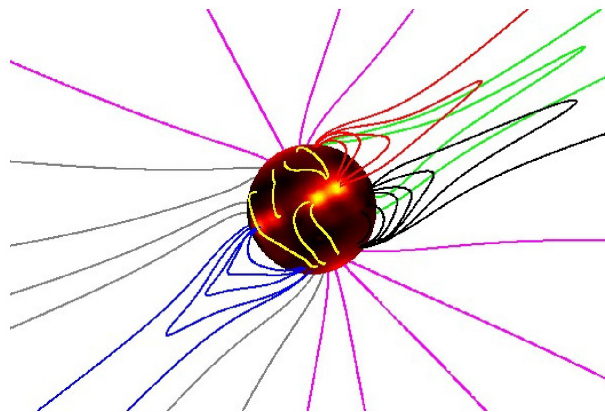


Figura 5: Las líneas de una simulación computarizada del campo magnético de la corona solar muestran parte de la complejidad del campo magnético del Sol. Los colores en la superficie del Sol muestran la intensidad del campo magnético (amarillo es más intenso). Fuente: Randy M. Russell, astrofísico e ingeniero aeroespacial.

2.1.2. Clasificación de Fulguraciones

Las fulguraciones solares se clasifican como A, B, C, M o X según el flujo máximo (en watt por metro cuadrado, W/m^2) (Bruevich [2020]) de 1 a 8 Angstroms de rayos X cerca de la Tierra, medido por los instrumentos a bordo del Satélite GOES que se encuentra en órbita geoestacionaria sobre el Océano Pacífico. Según su morfología, a las fulguraciones también se las puede clasificar en compactas, 2 patas (2 cintas), 3 patas (3 cintas) y 4 patas (4 cintas).

Los de Clase A y B son muy pequeños y no muy interesantes. Los de Clase C son pequeños y tienen pocas consecuencias notables sobre la Tierra. Los de Clase M son de tamaño mediano, con consecuencias más fuertes sobre nuestro planeta que los de Clase C; pueden causar breves apagones de radio que afectan las regiones polares de la Tierra. Las tormentas de radiación menores a veces siguen a una llamarada de Clase M. Los de Clase X son grandes, teniendo consecuencias mucho mayores sobre la Tierra; son eventos importantes que pueden desencadenar apagones de radio en todo el planeta y tormentas de radiación de larga duración. La siguiente tabla nos muestra las diferentes clases de fulguraciones solares:

<i>Clase</i>	<i>W/m^2 entre 1 y 8 Angstroms</i>
<i>A</i>	$< 10^{-7}$
<i>B</i>	$\geq 10^{-7} < 10^{-6}$
<i>C</i>	$\geq 10^{-6} < 10^{-5}$
<i>M</i>	$\geq 10^{-5} < 10^{-4}$
<i>X</i>	$\geq 10^{-4}$

Cuadro 1: Clasificación de los flares.

Cada clase de rayos X es logarítmica (Reep et al. [2013]), siendo cada clase 10 veces más fuerte que la anterior, y dentro de cada categoría va del 1 al 9 (Schrijver and Siscoe [2010]). Por ejemplo: B1 a B9, C1 a C9, etc. Originalmente las clases estaban limitadas a C, M y X. A medida que los instrumentos se volvieron más sofisticados con el tiempo, se pudieron observar fulguraciones más pequeñas que estaban etiquetadas como A y B. Siguiendo por esta línea, Y y Z deberían seguir a X si se detectara alguna fulguración mayor a X9, sin embargo no se ha usado de esta manera. En cambio, los científicos continuaron con la clase X para etiquetar llamaradas muy grandes (por ejemplo, la X40 del 4 de noviembre de 2003).

Clase A y B

Las clases A y B (Tanaka [1987]) son la clase más baja de fulguraciones solares. Son muy comunes y no muy interesantes. El flujo de fondo (cantidad de radiación emitida cuando no hay llamaradas) a menudo está en el rango B durante el máximo solar y en el rango A durante el mínimo solar.

Clase C

Las fulguraciones solares de clase C (Bai and Sturrock [1989]) son erupciones solares menores que tienen poco o ningún efecto en la Tierra. Solo las erupciones solares de clase C de larga duración podrían producir

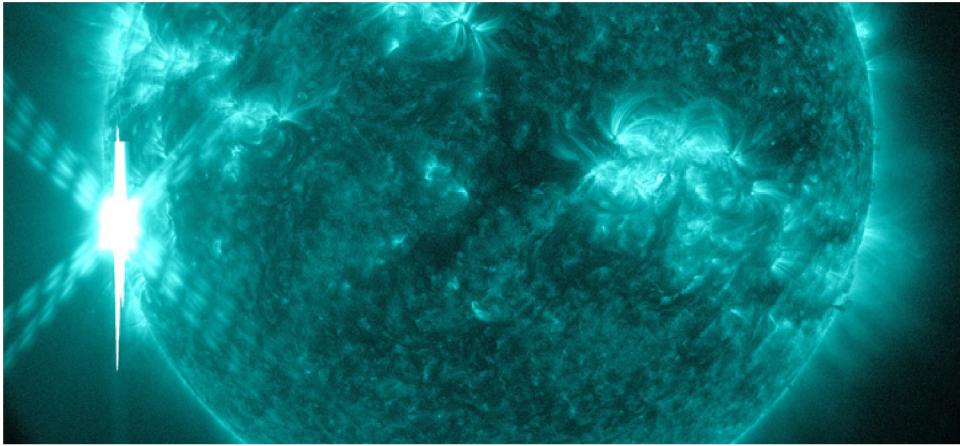


Figura 6: Una llamarada solar de clase X. Fuente: Observatorio de Dinámica Solar de la NASA.

una eyección de masa coronal, pero generalmente son lentas, débiles y rara vez causan una perturbación geomagnética significativa en la Tierra.

Clase M

Las fulguraciones solares de clase M son lo que llamamos llamaradas solares medianas y grandes. Causan apagones de radio pequeños (durante el día en la región iluminada de la Tierra), a moderados (durante el día en la región iluminada). Las fuertes erupciones solares de clase M de larga duración son probablemente candidatas para lanzar una eyección de masa coronal. Si la erupción solar ocurre cerca del centro del disco solar que mira hacia la Tierra y lanza una eyección de masa coronal hacia nuestro planeta, existe una alta probabilidad de que la tormenta geomagnética resultante sea lo suficientemente fuerte como para ver auroras en latitudes medias.

Clase X

Las fulguraciones solares de clase X son las más grandes y fuertes de todas. En promedio, las erupciones solares de esta magnitud ocurren unas 10 veces al año y son más comunes durante el máximo solar que durante el mínimo solar. Durante este tipo de erupción solar se producen apagones de radio de fuertes a extremos en el lado luminoso de la Tierra. Podría causar una tormenta de radiación solar fuerte y duradera, liberando una importante eyección de masa coronal que puede causar una tormenta geomagnética de severa o incluso extrema.

Teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente, ¿cómo se clasifican los flares por encima de X9? En lugar de recibir una nueva letra, se continúa con la X y estas erupciones solares a menudo se denominan erupciones solares de "clase Super X". Sin embargo, las erupciones solares que alcanzan o incluso superan la clase X10 son muy raras y ocurren muy pocas veces (a veces ninguna) durante un ciclo solar. Se sabe que las eyecciones de masa coronal, que pueden ser lanzadas por tales erupciones solares, pueden causar problemas con nuestra tecnología moderna, como con los satélites y las líneas eléctricas.

Algo a tener en cuenta con las llamaradas de clase súper X es que una llamarada solar X20 no es 10 veces

más fuerte que una llamarada solar X10. Una erupción solar X10 equivale a un flujo de rayos X de 0,001 Watt/m², mientras que una erupción solar X20 equivale a 0,002 Watt/m² en la longitud de onda de 1 a 8 Ångstrom.

Se estimó que la fulguración solar más grande jamás registrada, desde que los satélites comenzaron a medirla en 1976, fue una fulguración solar X40 (Kaufmann et al. [2012]) que ocurrió el 4 de noviembre de 2003 durante el Ciclo Solar 23 (dicha fulguración se analizará con más detalles en otra subsección en la presente tesis). Un análisis posterior de los datos disponibles arrojó un flujo máximo estimado de X40, sin embargo, hay científicos que piensan que esta erupción solar fue incluso más fuerte que X40. Lo bueno para nosotros fue que el grupo de manchas solares que produjo esta fulguración ya había rotado gran parte del disco solar que mira hacia la Tierra, de lo contrario, como las manchas solares están asociadas a las eyecciones de masa de coronal (CME), estas eyecciones tienen una alta probabilidad de dirigirse hacia nuestro planeta, provocando fuertes tormentas geomagnéticas, lo que sería un problema, ya que podrían generar apagones de radio, afectar las redes eléctricas, provocar a los astronautas una mayor exposición a la radiación, etc. Si el grupo de manchas solares ya ha rotado y no está frente a la Tierra, la CME resultante de la fulguración solar probablemente no estará dirigida hacia la Tierra, disminuyendo el riesgo de estos impactos.

La llamarada solar más energética de la que se tenga registro fue el denominado evento Carrington que ocurrió el 1 de septiembre de 1859. La energía liberada durante el Evento Carrington (Carrington [1859]) no se ha medido directamente, ya que ocurrió mucho antes de que tuviéramos la tecnología necesaria para realizar mediciones precisas de las explosiones solares. Sin embargo, los científicos han realizado estimaciones basadas en los efectos observados en la Tierra y en modelos teóricos de eventos solares similares. Se estima que el Evento Carrington liberó una cantidad extremadamente grande de energía, posiblemente comparable a varias miles de millones de bombas nucleares, aunque estas estimaciones pueden variar considerablemente dependiendo de los modelos utilizados y los datos disponibles. El evento Carrington causó fuertes exhibiciones aurorales y causó estragos en los sistemas telegráficos. Algunos modelos estiman que si una tormenta solar de esta magnitud ocurriera hoy en día causaría interrupciones eléctricas generalizadas, apagones y daños debido a interrupciones prolongadas de la red eléctrica, como así también las telecomunicaciones se verían sumamente afectadas.

Según su morfología

A las fulguraciones también se las puede clasificar según su morfología (Tang [1985]). Las fulguraciones compactas, también llamadas de una pata o una cinta, se observan como fuentes concentradas en una única región de emisión brillante, lo que sugiere que la reconexión magnética, responsable de liberar energía, ocurre de manera localizada en un pequeño volumen del campo magnético, y se limitan a una pequeña área cerca de una sola pata de un bucle magnético. Las de dos patas están asociadas a bucles magnéticos más grandes y se extienden sobre áreas más amplias, donde se observan dos regiones brillantes, conocidas como "patas", conectadas por un arco o bucle magnético brillante. También se puede encontrar fulguraciones de tres y hasta

de cuatro patas, pero son mucho menos frecuentes y más complejas.

2.1.3. Apagones de radio

Las ráfagas de rayos X y radiación ultravioleta extrema que se emiten durante los flares pueden causar problemas con las transmisiones de radio de alta frecuencia (HF) (NOAA [b]) en el lado iluminado de la Tierra y son más intensas en lugares donde el Sol está directamente sobre la cabeza. La comunicación de radio de alta frecuencia (HF) (3-30 MHz) se ve principalmente afectada durante estos eventos, aunque el desvanecimiento y la recepción disminuida pueden extenderse a frecuencia muy alta (VHF) (30-300 MHz) y frecuencias más altas.

Estos apagones de radio son el resultado de un aumento en la densidad electrónica de la ionosfera inferior (capa D) durante una llamarada solar, lo que genera un gran aumento en la cantidad de energía que las ondas de radio pierden cuando pasan a través de esta capa. Este proceso impide que las ondas de radio alcancen las capas mucho más altas E, F1 y F2, donde estas señales de radio normalmente se refractan y rebotan de vuelta a la Tierra.

Los apagones de radio causados por las llamaradas solares son los eventos de clima espacial más comunes que afectan al planeta. Los eventos menores ocurren aproximadamente 2000 veces en cada ciclo solar. La emisión electromagnética producida durante las llamaradas viaja a la velocidad de la luz, tardando poco más de 8 minutos en viajar desde el Sol hasta la Tierra. Este tipo de apagones de radio pueden durar desde varios minutos hasta varias horas, dependiendo de la duración de la llamarada solar. Por lo que la severidad de un apagón de radio depende de la intensidad de la llamarada solar.

<i>Clase y flujo de rayos X del GOES</i>	<i>Frecuencia más alta afectada</i>
$M1,0 (10^{-5})$	15MHz
$M5,0 (5 * 10^{-5})$	20MHz
$X1,0 (10^{-4})$	25MHz
$X5,0 (5 * 10^{-4})$	30MHz

Cuadro 2: Frecuencias que afectan los distintos tipos de flares.

La NOAA utiliza un sistema de cinco niveles, llamado escala R (NOAA [a]), para indicar la gravedad de un apagón de radio relacionado con rayos X. Esta escala va desde R1 para un apagón de radio menor hasta R5 para un apagón de radio extremo, siendo R1 el nivel más bajo y R5 el nivel más alto. Cada nivel R tiene asociado un cierto brillo de rayos X. Esto varía desde R1 para un flujo de rayos X de M1 hasta R5 para un flujo de rayos X de X20.

<i>R – escala</i>	<i>Descripción</i>	<i>Umbral de rayos X del GOES por clase y flujo</i>	<i>Frecuencia media</i>
R1	Menor	M1 (10^{-5})	2000 por ciclo
R2	Moderado	M5 ($5 * 10^{-5}$)	350 por ciclo
R3	Fuerte	X1 (10^{-4})	175 por ciclo
R4	Importante	X10 (10^{-3})	8 por ciclo
R5	Extremo	X20 ($2 * 10^{-3}$)	Menos de 1 por ciclo

Cuadro 3: Tabla de R-Escala.

2.1.4. Otros efectos

Si bien las erupciones solares afectan principalmente a los sistemas tecnológicos de la Tierra, también pueden tener efectos directos en el cuerpo humano. El aumento de la radiación solar durante una erupción solar puede suponer un riesgo para los astronautas en el espacio, ya que están expuestos a niveles más altos de radiación. Esta exposición a la radiación puede aumentar el riesgo de cáncer (Cucinotta et al. [2006]) y otros problemas de salud a largo plazo.

Las erupciones solares pueden aumentar la temperatura de la Tierra, pero de forma leve. La energía liberada durante estos eventos calienta la atmósfera superior, causando su expansión y un ligero incremento en la temperatura. Sin embargo, este efecto es mínimo comparado con factores más importantes como los gases de efecto invernadero..

2.2. Campo geomagnético

2.2.1. Características generales

El campo geomagnético, también llamado campo magnético terrestre, es el campo generado por nuestro planeta que abarca desde el núcleo hasta el espacio, donde interactúa con el viento solar. La magnitud del campo, en la superficie, oscila entre los 25000nT y 65000nT (0.25G a 0.65G). El campo magnético terrestre se divide en 2 partes, el campo interno y el campo externo (Hide and Roberts [1961]). El campo de origen interno (Parkinson [1983]), que representa alrededor del 90% del campo geomagnético, viene dado por la superposición del campo geomagnético principal (creado por el geodinamo) y los campos de inducción magnética aportados por las estructuras geológicas que contienen materiales ferromagnéticos y otros asociados (campo cortical). La teoría del dinamo (Elsasser [1956]) nos habla del proceso mediante el cual un fluido giratorio, convectivo y conductor de electricidad actúa para generar y mantener un campo magnético. Esta teoría se utiliza para explicar la presencia de campos magnéticos de duración anómala en los cuerpos astrofísicos. Para el caso de nuestro planeta lo definimos como un proceso de geodinamo. El fluido conductor en el geodinamo es hierro y níquel líquido en el núcleo externo, es decir, este material fundido al entrar en movimiento genera electricidad, como una dinamo autoinducida, y, como bien sabemos por las ecuaciones de Maxwell, al generar electricidad generará el campo magnético principal. El campo de origen externo, que es sólo una pequeña fracción del campo total, se origina por las corrientes ionosféricas y magnetosféricas. Las corrientes ionosféricas (Kelley [2009]) se generan por el movimiento de partículas cargadas en la ionósfera, que producen campos magnéticos adicionales. Dichas corrientes están influenciadas por la radiación solar y los efectos de la rotación de la Tierra. Las corrientes que se forman en la frontera exterior de la magnetósfera (Kivelson and Russell [1995]) se deben a la interacción con el viento solar, donde se crean campos magnéticos que se superponen al campo interno de la Tierra. Por lo que el campo externo es de origen solar. Dicho campo sufre cambios rápidos provocados por las oscilaciones de las mareas y por las corrientes de partículas

cargadas procedentes del Sol. Además de las mareas ionosféricas (Hunsucker and Hargreaves [2002]) y sus oscilaciones, el campo externo también es alterado por fenómenos como las corrientes de anillo (Stening [1969]), que circulan alrededor del ecuador magnético, y las corrientes de Birkeland (Potemra [1985]), que conectan la magnetósfera con la ionósfera en las regiones polares. Durante eventos de alta actividad solar, como las fulguraciones solares o las eyecciones de masa coronal (CME), la radiación adicional impacta la magnetosfera terrestre, generando perturbaciones que se manifiestan significativamente en el campo externo. Estas alteraciones se las puede observar midiendo el campo desde la superficie. Además, dichas perturbaciones pueden afectar nuestra tecnología, incluyendo sistemas de navegación, comunicaciones por radio y redes eléctricas.

2.2.2. Elementos geomagnéticos

Matemáticamente, a un campo magnético lo podemos definir como un vector, al definir un sistema de referencia, vamos a poder definir las distintas componentes del mismo. Para el caso de la Tierra, se considera un sistema de referencia local situado en el lugar donde estamos determinando el valor del campo, por lo que los elementos geomagnéticos (Campbell [1997]) pueden designarse como X, Y (donde a su vez, X e Y van a dar lugar a la componente H), Z. Estas componentes del campo apuntan al Norte geográfico, al Este y hacia el centro de la Tierra, respectivamente, ver figura 7.

A partir de dichas componentes surge la definición de dos ángulos, D e I. La declinación D es el ángulo que se forma entre la dirección del norte geográfico y el norte geomagnético (donde apunta la componente H). La inclinación I es el ángulo que forma la componente horizontal con el campo total F.

Simplemente con trigonometría podemos entablar las siguientes relaciones entre las componentes:

$$X = H \cos(D), \quad Y = H \sin(D) \quad (1)$$

$$F = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2} \quad (2)$$

$$\frac{Z}{H} = \tan(I) \quad (3)$$

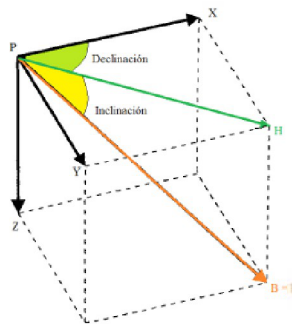


Figura 7: Esquema donde se muestran los elementos geomagnéticos: Campo total (F), componente horizontal (H), vertical (Z), al Norte (X), al Este (Y), ángulo de inclinación (I) y de declinación (D).

2.2.3. Estación geomagnética

El objetivo de los observatorios geomagnéticos (Parkinson [1983]) es registrar en forma continua y a lo largo de grandes períodos de tiempo, las variaciones temporales de campo geomagnético y mantener la calidad de los estándares de las mediciones. Para asegurar que se cumplan los requerimientos de precisión, se pide que se registre al menos con una precisión de 0.1nT. Para asegurar esto en variaciones de pequeña amplitud hace falta realizar mediciones independientes con instrumentos que permitan hacer determinaciones absolutas para periódicamente calibrar el registro de los instrumentos. Una de las tareas globales de la red de observatorios es monitorear el comportamiento de la variación secular y de los fenómenos de origen externo que son de especial interés.

2.2.4. Día tranquilo

El registro diario de las variaciones del campo magnético en cualquier punto de la Tierra muestra muchos cambios irregulares que refieren a la superposición de una gran cantidad de componentes espectrales. Corrientes en la parte alta de la atmósfera y magnetósfera se identifican como las fuentes de algunas de estas variaciones. En base a esto vemos que hay días en los que estos cambios abruptos son menos comunes y el registro muestra una curva mas suave. Básicamente, podemos decir que aquellos días en los que hay una menor perturbación magnética se los conoce como días calmos o tranquilos (Campbell [1997]). Las estaciones que determinan si un día se encuentra o no perturbado (día tranquilo), están ubicadas en latitudes medias. Cuando estas estaciones no se encuentren influenciadas por el electrojet auroral (Kamide and Akasofu [1976]) se dice que las condiciones son geomagnéticamente quietas. En cuanto a la definición de días internacionales calmos, por convención son los 5 días de más calma de cada mes, pudiendo encontrarse alguno de ellos no tan calmos o medianamente perturbados, conforme al índice K_p .

2.2.5. Índices planetarios

Los índices geomagnéticos (Parkinson [1983]) son mediciones de la actividad geomagnética que tiene lugar en intervalos de tiempo de algunas horas. Estos cuantifican las variaciones, causadas por perturbaciones que crean corrientes irregulares en la ionósfera y magnetósfera. Una gran variedad de índices han sido usados en distintos momentos con diferentes propósitos. Los indicadores de actividad geomagnética comúnmente empleados son los índices K_p , A_p y DST, calculados y distribuidos por el GFZ.

Índice K_p : Este índice magnético (NOAA [c]) es un indicador que cuantifica el comportamiento del campo geomagnético a escala planetaria en un instante dado. El índice K_p se obtiene calculando un valor promedio de los índices K normalizados de 13 observatorios situados entre 44° y 60° de latitud (tanto norte como sur). El índice K mide la actividad geomagnética de forma local, es decir, en una única estación geomagnética. Este índice se calcula dividiendo el magnetograma diario en 8 intervalos de 3 horas, durante los cuales se mide la máxima variación de las componentes H y D. La mayor de estas variaciones en cada intervalo proporciona el

índice K. A cada intervalo de 3 horas se le asigna un valor de K entre 0 y 9, el cual depende de la latitud, dado que las perturbaciones geomagnéticas tienden a ser mayores en observatorios cercanos a las zonas aurales.

Índice DST (Disturbance storm time): El índice Dst se utiliza para clasificar las tormentas geomagnéticas y analizar la intensidad de la corriente anillo (sistema de corrientes magnetosféricas (Brathwaite and Rostoker [1981])), excluyendo los efectos de las corrientes aurales y del electrojet ecuatorial (Stening [1969]) (sistemas de corrientes ionosféricas). Este índice se calcula utilizando los datos de cuatro estaciones distribuidas en latitudes medias (solo una de ellas se encuentra en el hemisferio sur) lo que ayuda a minimizar la influencia de las corrientes aurales y del electrojet ecuatorial. El cálculo del Dst se basa en la variación de la componente horizontal del campo magnético registrada en cada estación, teniendo en cuenta también la latitud geomagnética de cada una. En resumen, el índice Dst se obtiene a partir del promedio de las perturbaciones en la componente horizontal del campo magnético en las 4 estaciones.

Índice A: Este índice mide la actividad geomagnética en una escala lineal, con valores en nanoteslas (nT). El índice A diario es el promedio de los ocho valores K_p convertidos a una escala lineal.

Índice A_p : Similar al índice A, pero es un promedio ponderado de los índices A de varias estaciones geomagnéticas distribuidas globalmente. Por lo que podemos decir que tanto el índice A como el A_p se derivan del K_p .

2.2.6. Tormenta geomagnética

Las tormentas geomagnéticas (Gonzalez et al. [1994]) son producidas por las fulguraciones, ya que, tal y como mencionamos, estos liberan grandes cantidades de energía en forma de radiación electromagnética y partículas cargadas en el espacio. Este material que se desprende del Sol puede alcanzar nuestro planeta, es decir, el viento solar y el Campo Magnético Interplanetario interactúan con el campo magnético de nuestro planeta, provocando alteraciones del mismo y afectando nuestra tecnología.

Etapas de la tormenta:

Flare: La tormenta comienza con una erupción en la superficie del Sol, también llamadas fulguración solar (flare).

Eyección de masa coronal: Durante una erupción solar, también puede ocurrir una eyección de masa coronal, que es una expulsión de una gran nube con partículas cargadas desde la corona solar hacia el espacio. Estas eyecciones pueden contener miles de millones de toneladas de material solar y viajan a velocidades de varios cientos de kilómetros por segundo.

Llegada del viento solar a la Tierra: Las partículas cargadas y el plasma de la eyección de masa coronal viajan por el espacio en forma de viento solar. Cuando estas partículas alcanzan la magnetosfera de la Tierra, interactúan con el campo magnético del planeta, produciendo fluctuaciones y distorsiones en la magnetosfera.

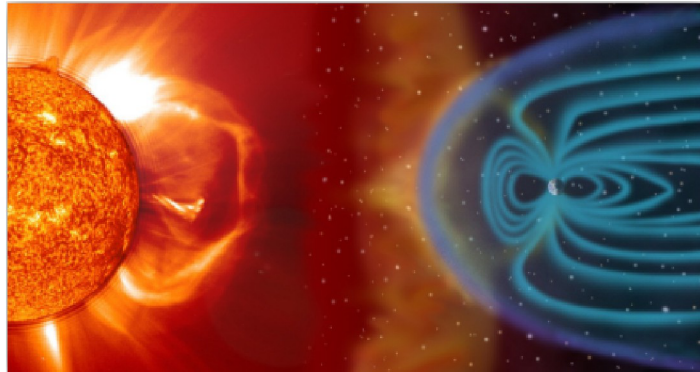


Figura 8: Una Imagen de una Eyección de Masa Coronal saliendo del Sol. Básicamente, estas eyecciones son enormes burbujas de plasma rodeadas por el campo magnético del Sol que ha estado alimentándolas durante varios minutos o incluso horas. La nube de partículas cargadas que viajen en dirección a la Tierra puede interactuar con la magnetosfera, y causar infinidad de efectos como interferencias en las radios o fallos de sistemas muy sofisticados o las Auroras Boreales. Fuente ESA/NASA.

La escala de la intensidad de las tormentas geomagnéticas comúnmente usada, fue desarrollada por la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de Estados Unidos ([NOAA \[a\]](#)). Esta escala presenta 5 rangos, según las fluctuaciones y distorsiones que pueda causar en la magnetosfera. Además, en [SpaceWeatherLive](#) se detallan los índices K_p asociados a cada tipo de tormenta. De menor a mayor:

G1 - menor: actividad geomagnética leve, se registran pocas o ninguna afectación en la Tierra, se pueden observar auroras en los polos. El índice K_p asociado a este tipo de tormenta es $K_p = 5$, incluyendo 5- y 5+ (que equivalen a 4.67 y 5.33 respectivamente)

G2 - moderada: actividad geomagnética medida. Se pueden registrar desperfectos en sistemas de energía y satélites y auroras sobre latitudes altas. El índice K_p asociado a este tipo de tormenta es $K_p = 6$, incluyendo 6- y 6+ (que equivalen a 5.67 y 6.33 respectivamente)

G3 - fuerte: actividad geomagnética considerable. Se pueden registrar anomalías en los sistemas de energía y de comunicación. Las auroras pueden ser visibles en latitudes más bajas de lo normal. El índice K_p asociado a este tipo de tormenta es $K_p = 7$, incluyendo 7- y 7+ (que equivalen a 6.67 y 7.33 respectivamente)

G4 - severa: actividad geomagnética activa. Se registran importantes desperfectos en sistemas energéticos, de comunicación y satélites. Las auroras visibles son en latitudes medias. El índice K_p asociado a este tipo de tormenta es $K_p = 8$, incluyendo 8-, 8+ y 9- (que equivalen a 7.67, 8.33 y 8.67 respectivamente)

G5 - extrema: gran actividad geomagnética. Posibles apagones en sistemas eléctricos y de comunicación. Auroras visibles a latitudes inusualmente bajas, incluso en regiones cercanas al ecuador. El índice K_p asociado a este tipo de tormenta es $K_p = 9$.

Además, dentro de la misma escala, también existe **G0** ([SpaceWeatherLive](#)), el cual indica las condiciones por debajo del nivel de una tormenta. Los índices K_p asociados a G0 van de $K_p = 0$ a $K_p = 4.33$. Hasta $K_p = 2.33$ (2+) se establece la tranquilidad absoluta, para un K_p entre 3- y 3+ (2.67, 3 y 3.33) hay inestabilidad, para un K_p entre 4- y 4+ (3.67, 4 y 4.33) se empieza a evidenciar cierta actividad.

2.3. Ionósfera

2.3.1. Características generales

Si bien la atmósfera tiene un comportamiento eléctricamente neutro, es decir, no presenta una carga neta positiva ni una carga neta negativa. Alrededor de los 50 km comienza a encontrarse mayores concentraciones de iones (átomos y moléculas que han ganado o perdido uno o más electrones) y electrones libres, a esta región se la llama ionósfera ([Donahue \[1968\]](#)), debido a la ionización que ocurre allí. Por lo que la ionósfera se extiende desde, aproximadamente, los 50 kilómetros sobre la superficie de la Tierra hasta altitudes de alrededor de 965 kilómetros (siempre como referencia la superficie terrestre). Esta capa se compone principalmente por iones y electrones, estos son producidos tanto por la radiación solar como por la radiación cósmica. Estas partículas cargadas interactúan con la radiación solar, creando capas ionizadas, conformando un plasma, que pueden reflejar las ondas de radio. La ionósfera se caracteriza por su perfil de densidad electrónica con la altura (ver [figura 9](#)), el cual se encuentra estratificado en subcapas debido a la combinación de la variedad de especies atómicas con la altura y la penetración de los agentes ionizantes (como los rayos cósmicos y la radiación solar). Estas subcapas se denominan con letras, como D, E y F de acuerdo a su contenido electrónico, y debido a esto, las subcapas son variables en función de la posición de la Tierra respecto al Sol (traslación, rotación, horas diurnas, horas nocturnas, actividad solar como presencia de manchas solares, etc). Estas capas tienen la capacidad de reflejar y refractar ondas electromagnéticas de diferentes frecuencias, como por ejemplo las utilizadas en telecomunicaciones.

