

UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE
HIDALGO

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO MATEMÁTICAS

ESTUDIO DE LAS PERTURBACIONES IONOSFÉRICAS
SÚBITAS MEDIANTE ONDAS DE RADIO DE MUY BAJA
FRECUENCIA

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
LICENCIADO EN CIENCIAS FÍSICO MATEMÁTICAS

P R E S E N T A

LEÓN MARCOS MARIANO

DIRECTOR DE TESIS: DR. ERNESTO AGUILAR RODRÍGUEZ

MAYO 2010

Indice General

1. Introducción	1
2. La Interacción Sol-Tierra y el monitoreo del clima espacial	3
2.1. Principales fenómenos solares y su interacción con la magnetosfera terrestre	3
2.1.1. El viento solar	4
2.1.2. Eyecciones de masa coronal	4
2.1.3. Fulguraciones solares	4
2.1.4. La magnetosfera terrestre	6
2.1.4.1. Estructura básica de la magnetosfera	6
2.1.4.2. Tormentas magnéticas y la ionosfera	9
2.1.4.3. Observaciones adicionales	10
2.2. La Ionosfera	11
2.2.1. Formación y estructura básica	11
2.2.2. Descripción de la capas ionosféricas	11
2.2.3. La región D	14
2.2.4. La región E	15
2.2.5. La región F	15
2.2.6. Comportamiento diurno de las capas ionosféricas	16
2.2.6.1. Variaciones promedio	16
2.2.6.2. Variaciones a corto plazo	16
2.2.7. Dependencia de la actividad solar a largo plazo	16
2.2.8. Región esporádica E. Características generales.	21
2.2.9. Respuesta ionosférica a las fulguraciones solares	21
2.3. El programa de monitoreo del clima espacial	22
2.3.1. Clima espacial	22
2.3.2. Efectos del clima espacial sobre la superficie terrestre	23
2.3.3. El monitoreo del clima espacial	24
2.3.4. Estaciones emisoras de ondas de radio de muy baja frecuencia (VLF)	25
3. Equipo e instrumentación y el proceso de recolección de datos	27
3.1. Equipo e instrumentación	27
3.1.1. Materiales	29
3.2. Generalidades del funcionamiento del monitor SID	29
3.3. Obtención de los datos	31

3.4. Clasificación de la fulguraciones solares	33
4. Tratamiento de los datos y resultados	37
4.1. Tratamiento de los datos	37
4.2. Descripción de algunas fulguraciones solares	41
4.2.1. Evento I: 26 de abril de 2006	41
4.2.2. Evento II: 27 de abril de 2006	43
4.2.3. Evento III: 6 de diciembre de 2006	43
4.2.4. Evento IV: 14 de diciembre de 2006	43
4.2.5. Evento V: 2 de junio de 2007	45
4.2.6. Evento VI: 25 de marzo de 2008	45
5. Conclusiones	47

Capítulo 1

Introducción

Entre los múltiples campos del saber científico que existen actualmente, las Ciencias de la Tierra nos ofrecen un particular punto de vista acerca de la evolución, la estructura interna y la naturaleza de los distintos fenómenos que moldean las condiciones de nuestro planeta. Debido a la vastedad y complejidad de los fenómenos que aborda dicho campo, es de esperarse su carácter altamente interdisciplinario, apoyándose en las ciencias fundamentales como la física, química, matemáticas, etc. para llevar a cabo sus objetivos.

Con la expansión de los horizontes de la exploración humana, en particular en el ámbito espacial, se presenta también una expansión en el horizonte de la ciencia y nace una nueva disciplina conocida como *física espacial*. Esta nueva disciplina toma como campo de estudio a la *heliosfera*, una extensa región centrada en el Sol y que abarca mucho más allá de la órbita de Plutón. La *heliosfera* es, por definición, la región del espacio interestelar controlada por el Sol, mediante la expansión de su corona (viento solar) abarcando distancias superiores a 100 unidades astronómicas (UA), [Bothmer and Daglis, 2007], donde una UA es la distancia media de la Tierra al Sol ($1 \text{ UA} = 1.50 \times 10^{11} m$).

El estudio sistemático del Sol y del medio interplanetario ha permitido reconocer que la actividad solar involucra emisiones de radiación en muy diversos rangos del espectro electromagnético, así como eyecciones de material en estructuras de gran escala y en forma de partículas de muy alta energía; las *fulguraciones solares* y las *eyecciones de masa coronal (EMCs)*, respectivamente, son ejemplos de ellos. Si bien la magnetosfera de la Tierra actúa como un escudo protector contra los eventos anteriormente citados, estudios recientes demuestran que algunas de las perturbaciones antes mencionadas pueden afectarnos seriamente sobre la superficie terrestre y a las naves espaciales y satélites que orbitan nuestro planeta. Las *fulguraciones solares* constituyen uno de los eventos más intrigantes y cuyos efectos tienen repercusión directa sobre la capa de la atmósfera terrestre conocida como *ionosfera*. Ésta capa es de suma importancia en el campo de las telecomunicaciones, principalmente aquellas que hacen uso de la banda de frecuencias de radio del espectro electromagnético, pues posee la propiedad de reflejar dichas ondas permitiendo que las mismas se propaguen a grandes distancias de su fuente. Ésta propiedad aunada a la sensibilidad de la ionosfera ante la ocurrencia de una fulguración la convierte en un medio útil para detectar la ocurrencia de tales

eventos desde la Tierra.

En este sentido, la motivación central de la presente tesis es calibrar y conseguir una operación óptima de la antena construida por el grupo de física espacial del Instituto de Geofísica de la UNAM. Dicha antena constituye básicamente un receptor de ondas de radio de muy baja frecuencia. Éste modesto proyecto forma parte de uno más ambicioso a nivel mundial: la construcción de una red de observatorios diseminados sobre la faz del planeta para el estudio de las perturbaciones ionosféricas. En el capítulo 2 se describen de manera breve los elementos principales de la ionosfera así como su relación con la magnetosfera. En el capítulo 3 se describen las características del equipo con el que trabajamos así como el procedimiento de calibración. En el capítulo 4 se muestran los resultados alcanzados hacia el final de este trabajo. Es importante notar que en el lapso de duración de este trabajo no se presentaron eventos de fulguraciones solares debido a que el *mínimo solar* fue bastante prolongado. Por esta razón tomamos datos correspondientes a otros sitios de observación situados en distintos lugares del planeta, pero que cuentan con equipos similares al nuestro, para mostrar el comportamiento del equipo ante una fulguración. Finalmente, en el capítulo 5 exponemos las conclusiones a las que llegamos.

Capítulo 2

La Interacción Sol-Tierra y el monitoreo del clima espacial

El espacio interplanetario, lejos de ser completamente vacío, se encuentra permeado por el viento solar (que no es más que la corona del Sol en expansión) y esporádicamente de partículas energéticas resultado de la compleja dinámica del sol. Este flujo de partículas energéticas interactúa con las magnetosferas de los planetas del sistema solar dando lugar a una amplia variedad de fenómenos. Debido a que la Tierra cuenta con una atmósfera, dicho flujo interactúa también con ésta. En particular, la ionosfera, que es la capa más externa de la atmósfera, es muy sensible a esta dinámica.

En el presente trabajo estamos interesados precisamente en las perturbaciones producidas por este flujo de energía sobre la ionosfera; las cuales, en ciertas circunstancias, como se verá más adelante, pueden afectar algunas de nuestras actividades, tanto a nivel de la superficie terrestre como en el espacio interplanetario. A continuación describimos brevemente el proceso de interacción de las emisiones solares con la magnetosfera. En la sección 2.2 analizamos la respuesta de la ionosfera ante tales eventos, y finalizamos este capítulo con una breve introducción acerca del *clima espacial*.

2.1. Principales fenómenos solares y su interacción con la magnetosfera terrestre

El destino de la Tierra se encuentra indudablemente ligado al Sol. Las emisiones de éste último, condicionan muchos de los fenómenos que suceden aquí en la Tierra. Como se mencionó en la introducción, algunos fenómenos derivados de la actividad solar pueden producir perturbaciones de grado considerable en la Tierra, entre ellos tenemos:

- Los flujos ultra-rápidos de viento solar.
- Las Eyecciones de Masa Coronal (EMCs)
- Las Fulguraciones Solares (*solar flares*).

Antes de describir las interacciones de estos fenómenos con la magnetosfera y la ionosfera daremos una descripción de cada uno de ellos.

2.1.1. El viento solar

La existencia del viento solar fue predicha teóricamente por Eugene Parker en 1958 y corroborada por las naves soviéticas *Lunik 2* y *Lunik 3*, y la misión norteamericana *Mariner 2* a principios de la década de los 60, [Blanco-Cano, 1998] y [González-Esparza, 2000]. Está constituido principalmente por protones y electrones libres (aproximadamente 98 %) el resto está constituido por iones más pesados. Posee un rango de velocidades que van desde los 250 km/s hasta los 800 km/s. Generalmente el viento solar tiene una intensidad variable a lo largo del ciclo de actividad solar. Su velocidad promedio en la vecindad de nuestro planeta es de 400 km/s aproximadamente, [Hanslmeier, 2004].

Debido a su alta conductividad eléctrica, el viento solar arrastra consigo el campo magnético solar (este fenómeno se conoce como *campo congelado* [Alfvén y Fälthammar, 1963]), conformando así el Campo Magnético Interplanetario (CMI).

2.1.2. Eyecciones de masa coronal

Las definiciones dadas en la literatura especializada para referirse a las Eyecciones de Masa Coronal (EMCs), se centran básicamente en sus características observacionales obtenidas, principalmente en luz blanca, gracias a la ayuda de coronógrafos ¹ que pueden observar al Sol, ya sea desde la Tierra, o bien desde una nave espacial. Tousey [1973], define a las EMCs como *estructuras de gran escala de plasma magnetizado que son eruptadas desde el Sol hacia la heliosfera*.

Este fenómeno ocurre con una frecuencia de algunos cuantos por día en periodos de máxima actividad solar, mientras que durante un mínimo solar sólo ocurren unos cuantos por año. La longitud transversal de las EMCs puede cubrir desde una fracción hasta más de un radio solar [Aschwanden, 2006]. En la figura 2.1 se muestra una representación artística de una EMC (estructura irregular al centro de la figura), cuyo tamaño sobrepasa considerablemente al de la Tierra. Estas gigantescas nubes de gas ionizado emitidas desde el Sol pueden contener más de 10^{16} gramos de plasma caliente. Se estima que estas EMCs alcanzan velocidades que van desde los 20 km/s a 2000 km/s [Aguilar-Rodríguez, 2006], y pueden acelerar partículas a energías del orden de cientos de keV.

2.1.3. Fulguraciones solares

El Sol en un periodo de máxima actividad, es también fuente de potentes fulguraciones, además de flujos de viento solar de alta velocidad. Una fulguración solar (*solar flare*) es una explosión que ocurre en el Sol cuando la energía almacenada en regiones de intensos campos magnéticos (usualmente en aquellas donde se presentan las manchas

¹Un coronógrafo es un instrumento que produce un eclipse artificial con la ayuda de un disco de ocultación que se encuentra dentro de un telescopio.