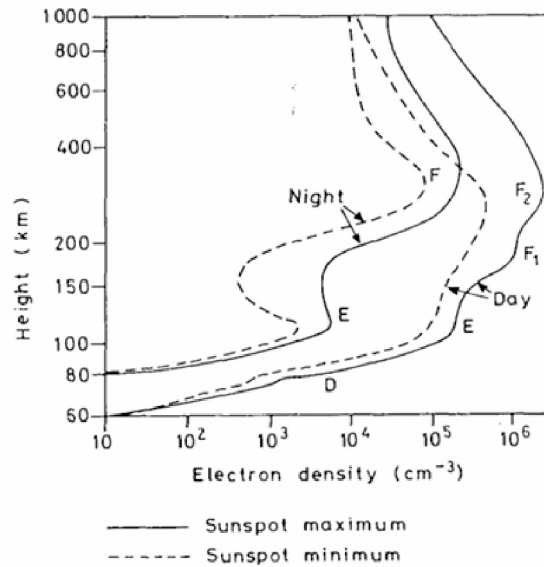


Figura 9: Perfil de densidad electrónico con la altura, durante horas diurnas y nocturnas (Hargreaves [1992]).

La ionósfera juega un papel crucial en la propagación de las ondas de radio de alta frecuencia (HF) (Bora [2017]), ya que puede reflejarlas y refractarlas. Esto permite la comunicación de larga distancia, debido que las ondas de radio pueden ser reflejadas de vuelta a la Tierra desde la ionósfera, permitiendo que las señales alcancen regiones distantes del planeta (ver figura 10). Además, la ionósfera también desempeña un papel importante en la protección de la Tierra de la radiación solar nociva al absorber una cantidad significativa de la radiación ultravioleta del Sol.

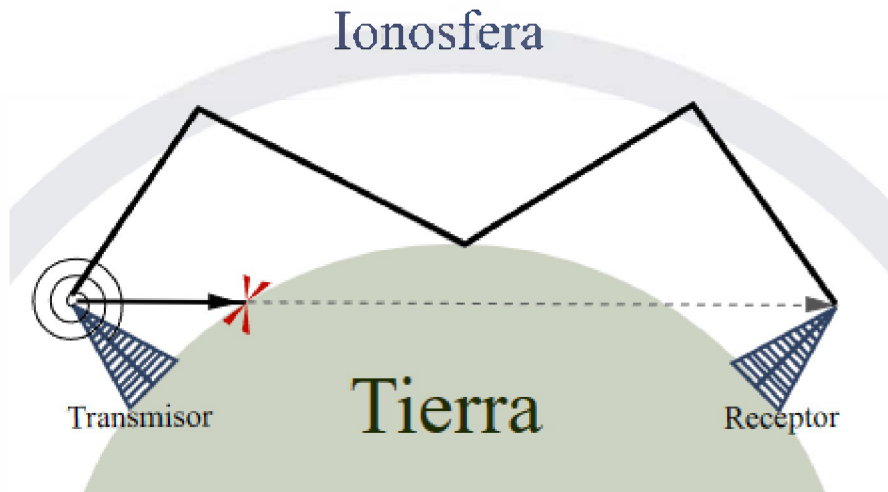


Figura 10: Reflexión de ondas de radio en la ionósfera. Fuente: Phirosiberia.

Características clave de la ionósfera:

Ionización constante: La ionosfera se encuentra en un estado de ionización permanente debido a la radiación solar (Kelley [2009]). Los átomos se disocian formando iones, lo que provoca variaciones extremas en la temperatura de los gases, que pueden oscilar entre aproximadamente -70 °C y 1.500 °C (ver figura 11).

Excelente conductora de electricidad: La baja densidad de los gases en la ionósfera permite que los electrones se muevan más libremente. Esto la convierte en una excelente conductora de electricidad, facilitando la propagación de ondas de radio y televisión.

Subdivisiones: La ionósfera se divide en varias capas: D, E, F1 y F2. Las capas más bajas (D y E) son ideales para las ondas de radio de baja frecuencia, mientras que las capas más altas (F1 y F2) reflejan las ondas de radio con frecuencias mayores. Además, en la región E de la ionósfera ocurre un fenómeno conocido como variación geomagnética solar tranquila (Sq) (Torta [2000]). Este fenómeno corresponde a la variación diurna regular del campo geomagnético, causada por corrientes eléctricas generadas en la ionósfera debido a la radiación solar. La Sq es más notable en latitudes cercanas al ecuador magnético y varía con la hora local, la estación del año y la actividad solar.

Fenómenos lumínicos: En la ionósfera, también se producen las auroras polares, que son consecuencia directa del influjo de los vientos solares sobre la Tierra. Estas partículas atrapadas por el campo magnético generan uno de los fenómenos lumínicos más impresionantes del mundo.

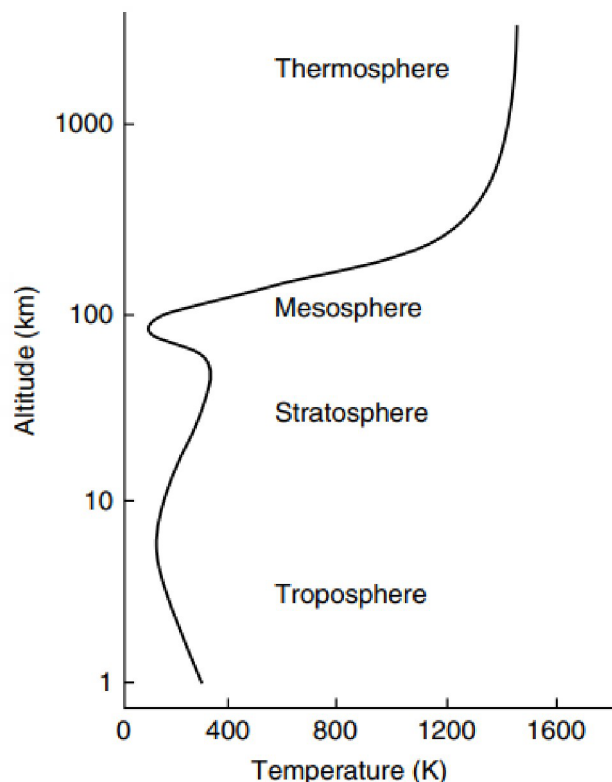


Figura 11: Perfil típico de temperatura a latitudes medias (Kelley [2009]).

2.3.2. Ionósfera a latitudes medias

La ionósfera se forma por la ionización de gases atmosféricos como N₂, O₂ y O. En latitudes medias (Hargreaves [1992]) (y bajas), la energía necesaria para ionizar esos gases proviene de la radiación solar en las partes extremas del espectro ultravioleta (EUV) y de rayos X. Una vez formados, los iones y electrones tienden a recombinarse y reaccionar con otras especies gaseosas para producir otros iones. Se produce así un equilibrio dinámico en el que la concentración neta de electrones libres (conocida como densidad electrónica) depende de la velocidad relativa de los procesos de producción y pérdida. En términos generales, la tasa de cambio de la densidad electrónica se expresa mediante la ecuación de continuidad:

$$\frac{dN}{dt} = q - L - \nabla \cdot (N\vec{v}) \quad (4)$$

Donde q es la tasa de producción, L la tasa de pérdida de electrones, y $\nabla \cdot (N\vec{v})$ expresa la pérdida de electrones por movimiento, siendo \vec{v} su velocidad media de deriva.

Si bien es necesario profundizar en los procesos específicos para entender completamente la formación de la ionósfera, es posible obtener una comprensión significativa a partir de consideraciones físicas generales, sin adentrarse en los detalles fotoquímicos. Este es el enfoque de la aeronomía física.

La tasa de producción depende de 4 términos, η : Eficiencia de ionización; σ : Sección transversal de absorción de la radiación; I: Intensidad de la radiación ionizante; n: Concentración de átomos o moléculas capaces de ser ionizadas por I, de la siguiente manera:

$$q = \eta\sigma nI \quad (5)$$

Para la función de producción Chapman (para más detalles ver libro Hargreaves [1992]) se asumen las siguientes consideraciones:

-La atmósfera está compuesta con una sola especie, distribuida exponencialmente con una altura de escala constante.

-No hay variaciones horizontales en la atmósfera.

-La radiación solar se absorbe proporcionalmente a la concentración de partículas.

-El coeficiente de absorción (σ) es constante, suponiendo radiación monocromática.

En la forma normalizada de la función de producción de Chapman se introduce el ángulo cenital solar (χ), quedando de la siguiente manera:

$$q = q_{m0} EXP(1 - Z - \sec(\chi)e^{-z}) \quad (6)$$

Donde Z es una altura reducida, $Z = (h - h_{m0})/H$, donde H es la altura de escala, h_{m0} es la altura de la máxima tasa de producción y q_{m0} es la producción máxima de ionización ideal, se da cuando el Sol está

directamente sobre la vertical del lugar ($\chi = 0$, es decir, el Sol está en el cenit).

Luego se busca el máximo de la función Chapman (q_m) para un χ arbitrario, para esto se diferencia a q respecto de Z , se iguala a cero y se llega a $Z = \ln(\sec \chi)$. Ese valor se reemplaza en la expresión (6), teniendo en cuenta ciertas identidades trigonométricas se llega a:

$$q_m = q_{m0} \cos(\chi) \quad (7)$$

Donde q_m es la producción máxima de ionización para un ángulo cenital solar χ arbitrario, que tiene en cuenta la inclinación de los rayos solares al atravesar la atmósfera.

Por lo tanto podemos ver como la tasa de producción está estrechamente vinculada con el ángulo cenital solar.

En cuanto a la tasa de pérdida de electrones L , primero se asume que los electrones se recombinan directamente con iones positivos y que no hay iones negativos presentes, por lo que la tasa de pérdida de electrones es $L = \alpha N^2$, donde N es la densidad electrónica y α es el coeficiente de recombinación. Ahora bien, si nos preocupamos particularmente por la pérdida de electrones, entonces la adhesión a partículas neutras para formar iones negativos puede considerarse como otro tipo de proceso de pérdida de electrones, de hecho, este proceso se convierte en el tipo dominante en niveles algo más altos de la ionosfera, por lo que la tasa de pérdida de electrones es $L = \beta N$, donde β es el coeficiente de attachment. Por lo tanto se pueden considerar dos tipos de pérdidas de electrones, una por recombinación y otra por attachment, dependiendo la altura a la que se produzca. El cambio de régimen en el proceso de pérdida se produce a una altura cercana a la base de la capa F.

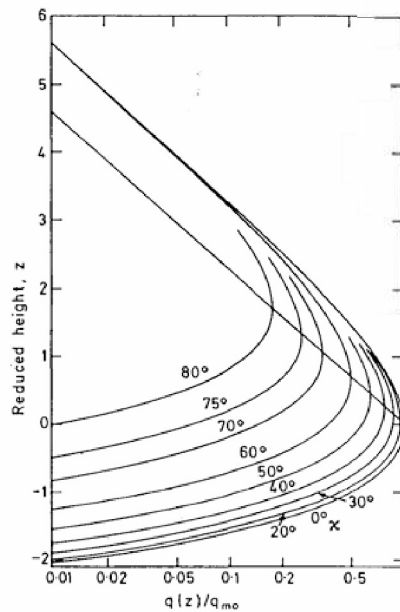


Figura 12: Función de producción Chapman (Hargreaves [1992]).

2.4. Efecto de una fulguración sobre el campo geomagnético

El efecto de fulguración solar geomagnética (del inglés geomagnetoc solar flare effect, gsfe) (Meza et al. [2009]) se refiere al aumento del campo geomagnético en todo el hemisferio diurno de la Tierra, el cual se manifiesta como fluctuaciones de campo que comienzan con un rápido aumento hasta alcanzar una intensidad máxima, seguido de una disminución lenta y constante. Este fenómeno fue inicialmente denominado “crochet” (Chapman [1961]).

La ionosfera juega un papel crucial en este proceso, ya que absorbe la radiación ultravioleta lejana y los rayos X (con longitudes de onda de 1 a 1000 Å), lo que resulta en un aumento desigual de la densidad de ionización a diferentes altitudes. Esto incrementa la conductividad en la ionosfera inferior, específicamente en las regiones D y E. Las corrientes responsables del gsfe dependen de varios factores, como el movimiento térmico y de marea del aire, el campo magnético terrestre a altitudes ionosféricas y la distribución de la conductividad (Sabben [1961]), creando un sistema de corrientes independiente del Sq (Volland and Taubenheim [1958]).

El gsfe resulta de un aumento temporal en la radiación ionizante solar, sin cambios en el campo eléctrico (Rastogi [1998]). Es importante destacar que el efecto está influenciado significativamente por la producción adicional de electrones generada por la intensidad de la radiación de las fulguraciones solares. El gran cuidado en la limpieza de los datos y en el valor de referencia de tranquilidad que debemos tener en este procedimiento radica en que el gsfe puede ser difícil de distinguir de otros fenómenos geomagnéticos, como los producidos por corrientes terrestres, el inicio repentino de tormentas, subtormentas y vientos neutros, debido a las similitudes en sus variaciones geomagnéticas.

2.5. Efecto de una fulguración sobre la ionósfera

La irradiancia solar aumenta rápidamente durante las fulguraciones solares, con un factor de incremento de aproximadamente 10 a 100 en los rayos X suaves (0,1-10 nm) y de aproximadamente 2 a 10 en los flujos del ultravioleta extremo (EUV, 10-121,6 nm). Estos aumentos suelen alcanzar su máximo en un lapso de 10 a 30 minutos. El aumento de la irradiación de rayos X blandos y EUV incrementa rápidamente la ionización en la alta atmósfera. Esto provoca perturbaciones en el sistema de la termósfera y la ionósfera. Estudios anteriores mostraron que los efectos de la fulguración solar en el sistema de Termósfera-ionósfera dependen de la ubicación de la fulguración en el disco solar (por ejemplo, L. et al. [2010]), así como de las características de la fulguración, incluidos los tiempos de aumento y disminución de la fulguración (por ejemplo, L. et al. [2011]).

El efecto de una fulguración solar sobre la ionosfera, conocido como Ionospheric Solar Flare Effect (isfe), se estudia a través de la variación en los datos del contenido vertical total de electrones ($\delta\nu\text{TEC}$) obtenidos mediante GPS. El isfe altera el comportamiento del $\delta\nu\text{TEC}$, provocando un aumento repentino en el contenido total de electrones (TEC), cuya magnitud depende de la intensidad y localización de la fulguración solar, así

como de la ubicación de la estación GPS (Liu et al. [2006]).

Desde la década de 1970, el contenido total de electrones (TEC) ha sido objeto de extensas investigaciones, en gran parte debido al avance de la tecnología en el lanzamiento de satélites, permitiendo un estudio más detallado de la ionósfera. El TEC representa la integral de la densidad electrónica (N) a lo largo de una columna vertical (o a lo largo de una línea de visión entre un satélite y un receptor en tierra). Se expresa en unidades de electrones por metro cuadrado (e^-/m^2). Estas investigaciones se basaban en mediciones obtenidas mediante radiobalizas VHF instaladas en satélites geoestacionarios y en observaciones de dispersión incoherente.

Los principales problemas de las investigaciones que se llevaban a cabo durante gran parte del siglo pasado, recaían sobre el hecho de que no existían métodos de seguimiento global y continuo de las perturbaciones ionosféricas, sumado a una baja resolución espacio-temporal.

El Sistema de Posicionamiento Global (GPS) es una herramienta geodésica madura y ampliamente utilizada en diversas aplicaciones tecnológicas y científicas. Su uso en estaciones permanentes de seguimiento, gestionadas por el Servicio Internacional GPS (IGS), ha sido fundamental para la investigación ionosférica, permitiendo una cobertura global constante y de bajo costo. Las investigaciones en este campo han empleado el GPS para medir el contenido total de electrones (TEC) en la ionosfera, un parámetro clave en el estudio del clima espacial ionosférico (Aarons et al. [1997], Ho et al. [1998], Jakowski et al. [1999], Afraimovich et al. [2000] y Meza et al. [2005]).

La observación del contenido total de electrones a lo largo de una línea inclinada entre el satélite y el receptor (sTEC), con GPS, ha sido especialmente valiosa para comprender fenómenos como las tormentas geomagnéticas, las fulguraciones solares y su impacto en las comunicaciones y la navegación. En estudios anteriores, como el de Zhang et al. [2002], se analizó cómo las fulguraciones solares afectan al sTEC. Se observó que la variación del ν TEC depende de factores como la latitud, la longitud y el ángulo cenital solar del punto subionosférico, y que estas respuestas no son simétricas, siendo generalmente menores por la mañana que por la tarde.

En este trabajo en particular, los valores de ν TEC fueron procesados en el Laboratorio de Meteorología espacial, Atmósfera terrestre, Geodesia, Geodinámica, diseño de Instrumental y Astrometría (MAGGIA) siguiendo los lineamientos de Meza et al. [2022]. Para tal fin, se empleó el software Bernese GNSS versión 5.2 (Dach et al. [2015]), utilizando los modelos recomendados por el Servicio Internacional de Rotación de la Tierra y Sistemas de Referencia (IERS) (Petit and Luzum [2010]). Se aplicaron correcciones por carga de mareas oceánicas, siguiendo a Letellier [2004], junto con desplazamientos por carga de mareas atmosféricas proporcionados por van Dam and Ray [2010] y correcciones absolutas del centro de fase para satélites y receptores, según lo emitido por el IGS.

El software Bernese GNSS fue modificado para obtener el observable del retraso del código de fase ionosféri-

co ($\tilde{L}_{I,arc}$, ver ecuación 9), junto con la latitud geográfica y la longitud fija al sol del punto de perforación ionosférica, la distancia cenital (z'), el ángulo de acimut y el tiempo para cada satélite en cada estación GNSS.

La ionósfera se aproxima mediante una sola capa de grosor infinitesimal con un sTEC equivalente, ubicada a 450 km sobre la superficie terrestre. El punto de intersección de la línea receptor-satélite con la capa ionosférica se denomina punto de perforación ionosférico. Se utiliza un factor de oblicuidad ($1/\cos z'$) para mapear ν TEC en STEC (ver ecuación 8); siendo z' la distancia cenital de la trayectoria inclinada en el punto de perforación ionosférico.

$$sTEC = \frac{1}{\cos z'} \nu TEC \quad (8)$$

El observable de retraso de código ionosférico se modela utilizando un sesgo dependiente del arco, \tilde{c}_{arc} , que considera el sesgo interfrecuencia del receptor y del satélite, además del término de ambigüedad. Siguiendo a (Ciraolo et al. [2007]) y (Meza et al. [2009]), la ecuación de observación puede escribirse como:

$$\tilde{L}_{I,arc} = sTEC + \tilde{c}_{arc} + \epsilon_L \quad (9)$$

Donde $\tilde{L}_{I,arc}$ está en TECu (10^{16} electrones/m²). Se calculan soluciones diarias para estimar el sesgo dependiente del arco, que posteriormente se elimina de $\tilde{L}_{I,arc}$ para obtener sTEC y ν TEC mediante las ecuaciones (9) y (8), respectivamente.

3. Metodología

Para llevar a cabo la investigación, en primera instancia, se seleccionaron las fulguraciones sobre las cuales se hará el estudio. Cabe destacar que lo que se analizó fue el efecto de la radiación extra producida por las fulguraciones sobre la ionósfera y el campo geomagnético, donde dicha radiación extra tarda entre 8 a 8.5 minutos en llegar a la Tierra. En esta investigación en particular se buscó trabajar con fulguraciones clase X, que se hayan dado durante el ciclo solar 23 (teniendo en cuenta que este abarca desde agosto de 1996 a diciembre de 2007), y a la vez que sean relevantes para la estación de Trelew, es decir, que la distancia entre el punto subionosférico sobre la estación y el punto subsolar sea lo más pequeño posible, lo cual se da durante los meses de verano o próximos al solsticio. Además, otra de las condiciones que se tuvo en cuenta para la elección de las fulguraciones es que estas hayan sucedido durante un período de tranquilidad o de perturbación moderada, de manera de identificar claramente el evento y así poder estudiarlo.

3.1. Locación espacio-temporal

La estación elegida para llevar a cabo el trabajo fue la estación que se encuentra ubicada en el Observatorio Geofísico de Trelew (Chubut, Argentina). En base a esta estación como referente es que se elabora la estrategia para llevar a cabo el análisis de las fulguraciones. Dicha estación se encuentra a una latitud de $43^{\circ}15'12''\text{S}$ y una longitud de $65^{\circ}18'34''\text{W}$. Como se buscaron fulguraciones que sean relevantes para la estación escogida, los meses que se tuvieron en cuenta fueron aquellos que se encuentran en verano o próximos al solsticio, es decir, se tuvo en cuenta los meses de noviembre a febrero. ¿Por qué elegimos estos meses?, bueno la respuesta recae en el hecho de que durante estos meses la radiación solar es mayor sobre el hemisferio sur, que es donde se encuentra nuestra estación escogida. También se tuvo en cuenta la hora local. Debido a que nuestro estudio consiste en cómo afecta a la ionósfera y campo magnético, la variación abrupta del flujo solar; es necesario que las mediciones utilizadas se encuentren ubicadas en un entorno cercano de la coordenada subsolar, es decir, dirigida hacia el sol. Por ende el horario escogido fue de 14 a 20 UTC, teniendo en cuenta que la longitud de Trelew es de $65^{\circ}18'34''\text{W}$, por lo que fue de 10 a 16 hora local.

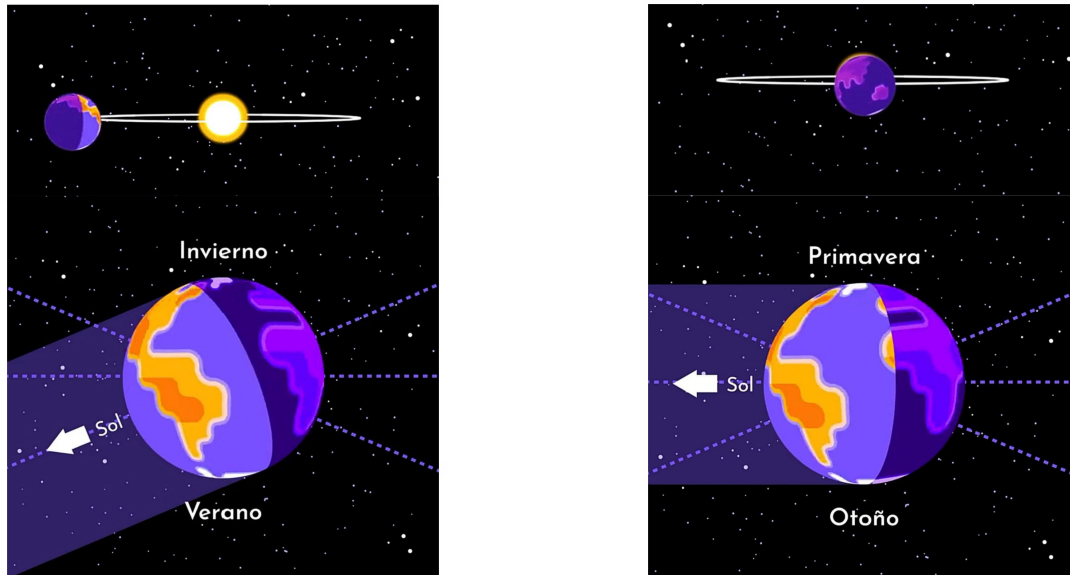


Figura 13: Ubicación e iluminación de la Tierra durante el solsticio de verano y equinoccio de otoño, respectivamente (para el hemisferio sur).

3.2. Selección de las fulguraciones a estudiar

Finalmente después de un profundo análisis, las fulguraciones seleccionadas fueron las del 13 diciembre de 2001 (clase X6.2 a las 14:20 hs, en UTC) y la del 4 de noviembre de 2003 (clase X40 a las 19:29 hs, en UTC).

Para la caracterización general de ambos eventos, se consultaron los datos en [NOAA](#) [f], donde se presentan reportes anuales. Cada reporte incluye información sobre las fulguraciones registradas durante ese año. En cada fila del reporte se detalla el evento correspondiente, con la primera columna mostrando el número de identificación, que incluye la fecha. Las siguientes tres columnas presentan la hora de inicio, la hora de finalización y la hora del pico máximo. A continuación, se incluyen la localización heliográfica y el brillo, seguidos por la clasificación de rayos X, el satélite que registró el evento y, finalmente, la región activa asociada (número de región activa NOAA).

Además, se incluyeron las coordenadas geográficas de las estaciones GNSS, junto con los ángulos cenitales solares correspondientes a la hora del pico máximo de cada evento. También se incluyó un gráfico de rayos X para cada evento. Los datos en rayos X se obtuvieron de [GOES-SolarData](#), recopilados por el satélite GOES, y se presentan en archivos de tipo .fits, donde se encuentran los datos del flujo en dos canales: uno para la longitud de onda entre 1 y 8 Å, y el segundo para la longitud de onda entre 0.5 y 4 Å. Además, se presenta el dato temporal, el cual está en segundos. Con estos datos, se procedió a graficar ambos eventos en rayos X utilizando un código en Python (ver código [A.1](#)).

3.3. Caracterización de los días de los eventos

Para este análisis nos enfocamos, en primera instancia, en la fulguración del 2001, donde se describió en detalle el procedimiento utilizado para el análisis de su efecto sobre la ionósfera y el campo geomagnético, luego en la fulguración del 2003 el mecanismo implementado fue el mismo; por lo tanto solo se mostraron los resultados obtenidos.

La elección se basó en todo lo mencionado anteriormente, ya que cumple con las condiciones de intensidad (clase X), cumple con la época del año (entre noviembre y febrero), cumple con el momento del día (entre las 14 y 20 UTC), y además satisface la condición de que se haya dado en un denominado “día tranquilo” o “moderadamente perturbado”. Con respecto a esto último, los días tranquilos se analizaron de 3 maneras a grandes rasgos. En primera instancia se los buscó directamente utilizando el [for Geomagnetism de Kyoto](#).

En segunda instancia se los buscó utilizando los índices K_p , los cuales fueron calculados y distribuidos en el [GFZ-Postdam](#). Para determinar los días calmos con estos parámetros tenemos que tener en cuenta que los datos se muestran de izquierda a derecha para cada día del mes, los cuales se toman cada 3 horas, por ende tendremos 8 por día (tener en cuenta que se toman en UTC). Luego, con estos datos sacaremos 3 resultados, la suma de los 8 datos diarios, la suma de los cuadrados de los 8 datos y el mayor de los 8 valores. Finalmente se realiza un promedio simple de estos 3 valores, y nos quedamos con los valores más pequeños como los días calmos, esto siguiendo las recomendaciones del [ISGI](#) (servicio internacional de índices geomagnéticos). Además, dichas recomendaciones indican que los días en los que el índice K_p supere el valor 3 en alguno de los 8 intervalos, o el índice A_p supere el valor 6, se considerarán como medianamente perturbados.

Por último, en lo que respecta a este análisis, se hizo una inspección visual sobre los registros diarios de la componente horizontal (H) del campo geomagnético en la estación de Trelew para los meses que involucran a los eventos estudiados. Para llevar esto a cabo, los datos se buscaron y descargaron del sitio web de la red [INTERMAGNET](#).

A la hora de realizar la inspección visual del registro diario del campo, se buscó que el campo responda lo más suave posible, es decir, que no se vea tan ruidoso.

3.4. Detección de las fulguraciones sobre el campo geomagnético

Los datos magnéticos para llevar a cabo el análisis sobre el campo geomagnético, se obtuvieron a partir del sitio web de la red [INTERMAGNET](#) (tal y como los obtuvimos para la inspección visual diaria de la componente H durante el mes de diciembre de 2001 y el mes de noviembre de 2003). Se buscaron los datos para los días 13 de diciembre de 2001 y 4 de noviembre de 2003. Los datos descargados se presentan a lo largo de 7 columnas de la siguiente manera: Fecha (año/mes/día) Hora (hay que tener en cuenta que los datos están tomados cada un minuto) Día del año Valor de la componente X Valor de la componente Y Valor de la componente Z Valor de la componente F. Con estos datos se analizaron las componentes X, Y, Z y F, gráficos de por medio. En dichos gráficos se buscó observar un cambio brusco sobre el valor del campo en el horario en el que se produce un evento de fulguración. A partir de allí, se analizó el valor de dichos cambios, el tiempo

que tardaron en alcanzar el pico, como así también cuanto tardaron en recomponerse dichos valores.

Luego se enfocó el análisis, en las mismas componentes, sobre los instantes previos y posteriores a los efectos de las fulguraciones. La longitud de dichos instantes es arbitraria, pero se suelen tomar en el orden de los 30 minutos cada uno. De esta manera se observaron mejor los cambios bruscos sobre los valores del campo. Además sobre estos datos se realizó un ajuste polinómico de grado bajo, ya que de esta manera se ve de forma muy aproximada como hubiese sido el valor del campo si las fulguraciones no se hubiesen dado, para confirmar esto, también se realizó una diferencia entre los valores del campo y el de los ajustes.

Luego se tomó el intervalo temporal en el que sucedieron las fulguraciones, esto para realizar una diferencia entre los valores de las componentes y los ajustes mencionados, de esta manera se observó la variación entre los valores reales (producto de los eventos) y los valores que hubiesen tenido en caso de que no se hubiesen dado los eventos.