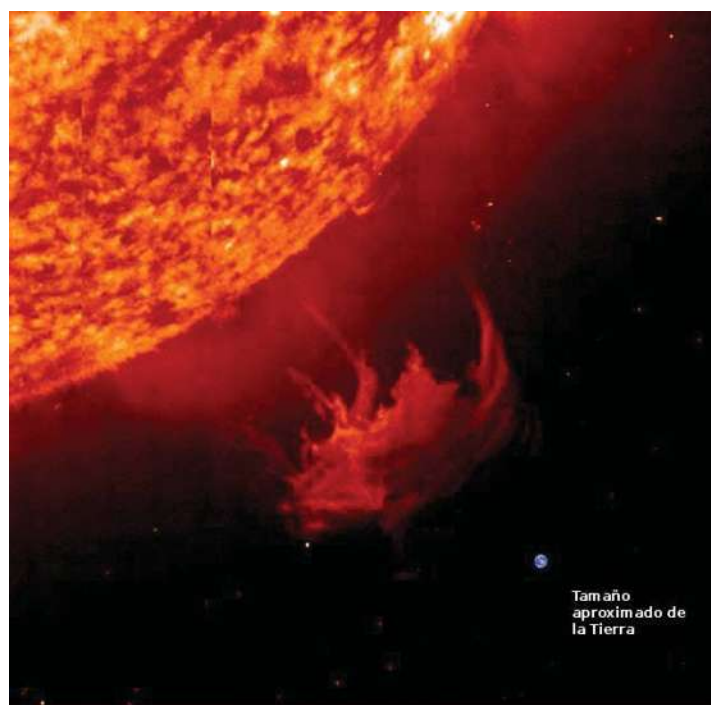


Figura 2.1: Diagrama ilustrativo de una eyección de masa coronal en comparación con el tamaño aproximado de la Tierra (Adaptado de Scherer *et al.*, 2005).

solares) es liberada súbitamente. Las fulguraciones producen un estallido de radiación que abarca prácticamente todo el espectro electromagnético, desde las ondas de radio hasta los rayos X y los rayos gamma. La energía liberada durante una fulguración es típicamente del orden de 10^{27} ergs por segundo.² Fulguraciones mayores pueden emitir hasta 10^{32} ergs. Esta energía es del orden de diez millones de veces mayor que la energía liberada por una erupción volcánica. Por otra parte, es menos de una décima parte de la energía total emitida por el Sol cada segundo. Cuando estas manifestaciones solares alcanzan la vecindad de la Tierra, pueden dar origen a perturbaciones dañinas y de larga duración llamadas *tormentas geomagnéticas* (Ver Sección 2.1.4.1). Los iones ultra-energéticos y los electrones producidos durante tales tormentas, así como las fluctuaciones de los campos magnéticos pueden afectar seriamente tanto a las naves espaciales, como a los humanos en el espacio [Lanzerotti, 2001].

2.1.4. La magnetosfera terrestre

En su trayecto, el *viento solar* interactúa inevitablemente con los planetas y demás objetos que se encuentran en el sistema solar. Este viento no tiene acceso directo a la superficie terrestre ya que el campo geomagnético y el campo del medio interplanetario, junto con sus respectivos plasmas no se mezclan en condiciones normales. Al no poder mezclarse los plasmas, el flujo del viento solar confina al campo geomagnético formando la *magnetosfera terrestre* (figura 2.2), que es una coraza magnética que nos protege de las intensas radiaciones provenientes del Sol y el espacio interestelar. Al interior de la magnetósfera se encuentra el campo magnético terrestre. Por lo tanto, la magnetosfera es la región de dominio del campo magnético terrestre. El campo geomagnético no perturbado tiene, a primera aproximación, una forma dipolar, que se asemeja al de un gran imán de barra. Dicho dipolo magnético se encuentra inclinado con respecto al eje de rotación de la Tierra aproximadamente 11.5° .

El campo magnético terrestre actúa como un escudo protector contra la acción erosionante del flujo de partículas provenientes del espacio hacia la Tierra. En particular evita la acción directa del viento solar con la ionosfera. El planeta Marte, por ejemplo, no tiene una magnetosfera, por lo que la erosión debida al viento solar ha eliminado buena parte de su atmósfera.

2.1.4.1. Estructura básica de la magnetosfera

El flujo del viento solar comprime el campo magnético del lado diurno de la Tierra y genera, del lado nocturno, una cola cuya longitud alcanza varios cientos de radios terrestres. En la figura 2.3 se muestran los elementos básicos que conforman la magnetosfera terrestre:

- El choque de proa y la magnetofunda.
- La magnetopausa.
- La magnetocola.

²Aproximadamente 10^{32} MeV

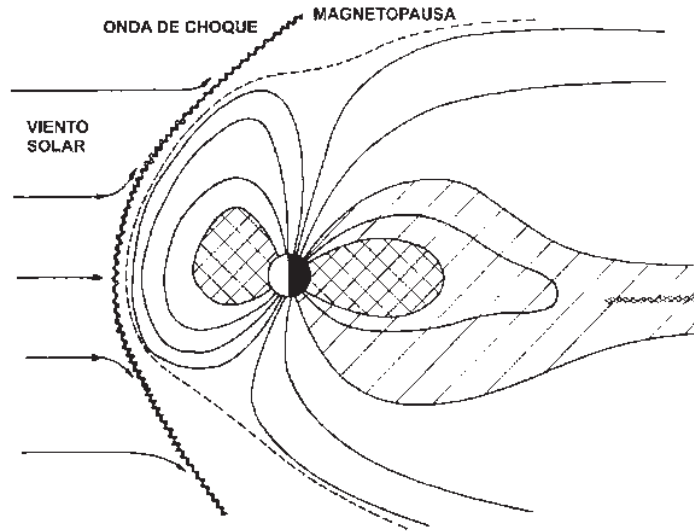


Figura 2.2: La magnetosfera. Resultado de la interacción del Campo Magnético Interplanetario (CMI) con el campo magnético terrestre. (Fuente: <http://www.iac.es/gabinete/difus/ciencia/soltierra/5.htm>).