Finalmente se realizó un ajuste exponencial, dado por la siguiente expresión (11), mediante mínimos cuadrados (ver código A.2) sobre la variación del campo F, tomándolo a partir del pico máximo, es decir, se ajustó el decaimiento. La variación del campo F se obtuvo a partir de considerar las variaciones de las demás componentes, es decir, a partir de la siguiente expresión (12), tal y como se realizó en el trabajo de investigación Meza et al. [2009].

Se plantea la siguiente ecuación diferencial:

$$\frac{dF}{dt} = -KF \quad (10)$$

Se resolvió dicha ecuación diferencial, donde en términos de la variación de f (δF) queda de la siguiente manera:

$$\delta F(t) = B_0 \cdot e^{-K(t_k - t_0)} \quad (11)$$

Donde B_0 es la amplitud, K es el coeficiente de decaimiento, t_0 es el tiempo inicial para el cual comienza el decaimiento y t_k representa los tiempos a partir de t_0 .

La variación del campo se obtiene con la siguiente expresión:

$$\delta F = \sqrt{(\delta X)^2 + (\delta Y)^2 + (\delta Z)^2} \quad (12)$$

3.5. Detección de las fulguraciones sobre la ionósfera

Mediante mediciones de los sistemas de posicionamiento global satelital (del inglés Global Navigation Satellite System, GNSS), es posible conseguir la evolución temporal de la variación del contenido electrónico total ionosférico, $\delta \nu \text{TEC}$ (Meza et al. [2009]), así como su tasa de variación, alrededor del punto subsolar en

diferentes ángulos cenitales solares. En este trabajo en particular y dada la época en la que suceden las dos fulguraciones analizadas, solo la constelación GPS fue analizada.

Los datos del ν TEC se obtuvieron a lo largo de una amplia gama de satélites sobre 3 estaciones (La Plata, Córdoba, Rawson). Dichos datos se presentan distribuidos en un archivo de la siguiente manera: Número de satélite Fecha juliana (DDDD.[fraccion del día]) sTEC Longitud en [°] Latitud en [°] Elevación en [°] .000 ν TEC. Además, se calculó el ángulo cenital solar para cada estación durante el momento del pico máximo de cada evento. Este cálculo se realizó utilizando la herramienta [SolarGeometryCalculator](#) proporcionada por el NOAA. De esta manera, se obtuvo una estimación precisa de la distancia de cada estación al punto subsolar en el instante en que cada evento alcanzó su máximo.

Una vez obtenidos los datos se pasó a analizar los datos del ν TEC, gráficos de por medio. Teniendo en cuenta que el día juliano se corresponde con el día de los eventos, y cada dato fue tomado cada 30 segundos, por lo que se convirtió la parte fraccional del día juliano a la hora del día en UTC. Al graficar, en primera instancia, se vio cuales son los satélites que registraron en el momento de los eventos, por lo que se descartaron aquellas trazas que estaban fuera del rango temporal de interés. Como segunda medida se decidió aplicar otro filtro, en el cual se tuvo en cuenta la elevación de los satélites (respecto de cada estación en cuestión), donde se buscó que estén lo más cerca posible de la vertical del lugar, ya que cuando se realiza la conversión del sTEC y se escribe en términos del ν TEC, lo cual llamamos función de mapeo (ver ecuación 8), se tiene una aproximación muy burda, que es colapsar a la ionósfera en una capa muy delgada a 450 kilómetros sobre la superficie, y dicha función de mapeo comete un menor error cuanto más cerca esté de la vertical del lugar. Además, teniendo en cuenta que cuanto más cerca estén de la vertical del lugar se tendrán menos datos, por lo que se buscó un equilibrio entre ambas cuestiones, es decir, que estén lo más cerca de la vertical del lugar y a la vez con una buena cobertura temporal.

Una vez graficadas las trazas, se procedió a analizarlas de forma similar a como se realizó el análisis sobre los datos magnéticos. Como primera medida se buscó observar un aumento brusco en el valor del ν TEC en el momento en que suceden las fulguraciones. Una vez identificados estos momentos, se analizó dicho aumento, es decir, el valor de estos aumentos en TECu (Total Electron Content Unit, donde un TECu equivale a 10^{16} electrones/m²), el tiempo que tardaron en alcanzar el pico, como así también cuanto tardaron en recomponerse estos valores.

Posteriormente se tomaron los instantes previos y posteriores a los eventos (nuevamente la longitud temporal de estos instantes es arbitraria, pero por lo general se encuentran en el orden de 15 a 30 minutos), de esta manera aislamos el efecto de las fulguraciones sobre el ν TEC, por lo que se procedió a realizar un ajuste polinómico de bajo grado sobre las trazas de cada estación. De esta manera se apreció, de forma muy aproximada, el valor que hubiese tenido el ν TEC en caso de que las fulguraciones no se hubiesen originado. Esto se corroboró a partir de realizar una diferencia entre los valores reales y los del ajuste.

Luego se dejó de lado los instantes previos y posteriores, y se tomó el intervalo temporal de las fulgura-

ciones, de esta manera se observó la diferencia que hubo entre los valores que hubiese tenido el ν TEC (por medio del ajuste) con los valores reales producto de los eventos.

Una vez observada la variación, se procedió a realizar distintos tipos de ajustes (perfil α y perfil β) por medio de mínimos cuadrados (ver código A.3) sobre el decaimiento de dicha variación y de esta manera se vio que tipo de perfil ajusta mejor a dicho decaimiento. El análisis sobre el decaimiento se llevó a cabo a partir de los ajustes, donde dichos ajustes surgen de la ecuación de continuidad (ver ecuación 13), la cual expresa la tasa de cambio de la densidad electrónica, que fue usada para obtener el coeficiente de decaimiento de la $\delta\nu$ TEC (Chapman and Bartels [1940]).

$$\frac{dN}{dt} = Kl - L - \nabla \cdot (N\vec{v}) \quad (13)$$

Donde $\frac{dN}{dt}$ es la tasa de cambio de la densidad electrónica, Kl es la tasa de producción debida a la ionización por radiación solar, L es la tasa de pérdida de electrones, y $\nabla \cdot (N\vec{v})$ representa la pérdida de electrones debido al movimiento.

En primera instancia el análisis sobre el decaimiento se llevó a cabo con el denominado perfil α , por lo que el término L de la ecuación (13) se lo reescribe como αN^2 , que representa la tasa de pérdida debido a la recombinación que se da principalmente en las capas D y E (hasta los 140 kilómetros aproximadamente), donde α es el coeficiente de recombinación. Además, considerando que durante la fase de recuperación los términos Kl y $\nabla \cdot (N\vec{v})$ son despreciados, esto se debe a que durante esta fase de recuperación, es decir, durante la etapa de decaimiento ya pasó la máxima fotoionización, por lo que los valores buscan volver a la normalidad ya que no se tiene el exceso de radiación, es decir, ya no hay más producción, ya no hay más fotones extras que incidan en la ionósfera. Además, durante el decaimiento, la radiación que se tiene es la misma que la radiación de fondo, por lo que al comparar ambas situaciones, con exceso y sin exceso de radiación, los fenómenos de transporte que se dan en ese intervalo podemos asumir que son similares a los que ya existían. Por lo tanto la ecuación nos quedó de la siguiente manera:

$$\frac{dN}{dt} = -\alpha N^2 \quad (14)$$

Donde observamos que la tasa de cambio de la densidad electrónica es proporcional a la densidad electrónica al cuadrado. Como $\delta\nu$ TEC es la integral de la diferencia de la densidad electrónica con la altura, la expresión (14) la podemos reescribir en términos de la $\delta\nu$ TEC de la siguiente manera:

$$\frac{d\delta\nu TEC}{dt} = -\alpha \delta\nu TEC^2 \quad (15)$$

Resolviendo la ecuación diferencial (15):

$$\delta\nu TEC(t) = \frac{\delta\nu TEC_0}{1 + \alpha \cdot \delta\nu TEC_0(t_k - t_0)} \quad (16)$$

A la expresión (16) se la denominó perfil α . Donde en este caso a α se lo considera constante y representa el coeficiente de decaimiento de $\delta\nu\text{TEC}$.

Por otro lado se planteó otro análisis sobre el decaimiento a partir de un denominado perfil β , el cual se considera por un proceso de attachment (o adhesión) que se da en las capas más altas de la ionósfera. De dicho proceso se tiene que la tasa de cambio de la densidad electrónica en lugar de ser proporcional a la densidad electrónica al cuadrado, es proporcional a la densidad electrónica, por lo que el término L de la ecuación (13) se lo reescribe como βN , donde β es el coeficiente de attachment. Ya que en este caso los otros dos términos de la ecuación de continuidad también se desprecian, por los mismos motivos explicados en el perfil α , la ecuación queda de la siguiente manera:

$$\frac{dN}{dt} = -\beta N \quad (17)$$

Se reescribió la ecuación diferencial (17) en términos de $\delta\nu\text{TEC}$ y se resolvió, resultando de la siguiente manera:

$$\delta\nu\text{TEC}(t) = \delta\nu\text{TEC}_0 \cdot e^{-\beta(t_k - t_0)} \quad (18)$$

A la expresión (18) se la denominó perfil β . Donde en este caso a β se lo considera constante y representa el coeficiente de decaimiento de $\delta\nu\text{TEC}$.

Surge la pregunta ¿Por qué se plantean 2 análisis distintos sobre el decaimiento de $\delta\nu\text{TEC}$? La respuesta radica en el hecho de que el contenido total electrónico vertical (νTEC), es justamente un integrado vertical, si bien el análisis de cada uno de ellos se llevó a cabo por separado para ver cual resulta más representativo durante los procesos de decaimiento, la ionósfera es un todo. Ambos mecanismos, por recombinación y por attachment, están presentes durante una fulguración. Por lo que en principio no se sabe a que altura se tiene la mayor pérdida de electrones, si en las capas más bajas (D o E) o a mayor altura (gracias a los mecanismos de transporte). Pero si se sabe que el ajuste por el perfil α representa de mejor manera a la pérdida de electrones por recombinación en capas bajas, mientras que el perfil β lo hace para capas más altas donde predomina la pérdida de electrones por attachment, además, en este caso la recomposición tarda más tiempo en llevarse a cabo debido a la menor densidad de constituyentes en esas capas, por lo que la transición entre ambos perfiles se da alrededor de los 140 Km de altura. Por este motivo se propusieron ambos modelos y de esta manera se observó cual representa mejor a los datos del decaimiento.

Para finalizar la investigación, se calculó la variación temporal de $\delta\nu\text{TEC}$, es decir, la velocidad de cambio, de manera de comprender mejor como transcurre la incorporación de ese adicional de radiación en la ionósfera.

4. Resultados y análisis

4.1. Determinación de los días tranquilos para los meses de diciembre y noviembre de 2001 y 2003 respectivamente

Se describirá en detalle el procedimiento para el mes de diciembre de 2001, mientras que para el mes de noviembre de 2003 se hizo el mismo procedimiento pero solo se mostrará la conclusión.

De acuerdo a lo descrito en la subsección 3.3, los días de más tranquilidad para el mes de noviembre de 2001 de acuerdo a [for Geomagnetism de Kyoto](#) fueron:

9 10 11 13 20 2 28 14 26 7

Mientras que siguiendo las recomendaciones del [ISGI](#), a partir de los índices K_p calculados por el [GFZ-Postdam](#), se calcularon los días más tranquilos. Dichos valores se muestran a continuación:

Días	Hora 00:00	Hora 00:03	Hora 06:00	Hora 09:00	Hora 12:00	Hora 15:00	Hora 18:00	Hora 21:00	suma	Suma de los cuadrados	Máximo	Promedio
1	0.67	0.67	1.67	2	2.67	2.67	1	1.67	13.02	25.7	2.67	13.80
2	1	0	1	1.33	2	2	1.33	1	9.66	14.5	2	8.72
3	0.33	1.67	0.67	1.33	2.33	2	3.33	3.33	14.99	36.7	3.33	18.34
4	3	2.33	1.67	2.33	3	1.67	3	2	19	47.4	3	23.13
5	4	2.67	1.33	2.33	2	2	2.67	2	19	49.5	4	24.17
6	3	1.67	2	3	2.33	2.67	2.67	3	20.34	53.5	3	25.61
7	2.33	1.33	0.67	1	2.33	2.67	1	1.67	13	25	2.67	13.56
8	3.33	1.33	1.67	1.67	2	1	0.67	0.67	12.34	24.3	3.33	13.32
9	0.33	0.67	0	1.33	0.67	0	0.33	1.67	5	5.67	1.67	4.11
10	0.33	0.33	1	0.67	1.67	0.67	0.67	1.33	6.67	7.12	1.67	5.15
11	0.67	1	0.67	0.67	1	1	1.67	1.67	8.35	9.92	1.67	6.65
12	2	2.33	2.33	3.33	2.33	2.33	3	3	20.65	54.8	3.33	26.26
13	2	1.67	1	0.33	1	1	0	0	7	9.9	2	6.30
14	0	0.67	0	1	2	1.67	2	2	9.34	16.2	2	9.18
15	2.33	3	2	2.33	3	1.67	1	2.33	17.66	42.1	3	20.92
16	2.67	3.33	3.33	2.33	2.33	1.67	1.67	1.33	18.66	47.5	3.33	23.16
17	2.67	3.67	3	3	3.33	3.67	3	1.67	24.01	74.9	3.67	34.19
18	3.67	2	2	2.33	2.67	2	1	1.67	17.34	41.8	3.67	20.94
19	3	2.33	2	2.67	1	1.67	2.33	1.33	16.33	36.5	3	18.61
20	1	0	1	1.33	2	1.33	1	1.67	9.33	13.3	2	8.21
21	0.33	2	2.33	2.67	2.33	3.67	4	3.67	21	65	4	30.00
22	3	3	2.33	2.33	2	0.67	2	0.67	16	37.8	3	18.93
23	1.33	2	1.33	2.67	1.67	2	1	2	14	26.5	2.67	14.39
24	2	3.33	4.67	4.33	4.33	4.33	3	2.67	28.66	109	4.67	47.44
25	2.67	2.33	1.67	2.67	1.67	2	1	3	17.01	39.3	3	19.77
26	2.33	0.67	0.67	1	1	1.67	2.33	2.33	12	22	2.33	12.11
27	2.33	1	1	1.33	1.67	2	2.67	1.67	13.67	25.9	2.67	14.08
28	0.67	0	1.67	1.33	2	1	1	2	9.67	15	2	8.89
29	1.67	4	2.33	2.67	2.33	2.33	2	2.67	20	53.3	4	25.77
30	3.33	4.67	3.33	2	2.33	2.33	4	4.67	26.66	96.7	4.67	42.68
31	3.33	3.33	2	1.33	1.33	3	3.67	4	21.99	68.2	4	31.40

Cuadro 4: Tabla con los índices K_p del mes de diciembre de 2001, en UTC.

De acuerdo a lo mencionado anteriormente, los días de más tranquilidad para el mes de diciembre de 2001, según este análisis (ver cuadro 4), fueron el 9, 10, 13, 11, 20, 2 y 28. Podemos ver como en cada intervalo del 13 de diciembre, el índice K_p no supera el valor de 3 y el A_p no supera el valor 6.

Finalmente se procedió con el análisis visual de la componente H para todos los días del mes de diciembre de 2001. De esta manera, se concluyó que los 5 días de más tranquilidad en la estación de Trelew, en términos

de este análisis, fueron el 9, 11, 13, 22 y 27, tal y como se ve en la figura 14. Donde podemos observar los días del 1 al 31 de diciembre, de izquierda a derecha y de arriba a abajo.

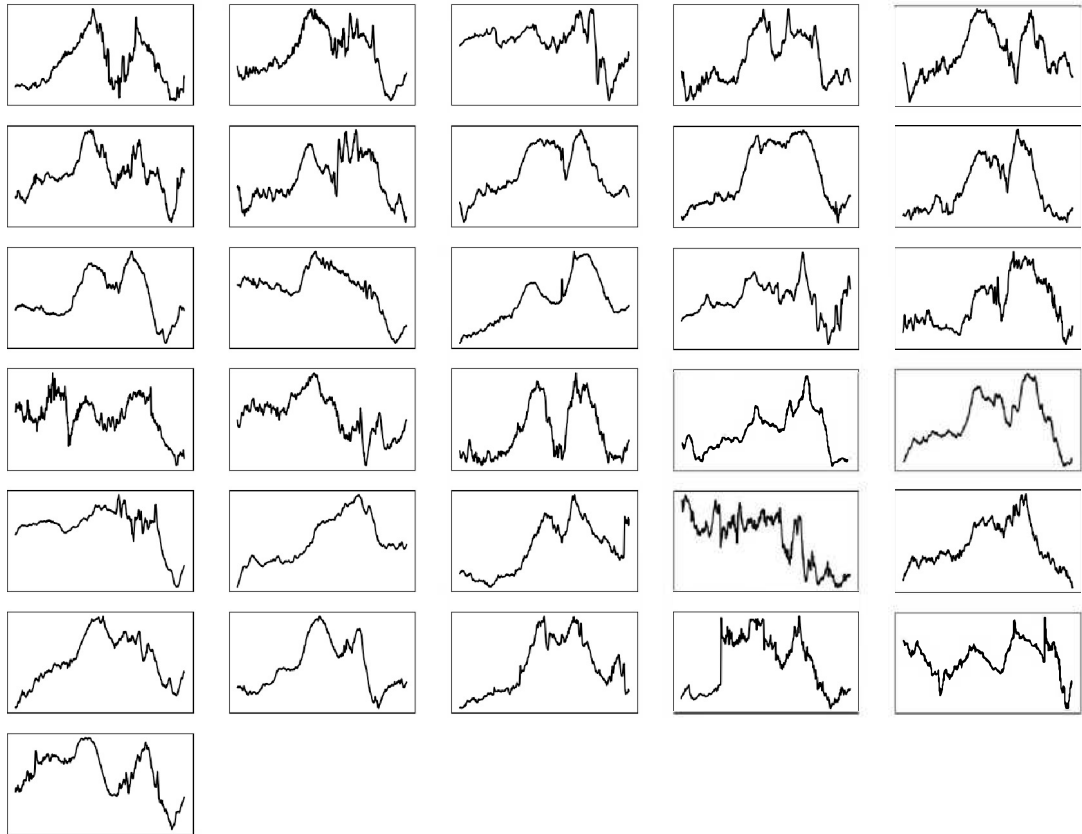


Figura 14: Registros diarios del campo magnético durante el mes de diciembre de 2001 en la estación de Trelew.

Finalmente, conforme a las 3 instancias de análisis, concluimos que la fulguración del 13 de diciembre de 2001 se dio durante un día tranquilo, además al ver el cuadro 4 se aprecia que el índice k_p no supera el valor 2 en cada uno de los intervalos a lo largo de ese día, por lo que, deberíamos de poder observar sus efectos sobre el campo geomagnético.

Para la fulguración del 4 de noviembre de 2003 se llevó a cabo exactamente el mismo análisis. Del análisis cabe destacar que los índices K_p para cada intervalo de ese día fueron:

3 3 6.33 7 2.67 2 3.33 2.67

Se observa que, en los intervalos de 6 a 9 hs y de 9 a 12 hs, los índices K_p indican tormenta. Sin embargo a partir de allí los valores descienden a los que se puede considerar tranquilo-inestables (recordando que este

evento se dio durante el séptimo intervalo), por lo que se procedió con su análisis.

4.2. Características generales de ambos eventos

Fulguración del 13 de diciembre del 2001: Esta fulguración tuvo lugar en un denominado día tranquilo. De acuerdo al reporte del NOAA [d], esta fulguración es de tipo 3B en la clasificación $H\alpha$, es decir, un evento de gran tamaño y alto brillo, lo que sugiere que fue una fulguración intensa con grandes cantidades de energía liberada. Estaba ubicado en N16 E09 en la región 9733 de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA). La región fue calificada como FU, lo que significa que tiene varios centros eruptivos y dos regiones brillantes que identifican a las fulguraciones de "dos patas". Mientras que el GOES, que observa en un rango de energía entre 1 y 8 Å, dio la siguiente información: una fulguración comienza a las 14:20 UT, alcanza su máximo a las 14:30 UT y termina a las 14:35 UT según los Datos Geofísicos Solares, donde los datos se reportan cada 5 min. Las coordenadas reportadas son N16 E09 y la clasificación en X es X6.2 (intensidad $6,2 \times 10^{-4} \text{ W/m}^2$), ver figura 15.

Fulguración del 4 de noviembre del 2003: Esta fulguración tuvo lugar en un denominado día medianamente perturbado. De acuerdo al reporte del NOAA [e], esta fulguración es de tipo 3B en la clasificación $H\alpha$, es decir, un evento de gran tamaño y alto brillo, lo que sugiere que fue una fulguración intensa con grandes cantidades de energía liberada. Estaba ubicado en S19 W58 en la región 10486 de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA). La región fue calificada como FZ, lo que significa que tiene varios centros eruptivos y con la umbra de la mancha solar cubierta por la fulguración. Mientras que el GOES, dio la siguiente información: una fulguración comienza a las 19:29 UT, alcanza su máximo a las 19:50 UT y termina a las 20:06 UT según los Datos Geofísicos Solares. Las coordenadas reportadas son S19 W58 y la clasificación en X es X40 (intensidad $4 \times 10^{-3} \text{ W/m}^2$), cabe aclarar que los instrumentos del satélite se saturaron por lo que los datos de forma fehaciente solo se midieron hasta los $1,75 \times 10^{-3} \text{ W/m}^2$ (ver figura 15), sin embargo diversos estudios y simulaciones establecieron que la fulguración fue de X40.

Fecha	Hora de inicio UTC	Hora de pico máx UTC	Hora de finalización UTC	Valor pico máx en X	Inicio hora local	Máximo hora local	Finalización hora local
13/12/2001	14:20	14:30	14:35	X 6.2	10:20	10:30	10:35
4/11/2003	19:29	19:53	20:06	X 40	15:29	15:53	16:06

Cuadro 5: Datos de cada fulguración en UTC y hora local para la estación geomagnética de Trelew.

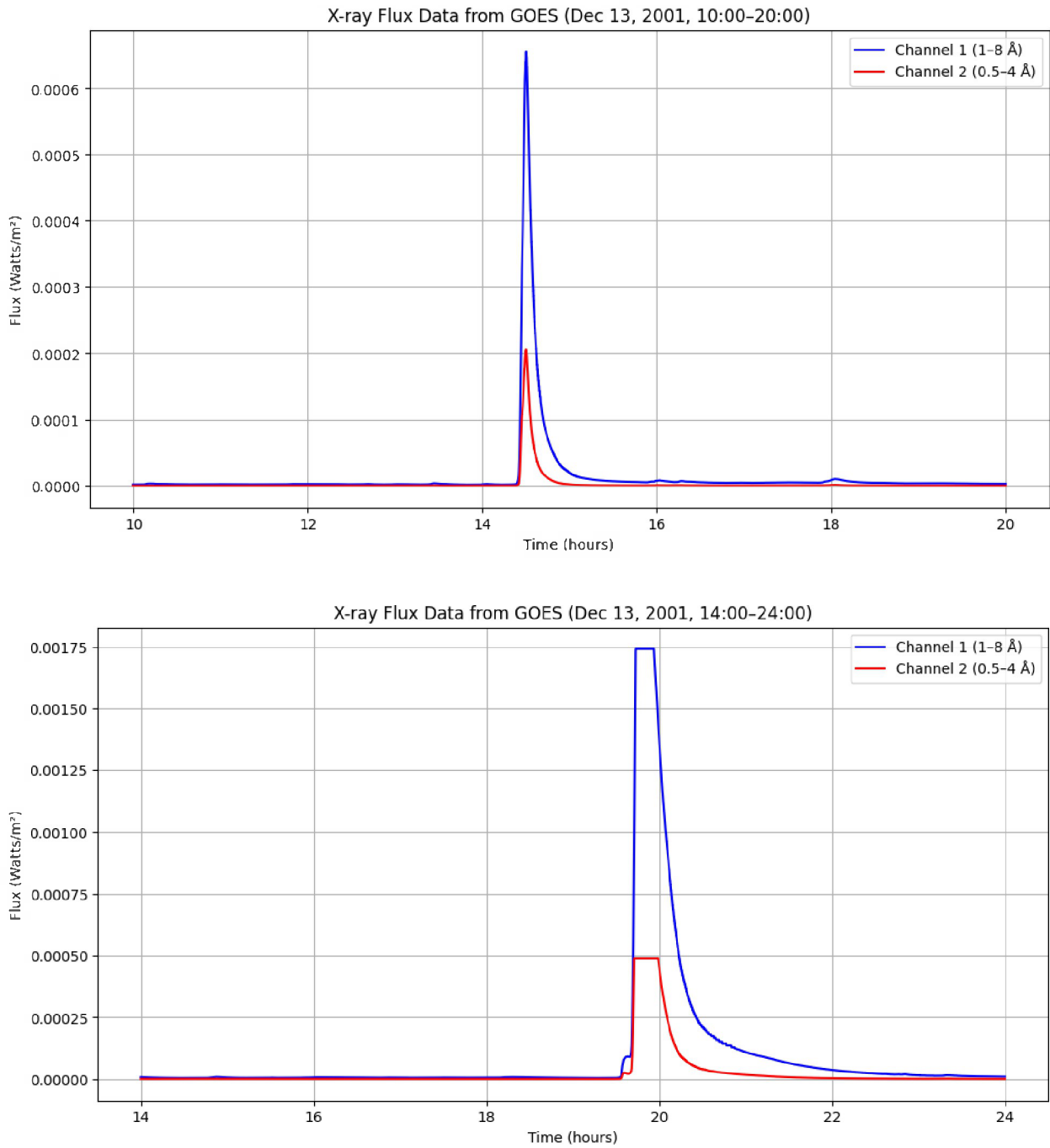


Figura 15: Evolución temporal del flujo de rayos X solares observados por el satélite GOES el 13 de diciembre de 2001 (arriba) y el 4 de noviembre de 2003 (abajo), en la banda de paso de 1 a 8 Ångström (azul) y de 0.5 a 4 Ångström (rojo).

4.3. Análisis sobre la fulguración del 13 de diciembre de 2001

En esta subsección se abarcó el análisis bien detallado sobre la fulguración del 13 de diciembre de 2001. Mientras que el análisis sobre la fulguración del 4 de noviembre de 2003 se llevó a cabo en otra subsección.

4.3.1. Respuesta del campo geomagnético ante la fulguración

Podemos observar en la figura 16 cómo la intensidad del campo geomagnético aumenta conforme pasan las horas, alcanzando un pico máximo de 26412.45 nT a las 09:44. Posteriormente, comienza un descenso gradual hasta llegar a 26383.7 nT a las 14:20, lo cual corresponde a un comportamiento esperado. Este descenso continúa de manera estable hasta las 14:24, momento en el que se registra un valor de 26383.8 nT, es decir, una variación mínima de apenas 0.1 nT en 4 minutos. Esta "normalidad" puede confirmarse mediante la observación de los días previos. Sin embargo, a partir de las 14:24, la intensidad del campo magnético comienza a aumentar nuevamente de manera paulatina en un período muy breve, alcanzando los 26388.8 nT en solo 6 minutos (14:30). Este valor corresponde al pico máximo durante el intervalo de la fulguración. Después de este aumento, la intensidad vuelve a descender, llegando a un mínimo de 26377.6 nT a las 14:43, el punto más bajo registrado ese día.

En resumen, en tan solo 6 minutos se produjo un aumento de 5 nT. Durante este breve intervalo, podemos observar claramente el efecto de la fulguración, en el que un descenso gradual cambia de tendencia hacia un aumento brusco, seguido de un nuevo descenso a medida que los efectos de la fulguración solar comienzan a disiparse.

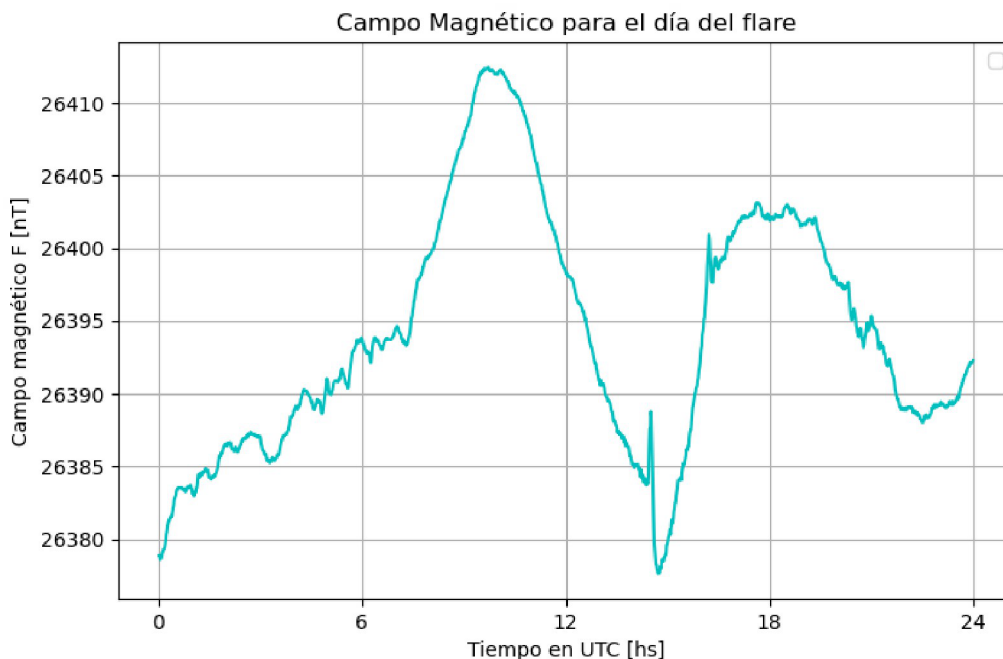


Figura 16: Registro del campo magnético F del 13 de diciembre de 2001 en la estación de Trelew.

En cuanto a las componentes X, Y, Z, podemos realizar las siguientes observaciones:

Componente X: El comportamiento de la componente X (ver figura 17) del campo es muy similar al del campo F. En el caso del efecto de la fulguración, también sigue un patrón similar, comenzando a las 14:24 con un valor de 19471 nT y finalizando a las 14:31 con un valor de 19488 nT. Esto representa un aumento de 17 nT en 7 minutos. Posteriormente, la componente X desciende gradualmente hasta alcanzar 19474 nT a las 14:43, momento en el que vuelve a un comportamiento "normal", lo que indica la disipación del efecto de la fulguración.

Componente Y: En esta componente (ver figura 18), no se aprecia el efecto del evento de manera tan clara como en la componente X. Al inicio del día, el campo presenta una tendencia descendente hasta el mediodía, alcanzando un mínimo de 1576.5 nT. A partir de este punto, la tendencia cambia drásticamente a un ascenso sostenido, llegando a 1651 nT pasadas las 17:00. Sin embargo, a las 14:26, dentro de esta tendencia alcista, se observa un leve descenso temporal (un "pull back"), donde el campo pasa de 1612 nT a 1608 nT a las 14:30, es decir, una disminución de 4 nT en 4 minutos. Tras este pequeño descenso, el campo vuelve a aumentar siguiendo su tendencia principal.

Componente Z: En la componente Z (ver figura 19), el efecto de la fulguración no es tan evidente como en las otras dos componentes. Desde el inicio del día hasta las 10:00, el valor del campo se mantiene relativamente constante en torno a -17760 nT. A partir de ese momento, comienza a aumentar con una tendencia ascendente marcada, la cual se extiende hasta pasadas las 16:00. A diferencia de la componente Y, no se observan "pull backs" en esta tendencia. Alrededor de las 14:24, coincidiendo con la fulguración, la pendiente del aumento se acentúa significativamente, casi alcanzando la verticalidad. El valor pasa de -17730 nT a las 14:24 a -17717 nT a las 14:33, lo que implica un incremento de 13 nT en solo 9 minutos.

Luego, nos enfocamos en un instante previo y un instante posterior al evento para observar con mayor detalle la variación del valor del campo durante el evento, tanto del campo total F (ver figura 20) como de sus componentes X (ver figura 21), Y (ver figura 22) y Z (ver figura 23). Cada instante tiene una duración de entre 10 y 30 minutos. El instante previo abarca desde las 14:13 hasta las 14:23, excepto en el caso de la componente Y, donde este intervalo abarca desde las 13:53 a 14:23. La reducción en el intervalo previo para X, Z y F se debe a la alta intermitencia y ruido presentes en los datos antes del evento, lo cual podría afectar la precisión de los ajustes.

Por otro lado, el instante posterior comprende desde las 14:44 hasta las 15:15, ya que a partir de las 14:44 se observa la recuperación del campo, indicando que el efecto de la fulguración ha desaparecido o está próximo a desaparecer. Sin embargo, para la componente Z, esta recuperación parece comenzar unos minutos

más tarde, por lo que su intervalo posterior se establece entre las 14:52 y las 15:02.

Para hacer más visible y clara la variación del campo durante estos intervalos, se decidió realizar un ajuste polinómico de bajo grado: cúbico para la componente Z y cuadrático para el campo total F y las componentes X y Y.

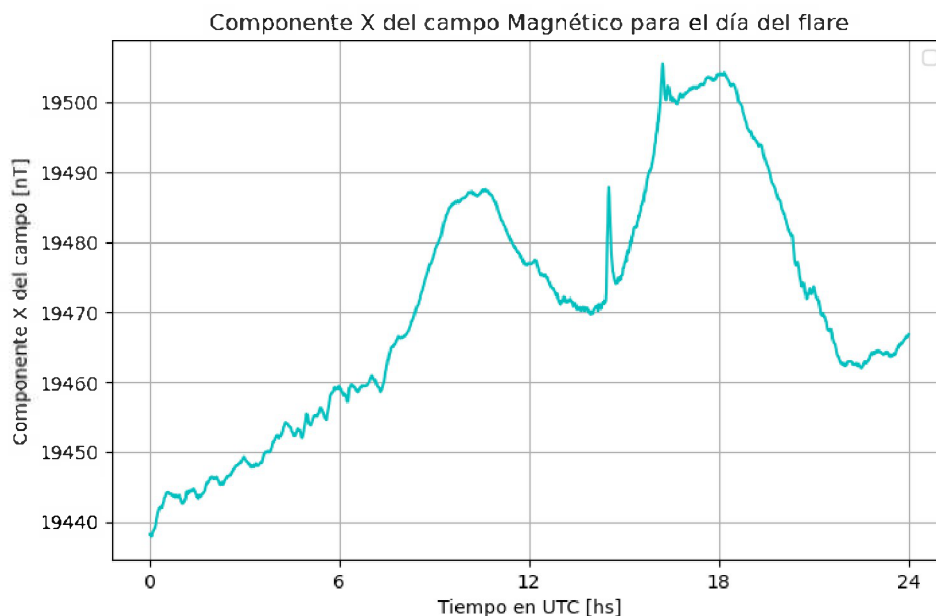


Figura 17: Registro de la componente X del campo magnético del 13 de diciembre de 2001 en la estación de Trelew.

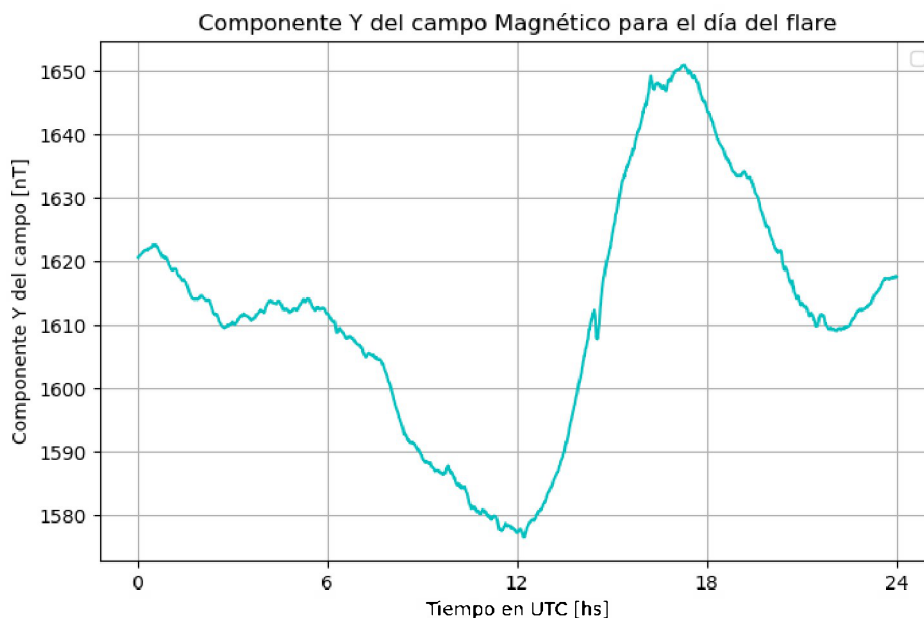


Figura 18: Registro de la componente Y del campo magnético del 13 de diciembre de 2001 en la estación de Trelew.

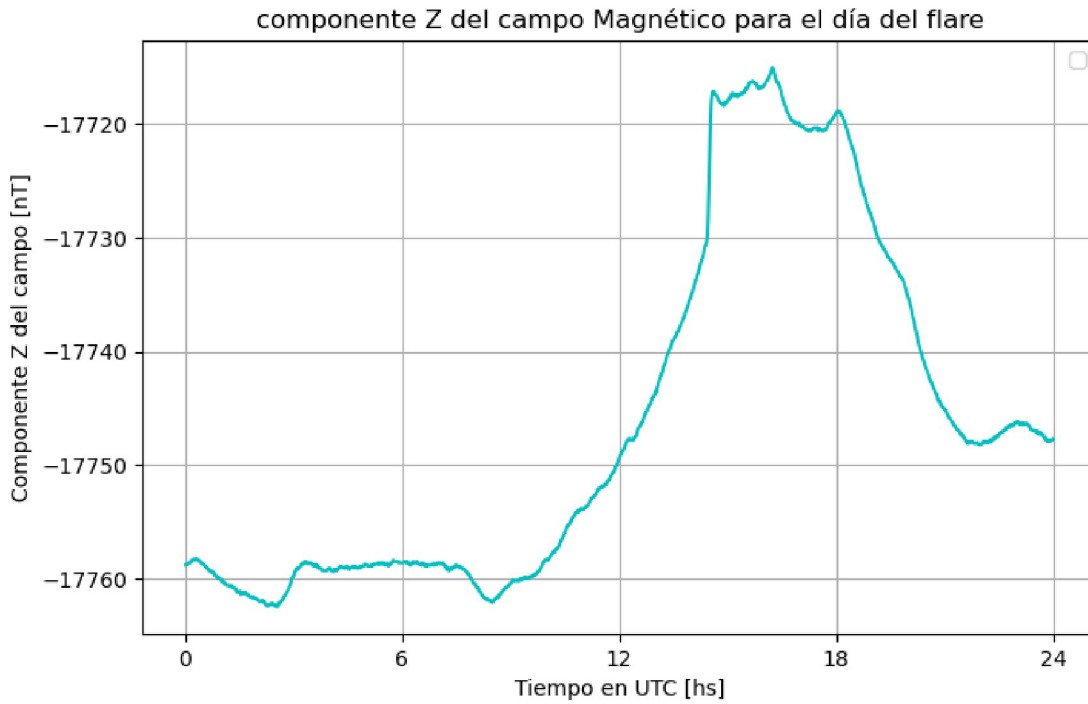


Figura 19: Registro de la componente Z del campo magnético del 13 de diciembre de 2001 en la estación de Trelew.

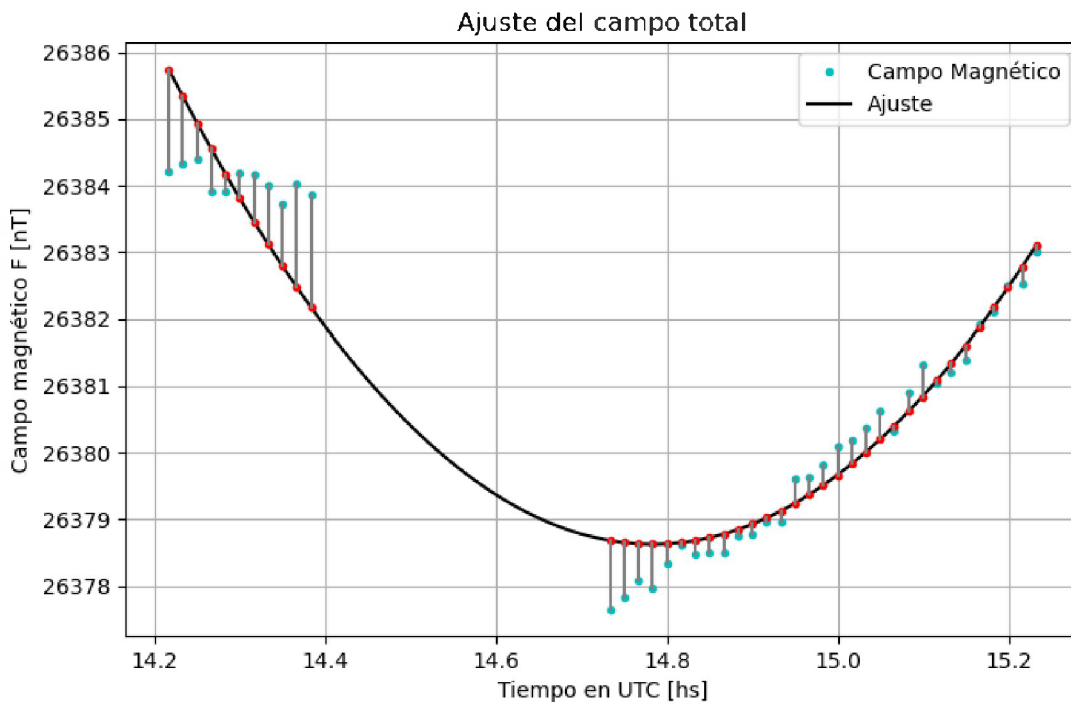


Figura 20: Ajuste del campo magnético F del 13 de diciembre de 2001 en la estación de Trelew.

En la figura 24, podemos observar la diferencia entre los valores medidos del campo, junto con los de sus componentes, y los ajustes polinómicos correspondientes. Se aprecia que los cuatro ajustes son muy buenos, ya que las diferencias son pequeñas. El ajuste para F presenta la mayor diferencia, alcanzando hasta 1.65 nT;

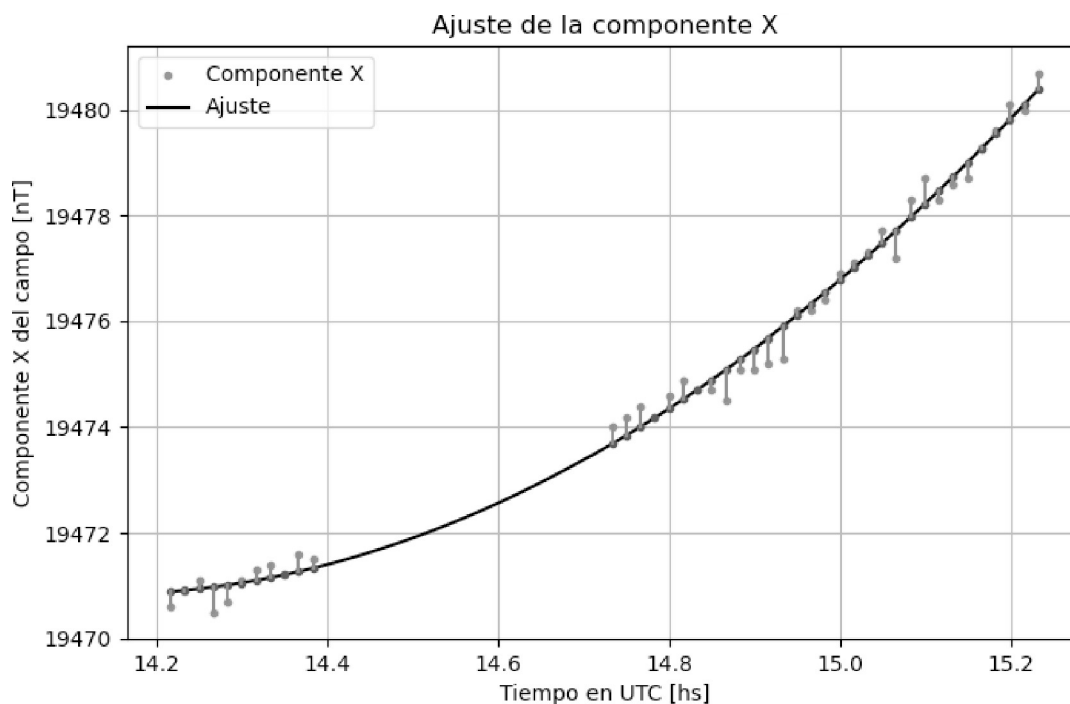


Figura 21: Ajuste de la componente X del campo magnético del 13 de diciembre de 2001 en la estación de Trelew.

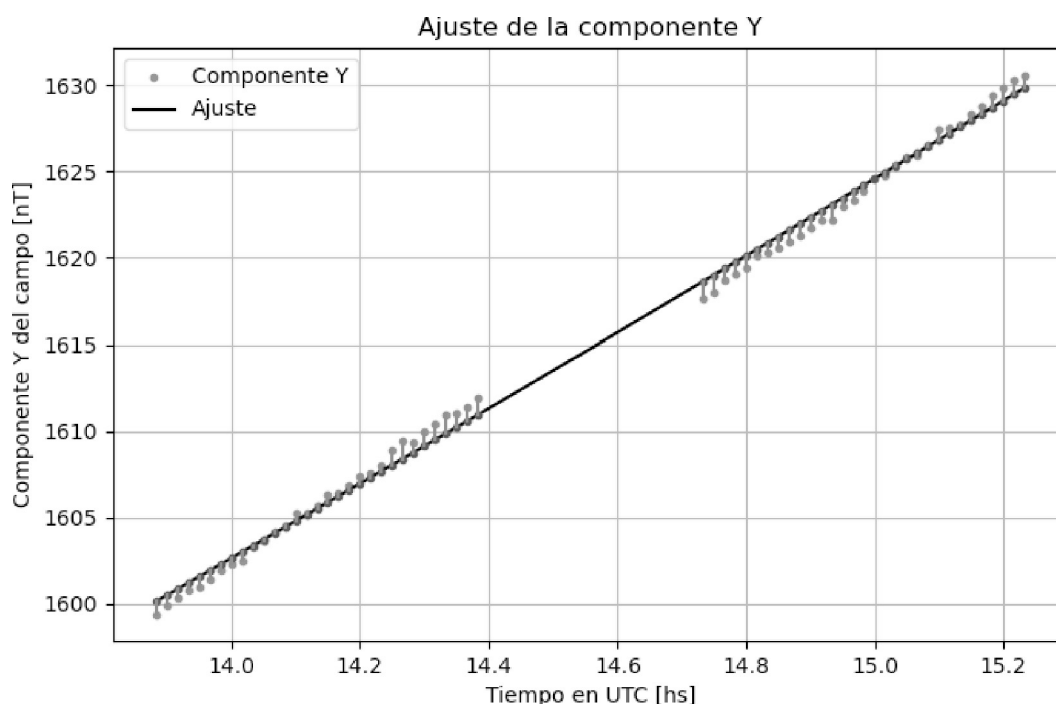


Figura 22: Ajuste de la componente Y del campo magnético del 13 de diciembre de 2001 en la estación de Trelew.

sin embargo, esto no deja de ser un ajuste adecuado. Para las componentes, las diferencias máximas son de 0.6 nT para X, 1.1 nT para Y y 0.35 nT para Z. Por lo tanto, podemos afirmar que los ajustes aproximan

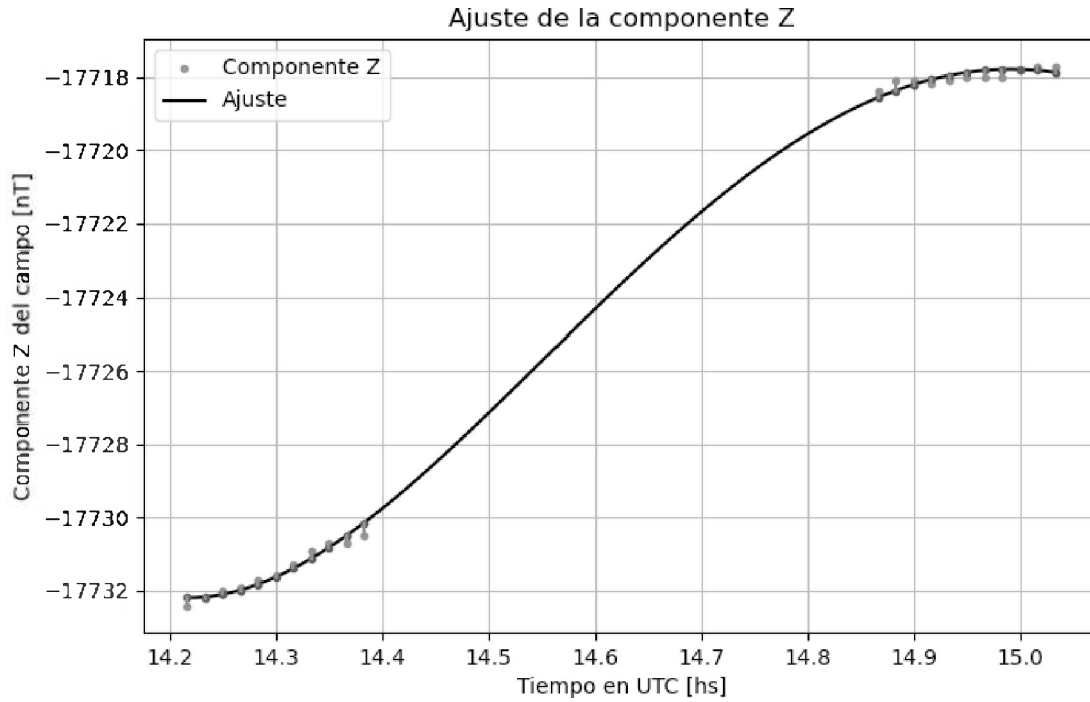


Figura 23: Ajuste de la componente Z del campo magnético del 13 de diciembre de 2001 en la estación de Trelew.

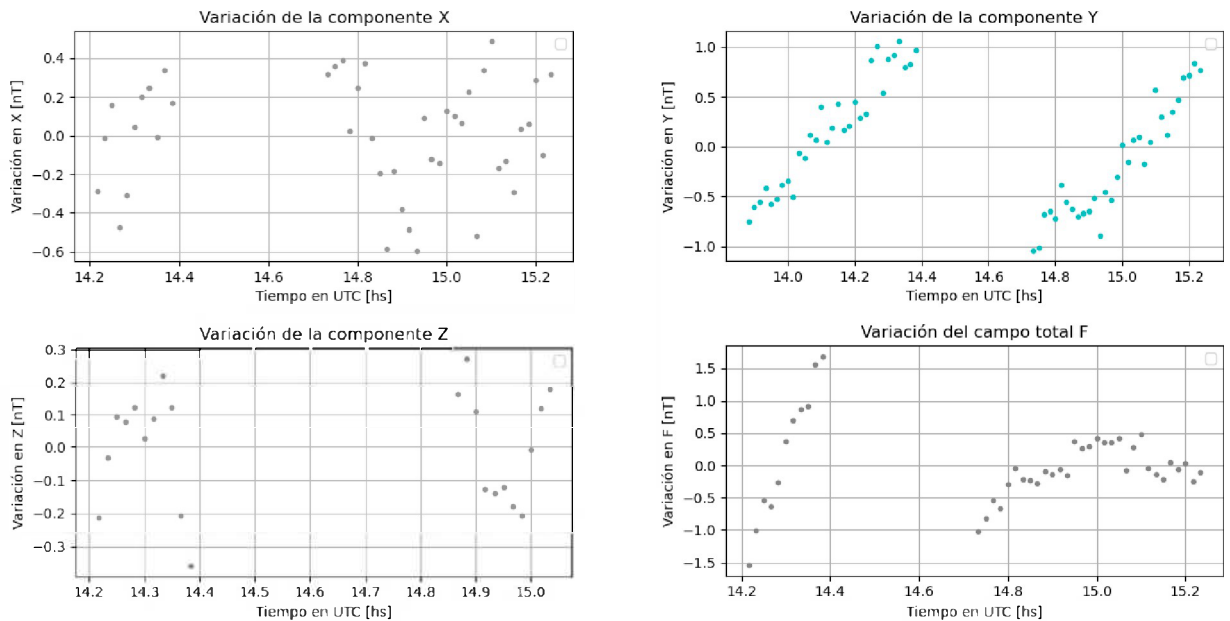


Figura 24: Variaciones entre los valores del campo (tanto total como sus componentes) y los ajustes realizados.

muy bien los valores reales del campo y a los de sus componentes.

Además, se observa que la diferencia en la componente X muestra una mayor dispersión en comparación con los otros tres ajustes. Esto se debe a lo mencionado anteriormente sobre el comportamiento ruidoso de esta componente del campo.

Una vez comprobado que los ajustes representan de forma adecuada al campo y a sus componentes,

podemos analizar la diferencia entre el valor del campo y el de sus componentes durante la fulguración y el ajuste correspondiente. Este ajuste representa, de manera muy aproximada, el valor que habrían tenido el campo y sus componentes si la fulguración no hubiese ocurrido.

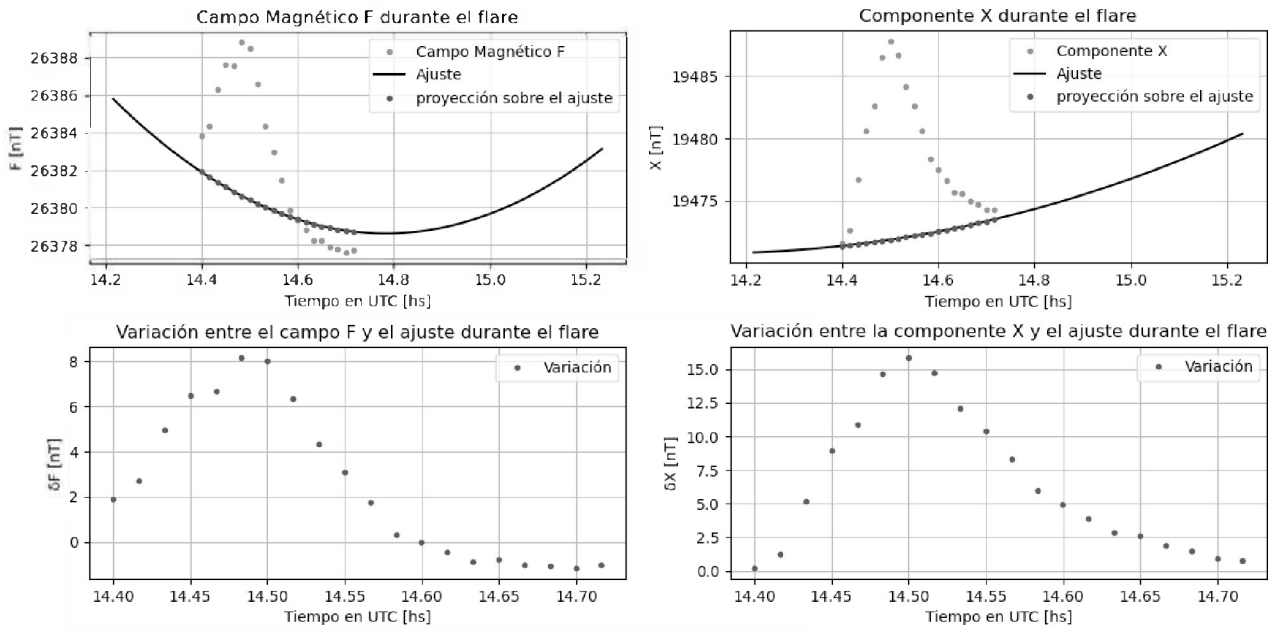


Figura 25: Valor del campo magnético y el ajuste durante la fulguración (arriba). Diferencia entre ambos (abajo). Tanto para el campo total (izquierda) como para la componente X (derecha).

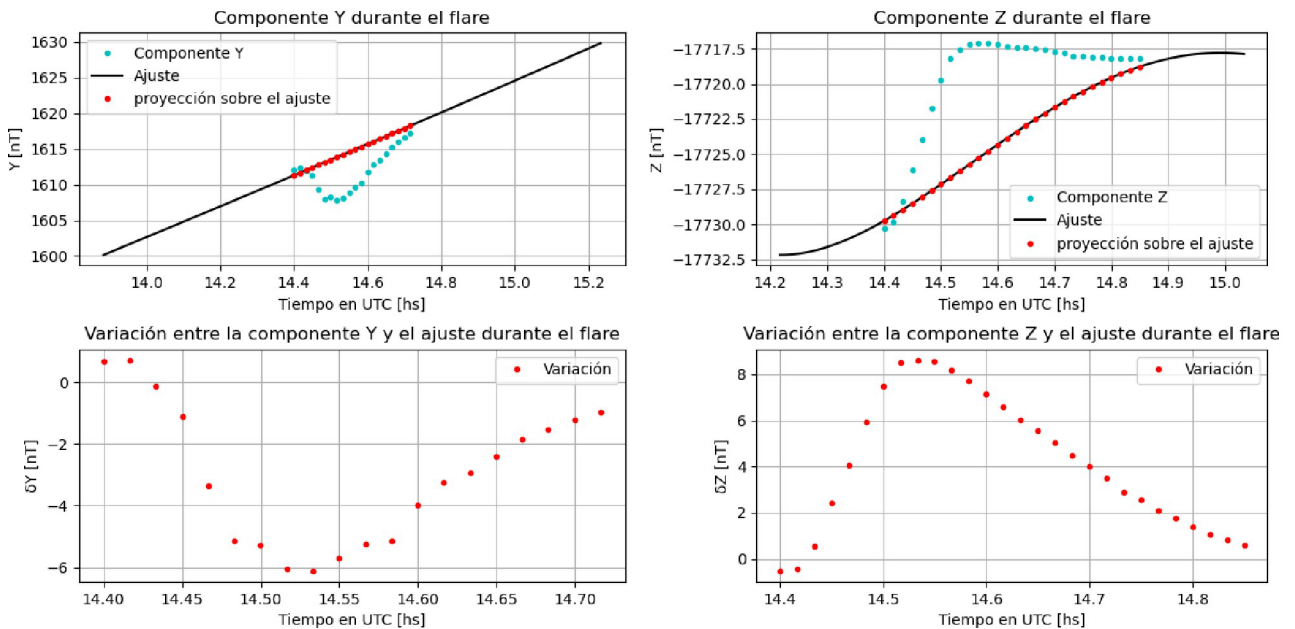


Figura 26: Valor del campo magnético y el ajuste durante la fulguración (arriba). Diferencia entre ambos (abajo). Tanto para la componente Y (izquierda) como para la componente Z (derecha).

En las figuras 25 y 26, se aprecia cómo varían los valores del campo geomagnético y el de sus componentes durante la fulguración, generando valores significativamente diferentes a los que se habrían observado en ausencia de este evento.

Variación del Campo total F: La mayor variación ocurre a las 14:29, alcanzando 8.2 nT. En el momento del auge de la fulguración, a las 14:30, la variación es de 8 nT.