■ El interior de la magnetosfera.

El *choque de proa* y la *magnetofunda* no se consideran parte de la magnetosfera propiamente sino que forman una capa externa embebiendo la magnetosfera. El flujo del viento solar, a través del medio interplanetario, usualmente alcanza velocidades supersónicas, formando una onda de choque estacionaria alrededor de la magnetosfera tal como aquella que se forma al frente de una aeronave viajando a velocidad supersónica. El choque de proa es el choque enfrente de la magnetosfera, y la magnetofunda es el viento solar que ha sufrido el choque. Por lo que la frontera de la magnetopausa lo constituye realmente el plasma calentado y fuertemente comprimido detrás del choque de proa.

La *magnetopausa* es la frontera entre el viento solar perturbado y el plasma magnetosférico. Sin embargo, la magnetosfera no es un sistema cerrado con respecto al campo magnético externo, sino que existe un flujo magnético cruzando la magnetopausa. Así, no resulta fácil definir ésta frontera en términos matemáticos precisos. La frontera permite el ingreso de una cierta cantidad de plasma. Esta región es muy importante pues los procesos físicos en ella controlan la entrada de plasma, momentum y energía al interior de la magnetosfera.

La *magnetocola* es una larga extensión de la magnetosfera hacia el lado nocturno de la Tierra. Dado que el campo magnético tiene su dirección apuntando hacia la Tierra en el lóbulo norte y apuntando hacia afuera de ella en el lóbulo sur, hay una corriente cuya dirección es hacia el oeste. Debido a esta estructura hay una considerable cantidad de energía almacenada en el campo magnético en la magnetocola. Durante épocas magnéticamente quietas la convección es típicamente lenta y la energía en el flujo del plasma es únicamente una pequeña fracción de la densidad total de energía.

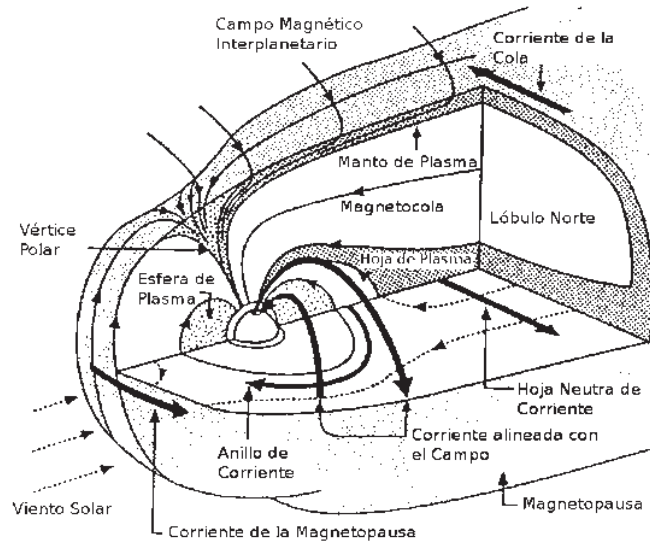


Figura 2.3: El ambiente espacial que rodea a la Tierra. La Magnetosfera con sus regiones clave de plasma y los sistemas de corriente. (Adaptado de Kivelson and Russell, 1995).

Esta región juega un papel particularmente importante en el fenómeno conocido como *subtormenta magnética*. Una subtormenta es caracterizada por una intensificación auroral específica de gran escala y las correspondientes perturbaciones magnéticas a altas latitudes, típicamente cercanos a la medianoche magnética. Se caracteriza también por flujos rápidos en la magnetocola, eyecciones de plasma en la dirección de esta, liberación de energía almacenada en los lóbulos del campo magnético, inyección de partículas energéticas a distancias geosíncronas y fuertes intensificaciones de los sistemas de corriente alineadas al campo. Una subtormenta consiste en una fase inicial o de desarrollo, una fase de expansión (auroral) y una fase de recuperación. Las subtormentas están claramente relacionadas a periodos de flujo del campo magnético interplanetario hacia el sur lo cual lleva a la reconexión en la parte diurna, transporte de flujo magnético desde la parte diurna hacia la cola y almacenamiento de energía magnética en la cola durante la fase inicial, la cual es subsecuentemente liberada en la fase de expansión. Estas manifestaciones constituyen un aspecto importante del clima espacial debido a las grandes perturbaciones en los campos eléctrico y magnético y a la generación de partículas muy energéticas.

La *magnetosfera interior* se diferencia del resto de la magnetosfera en que el campo es mayormente dipolar y las perturbaciones son pequeñas comparadas con el campo dipolar promedio. Sin embargo, puede haber grandes cantidades de energía almacenada en esta región, en particular durante las tormentas magnéticas. Durante tales periodos el anillo de corriente aumenta su intensidad fuertemente y es el responsable de fuertes perturbaciones magnéticas a bajas latitudes geomagnéticas sobre la Tierra.

2.1.4.2. Tormentas magnéticas y la ionosfera

En condiciones normales de baja o nula actividad solar, la topología de la magnetosfera terrestre permanece intacta. Cuando estas condiciones cambian (máximo de actividad solar), la probabilidad de que ocurran fenómenos tales como perturbaciones aurorales y tormentas magnéticas aumenta considerablemente. Es posible apreciar visiblemente las manchas solares, que son sinónimo de que la actividad solar se encuentra en su máximo. Durante tales períodos, el flujo del viento solar se incrementa, las regiones activas y las fulguraciones solares son más persistentes, perturbando la frontera magnetosférica así como la hoja de plasma dentro de la magnetocola. El fenómeno de expansión coronal incluyendo las eyecciones de masa coronal y los hoyos coronales son las fuentes primordiales de los flujos ultra-rápidos del viento solar. Es importante notar que los hoyos coronales pueden ocurrir aún durante los períodos de mínima actividad solar. Lo cual explica algunas perturbaciones ionosféricas observadas en ausencia de alguna actividad solar aparente (medida en términos de manchas solares).