Variación de la componente X: Registra su máxima variación a las 14:30, con un valor de 16 nT. La forma de la curva de esta componente es muy similar a la del campo total.

Variación de la componente Y: La mayor variación, en términos absolutos, ocurre a las 14:32, con un valor de 6.1 nT. Cabe destacar que la mayoría de los valores de la variación son negativas.

Variación de la componente Z: Presenta su máxima variación también a las 14:32, con un valor de 8.6 nT. La curva de la variación de Z tiene un comportamiento similar al de la variación de Y, pero invertida.

Ajuste del decaimiento para la variación del campo total F:

Para realizar este ajuste, se utilizó la variación del campo total F, calculada mediante la expresión (12), que considera las variaciones de las componentes X, Y y Z. Posteriormente, se ajustó su decaimiento utilizando la función exponencial definida en (11).

En la variación obtenida (ver figura 27), el valor máximo registrado es de 18.3 nT a las 14:30 horas. A partir de las 14:31 horas, se evidencia una clara caída exponencial que, al ajustarla con la función mencionada, resulta en un coeficiente de decaimiento $K = 0.137/\text{min}$. Además, se observa que el campo tarda aproximadamente 20 minutos en recuperarse.

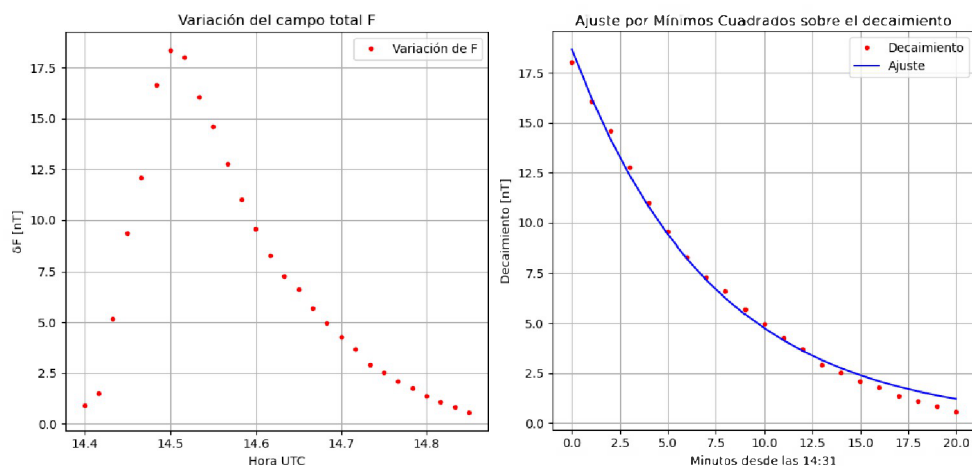


Figura 27: Variación del campo F (izquierda) y el ajuste del decaimiento (derecha).

4.3.2. Análisis de la fulguración sobre la ionósfera

Para realizar el análisis, se calculó el ν TEC a lo largo del día juliano 52256, correspondiente al 13 de diciembre de 2001, utilizando mediciones de 27 satélites registradas por 3 estaciones receptoras ubicadas en La Plata, Córdoba y Rawson. Las muestras fueron tomadas cada 30 segundos. En un primer análisis de los datos crudos, se observó que no todos los satélites registraron mediciones en el momento de la fulguración, por lo que se realizó un primer filtrado para identificar los satélites de interés. Un detalle relevante es que el efecto de la fulguración sobre la ionósfera comienza aproximadamente 4 minutos después de lo informado por el GOES (14:20 UT). Durante el análisis, se observó que el ν TEC aumenta considerablemente en poco tiempo, entre 6 y 6.5 minutos, desde el inicio del evento (14:24 UT) hasta alcanzar su valor máximo (14:30.5 UT), lo cual se corrobora en las tres estaciones. Además, en el cuadro 6 se muestran las coordenadas geográficas de cada estación, junto con el ángulo cenital solar correspondiente a cada estación durante el pico máximo de este primer evento.

La Plata (ver figura 28):

Satélite 15: Aumento de 10 TECu durante el intervalo mencionado.

Satélite 21: Aumento de 6 TECu durante el intervalo mencionado.

Satélite 3: Aumento de 5 TECu durante el intervalo mencionado.

Satélites 18 y 22: No registraron todo el evento, por lo que fueron descartados.

Córdoba (ver figura 29):

Satélite 22: Aumento de 7 TECu durante el intervalo mencionado.

Satélite 21: Aumento de 5 TECu durante el intervalo mencionado.

Satélite 3: Aumento de 5 TECu durante el intervalo mencionado.

Satélites 15 y 31: No registraron todo el evento; el primero solo los primeros minutos y el segundo únicamente el final, por lo que fueron descartados.

Satélite 18: Registro anómalo, con una disminución de casi 4 TECu en un minuto y medio (de 79 TECu a las 14:25:30 a 75.4 TECu a las 14:26:30), seguida de un aumento hasta 79 TECu a las 14:30.

Rawson (ver figura 30):

Satélite 22: Aumento de 7 TECu durante el intervalo mencionado. Sin embargo, presenta un comportamiento particular, ya que entre las 14:25:30 y las 14:29:00 se salta 7 muestras (registraba cada 30 segundos) y deja de registrar a partir de las 14:29:00.

Satélite 3: Aumento de 7 TECu durante el intervalo mencionado.

Satélite 31: Aumento de 5 TECu durante el intervalo mencionado.

Satélite 18: Aumento de 5 TECu durante el intervalo mencionado.

Satélite 15: Aumento de 5 TECu durante el intervalo mencionado.

Satélite 21: Aumento de 4 TECu durante el intervalo mencionado.

Estaciones	Latitud [°]	Longitud [°]	Ángulo cenital solar 1° evento [°]	Ángulo cenital solar 2° evento [°]
La Plata	34.9 S	57.9 W	20	59
Córdoba	31.4 S	64.2 W	23.8	54
Rawson	43.3 S	65.1 W	29.5	55

Cuadro 6: Coordenadas geográficas de las estaciones y el ángulo cenital solar asociado al pico máximo de cada fulguración.

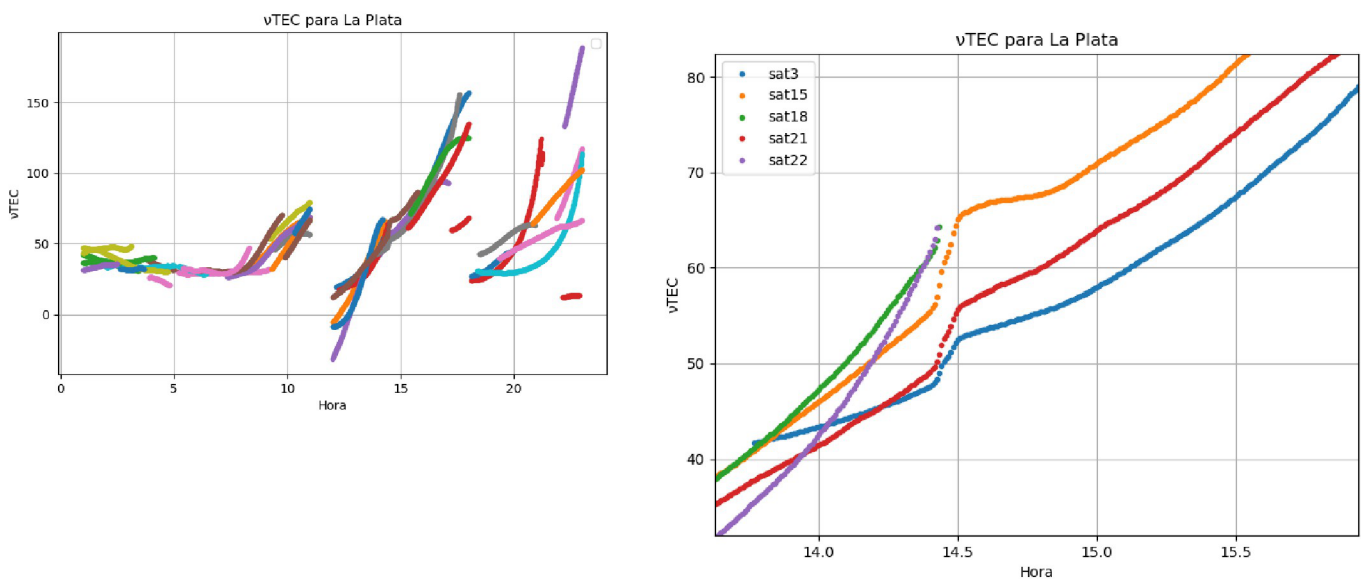


Figura 28: Registro de ν TEC de los 27 satélites sobre la estación de La Plata, a la izquierda. Registro de ν TEC de los satélites que registraron la fulguración, a la derecha.

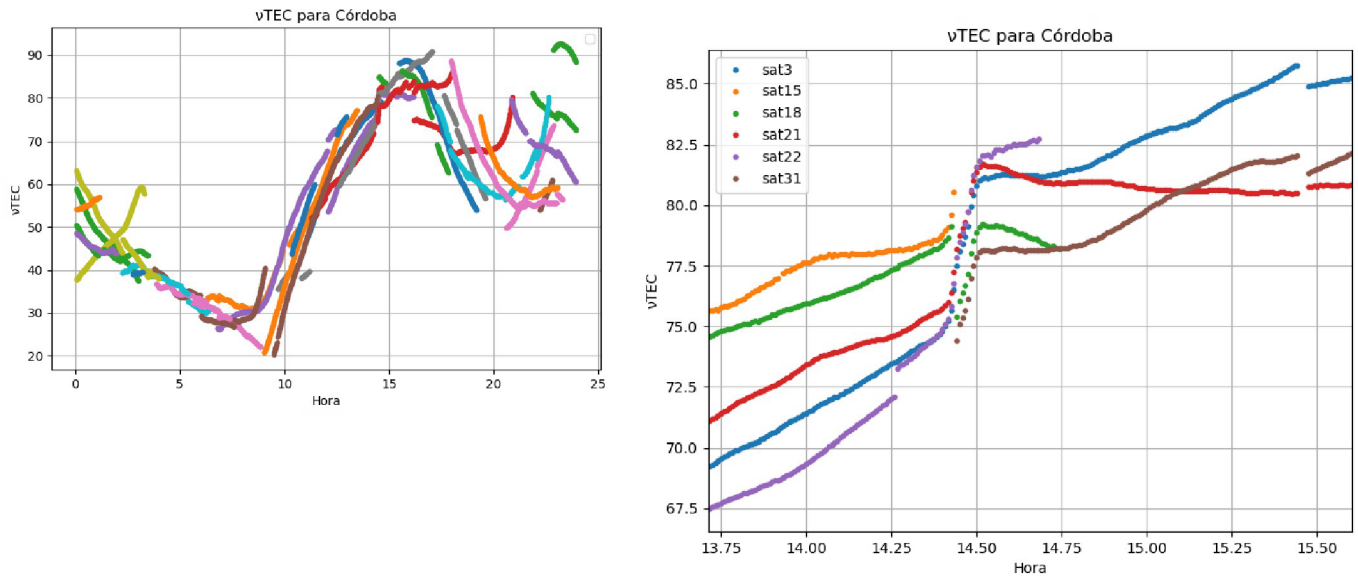


Figura 29: Registro de ν TEC de los 27 satélites sobre la estación de Córdoba, a la izquierda. Registro de ν TEC de los satélites que registraron la fulguración, a la derecha.

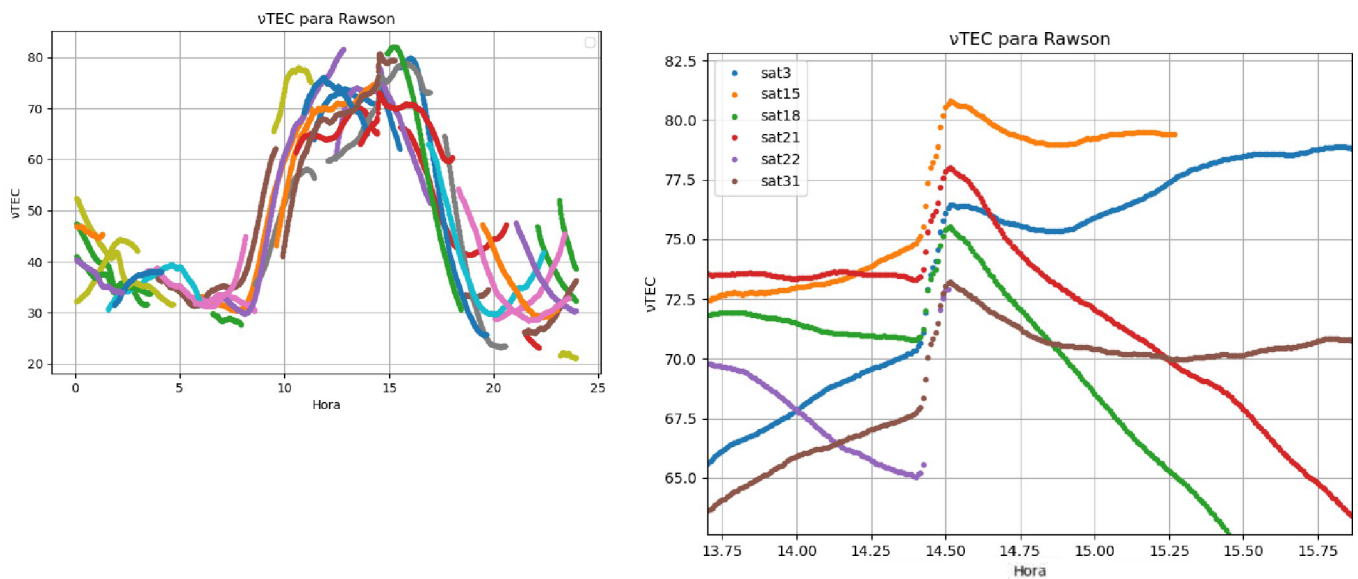


Figura 30: Registro de ν TEC de los 27 satélites sobre la estación de Rawson, a la izquierda. Registro de ν TEC de los satélites que registraron la fulguración, a la derecha.

Tal y como mencionamos anteriormente, en la primera instancia de análisis solo aplicamos un filtrado para obtener los satélites que registraron el evento.

En esta segunda etapa de análisis, aplicaremos un segundo filtro, considerando la elevación de los satélites. La elevación es el ángulo medido desde la horizontal hacia la vertical, es decir, el ángulo complementario al cenit. La elección de la elevación dependerá del tipo de análisis que se quiera realizar. A mayor elevación (es decir, que la distancia cenital sea más cercana a la vertical del lugar), mejor será la representación de esa

estación. La razón para tomar registros con una elevación cercana a la vertical es que la función de mapeo comete un menor error cuanto más cercano esté el ángulo de elevación a la vertical del lugar. De este modo, los registros serán más representativos de la ionósfera sobre la estación en cuestión. En otras palabras, cuanto menor sea el ángulo cenital (mayor elevación), más representativa será la traza respecto de la fulguración que se está analizando en la estación. Aunque también tengo que tener en cuenta que si la elevación es muy cercana a la vertical del lugar, probablemente no tendré muchos registros para analizar, es decir, no tendré una cobertura temporal adecuada para analizar la fulguración. Por ende hay que llevar el análisis encontrando un equilibrio en estas cuestiones. Además, cuanto mayor es la elevación, menor es el error de la función de mapeo, es decir es más confiable el pasar del sTEC a ν TEC. Por ende vamos a considerar aquellos satélites cuya elevación sea mayor a 55° , de esta manera estará más cerca del cenit y tendremos una buena cobertura temporal. Además, al igual que como hicimos con el campo magnético, vamos a ver la variación que hubo en el ν TEC entre un instante anterior y un instante posterior al evento (30 minutos para el instante previo, es decir, desde las 13:54 hasta las 14:24, mientras que para el instante posterior va a depender del análisis de cada estación, teniendo en cuenta que cada muestra fue tomada cada 30 segundos), y sobre ambos instantes haremos un ajuste polinómico de bajo grado (cuadrático). Teniendo los siguientes resultados:

La Plata (ver figura 31):

En el caso de La Plata, el registro se redujo a 2 satélites que registraron el evento. Sin embargo, las muestras para el satélite 15 solo llegaron hasta las 15:00 horas, y las muestras del satélite 21 comenzaron a las 14:19 (ambos casos se deben al filtro de elevación). No obstante, estos datos son suficientes para realizar el ajuste. En cuanto al instante posterior, las muestras se tomaron desde las 14:56 hasta las 15:26, siendo el satélite 21 quien registró todo ese intervalo de forma completa.

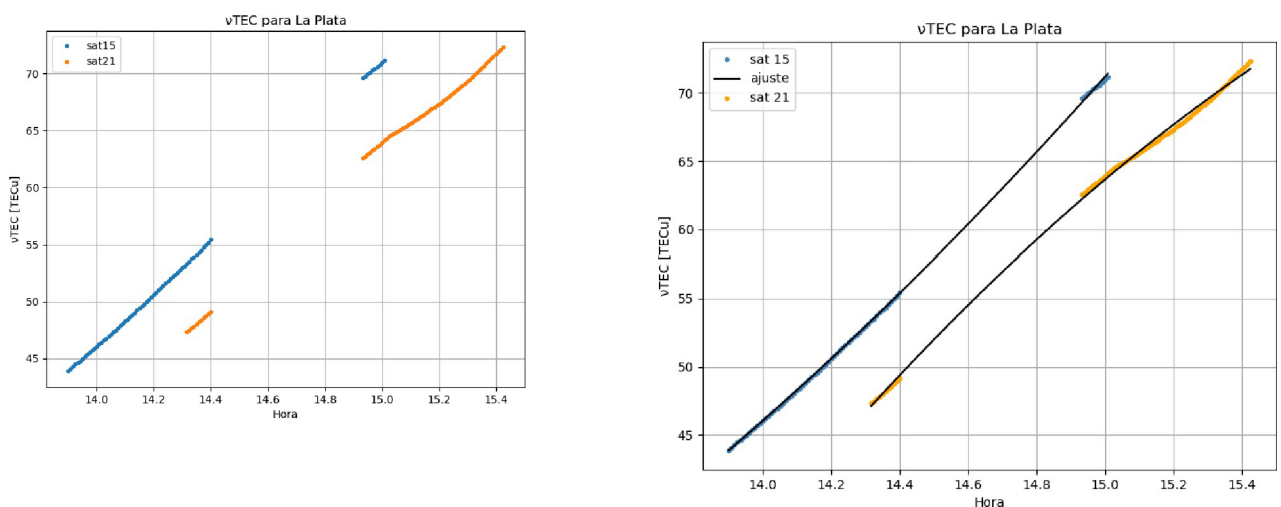


Figura 31: Registro de ν TEC de los 2 satélites sobre la estación de La Plata junto con el ajuste, respectivamente.

Córdoba (ver figura 32):

En Córdoba, el registro se redujo a 2 satélites que registraron el evento: el satélite 3 y el satélite 21. Ambos satélites registraron de forma completa ambos intervalos previstos, siendo que el instante posterior abarca desde las 15:16 hasta las 15:27, ya que la recuperación se observa a partir de las 15:16.

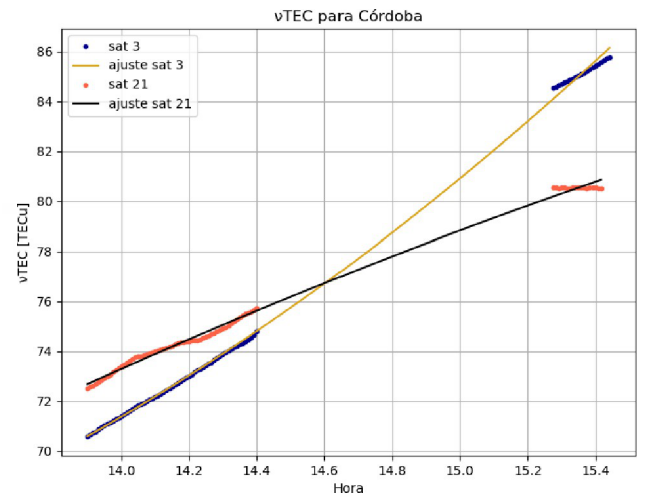
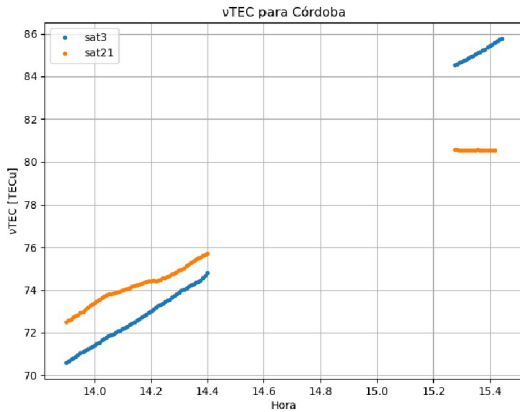


Figura 32: Registro de ν TEC de los 2 satélites sobre la estación de Córdoba junto con el ajuste, respectivamente.

Rawson (ver figura 33):

En Rawson, el registro se redujo a 4 satélites que registraron el evento; sin embargo, solo 2 de ellos registraron ambos intervalos de forma completa: el satélite 3 y el satélite 21. En esta estación, se observa que la recuperación del ν TEC se da a partir de las 15:12, por lo que las muestras se tomaron a partir de ese momento hasta las 15:27.

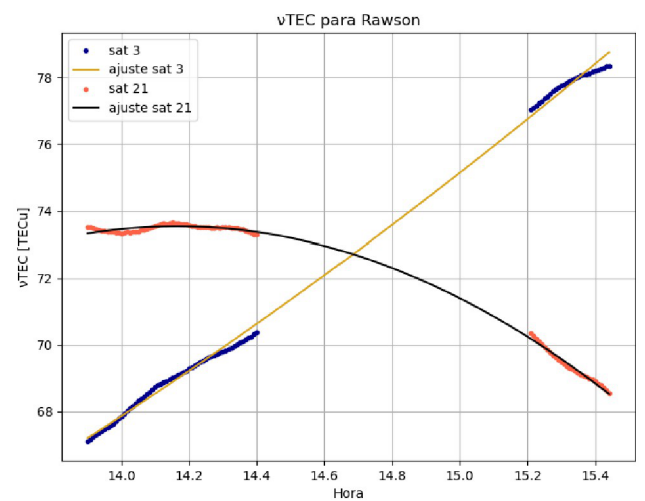
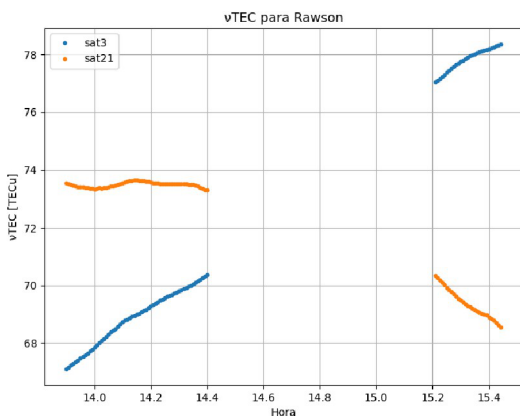


Figura 33: Registro de ν TEC de los 2 satélites sobre la estación de Rawson junto con el ajuste, respectivamente.

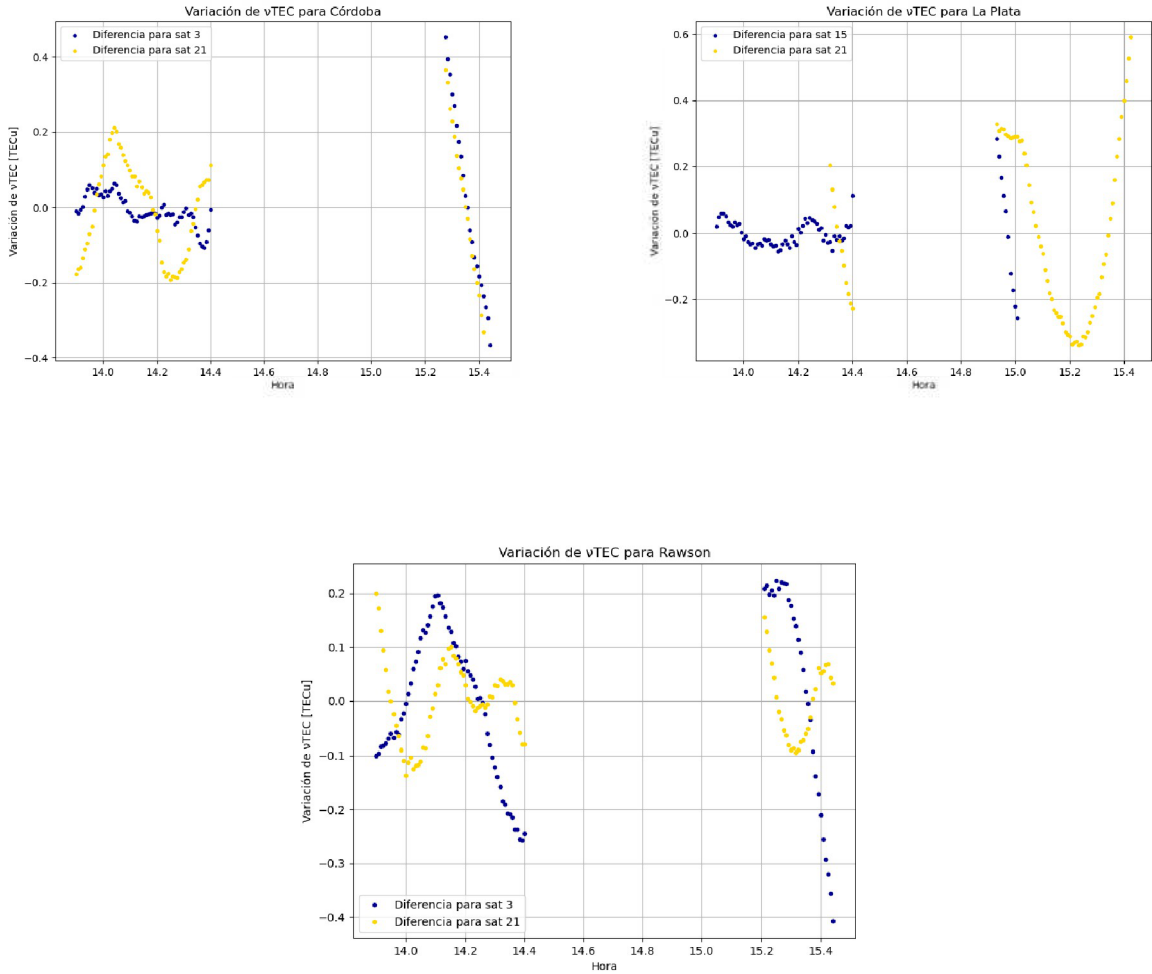


Figura 34: Variación entre el νTEC y el ajuste para las 3 estaciones, Córdoba y La Plata (arriba) y Rawson (abajo).

En la figura 34, se puede observar la diferencia entre el valor del contenido total electrónico vertical (νTEC) para las tres estaciones (Córdoba, La Plata y Rawson) y el ajuste realizado. En las tres estaciones, las variaciones entre el νTEC observado y el ajustado son mínimas, lo que indica que los ajustes fueron muy precisos. Incluso para el caso del ajuste con la mayor variación (0.6 TECu), que corresponde al satélite 21 en La Plata, el ajuste sigue siendo adecuado. En los demás casos, las diferencias son aún menores: 0.25 TECu para el satélite 15 en La Plata, hasta 0.45 y 0.36 TECu para los satélites 3 y 21, respectivamente, en Córdoba, y hasta 0.4 y 0.2 TECu para los satélites 3 y 21, respectivamente, en Rawson. Por lo tanto, podemos concluir que los ajustes representan muy bien los valores reales del νTEC .

Una vez confirmado que los ajustes reflejan adecuadamente el νTEC , podemos proceder a analizar la diferencia entre el valor del νTEC durante la fulguración y el valor ajustado, el cual representa de manera aproximada el νTEC que se habría tenido si la fulguración no hubiese ocurrido.

En las figuras 35, 36 y 37, se observa la diferencia entre el νTEC durante la fulguración y el ajuste, además en el cuadro 8 se presentan las principales características para cada estación. Esto nos permite ver cómo la

fulguración afecta el ν TEC, es decir, cuánto aumenta su valor en comparación con el que habría tenido si el evento no se hubiese originado.

La Plata (ver figura 35): La variación máxima para el satélite 15 ocurre a las 14:31 horas y es de 7.5 TECu, mientras que para el satélite 21, a la misma hora, es de 3.8 TECu.

Córdoba (ver figura 36): La variación máxima para el satélite 3 se da a las 14:31 horas y es de 5.2 TECu, mientras que para el satélite 21, a la misma hora, es de 5.4 TECu, muy similares ambos valores.

Rawson (ver figura 37): La variación máxima para el satélite 3 se da a las 14:31 horas y es de 5 TECu, mientras que para el satélite 21, a la misma hora, es de 4.8 TECu, siendo también muy similares ambos valores.

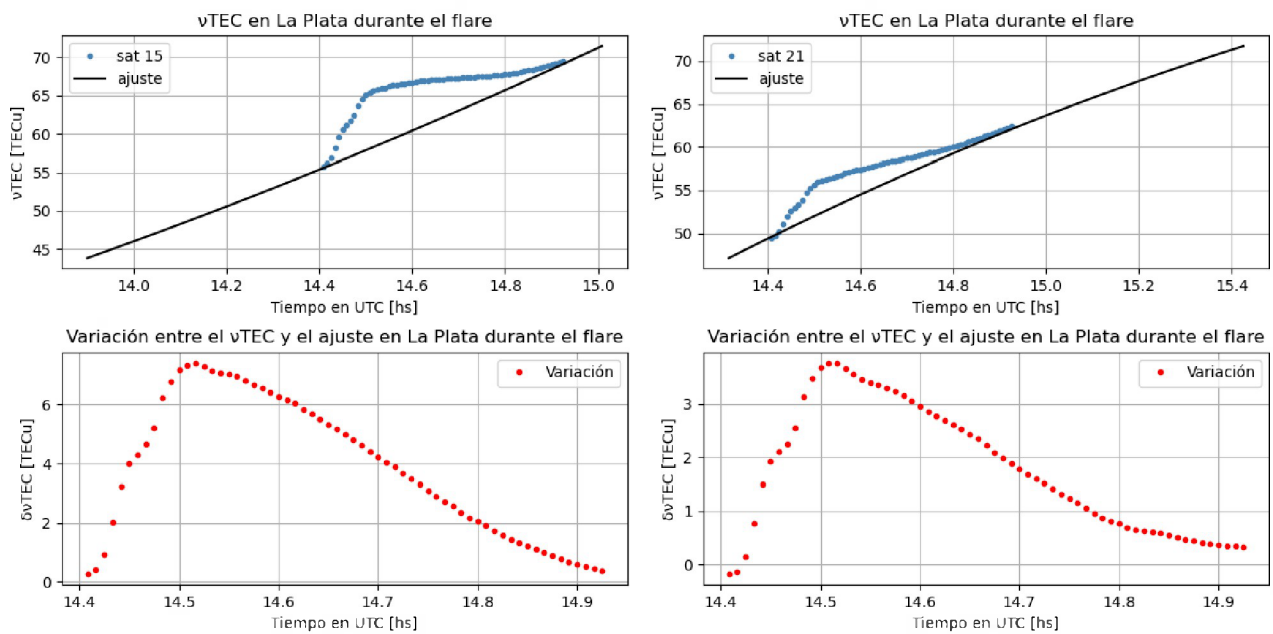


Figura 35: Valor del ν TEC y el ajuste durante la fulguración (arriba). Diferencia entre ambos (abajo). Tanto para el satélite 15 (izquierda) como para el satélite 21 (derecha).

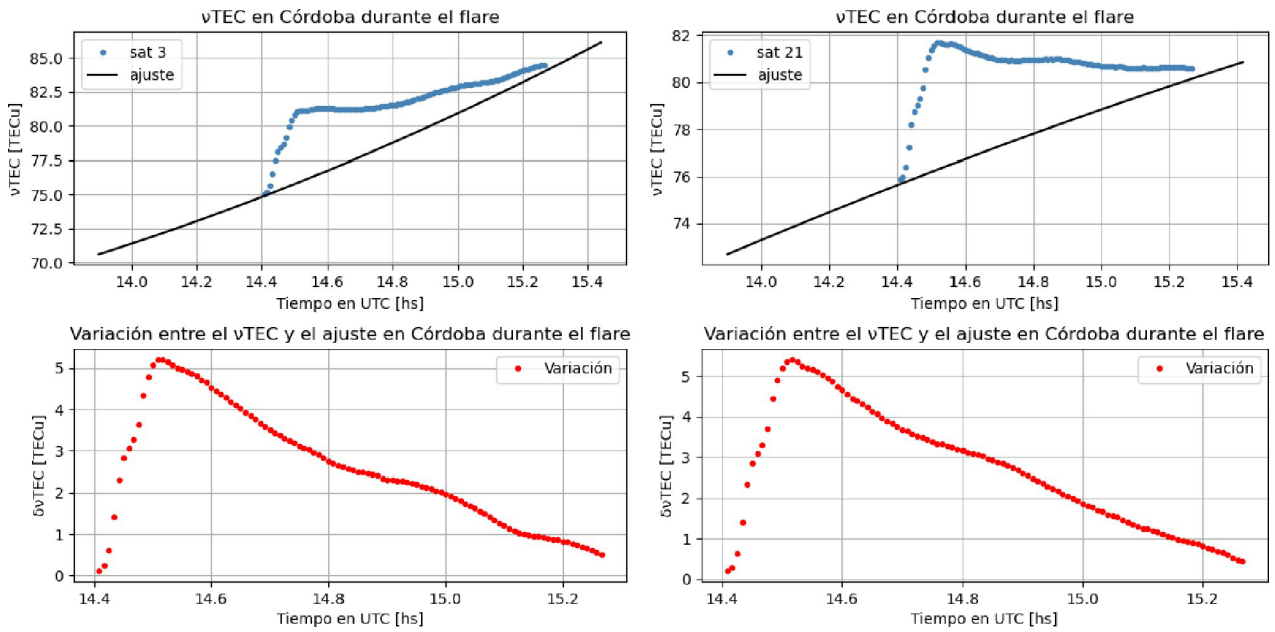


Figura 36: Valor del ν TEC y el ajuste durante la fulguración (arriba). Diferencia entre ambos (abajo). Tanto para el satélite 3 (izquierda) como para el satélite 21 (derecha).

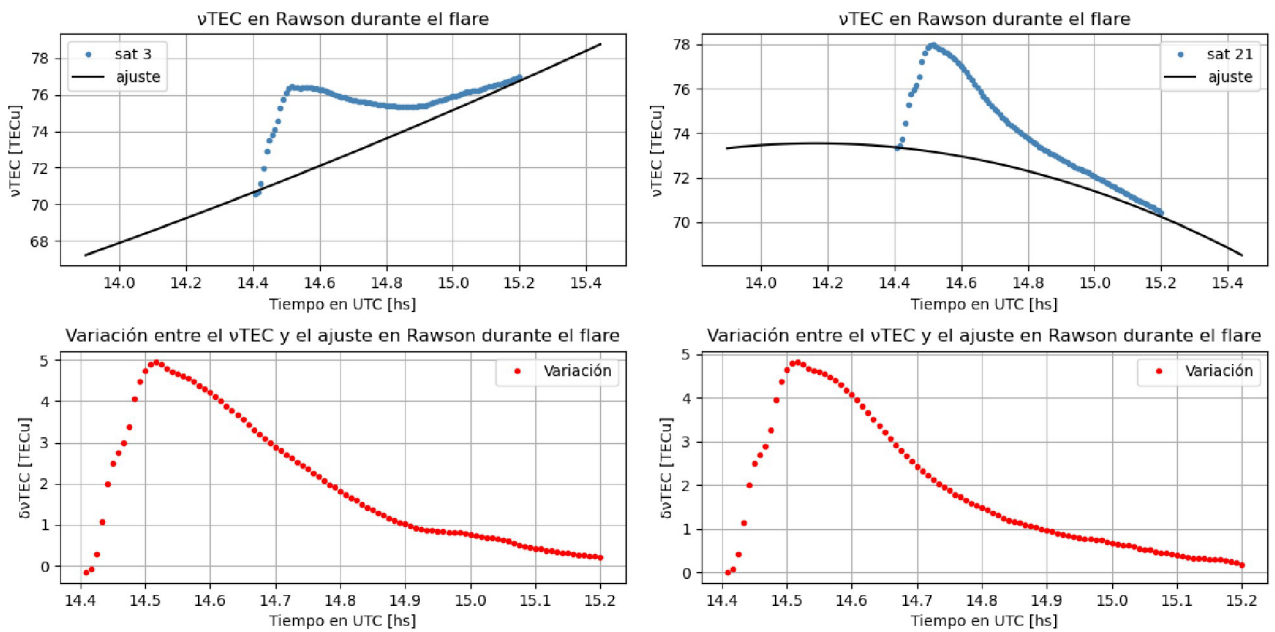


Figura 37: Valor del ν TEC y el ajuste durante la fulguración (arriba). Diferencia entre ambos (abajo). Tanto para el satélite 3 (izquierda) como para el satélite 21 (derecha).

Ajuste sobre el decaimiento para la variación del ν TEC en las 3 estaciones:

Para ambos registros de cada estación, se decidió que la recuperación comenzó de forma clara a partir de las 14:36 horas, es decir, que a partir de ese momento se tomó el ajuste para el decaimiento.

En primer lugar, el ajuste se llevó a cabo utilizando la expresión (16), que representa el perfil α , cuyos resultados se muestran en la figura 38. Posteriormente, se realizó el ajuste con el perfil β , utilizando la expresión (18), cuyos resultados se presentan en la figura 39.

Visualmente, se observa que el perfil β ajusta mejor que el perfil α para ambos registros de cada estación. Este resultado también se confirma mediante el MSE (ver cuadro 7), donde los valores son más bajos para el ajuste con el perfil β . Además, se puede comprobar que el decaimiento del ν TEC es menor que el decaimiento del campo ($K = 0.137$), aunque el decaimiento para ambos registros en La Plata es ligeramente inferior.

Análisis de la velocidad de cambio del $\delta\nu$ TEC

Podemos observar en las figuras 40, 41 y 42 cómo la fulguración afecta a la velocidad del $\delta\nu$ TEC para ambos registros en cada estación (ver cuadro 8). En todos los casos, se aprecia que tanto en el instante previo como en el posterior al evento, la velocidad es relativamente baja y sigue una tendencia coherente. Sin embargo, a partir de las 14:24, se produce un salto significativo en los valores, mostrando dos picos separados por dos minutos. Es decir, se observa una aceleración, seguida de una desaceleración y luego una nueva aceleración, para finalmente desacelerar. Esto sugiere que podrían haber ocurrido dos eyecciones de radiación extra independientes. El primer pico se alcanza a las 14:27, y el segundo a las 14:29, siendo este patrón consistente para los seis registros. El pico máximo de cada registro ronda los 1.5 TECu/min, excepto para el satélite 15 de La Plata, donde alcanza un valor de 2.5 TECu/min. En cuanto al segundo pico, su valor varía entre 1 TECu/min y 1.25 TECu/min, con la excepción del satélite 15 de La Plata, donde este alcanza los 2 TECu/min.

Perfil β			
Estaciones	Nº de satélite	β [1/min]	MSE
La Plata	15	0.106	0.12
	21	0.113	0.009
Córdoba	3	0.0415	0.03
	21	0.0417	0.05
Rawson	3	0.077	0.005
	21	0.08	0.003

Perfil α			
Estaciones	Nº de satélite	α [1/min]	MSE
La Plata	15	0.027	0.45
	21	0.066	0.06
Córdoba	3	0.016	0.09
	21	0.015	0.15
Rawson	3	0.036	0.09
	21	0.044	0.043

Cuadro 7: Cuadros comparativos entre los resultados del perfil β y el perfil α .

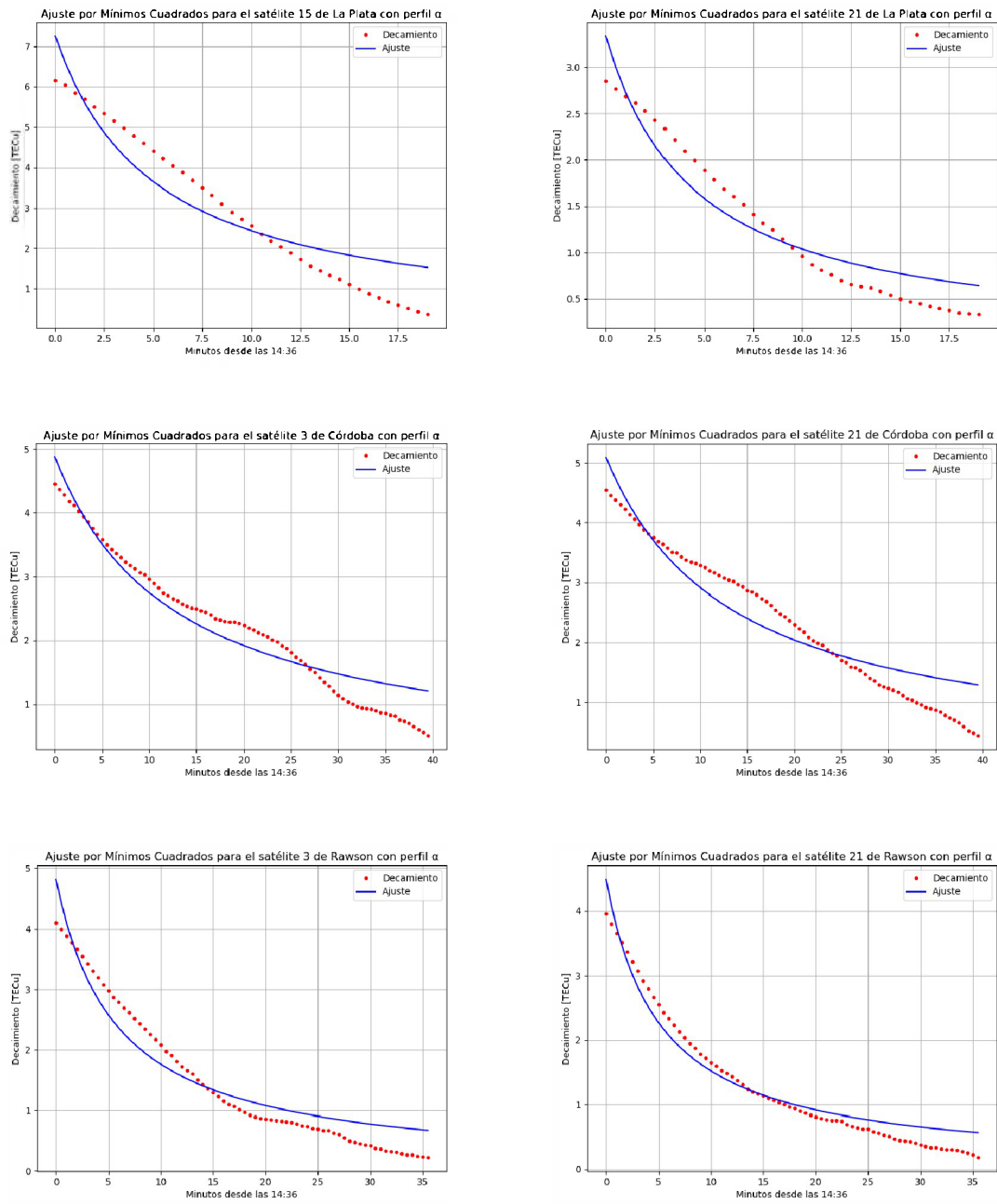


Figura 38: Ajuste por mínimos cuadrados al decaimiento del $\delta\nu\text{TEC}$ para todos los satélites de cada estación por medio del perfil α .

Estaciones	N° de satélite	Velocidad de cambio (valores en TECu/min y hora en UTC)				Variación	
		Pico Max	2° Pico Max	Hora pico max	Hora 2° pico max	$\delta\nu\text{TEC}$ max	Hora $\delta\nu\text{TEC}$ max
La Plata	15	2.4	2	14:27	14:29	7.5	14:31
	21	1.6	1.3	14:27	14:29	3.8	14:31
Córdoba	3	1.6	1.2	14:27	14:29	5.2	14:31
	21	1.5	1.25	14:27	14:29	5.4	14:31
Rawson	3	1.5	1.2	14:27	14:29	5	14:31
	21	1.3	1.04	14:27	14:29	4.4	14:31

Cuadro 8: Principales características de la velocidad de cambio y de la variación para los 6 registros.

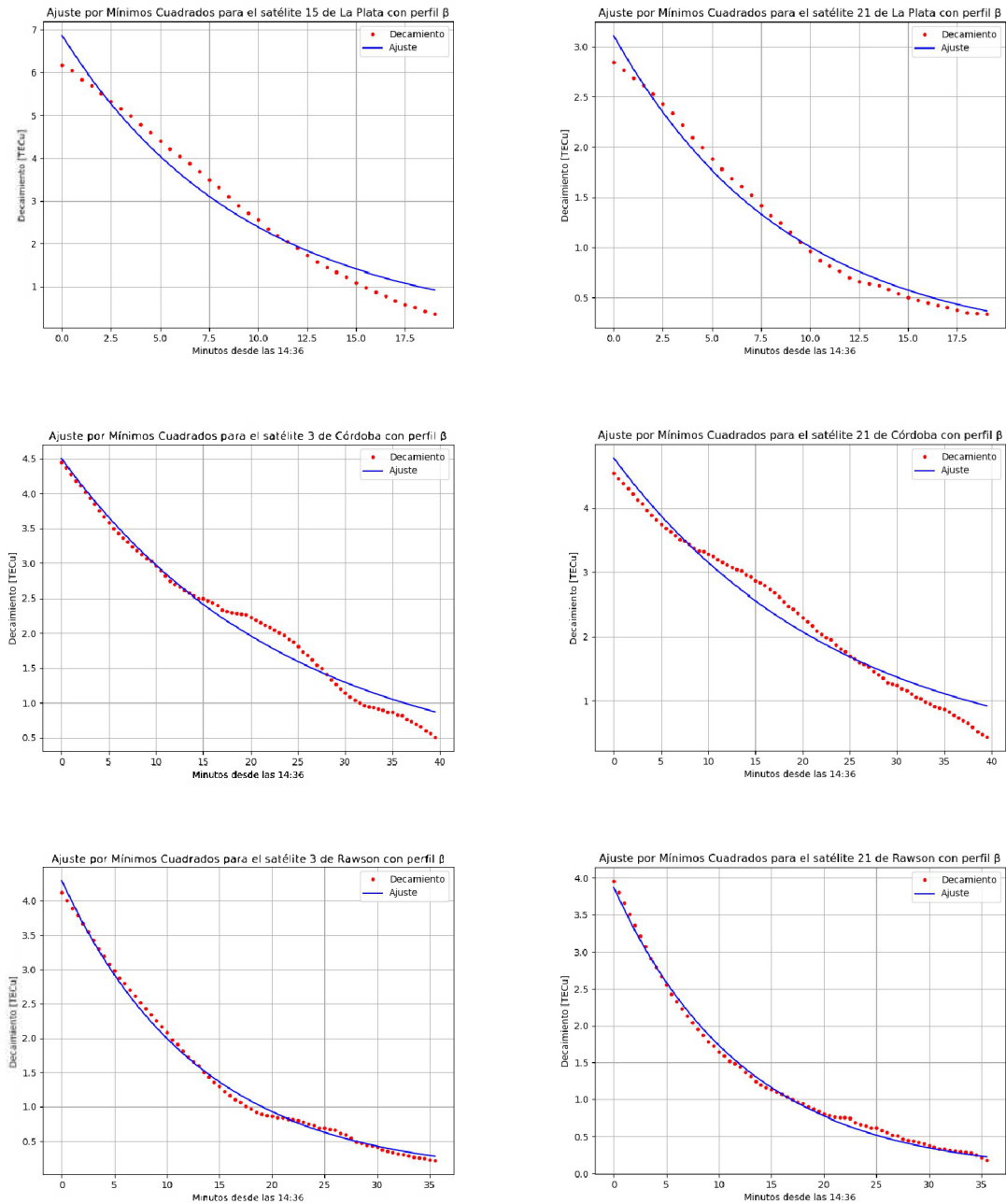


Figura 39: Ajuste por mínimos cuadrados al decaimiento del $\delta\nu\text{TEC}$ para todos los satélites de cada estación por medio del perfil β .

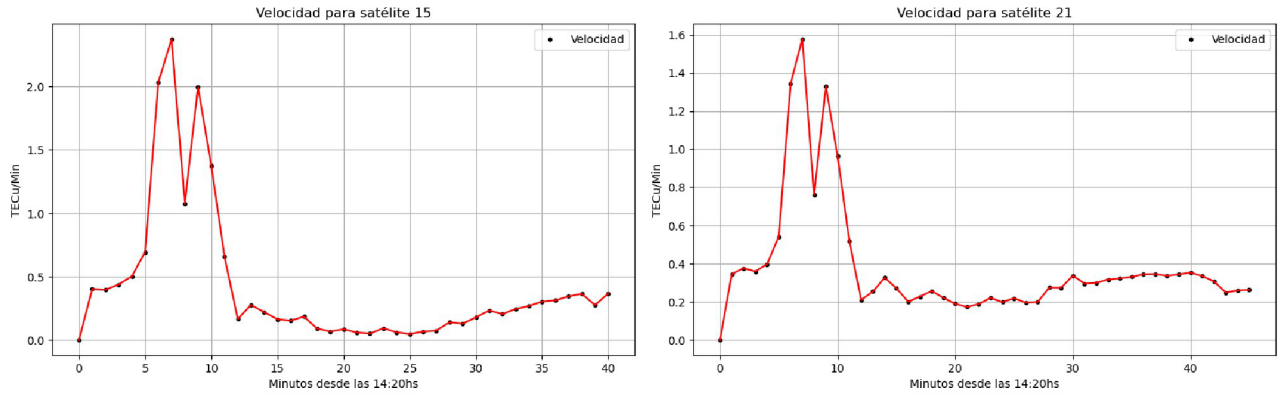


Figura 40: Velocidad de cambio del $\delta\nu\text{TEC}$ para los satélites 15 (izquierda) y 21 (derecha) sobre la estación de La Plata.

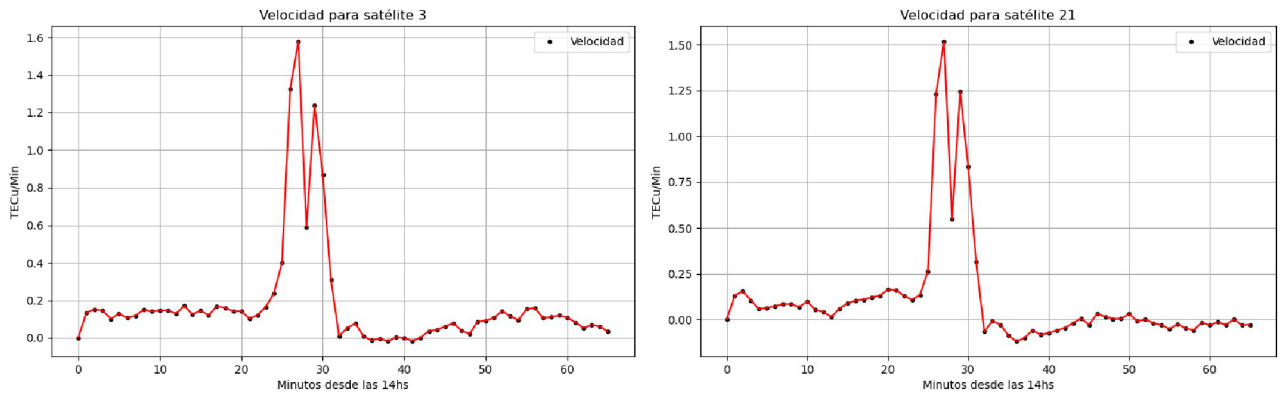


Figura 41: Velocidad de cambio del $\delta\nu\text{TEC}$ para los satélites 3 (izquierda) y 21 (derecha) sobre la estación de Córdoba.

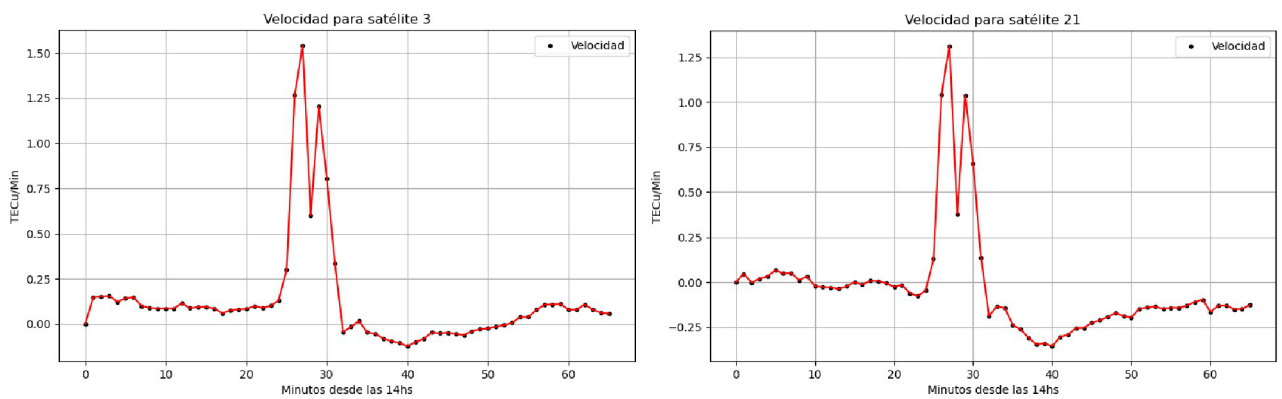


Figura 42: Velocidad de cambio del $\delta\nu\text{TEC}$ para los satélites 3 (izquierda) y 21 (derecha) sobre la estación de Rawson.

4.4. Análisis sobre la fulguración del 4 de noviembre de 2003

El análisis sobre esta fulguración fue exactamente el mismo que se llevó a cabo sobre la fulguración del 2001, con la diferencia que se muestran los resultados más relevantes.

4.4.1. Respuesta del campo magnético ante la fulguración

Podemos apreciar claramente el efecto de la fulguración, tanto para el campo total F como para sus componentes X , Y , Z (ver figura 43). La fulguración comienza a las 19:29 horas en tiempo universal, sin embargo el efecto comienza a ser notorio, tanto en el campo F como para sus componentes, a las 19:40 horas, mientras que el pico máximo se alcanza a las 19:57. En esos 17 minutos el valor del campo F y el de sus componentes aumentó considerablemente. 17 nT para F , 21 nT para X , 29 nT para Y , 3 nT para Z .

Luego se procedió con el ajuste (cuadrático) sobre los instantes previos y posteriores al efecto de la fulguración. Dichos instantes abarcan los intervalos de 19:31 hs a 19:40 hs y de 20:50 hs a 21:00 hs, respectivamente. Al hacer la diferencia entre los valores reales y los de ajuste, se observó que los resultados no van más allá de 1 nT, por lo que se concluyó que es un muy buen ajuste.

A partir del ajuste cuadrático se determinó la variación tanto para F como para sus componentes, tal y como se observa en la figura 44. Donde los valores máximos para cada variación son de 12.85 nT para δF , 21.5 nT para δX , 25.7 nT para δY , 7 nT para δZ . Para las variaciones de F y de X sus respectivos valores máximos se dieron a las 19:57 hs, mientras que para las variaciones de Y y de Z los máximos se dieron a las 19:53 hs y a las 19:56 hs, respectivamente. Podemos observar que durante el decaimiento de cada componente y de F , este no resulta ser suave como en el caso de la fulguración de 2001. Se evidencia una perturbación, un efecto ondulatorio que altera el decaimiento. Es decir, la fulguración tiene acoplada una señal espuria que no puede ser aislada, posiblemente debido a que el evento ocurrió en un día medianamente perturbado. Esto podría estar relacionado, en parte, con una tormenta. Además, en rayos X se observa cómo, mientras la fulguración $X40$ está finalizando (el flujo vuelve a un estado de normalidad), otras fulguraciones de tipo M se acoplan a ella (ver figura 15), lo que contribuye a esta perturbación.

Para calcular el ajuste sobre el decaimiento de la variación de F , en primera instancia, se decidió usar esta expresión (11) para obtener la variación de F (al igual que con la fulguración de 2001), y a partir de esta variación se ajustó su decaimiento con la expresión exponencial (12), tal y como se puede ver en la figura 45. Lamentablemente debido a la señal acoplada, que perturba el decaimiento, el ajuste también se vio afectado y no se ve un ajuste tan bien representado como en el caso de la fulguración del 2001, sin embargo, se puede apreciar que tiene un decaimiento aproximadamente exponencial, donde el coeficiente de decaimiento es $K = 0.054/\text{min}$.

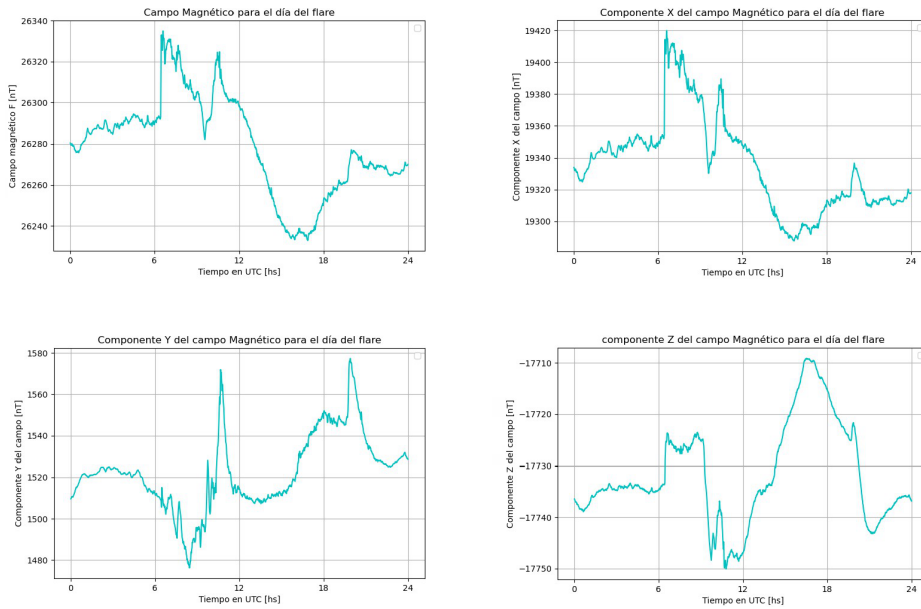


Figura 43: Registro del campo magnético F y sus componentes X, Y, Z correspondientes al 4 de noviembre de 2003.