La Figura 2.4 muestra una representación esquemática de una subtormenta magnética. Un factor importante en la generación de energía de la subtormenta es la dirección del campo magnético interplanetario con respecto al eje del campo dipolar terrestre.

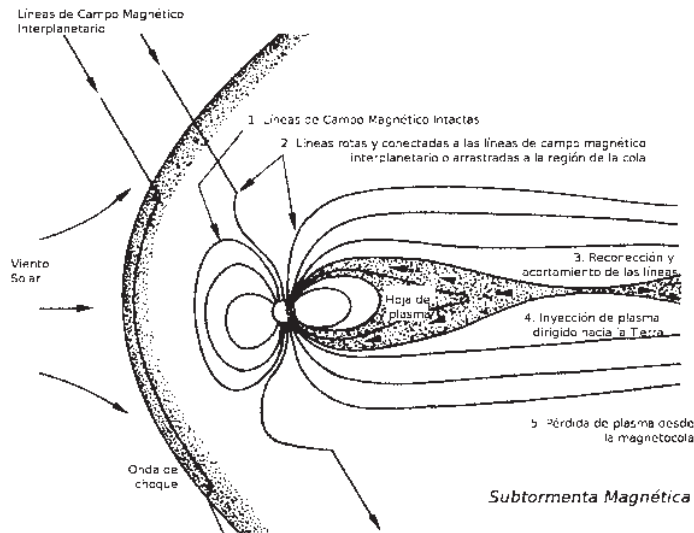


Figura 2.4: Sección transversal de una subtormenta magnética. (Adaptado de Goodman, 2005).

El viento solar exhibe fluctuaciones cuando flujo de viento ultra-rápido se mezcla con él. Estas fluctuaciones pueden ser transferidas a la componente Norte-Sur (N-S) del CMI. Una fluctuación hacia el sur puede introducir una serie de subtormentas hasta que el exceso de energía asociado con el acoplamiento diferencial se haya agotado. El acoplamiento diferencial es un proceso en el cual la tasa de acoplamiento diurna excede la tasa de acoplamiento nocturna. Se piensa que éste fenómeno refuerza la tensión a lo largo de las líneas de campo dentro de la hoja de plasma en la región de la cola. Las subtormentas ocurren en grupos y este proceso sirve para producir una pulsación de

las estructuras aurorales. Una tormenta magnética puede verse como una integración de una serie de subtormentas.

Conforme las líneas de campo asociadas con el CMI se orientan hacia el sur, se unen con las líneas de campo geomagnético al interior de la región del choque de proa (en la vecindad de la cuña magnética) y se transfiere flujo desde el lado diurno hacia el lado nocturno de la magnetosfera. Este reforzamiento en la energía potencial dura menos de una hora. Subsecuentemente la energía es liberada a medida que las líneas de campo abierto se juntan en la magnetocola y algunas de ellas se reconectan. A medida que las líneas de campo se fusionan dentro de la configuración dipolar, son inyectadas partículas energéticas dirigidas hacia la Tierra, formando arcos. Estos arcos aurorales forman hermosos despliegues nocturnos en los hemisferios Norte y Sur localizados precisamente en dirección de los polos.

Una *tormenta geomagnética* es una perturbación extensa y de larga duración (hasta de algunos días) de la magnetosfera, la cual lleva a una fuerte compresión y una contracción de la magnetosfera. Se caracteriza por una fuerte amplificación del anillo de corriente y el campo magnético asociado medido en latitudes ecuatoriales. La aurora es típicamente visible a latitudes mucho más bajas durante tales fenómenos. Dichas tormentas están asociadas con grandes fulguraciones y/o eyecciones de masa coronal (EMCs) y su duración es de varias horas. Se desarrolla como resultado de la energía transferida del viento solar a la magnetosfera en una serie de subtormentas. En términos macroscópicos, podemos ver que una tormenta geomagnética se compone de (a) una fase inicial positiva (de corta duración) asociada con un incremento en la componente horizontal del campo magnético, lo cual es seguido inmediatamente por un aumento de los despliegues aurorales, y (b) una fase principal negativa en la intensidad de la componente horizontal del campo la cual puede durar varios días. La fase inicial esta asociada con incrementos de corta duración en la concentración de electrones en la ionosfera, mientras que la fase principal esta asociada una disminución de gran magnitud en la concentración de electrones. Estos efectos son frecuentemente llamados tormentas ionosféricas para enfatizar las perturbaciones ionosféricas involucradas. Se debe hacer notar, sin embargo, que la respuesta ionosférica a una tormenta magnética no siempre es la misma. Hay diferencias en latitud y los efectos dependen también de la estación anual. En la sección siguiente se analizará la ionosfera con mayor profundidad.

2.1.4.3. Observaciones adicionales

La Tierra no es el único planeta que cuenta con una magnetosfera, todos los planetas con un campo magnético intrínseco expuesto al flujo de plasma del viento solar, tienen una magnetosfera aunque con tamaños y estructura distintos. Así como también la tienen algunos otros objetos astrofísicos como los pulsares y galaxias. Este hecho hace que el estudio de la magnetosfera terrestre y el clima espacial tenga importantes implicaciones no únicamente para nuestro sistema planetario sino para la astrofísica en general. Notemos que más del 99 % del universo visible se encuentra en estado de plasma. Las propiedades del plasma inter-magnetosférico varían fuertemente. Las densidades van desde 10^6 partículas por cm^3 en la ionosfera hasta alrededor de 10^{-2} partículas por cm^3 en los lóbulos de la magnetocola. Por su parte, la intensidad del

campo magnético varía desde 10^{-9} Tesla en la cola de la hoja de plasma hasta 10^{-4} Tesla en la ionosfera. El plasma en la mayor parte de la magnetosfera se encuentra altamente ionizado, salvo una delgada capa de algunos cuantos kilómetros de espesor en la ionosfera baja donde además se encuentra dominado por colisiones con la atmósfera neutra. Así, en la gran parte de la magnetosfera el plasma se puede considerar como un medio sin colisiones.

2.2. La Ionosfera

El viento solar, que fluye desde el Sol, y el campo magnético interplanetario (CMI) embebido, proporcionan el momentum, la energía y gran parte de la masa que impulsa a la magnetosfera terrestre. La ionosfera y la atmósfera responden a este viento solar de forma muy complicada, conformando así el sistema magnetosfera-ionosfera-atmósfera, un sistema altamente acoplado (ver figura 2.3). El estudio de la ionosfera es vital para el entendimiento de la magnetosfera, ya que funge como una capa altamente conductora lo cual repercute en el intercambio de energía desde la ionosfera a la magnetosfera.

2.2.1. Formación y estructura básica

Se le denomina ionosfera a la región ionizada en la parte superior de la atmósfera, más precisamente a la región comprendida entre los 70-1000 kilómetros de altitud. Su formación se debe básicamente a la ionización de las partículas que constituyen la atmósfera, por acción de la radiación electromagnética proveniente del Sol, principalmente ultravioleta (UV) y rayos X; a este proceso se le llama (*fotoionización*). La ionosfera se caracteriza principalmente por su densidad de electrones. La distribución de la densidad electrónica es evaluada primero de acuerdo a un perfil de altitud, seguido por su variabilidad espacial y temporal. Evidencias recientes apuntan a que dicho perfil de densidad electrónica es aún más complejo, incluyendo varios picos y valles, sin embargo las bases para un entendimiento de las propiedades fundamentales de la ionosfera provienen de una representación simple: la de un medio ionizado dominado por una sola capa teniendo un máximo distinto en su densidad electrónica. Una justificación de esto puede verse en la región más alta y más densa, la llamada capa F, que típicamente presenta la mayor densidad electrónica. La capa F presenta, en muchas aplicaciones basadas en ondas de radio, la interacción dominante. La figura 2.5 representa las regiones o capas de la ionosfera en términos de la densidad de electrones. Se ha observado que el perfil de altitud varía diurnamente, estacionalmente, y como función de la actividad solar.

2.2.2. Descripción de la capas ionosféricas

En el estudio de la distribución de la densidad electrónica en la ionosfera, los principales métodos usados incluyen: sondeo de incidencia vertical terrestre (SIV), sondeo desde satélites en órbita, dispersión incoherente de radar, la rotación Faraday y el retraso de señales satelitales, así como mediciones *in-situ* mediante cohetes y satélites.

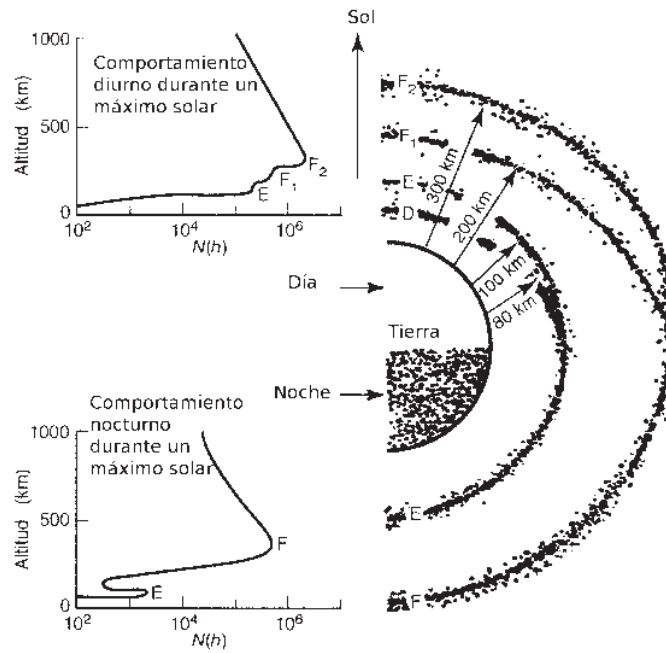


Figura 2.5: Representación de las capas ionosféricas para latitudes intermedias, incluyendo la variación en el transcurso día-noche. La ionosfera diurna se define por tres capas refractivas: las regiones E, F1 y F2. También posee una capa de absorción, principalmente para la propagación de ondas cortas, llamada región D; la cual se extiende aproximadamente 50 km desde la base de la región E. (Adaptado de Goodman, 2005).

El método SIV, el cual emplea la banda de alta frecuencia, fue el método más antiguo y ha proporcionado la visión más comprensiva de la ionosfera baja y su distribución alrededor del planeta. Excepto para la capa D, la cual tuvo que esperar el advenimiento de métodos especiales para determinar su distribución electrónica.