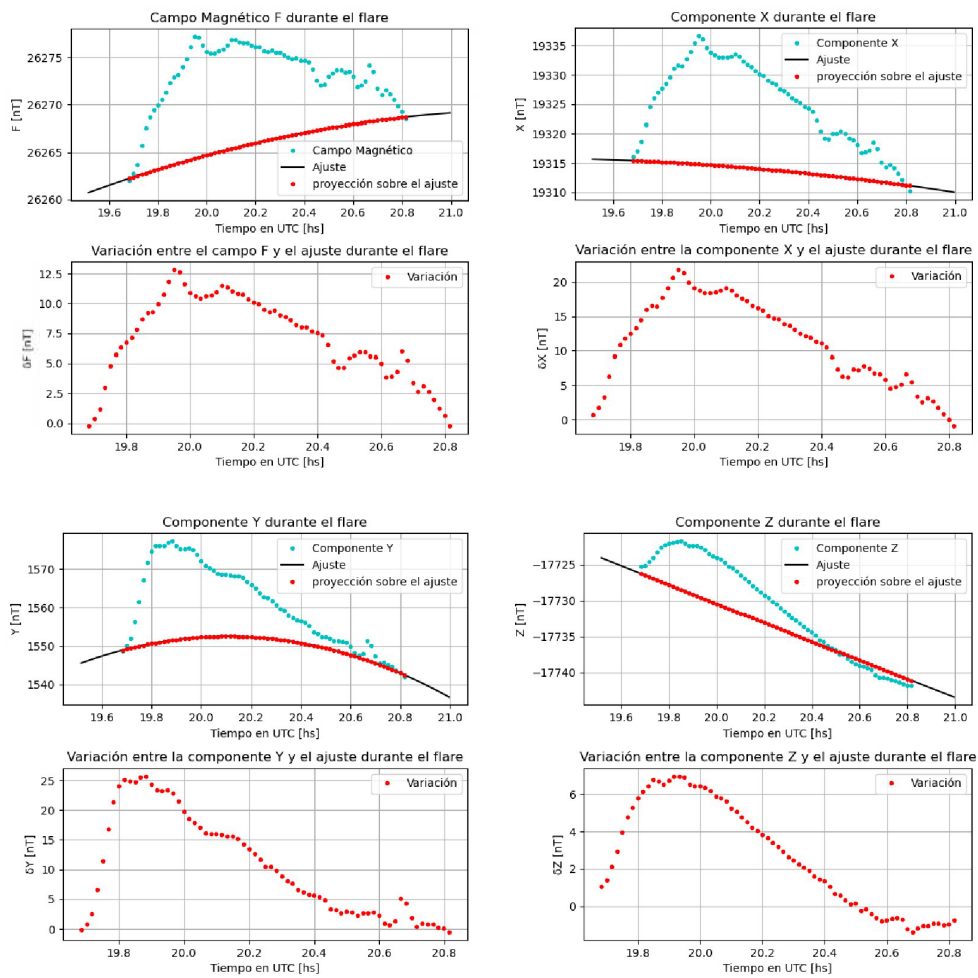


Figura 44: Valor del campo F y sus componentes X, Y, Z, junto con el ajuste durante la fulguración. Además de la diferencia entre ambos.

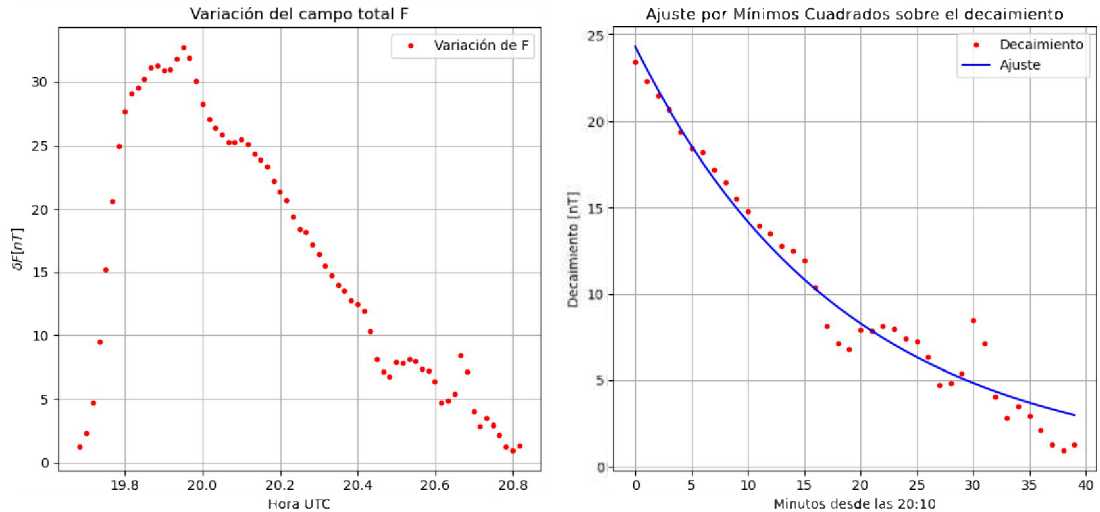


Figura 45: Variación del campo F (izquierda) y el ajuste sobre el decaimiento (derecha).

4.4.2. Análisis de la fulguración sobre la ionósfera

En primera instancia se calculó el ν TEC a lo largo de todo el día juliano 52947, que corresponde al 4 de noviembre de 2003. Al igual que para la fulguración de 2001 se tomaron las estaciones de La Plata, Córdoba y Rawson, cuyas coordenadas geográficas se muestran en el cuadro 6, junto con el ángulo cenital solar correspondiente a cada estación durante el pico máximo de este segundo evento.

El efecto de la fulguración sobre los registros de todas las estaciones se observa a partir de las 19:40 (al igual que el efecto sobre el campo magnético), tal y como vemos en la figura 46. Donde podemos ver el efecto de la fulguración sobre una serie de registros de ν TEC por parte de los satélites que registraron en el momento del evento. Se aprecia como el ν TEC aumenta considerablemente en pocos minutos, sin embargo, para un análisis más preciso se llevó a cabo un filtro. Dicho filtro tiene en cuenta la elevación, la cual será mayor a los 55° (al igual que la fulguración del 2001). A partir de este filtro el registro se limita a 1 o 2 satélites, sin embargo, el análisis se llevará a cabo sobre un registro de cada estación.

Luego se procedió a tomar los instantes previos y posteriores al evento para realizar un ajuste cuadrático sobre esos instantes. Dichos instantes abarcan los intervalos de 19:26 horas a 19:40 horas y de 20:33 horas a 21 horas, respectivamente. Para determinar si el ajuste es acorde, se realizó una diferencia entre los valores reales y los del ajuste, donde los valores máximos de estas diferencias no van más allá de 0.6 TECu. Una vez corroborado el ajuste, se toma el intervalo de tiempo donde se aprecia el efecto de la fulguración y se lleva a cabo la diferencia entre los valores reales durante la fulguración y el ajuste, así se obtuvieron las variaciones, donde sus características se las puede ver en la figura 47 y en el cuadro 9.

Sobre la variación se decidió que la recuperación comenzó a las 20:09 horas, es decir que a partir de ese horario se tomó el ajuste para el decaimiento. En primera instancia, se llevó a cabo el ajuste utilizando el perfil α (ver expresión 3), cuyos resultados se presentan en la figura 48. Posteriormente, se realizó el ajuste

con el perfil β (ver expresión 10), cuyos resultados también se muestran en la figura 48. Visualmente, se observa que el perfil β ajusta mejor que el perfil α para el satélite 20 en las tres estaciones analizadas. Esto se confirma a partir del error cuadrático medio (MSE) (ver cuadro 10), donde los valores son consistentemente menores para el perfil β . Además, se puede corroborar que el decaimiento del ν TEC, a diferencia del otro evento, es mayor que el del campo ($K = 0.054/\text{min}$).

Finalmente se procedió a calcular la velocidad de cambio del $\delta\nu\text{TEC}$, donde sus características también las vemos en el cuadro 9 y en la figura 50. Para este caso, a diferencia del otro evento analizado, podemos ver como tiene un solo máximo en los 3 registros, por lo que podemos decir que hay una única fuente de radiación extra.

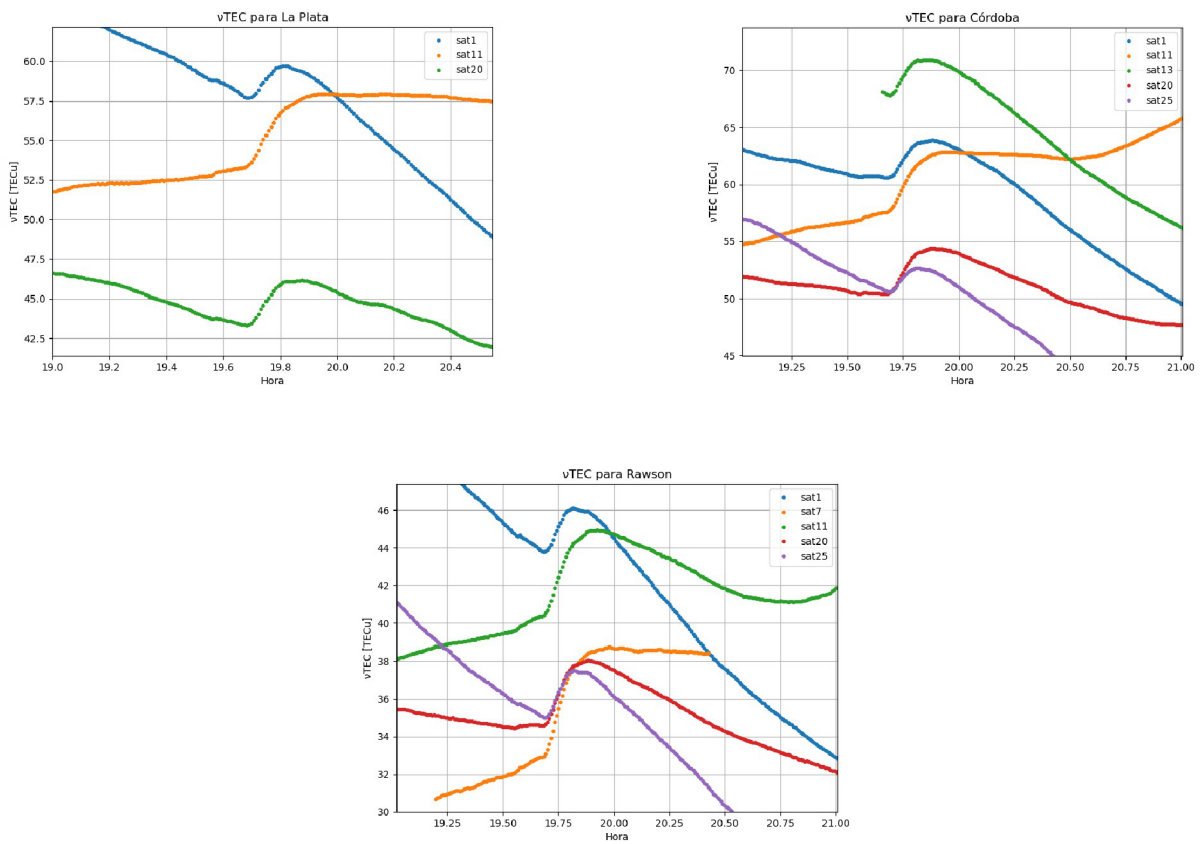


Figura 46: Registros de los satélites entre las 19 horas y 21 horas.

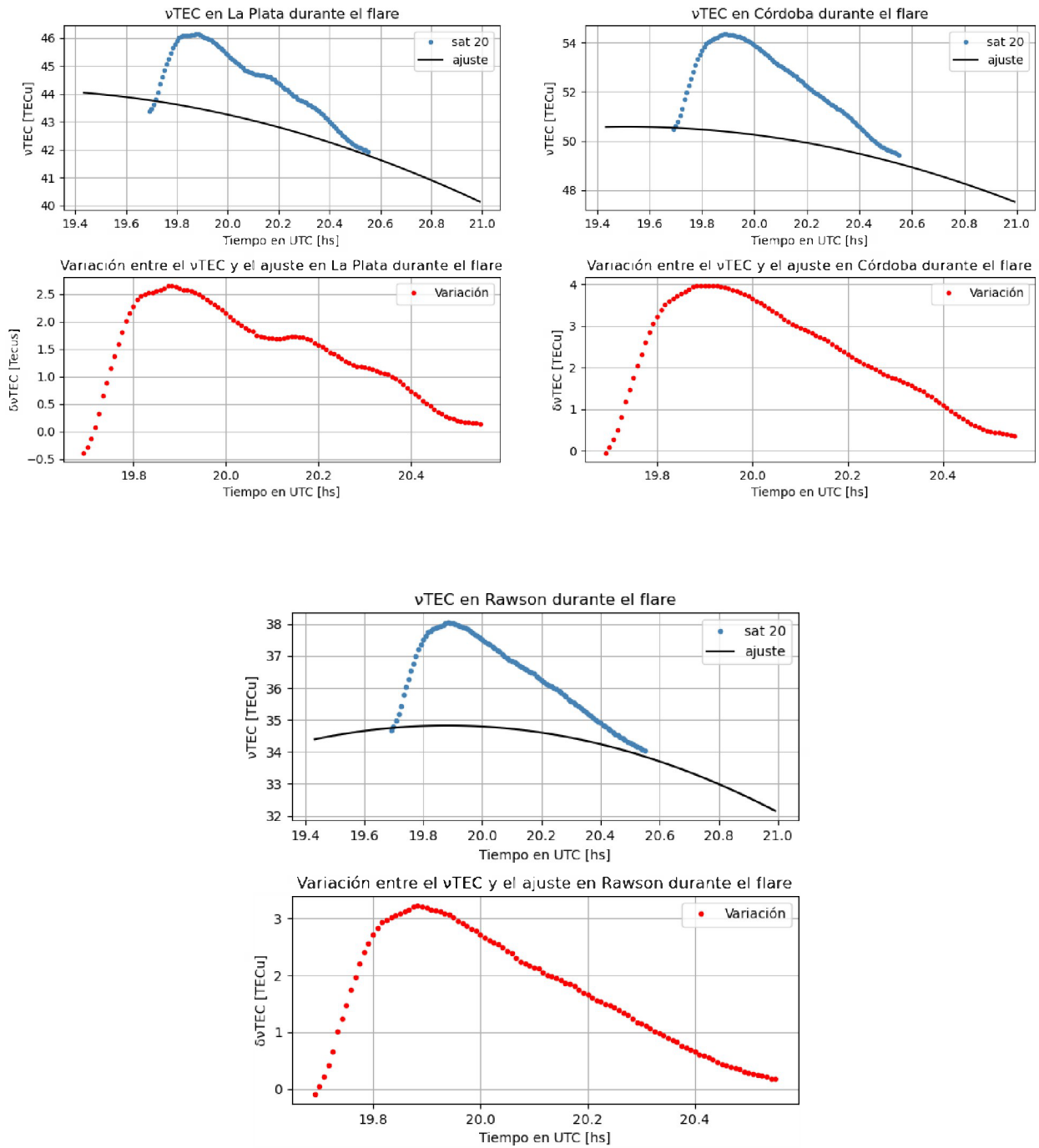


Figura 47: Registros del satélite 20 de cada estación durante la fulguración, junto con el ajuste (arriba) y la variación del ν TEC (abajo)

Estaciones	N° de satélite	Variación		Velocidad de cambio	
		$\delta\nu\text{TEC max}$	Hora $\delta\nu\text{TEC max}$	Max [TECU/min]	Hora pico max
La Plata	20	2.65	19:53	0.55	19:44
Córdoba	20	3.95	19:55	0.67	19:44
Rawson	20	3.22	19:53	0.6	19:44

Cuadro 9: Características de la variación del ν TEC y de la velocidad de cambio.

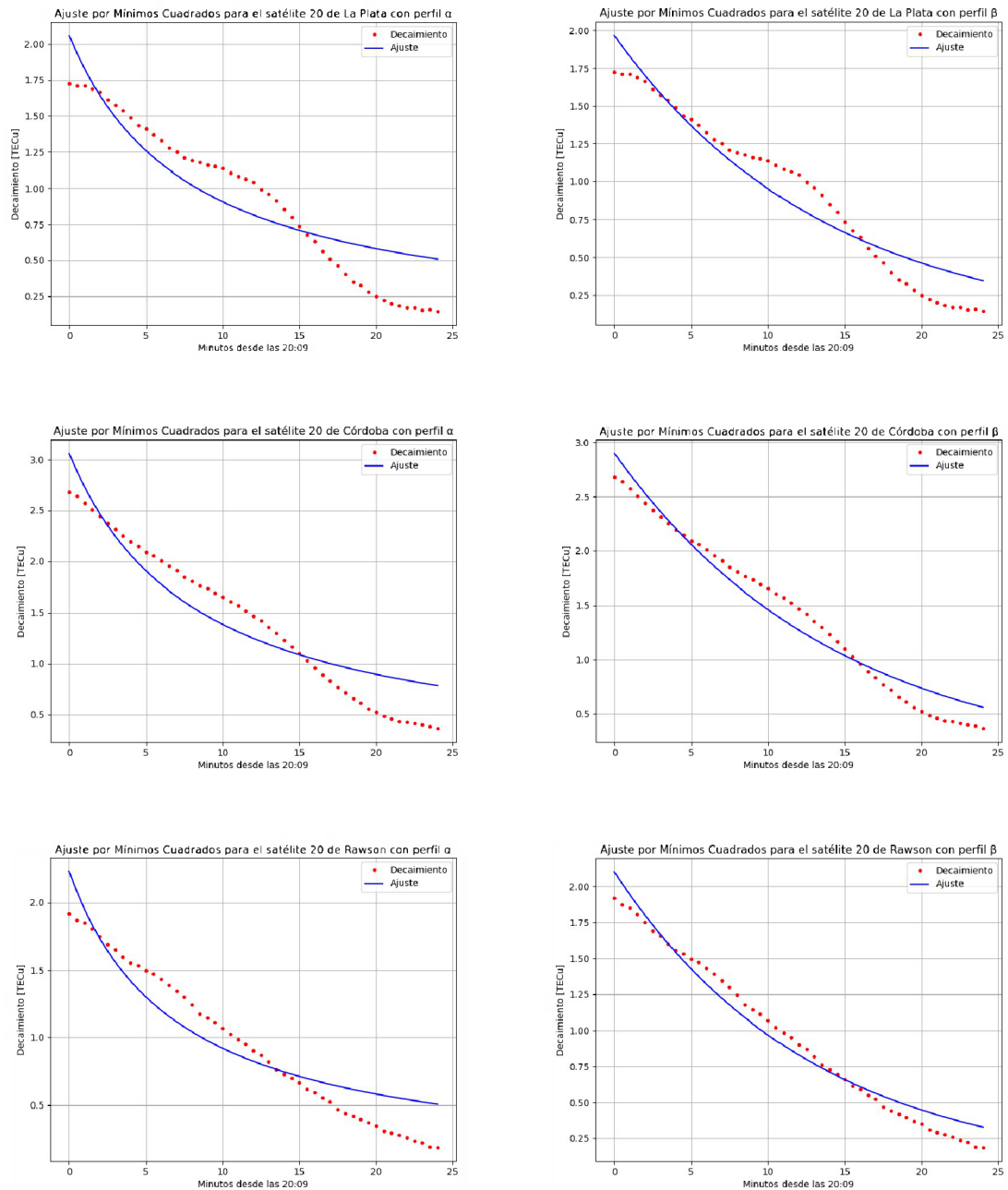


Figura 48: Ajuste por mínimos cuadrados al decaimiento del $\delta\nu\text{TEC}$ para el satélite 20 con el perfil α (izquierda) y el perfil β (derecha).

Estaciones	Perfil β		
	Nº de satélite	β [1/min]	MSE
La Plata	20	0.072	0.02
Córdoba	20	0.069	0.02
Rawson	20	0.077	0.008

Estaciones	Perfil α		
	Nº de satélite	α [1/min]	MSE
La Plata	20	0.062	0.05
Córdoba	20	0.039	0.07
Rawson	20	0.064	0.03

Cuadro 10: Cuadros comparativos entre los resultados del perfil β y el perfil α .

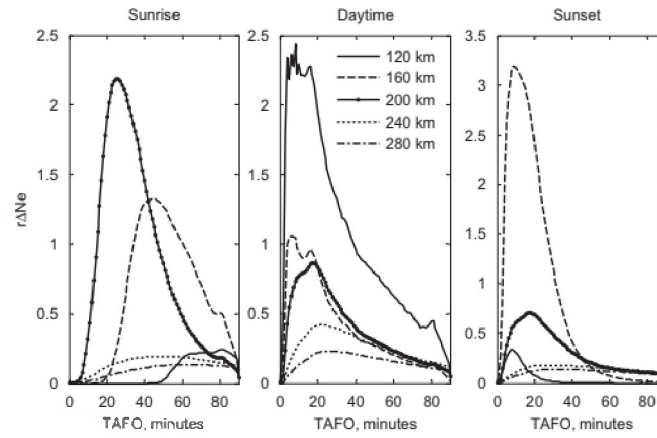


Figura 49: Evolución temporal del cambio relativo en Ne, $r\Delta Ne$, en altitudes de 120, 160, 200, 240 y 280 km, cuando se produce una fulguración alrededor del amanecer (05 LT, $SZA = 101.1^\circ$), durante el día (12 LT, $SZA = 42.7^\circ$), y atardecer (18 LT, $SZA = 90.1^\circ$) en el equinoccio. Fuente [Le et al. \[2007\]](#)

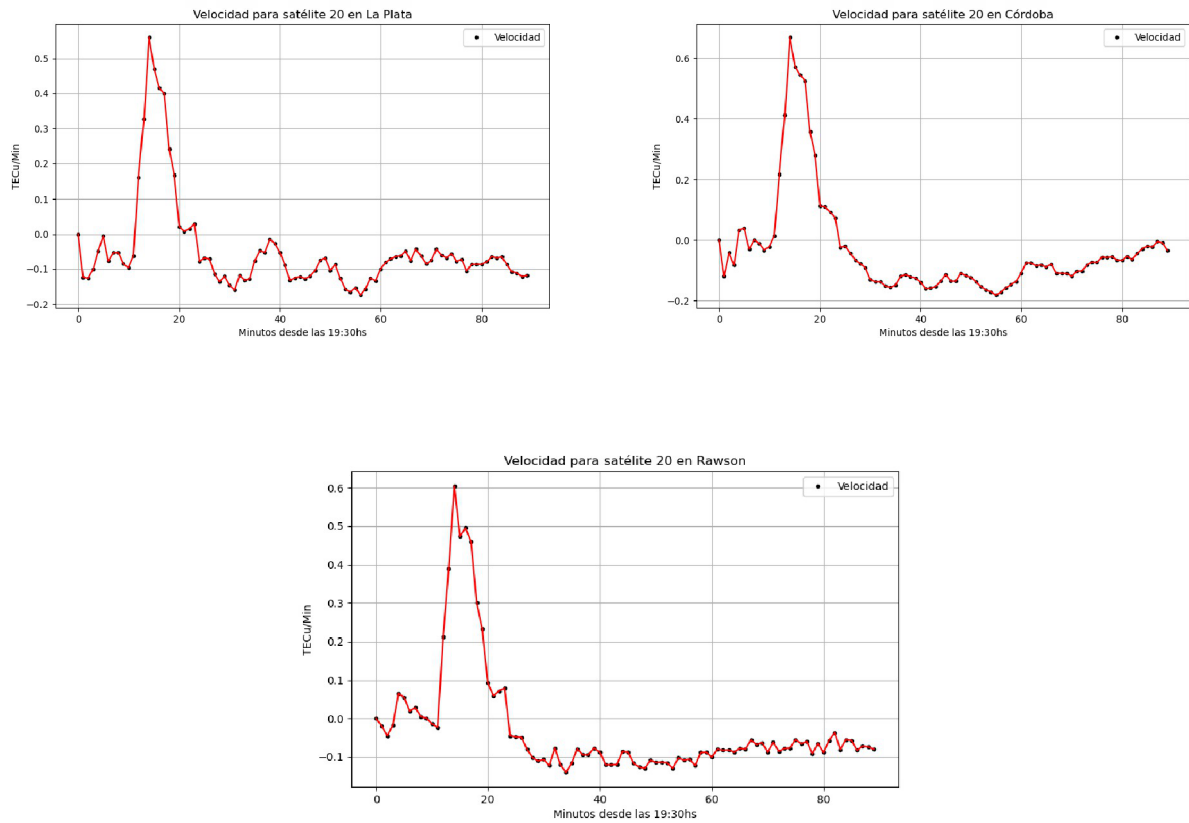


Figura 50: Velocidad del $\delta\nu TEC$ para el satélite 20 de cada estación.

5. Conclusiones

- Las fulguraciones seleccionadas fueron de gran intensidad y afectaron notablemente tanto a la ionósfera como al campo geomagnético. En el caso del ν TEC, se observó que los máximos de respuesta en las tres estaciones ocurrieron posteriormente al pico registrado en X para el evento del 13 de diciembre de 2001. Específicamente, el pico máximo en X se registró a las 14:30, coincidiendo con el máximo del campo geomagnético, mientras que los máximos del ν TEC en las tres estaciones ocurrieron un minuto después, a las 14:31.

Para el segundo evento, el 4 de noviembre de 2003, no se sabe con certeza cuándo se alcanzó el pico máximo en X debido a la saturación de los instrumentos encargados del registro. Sin embargo, se estima que ocurrió alrededor de las 19:53. En ese mismo horario se registraron los valores máximos del ν TEC en las estaciones de La Plata y Rawson, mientras que en Córdoba el máximo se produjo a las 19:55. Por otro lado, el campo geomagnético alcanzó su pico máximo a las 19:57.

- Se podría pensar que cuanto más intensa sea una fulguración, mayor será su efecto sobre el ν TEC y el campo geomagnético. Si bien esto último se cumple, ya que se observó un mayor aumento del campo para la fulguración de clase X40, no ocurre lo mismo con el ν TEC, donde el mayor incremento se registró para la fulguración de clase X6.2. Esto indica que, además de la intensidad de la fulguración, es necesario considerar otros factores, como la posición del punto subsolar, que varía según la época del año y la hora del día, así como las condiciones geomagnéticas del momento. En este caso, la clave radica en el ángulo cenital solar: como se muestra en el cuadro 6, durante el pico máximo del segundo evento, los ángulos fueron significativamente mayor que en el primero, lo que implicó que las estaciones estaban más alejadas del punto subsolar. Esto explica la menor variación del ν TEC en comparación con el primer evento. Como se indicó en la ecuación (7), la tasa de producción de ionización no solo depende de la intensidad de la fulguración, sino también del ángulo cenital solar; a mayor ángulo, menor tasa de producción y, por lo tanto, menor incremento en el ν TEC. En resumen, cuanto más alejadas estén las estaciones del punto subsolar, menos significativa será la fotoionización y, en consecuencia, el efecto de la fulguración sobre el ν TEC será menor.
- Al tener en cuenta lo que dice el artículo de Le et al. [2007], que en la región F (por encima de los 200 km), el proceso de pérdida del ion dominante O⁺ por la reacción de intercambio ión-átomo es mucho más lento en comparación con la recombinación disociativa de los iones moleculares, lo que provoca una disminución más lenta del $r\Delta$ Ne en esta región, se observó que este comportamiento representó mejor a los datos de ambos eventos analizados en este estudio. Esto sugiere que la mayor pérdida de electrones en ambos casos ocurrió en capas superiores debido al mecanismo de attachment. Asimismo, estos resultados son concordantes con lo señalado en el trabajo de Le et al. [2007], donde se muestra para diferente hora local el cambio de la densidad electrónica a diferentes alturas durante una fulguración (ver figura 49): las capas más afectadas por fulguraciones que ocurren durante horas de la mañana

local (como el evento del 13 de diciembre de 2001) y horas de la tarde local (como el evento del 4 de noviembre de 2003) son las capas superiores, específicamente las ubicadas a 160 y 200 kilómetros de altura. Esto sugiere que el perfil β (el cual se comporta de manera proporcional a la densidad electrónica, y no al cuadrado de la densidad electrónica), es el más adecuado para describir los dos eventos analizados. Además, a diferencia del trabajo de Meza et al. [2009], se ajustó un perfil β , por consiguiente se recomendaría ajustar este tipo de perfil cuando las estaciones se encuentren ubicadas en horas de la mañana o en horas de la tarde.

- A partir del análisis de la velocidad de cambio de la $\delta\nu\text{TEC}$ (ver Figuras 40, 41 y 42), se puede especular que el evento del 13 de diciembre de 2001 presentó dos focos independientes de emisión de radiación adicional en el Sol, lo que sugiere una estructura morfológica de dos patas. Una razón podría ser que la radiación en $H\alpha$, que afecta más la producción de electrones a baja altura, sea diferente para cada una de las dos patas que conforman la fulguración. Sin embargo, habría que realizar más análisis de este tipo para llegar a algo más concluyente. Siguiendo una analogía de este razonamiento, la velocidad de cambio correspondiente a la $\delta\nu\text{TEC}$ del evento del 4 de noviembre de 2003 (ver Figura 50) mostró un único máximo. No obstante, debido a su gran intensidad y complejidad, este análisis no permite confirmar si presenta una estructura morfológica compacta o simple, aunque sí indica que está asociado a una única emisión preponderante.

Además, al comparar las velocidades de los picos máximos para cada evento, se observa que las velocidades de los dos picos del evento de 2001 (en las tres estaciones, ver cuadro 8) son mayores que las del pico del evento de 2003 en las mismas estaciones (ver cuadro 9). En particular, el primer pico del evento de 2001 presenta valores que son hasta 3 o incluso 4 veces mayores que los registrados en 2003.