Este método se basa en la *frecuencia de plasma* asociado con un gas de electrones, f_p (una frecuencia natural resonante), la cual está dada por

$$f_p = \frac{e}{2\pi} \left(\frac{N_e}{\epsilon_0 m_e} \right)^{1/2} \quad (2.1)$$

donde e es la carga del electrón, N_e es la densidad de electrones, m_e es la masa del electrón y ϵ_0 es la permitividad del vacío. Como se puede apreciar en la ecuación anterior, la frecuencia de plasma, en este caso, es proporcional a la raíz cuadrada de la densidad electrónica del gas. Para simplificar un poco esta ecuación, usamos una aproximación numérica de la misma

$$f_p = 8.98 \sqrt{N_e} \quad (2.2)$$

donde f_p está dado en Hz y N_e es la densidad volumétrica de electrones.

Se sabe, por estudios previos, que una onda de radio que se propaga ascendiendo verticalmente dentro de la ionosfera, penetrará la región hasta alcanzar un punto en el que la frecuencia de sondeo coincide con la frecuencia de plasma. Todas las frecuencias menores que este valor serán reflejadas de regreso hacia la Tierra. Esencialmente se trata de un radar que mapea la concentración de electrones en la ionosfera como función de la altura *versus* la frecuencia de transmisión, donde la frecuencia de sondeo es típicamente una función gradualmente creciente del tiempo.

Si N_{max} es la densidad máxima de electrones de una capa, entonces definimos una frecuencia crítica de reflexión, f_c , la cual es la máxima frecuencia de plasma dentro de la capa. Si la frecuencia de transmisión de sondeo excede a f_c , la señal no es reflejada y penetra la capa. Hay tantas frecuencias críticas como capas o regiones haya en la ionosfera. Un tratamiento más completo de la radio propagación muestra que un medio magnetiónico soporta 2 modos de propagación: el modo ordinario y el extraordinario (modo O y modo X, respectivamente). Estos modos se encuentran con índices de refracción ligeramente distintos, lo cual hace que viajen con velocidades y direcciones ligeramente distintas. Esto causa que cada ionograma consista en dos señales correspondientes a cada uno de estos modos. Estas señales se pueden alinear sobre una gran porción de su respectiva banda de propagación, pero pueden diferir significativamente en sus respectivas frecuencias críticas. Por convención, se usa la señal en el modo O para la conversión de las frecuencias críticas del ionograma en densidades máximas de electrones. Para ello se usa la siguiente expresión:

$$N_{max} = 1.24 \times 10^{10} f_o^2 \quad (2.3)$$

donde f_o es la frecuencia crítica de la señal ordinaria (en MHz) y N_{max} es la densidad máxima de electrones de la región dada (en electrones por metro cúbico). La ecuación 2.3 se deduce de la ecuación 2.2.

2.2.3. La región D

La región D es responsable de la mayor parte de la absorción de las señales HF, las cuales aprovechan el modo ionosférico de propagación. En la mayoría de los casos, la absorción en la región D es un factor primario en la determinación de la frecuencia más baja que es útil para la comunicación a través de un circuito establecido. Además, la región D permite la propagación de radiación catalogada en las bandas de *muy baja frecuencia (VLF)* y *baja frecuencia (LF)* del espectro electromagnético (*Very Low Frequency* y *Low Frequency*), y es usada en ciertos sistemas de navegación legados y sistemas de comunicación estratégicos de bajo nivel. El método de sondeo que se describió en la sección previa, no resulta útil para mediciones de la región D dado que las densidades electrónicas son relativamente bajas. Los detalles de la concentración de electrones en la región D son vagos en comparación con la información disponible acerca de las regiones E y F, principalmente debido a la dificultad de realizar mediciones de diagnóstico. Por otra parte, el análisis es obstaculizado por los numerosos procesos fotoquímicos con tasas de reacción pobremente definidas que toman lugar en la región D.

La Tabla 2.1 muestra que la región D se encuentra entre los 70 y 90 km. De hecho, los límites superior e inferior no se encuentran definidas con precisión. Es evidente que hay más de una fuente de ionización que da lugar a la distribución de la densidad electrónica en la región D. Las fuentes incluyen radiación solar para los niveles superiores y rayos cósmicos galácticos para los niveles inferiores. Además, los eventos de absorción por los casquetes polares (ACP), relativamente raros, son caracterizados por protones altamente energéticos que proveen una fuente adicional de ionización de la parte baja de la región D en las regiones polares.

Tabla 2.1: Propiedades de las capas ionosféricas. Adaptado de Goodman, (2005).

Región	Altura (km)	Rango de N_{max} (m^{-3})	f_p (MHz)	Componentes principales	Base de formación
D	70-90	10^8 - 10^9		NO^+ , O_2^+	$L\alpha$ Rayos X
E	90-130 $h_{max} \sim 110$	$\sim 10^{11}$ (día) $\sim 10^{10}$ (noche) (suave variación diurna)	~ 3.0 (día) ~ 0.3 (noche)	O_2^+ , NO^+	$L\beta$ Rayos X; Teoría de capas
eE	90-130	$\sim 10^{12}$ (Altamente variable)		Iones metálicos	Esfuerzos cortantes y desechos meteóricos; Electrochorro ecuatorial; Electrochorro auroral y precipitación auroral
F1	130-210 $h_{max} \sim 180$	$\sim 2 \times 10^{11}$ (día) ~ 0 (noche) (suave variación diurna)	$\sim 3 - 6$ (día) (se fusiona con la capa F2 durante la noche)	O^+ , NO^+	Línea Helio II; Radiación UV; Teoría de capas
F2	200-1000 $h_{max} \sim 300$	$\sim 10^{11}$ (día) $\sim 2 \times 10^{11}$ (noche) variación diurna asimétrica	$\sim 5 - 15$ (día) $\sim 3 - 6$ (noche) (mínimo antes del amanecer)	O^+	Difusión ascendente desde la capa F1; Fotoionización