6. Trabajos a futuro

- Este estudio podría ampliarse a fulguraciones de magnitud similar que ocurran en distintas horas del día, particularmente en el medio día local. Al comparar los efectos de fulguraciones de magnitudes similares ocurridas en la mañana, tarde y medio día, se podría investigar si los perfiles, α y β , siguen siendo representativos de los eventos a distintas horas del día. Esto permitiría observar si la fase de recuperación en la ionósfera se ajusta mejor con el perfil α para fulguraciones solares ocurridas alrededor del medio día local, como se sugiere en el trabajo de Le et al. [2007], el cual indica que las capas más bajas de la ionósfera son las más afectadas por fulguraciones en ese intervalo temporal.
- Otra posible extensión de este trabajo sería realizar un análisis similar en observatorios magnéticos situados en otras latitudes. En particular, sería interesante realizar un estudio en el hemisferio Norte utilizando observatorios que sean comparables a la estación de Trelew en el hemisferio Sur, es decir, alrededor de la misma longitud pero con latitud geomagnética opuesta. Este análisis permitiría verificar

si los efectos observados son consistentes en el punto opuesto a la estación de Trelew, y si existen diferencias muy marcadas con las variaciones en la respuesta de la ionósfera y el campo magnético a fulguraciones solares dependiendo de la latitud y en particular dependiendo del hemisferio.

- Además de las líneas de investigación mencionadas, el uso de técnicas de machine learning y deep learning ofrece un gran potencial para avanzar en el análisis de fulguraciones solares. Se propone desarrollar un clasificador semi-automático que permita identificar y categorizar fulguraciones solares con base en sus características, utilizando algoritmos como los árboles de decisión, K-means, y otras técnicas de agrupamiento. Este clasificador podría ser entrenado con grandes volúmenes de datos históricos de eventos solares, lo que permitiría mejorar la precisión en la identificación de fulguraciones según su magnitud, hora del día y otros parámetros relevantes.
- Por otro lado, el uso de deep learning, a través de redes neuronales, podría llevar este enfoque un paso más allá al desarrollar un predictor de estos eventos. El modelo podría predecir la probabilidad de ocurrencia y la intensidad de una fulguración solar en función de datos actuales y pasados, lo cual sería sumamente útil para mitigar los impactos de estos eventos. Tal predictor podría ser fundamental para la prevención de eyecciones de masa coronal y potenciales tormentas geomagnéticas, que tienen un impacto significativo en la tecnología y la salud humana. Un avance en este campo sería particularmente importante para el desarrollo de infraestructuras espaciales, como estaciones espaciales y bases en la Luna, donde la salud de los astronautas, los sistemas de comunicación y las tecnologías serían vulnerables a una intensa radiación solar producto de una fulguración.

Este tipo de herramientas no solo optimizaría los esfuerzos de predicción, sino que también proporcionaría información crítica para la toma de decisiones en tiempo real, mejorando nuestra capacidad de respuesta ante eventos solares extremos.

Este enfoque permitiría aplicar metodologías avanzadas para el análisis y predicción de eventos solares, abriendo nuevas oportunidades tanto para la investigación como para la implementación de soluciones tecnológicas en el ámbito espacial y de comunicaciones.

Referencias

- J. Aarons, M. Mendillo, and R. Yantosca. *GPS phase fluctuations in the equatorial region during sunspot minimum*. Radio Science, 1997.
- E.L. Afraimovich, A.T. Altyntsev, E.A. Kosogorov, N.S. Larina, and L.A. Leonovich. *Ionospheric effects of the solar flares of September 23, 1998 and July 29, 1999 as deduced from global GPS network data*. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2000.
- G. P. Apushkinskij, N. A. Topchilo, A. N. Tsyganov, and N. S. Nesterov. *Magnetic Field of Solar Prominences: The Procedure of Radio Observations*. John Wiley and Sons, 1996.
- M. R. Arghavani, C. T. Russell, J. G. Luhmann, and R. C. Elphic. *Interplanetary Magnetic Field Enhancements in the Solar Wind: Statistical Properties at 1 AU*. Elsevier Science, 1985.
- T. Bai and P. A. Sturrock. *Classification of Solar Flares*. Annual Reviews, 1989.
- Saradi Bora. *Ionosphere and radio communication*. Indian Academy of Sciences, 2017.
- K.S. Brathwaite and G. Rostoker. *DP2 current system in the ionosphere and magnetosphere*. Elsevier Science, 1981.
- E. A. Bruevich. *New Classification Parameter of Solar Flares Based on the Maximum Flux in Soft X-rays and on Duration of Flare*. Springer-Verlag, 2020.
- W.H. Campbell. *Introduction to Geomagnetic Fields*. Cambridge University Press, 1997.
- R.C. Carrington. *Description of a Singular Appearance seen in the Sun on September 1, 1859*. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 1859.
- S. Chapman. *Regular motions in the ionosphere: Electrical and magnetic relationships*. America-Bulletin of the American Society, 1961.
- S. Chapman and J. Bartels. *Geomagnetism, Vol. 2*. Oxford Press, 1940.
- L. Ciruolo, F. Azpilicueta, C. Brunini, A. Meza, and S.M. Radicella. *Calibration errors on experimental slant total electron content determined with GPS*. Journal of Geodesy, by Springer, 2007.
- F.A. Cucinotta, M.-H.Y. Kim, and L. Ren. *Evaluating shielding effectiveness for reducing space radiation cancer risks*. Elsevier Science, 2006.
- R. Dach, S. Lutz, P. Walser, and P. Fridez. *Bernese GNSS Software versión 5.2*. Instituto Astronómico de la Universidad de Berna (AIUB), 2015.
- T.M. Donahue. *Ionospheric Composition and Reactions: Our present knowledge of what ions are in the ionosphere, and why, is summarized*. American Association for the Advancement of Science, 1968.

- W.M. Elsasser. *Hydromagnetic Dynamo Theory*. The American Physical Society, 1956.
- World Data Center for Geomagnetism de Kyoto. <https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/>.
- GFZ-Postdam. <https://www.gfz-potsdam.de/en/section/geomagnetism/data-products-services>.
- GOES-SolarData. <https://umbra.nascom.nasa.gov/goes/fits/>.
- W.D. Gonzalez, J.A. Joselyn, Y. Kamide, H.W. Kroehl, G. Rostoker, B.T. Tsurutani, and V.M. Vasyliunas. *What is a geomagnetic storm?* American Geophysical Union, 1994.
- M. J. Hagyard, R. L. Moore, and A. G. Emslie. *The Role of Magnetic Field Shear in Solar Flares*. Elsevier Science, 1984.
- J. K. Hargreaves. *The Solar-Terrestrial Environment*. Cambridge University Press, 1992.
- R. Hide and P.H. Roberts. *The origin of the main geomagnetic field*. Elsevier Science, 1961.
- C.M. Ho, A.J. Mannucci, L. Sparks, X. Pi, U.V. Lindqwister, B.D. Wilson, B.A. Iijima, and M.J. Reyes. *Ionospheric total electron content perturbations monitored by the GPS global network during two northern hemisphere winter storms*. Journal of Geophysical Research, 1998.
- R.D. Hunsucker and J.K. Hargreaves. *The Ionosphere: An Introduction*. Cambridge University Press, 2002.
- INTERMAGNET. https://imag-data.bgs.ac.uk/GIN_V1/GINTest2?observatoryIagaCode=TRW.
- ISGI. https://isgi.unistra.fr/events_qdays.php.
- N. Jakowski, S. Schlüter, and E. Sardón. *Total electron content of the ionosphere during the geomagnetic storm of 10 January 1997*. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 1999.
- Y. Kamide and S.-I. Akasofu. *The Auroral electrojet and field-aligned current*. Elsevier Science, 1976.
- P. Kaufmann, G.D. Holman, Y. Su, C.G. Gimenez de Castro, E. Correia, L.O.T. Fernandes, R.V. Souza, A. Marun, and P. Pereyra. *Unusual Emissions at Various Energies Prior to the Impulsive Phase of the Large Solar Flare and Coronal Mass Ejection of 4 November 2003*. Springer, 2012.
- M.C. Kelley. *The Earth's Ionosphere: Plasma Physics and Electrodynamics*. Academic Press, 2009.
- M.G. Kivelson and C.T. Russell. *Introduction to Space Physics*. Cambridge University Press, 1995.
- Qian L., Burns A. G., Chamberlin P. C., and Solomon S. C. *Flare location on the solar disk: Modeling the thermosphere and ionosphere response*. Journal of Geophysical Research, 115, A09311, 2010.
- Qian L., Burns A. G., Chamberlin P. C., and Solomon S. C. *Variability of thermosphere and ionosphere responses to solar flares*. Journal of Geophysical Research, 116, A10309, 2011.

- Huijun Le, Libo Liu, Bin Chen, Jiuhou Lei, Xinan Yue, and Weixing Wan. *Modeling the responses of the middle latitude ionosphere to solar flares*. Elsevier Science, 2007.
- T. Letellier. *Modeling the global ocean tides: modern insights from FES2004*. Ocean Dynamics, 2004.
- J.Y. Liu, C.H. Lin, Y.I. Chen, Y.C. Lin, T.W. Fang, C.H. Chen, Y.C. Chen, and J.J. Hwang. *Solar flare signatures of the ionospheric GPS total electron content*. Journal of Geophysical Research, 2006.
- G. Mann, S.-I. Akasofu, and Y. Kamide. *The Solar Wind and the Earth*. John Wiley and Sons, 1989.
- A. Meza, M.A. Van Zele, C. Brunini, and R. Cabassi. *Vertical total electron content at subauroral and mid-south latitude, during geomagnetic storms*. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2005.
- A. Meza, M.A. Van Zele, and M. Rovira. *Solar flare effect on the geomagnetic field and ionosphere*, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 71 PP 1322-1332. Elsevier, 2009.
- Amalia Meza, Guillermo Bosch, María Paula Natali, and Bernardo Eylestein. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0273117721006013>. 2022.
- NOAA. <https://www.swpc.noaa.gov/noaa-scales-explanation>. a.
- NOAA. <https://www.swpc.noaa.gov/phenomena/solar-flares-radio-blackouts>. b.
- NOAA. <https://www.swpc.noaa.gov/products/planetary-k-index>. c.
- NOAA. https://www.ngdc.noaa.gov/stp/space-weather/solar-data/solar-features/solar-flares/x-rays/goes/xrs/goes-xrs-report_2001.txt. d.
- NOAA. https://www.ngdc.noaa.gov/stp/space-weather/solar-data/solar-features/solar-flares/x-rays/goes/xrs/goes-xrs-report_2003.txt. e.
- NOAA. <https://www.ngdc.noaa.gov/>. f.
- W.D. Parkinson. *Introduction to Geomagnetism*. Scottish Academic Press, 1983.
- G. Petit and B. Luzum. *IERS Conventions (2010)*. International Earth Rotation and Reference Systems Service (IERS), 2010.
- J. H. Piddington. *On the Origin and Structure of Stellar Magnetic Fields*. Springer Netherlands, 1983.
- T.A. Potemra. *Field-aligned (Birkeland) currents*. Springer Netherlands, 1985.
- R.G. Rastogi. *Storm sudden commencements in geomagnetic H, Y and Z fields at the Equatorial Electrojet Station, Annamalainagar*. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 1998.
- J.W. Reep, S.J. Bradshaw, and R.T.J. McAteer. *ON THE SENSITIVITY OF THE GOES FLARE CLASSIFICATION TO PROPERTIES OF THE ELECTRON BEAM IN THE THICK-TARGET MODEL*. University of Chicago Press, 2013.

- D. Van Sabben. *Ionospheric current systems of ten IGY-solar flare effects*. Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics, 1961.
- C. J. Schrijver and G. L. Siscoe. *Heliophysics: Space Storms and Radiation: Causes and Effects*. Cambridge University Press, 2010.
- SolarGeometryCalculator. <https://gml.noaa.gov/grad/antuv/SolarCalc.jsp>.
- SolarMonitor. https://solarmonitor.org/goes_pop.php?date=20000714&type=xray®ion=.
- SpaceWeatherLive. <https://www.spaceweatherlive.com/en/help/the-kp-index.html>.
- R.J. Stening. *Some features of the equatorial electrojet*. Elsevier Science, 1969.
- M. Stix. *Sunspots: What is Interesting?* John Wiley and Sons, 2002.
- K. Tanaka. *Impact of X-ray observations from the Hinitori satellite on solar flare research*. Astronomical Society of Japan, 1987.
- F. Tang. *Flare morphologies and coronal field configurations*. Springer, 1985.
- J. M. Torta. *Variaciones geomagnéticas de origen ionosférico en días de calma*. Física de la Tierra, 2000.
- T. M. van Dam and R. Ray. *S1 and S2 Atmospheric Tide Loading Effects for Geodetic Applications*. 2010.
- H. Volland and J. Taubenheim. *On the ionospheric current system of the geomagnetic solar flare effect (s.f.e.)*. Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics, 1958.
- D.H. Zhang, Z. Xiao, K. Igarashi, and G.Y. Ma. *GPS-derived ionospheric total electron content response to a solar flare that occurred on 14 July 2000*. Radio Science, 2002.

A. Descripción de los códigos

A.1. Visualización de la Actividad Solar en Rayos X desde un Archivo FITS para los días 13 de diciembre de 2001 y 4 de noviembre de 2003

Este código procesa y visualiza datos de actividad solar en rayos X obtenidos del satélite GOES, utilizando un archivo en formato FITS (cabe aclarar que este código es para los datos del día 13 de diciembre de 2001, para el día 4 de noviembre de 2003 se realiza de forma análoga). Se detallan las principales etapas y componentes:

El código se ejecutó en el lenguaje de programación Python. Para ejecutar dicho código las librerías necesarias fueron:

astropy.io.fits: Para abrir y manejar archivos FITS (Flexible Image Transport System), un formato estándar para datos astronómicos.

matplotlib.pyplot: Para graficar los datos procesados..

numpy: Para realizar operaciones matemáticas y manipular arrays de datos.

Apertura e Inspección del Archivo FITS:

Archivo FITS: Contiene datos de rayos X medidos por el satélite GOES.

hdul.info(): Muestra información del contenido del archivo, incluyendo extensiones y dimensiones.

Acceso y Exploración de Datos:

Se accede a la extensión FLUXES que almacena los datos relevantes.

Nombres de columnas: Permiten identificar las variables disponibles, como TIME y FLUX

Inspección Inicial de los Datos:

Dimensiones de las columnas: Garantiza que los datos de tiempo y flujo sean consistentes.

Valores iniciales y finales de las columnas: Ayuda a verificar que los datos estén correctos.

Inspección Inicial de los Datos: Se extraen los datos de tiempo y flujos en dos canales de longitud de onda y se convierten las unidades de tiempo de segundos a horas.

Manejo de Valores Corruptos: Los valores menores a 0 en los flujos se consideran corruptos y se identifican índices válidos en ambos canales para asegurar consistencia en las dimensiones.

Filtrado de Datos por Intervalo de Tiempo: Filtra los datos para el rango específico entre las 10:00 y 20:00 horas.

Finalmente se realiza el gráfico en ambas longitudes de onda

Resultados:

Flujos filtrados: Visualización de la actividad solar en rayos X para un intervalo de tiempo específico.

Identificación de valores corruptos: Garantiza la limpieza de datos.

Gráfico: Permite analizar la magnitud del flujo para ambos canales de longitud de onda.

```
from astropy.io import fits
import matplotlib.pyplot as plt

# Abrir archivo FITS
hdul = fits.open('/content/drive/MyDrive/go1020011213.fits')
hdul.info() # Inspeccionar el contenido

Filename: /content/drive/MyDrive/go1020011213.fits
No.  Name      Ver  Type      Cards  Dimensions  Format
  0  PRIMARY    1  PrimaryHDU  25      ()
  1  EDGES      1  BinTableHDU  18      1R x 1C    [4E]
  2  FLUXES     1  BinTableHDU  31      1R x 2C    [28800D, 57600E]
  3  STATUS     1  BinTableHDU  31      1R x 2C    [453E, 906E]

# Acceder a la extensión FLUXES
fluxes_data = hdul[2].data

# Explorar los nombres de las columnas
print(fluxes_data.names)

['TIME', 'FLUX']

# Inspeccionar dimensiones de las columnas
print("Shape of Column 1 (time):", fluxes_data['TIME'].shape)
print("Shape of Column 2 (flux):", fluxes_data['FLUX'].shape)
```

Figura 51: Código para graficar el flujo solar en rayos X.

```
# Revisar los primeros y últimos valores
print("Time (start):", fluxes_data['TIME'][0][:10])
print("Time (end):", fluxes_data['TIME'][0][-10:])
print("Flux (start):", fluxes_data['FLUX'][0][:10, 0])
print("Flux (end):", fluxes_data['FLUX'][0][-10:, 0])

Shape of Column 1 (time): (1, 28800)
Shape of Column 2 (flux): (1, 28800, 2)
Time (start): [ 0.  3.  6.  9. 12. 15. 18. 21. 24. 27.]
Time (end): [86370. 86373. 86376. 86379. 86382. 86385. 86388. 86391. 86394. 86397.]
Flux (start): [2.0214522e-06 2.0214375e-06 2.0214277e-06 2.0214277e-06 2.0214081e-06
 2.0214040e-06 2.0214072e-06 2.0214313e-06 2.0214313e-06 2.0214220e-06]
Flux (end): [1.7953112e-06 1.7953265e-06 1.7953264e-06 1.7953151e-06 1.7952990e-06
 1.7952990e-06 1.7952807e-06 1.7952729e-06 1.7952727e-06 1.7952929e-06]
```

```
# Extraer datos
time = fluxes_data['TIME'][0] # Eje de tiempo en segundos
flux_channel_1 = fluxes_data['FLUX'][0][:, 0] # Canal 1 (1-8 Å)
flux_channel_2 = fluxes_data['FLUX'][0][:, 1] # Canal 2 (0.5-4 Å)

# Convertir tiempo a horas
time_hours = time / 3600
```

```
import numpy as np

# Identificar los valores corruptos (menores a 0)
corrupt_indices_1 = flux_channel_1 < 0
corrupt_indices_2 = flux_channel_2 < 0

print(f"Corrupt indices in Channel 1: {np.sum(corrupt_indices_1)} values")
print(f"Corrupt indices in Channel 2: {np.sum(corrupt_indices_2)} values")
```

```
Corrupt indices in Channel 1: 123 values
Corrupt indices in Channel 2: 135 values
```

```
# Filtrar valores de tiempo y flujo para asegurar que coincidan en dimensiones
valid_indices_1 = flux_channel_1 >= 0
valid_indices_2 = flux_channel_2 >= 0

# Aseguramos que ambos conjuntos de índices sean válidos para el tiempo y ambos canales de flujo
valid_indices = valid_indices_1 & valid_indices_2

# Filtrar los datos válidos
flux_channel_1_valid = flux_channel_1[valid_indices]
flux_channel_2_valid = flux_channel_2[valid_indices]
time_valid = time_hours[valid_indices]

# Definir intervalo de tiempo (en horas)
start_time = 10 # 10:00 AM
end_time = 20 # 8:00 PM

# Crear máscara para seleccionar datos dentro del intervalo de tiempo válido
time_mask = (time_valid >= start_time) & (time_valid <= end_time)

# Aplicar máscara al tiempo y los flujos
time_filtered = time_valid[time_mask]
flux_channel_1_filtered = flux_channel_1_valid[time_mask]
flux_channel_2_filtered = flux_channel_2_valid[time_mask]

# Graficar los datos filtrados
plt.figure(figsize=(12, 6))
plt.plot(time_filtered, flux_channel_1_filtered, label="Channel 1 (1-8 Å)", color="blue")
plt.plot(time_filtered, flux_channel_2_filtered, label="Channel 2 (0.5-4 Å)", color="red")
plt.xlabel('Time (hours)')
plt.ylabel('Flux (watts/m²)')
plt.title('X-ray Flux Data from GOES (Dec 13, 2001, 10:00-20:00)')
plt.legend()
plt.grid(True)
plt.show()
```

Figura 52: Código para graficar el flujo solar en rayos X.

A.2. Ajuste por Mínimos Cuadrados sobre el decaimiento de la variación del campo geomagnético

Este código tiene como objetivo realizar un ajuste de mínimos cuadrados a un conjunto de datos que representan el decaimiento de la variación del campo geomagnético, utilizando un modelo exponencial. Además, se calcula el error cuadrático medio (MSE) de dicho ajuste (cabe aclarar que solo se muestra el código para el evento del 2001, ya que para el evento del 2003 se lo realizó de forma análoga). A continuación se detallan las distintas secciones del código:

El código se ejecutó en el lenguaje de programación Julia. Para ejecutar dicho código los paquetes necesarios fueron:

DelimitedFiles: Este paquete es necesario para leer el archivo de datos con `readdlm`.

Optim: Este paquete es necesario para realizar la optimización de los parámetros (función `optimize`).

PyPlot: Este paquete es necesario para crear los gráficos en el código (funciones `figure`, `subplot`, `plot`).

Carga de los datos:

`readdlm("mcF.txt")`: Se carga el archivo de texto con los datos que contienen información sobre el tiempo y las variaciones de las componentes del campo geomagnético. Este archivo se lee como una matriz y se almacena en la variable `Dat1`.

`Dat1[:,1]`: Extrae la primera columna del archivo que corresponde al tiempo (en formato UTC), y se asigna a la variable `t.t`.

`Dat1[:,3]`, `Dat1[:,4]`, `Dat1[:,5]`: Se extraen las variaciones de las tres componentes del campo geomagnético desde las columnas correspondientes (3, 4 y 5) y se calcula la magnitud de la variación del campo (v_f), utilizando la fórmula de la suma cuadrática de las tres componentes.

`t e y`: Se definen como los vectores que contienen los datos del tiempo y la variación del campo magnético a partir de la octava posición del conjunto de datos, respectivamente.

`x`: Se ajusta el tiempo para que comience a partir de las 14:31 (en minutos), y se asigna a la variable `x`.

`n`: Se calcula la longitud del vector `x`, que corresponde al número de puntos de datos.

Definición de la función de ajuste:

`model(x, p)`: Se define la función que modela el comportamiento del decaimiento exponencial de la variación del campo geomagnético. Los parámetros `p` son `B0` y `k`, donde `B0` es la amplitud y `k` es la constante de decaimiento. Esta función devuelve el valor del modelo para cada valor de `x` (tiempo). La función de ajuste viene dada por la expresión (11).

Definición de la función de pérdida (Mínimos cuadrados):

loss(p): Se define la función objetivo, que calcula la diferencia cuadrática entre los datos observados (y) y los valores ajustados por el modelo ($\text{model}(x, p)$). Esta función devuelve el error cuadrático medio (MSE). El objetivo es minimizar esta función para encontrar los parámetros óptimos $p = [B_0, k]$.

Optimización de los parámetros:

p0: Se definen los valores iniciales para los parámetros B_0 y k . Estos valores son utilizados como punto de partida para la optimización.

optimize(loss, p0): Se llama a la función `optimize` del paquete `Optim` para minimizar la función de pérdida definida previamente, utilizando los valores iniciales p_0 .

Optim.minimizer(result): Una vez completada la optimización, se extraen los valores óptimos de los parámetros B_0 y k desde el resultado de la optimización.

Cálculo del MSE:

MSE: Se calcula el error cuadrático medio utilizando los parámetros óptimos p_{opt} y se imprime el resultado en la consola.

Por último se generan los gráficos

Resultados:

Parámetros ajustados: Los parámetros B_0 (amplitud) y k (constante de decaimiento) son optimizados mediante el método de mínimos cuadrados, y sus valores finales se imprimen en la consola.

MSE: El error cuadrático medio (MSE) se calcula para evaluar la calidad del ajuste.

```

# Cargo los datos

Dat1 = readdlm("mcf.txt")

t_t = Dat1[:,1]
t = Dat1[:,1][8:end]
vf = sqrt((Dat1[:,3]).^2 .+ (Dat1[:,4]).^2 .+ (Dat1[:,5]).^2)
y = vf[8:end]
x = (t ./ 60)

n = length(x)

# Definir la función de ajuste
function model(x, p)
    B0, k = p
    return B0 .* exp(-k .* x)
end

# Función objetivo para minimizar
function loss(p)
    return sum((y ./ model(x, p)).^2) ./ n
end

# Valores iniciales para B0 y k
p0 = [18, 0.45]

# Optimizar los parámetros
result = optimize(loss, p0)

# Obtener los valores ajustados de B0 y k
p_opt = Optim.minimizer(result)
println("B0 = ", p_opt[1])
println("K = ", p_opt[2])

# Calcular el MSE
MSE = loss(p_opt)
println("El error cuadrático medio es = ", MSE)

# Graficos
figure(5, figsize=(5, 4))
subplot(1,2,1)
plot(t_t, vf, ".", color="red", label="Variación de F")
xlabel("Hora UTC")
ylabel("F [nT]")
title("Variación del campo total F")
legend(loc="best")
grid()

tight_layout(pad=2)

subplot(1,2,2)
plot(x, y, ".", color="red", label="Decaimiento")
plot(x, model(x, p_opt), color="blue", label="Ajuste")
xlabel("Minutos desde las 14:31")
ylabel("Decaimiento [nT]")
title("Ajuste por Mínimos Cuadrados sobre el decaimiento")
legend(loc="best")
grid()

```

Figura 53: Código para ajustar el decaimiento de la variación del campo geomagnético mediante el método de mínimos cuadrados.

A.3. Ajuste por Mínimos Cuadrados sobre el decaimiento del ν TEC

Este código realiza un ajuste por mínimos cuadrados al decaimiento de la variación del contenido total electrónico ($\delta\nu$ TEC) utilizando el perfil α y el perfil β . Cabe aclarar que el código que se muestra corresponde con los datos de Rawson para el evento del 2001, se realiza de forma análoga para el resto de las estaciones y para el evento del 2003. Además, para el caso del perfil β se realiza de forma análoga, pero cambiando la función de ajuste por la expresión (18). Se detallan los pasos principales:

El código se ejecutó en el lenguaje de programación Julia. Para ejecutar dicho código los paquetes necesarios fueron:

DelimitedFiles: Este paquete es necesario para leer el archivo de datos con `readdlm`.

Optim: Este paquete es necesario para realizar la optimización de los parámetros (función `optimize`)

PyPlot: Este paquete es necesario para crear los gráficos en el código (funciones `figure`, `subplot`, `plot`).

Carga de los datos:

`readdlm("mcR.txt")`: Se carga el archivo de texto con los datos que contienen información sobre el tiempo y la variación del ν TEC. Este archivo se lee como una matriz y se almacena en la variable `Dat1` y se separan en `x` e `y`.

`x`: Tiempo en minutos desde las 14:36.

`y`: Valores de la variación del ν TEC.

Definición de la función de ajuste:

`model(x, p)`: Se define la función que modela el comportamiento del decaimiento del ν TEC. Los parámetros `p` son `V0` y `a`, donde `V0` es la amplitud y `a` es la constante de decaimiento. Esta función devuelve el valor del modelo para cada valor de `x` (tiempo). La función de ajuste es la expresión (16).

Definición de la función de pérdida (Mínimos cuadrados):

`loss(p)`: Se define la función objetivo, que calcula la diferencia cuadrática entre los datos observados (`y`) y los valores ajustados por el modelo (`model(x, p)`). Esta función devuelve el error cuadrático medio (MSE). El objetivo es minimizar esta función para encontrar los parámetros óptimos `p = [V0, a]`.

Optimización de los parámetros:

`p0`: Se definen los valores iniciales para los parámetros `V0` y `a`. Estos valores son utilizados como punto de partida para la optimización.

`optimize(loss, p0)`: Se llama a la función `optimize` del paquete `Optim` para minimizar la función de pérdida definida previamente, utilizando los valores iniciales `p0`.

`Optim.minimizer(result)`: Una vez completada la optimización, se extraen los valores óptimos de los parámetros `V0` y `a` desde el resultado de la optimización.

Cálculo del MSE:

`MSE`: Se calcula el error cuadrático medio utilizando los parámetros óptimos `p_opt` y se imprime el resultado en la consola.

Por último se generan los gráficos

Resultados: Parámetros ajustados: Los parámetros V_0 (amplitud) y a (constante de decaimiento) son optimizados mediante el método de mínimos cuadrados, y sus valores finales se imprimen en la consola.

MSE: El error cuadrático medio (MSE) se calcula para evaluar la calidad del ajuste.

Gráfico: El gráfico visualiza el decaimiento observado y el ajuste del perfil α .

```
# Cargo los datos

Dat1 = readdlm("mcr.txt")

x = (Dat1[:,1] .- 14.688343999949284) .*60
y = Dat1[:,2]

n = length(x)

# Definir la función de ajuste, perfil alfa
function model(x, p)
    V0, a = p
    return V0 ./ (1 .+ a .* V0 .* x)
end

# Definir la función de ajuste, perfil beta
#function model(x, p)
#    V0, a = p
#    return V0 .* exp.(-a .* x)
#end

# Función objetivo para minimizar
function loss(p)
    return (sum((y .- model(x, p)).^2) ./ n)
end

# Valores iniciales para V0 y a
p0 = [6, 0.045]

# Optimizar los parámetros
result = optimize(loss, p0)

# Obtener los valores ajustados de V0 y a
p_opt = Optim.minimizer(result)
println("V0 = ", p_opt[1])
println("alfa = ", p_opt[2])

# Calcular el MSE
MSE = loss(p_opt)
println("El error cuadrático medio es = ", MSE)

# Graficos
figure(6, figsize=(8, 6))
plot(x, y, ".", color="red", label="Decaimiento")
plot(x, model(x, p_opt), color="blue", label="Ajuste")
xlabel("Minutos desde las 14:36")
ylabel("Decaimiento [TECU]")
title("Ajuste por Mínimos Cuadrados para el satélite 3 de Rawson con perfil  $\alpha$ ")
legend(loc="best")
grid()
```

Figura 54: Código para ajustar el decaimiento de la variación del δ TEC mediante el método de mínimos cuadrados.