2.2.4. La región E

La siguiente capa, moviéndonos hacia regiones de mayor altura, es la región E. Esta se extiende desde los 90 km hasta los 120 km. Su formación se debe a los rayos X de baja energía (rayos X suaves) y radiación UV, los cuales ionizan el oxígeno molecular (O_2). El pico de densidad en la región E mas de cien veces mayor que el correspondiente a la región D debido a que la recombinación es menos prevalente a grandes alturas. De manera similar a la región D, la región E decae durante la noche, a medida de que los tiempos de recombinación se hacen más rápidos, la región E decae más rápidamente a bajas altitudes que a grandes altitudes. Además de los fotones solares, la ionización en esta región ocurre también debido a la precipitación de partículas energéticas dentro de la atmósfera. Este proceso es particularmente importante a grandes altitudes. La ionización por impacto es la fuente de la formación de auroras, las cuales aparecen a altas latitudes en los hemisferios norte y sur, y constituyen uno de los fenómenos naturales mas hermosos por su despliegue de luz y color.

Hay otras fuentes de ionización mas transientes en el dominio de la región E, incluyendo los efectos resultantes de la compleja dinámica del movimiento de la atmósfera neutra, los campos eléctricos de las auroras, y meteoros incidentes que se consumen en la alta atmósfera y colisionan el gas neutro circundante con suficiente energía para crear una estela ionizada. Estas fuentes producen regiones, estrechas y de corta duración, de alta densidad de ionización. A estas regiones se les conoce colectivamente como regiones esporádicas E (o regiones eE). Las regiones eE pueden durar desde unos minutos hasta varias horas. La ionización puede ser muy alta localmente, y por tanto, las ondas de radio de alta frecuencia pueden ser reflejadas permitiendo la comunicación a grandes distancias.

2.2.5. La región F

La región F se extiende a partir de una altitud de unos 130 km, y constituye la región más densa de la ionosfera. El punto de máxima densidad de ionización se alcanza usualmente a los 300 km. su formación se debe a la ionización de oxígeno atómico por radiación solar en el rango del UV extremo. Aunque la ionización de esta capa decrece durante la noche, no lo hace tanto como las capas D y E, debido a que la tasa de recombinación a grandes altitudes es más baja, y la capa está formada por iones de oxígeno atómico en vez de iones de oxígeno molecular. Los iones atómicos tienen, por lo general, tasas de recombinación más bajas que los iones moleculares.

Debido a que la variación de la región F inferior es distinta de región F superior, se ha dividido en las capas F1 y F2, aunque el perfil de densidad electrónica vertical puede no presentar una clara estratificación. En la parte inferior de esta capa predominan los iones NO^+ , en tanto que en la zona superior están presentes principalmente los iones O^+ .

La capa F1 es la región comprendida entre los 130 km y los 210 km y en ella la densidad electrónica máxima es de unos 2×10^5 (electrones/cm³). Presenta una fuerte dependencia con respecto al ángulo cenital del Sol pero de forma distinta que la capa E. La distinción entre las capas F1 y F2 desaparece por la noche.

La capa F2 es la de mayor altitud y por lo general presenta la densidad electrónica máxima, cuya gama de valores pueden considerarse comprendidos entre 10^6 electrones/cm³, de día, y unos 2×10^5 electrones/cm³, por la noche. El máximo de la densidad electrónica se produce a menudo después del mediodía solar (entre las 13 y las 15 horas locales). Además, muestra una variación semi-diurna con máximos en torno a las 10-11 horas locales y las 22-23 horas locales.

2.2.6. Comportamiento diurno de las capas ionosféricas

2.2.6.1. Variaciones promedio

Como vimos anteriormente, las respectivas frecuencias críticas para cada una de las regiones ionosféricas generalmente alcanzan su máximo durante el día. Todas las capas, con la ocasional excepción de la región F2, exhiben un pico en la concentración media de electrones en la cercanía del mediodía local. La Figura 2.6 muestra la variación diurna media de las frecuencias críticas de las regiones E, F1 y F2 durante un máximo solar para un sitio en latitudes intermedias.

2.2.6.2. Variaciones a corto plazo

Las variaciones en la frecuencia crítica de las capas tendrán lugar sobre una base horaria y una base diaria, especialmente para la región F2. La variabilidad diaria de la región F se muestra en la figura 2.7 para un periodo de máxima actividad solar y latitudes medias. Parece que la mayor parte de éstas variaciones deben su existencia al impacto de tormentas geomagnéticas, *perturbaciones ionosféricas viajeras* (PIVs), y efectos dinámicos misceláneos en dicha región. Las perturbaciones ionosféricas viajeras son una de las características más fascinantes de la ionosfera. Ellas constituyen los trazadores ionosféricos de las ondas de gravedad atmosférica neutras, las cuales derivan de fuentes localizadas en la parte superior de la atmósfera. Estas fuentes incluyen efectos de calentamiento localizados, explosiones atmosféricas, aumentos en la actividad auroral, y otros fenómenos atmosféricos que están asociados con cambios relativamente rápidos y no uniformes en la presión atmosférica.

2.2.7. Dependencia de la actividad solar a largo plazo

Existe una clara tendencia de incremento de las frecuencias críticas de las capas ionosféricas con el número de manchas solares. La figura 2.8 muestra la variación a largo plazo de R_{12} , f_oF2 , y f_oE , y el nivel de absorción de la capa D (a 4 MHz) para condiciones de mediodía. La región D está mejor caracterizada por la cantidad de absorción (véase sección 2.2.3). De la figura 2.8, podemos notar una lenta modulación de 11 años en los parámetros ionosféricos.

La lenta pero definitiva dependencia del número promedio de manchas solares se ilustra en la figura 2.9. Ésta gráfica es algo inusual pues representa el comportamiento promedio de 12 meses de parámetros ionosféricos específicos así como el número de manchas solares (Goodman, [2005]).

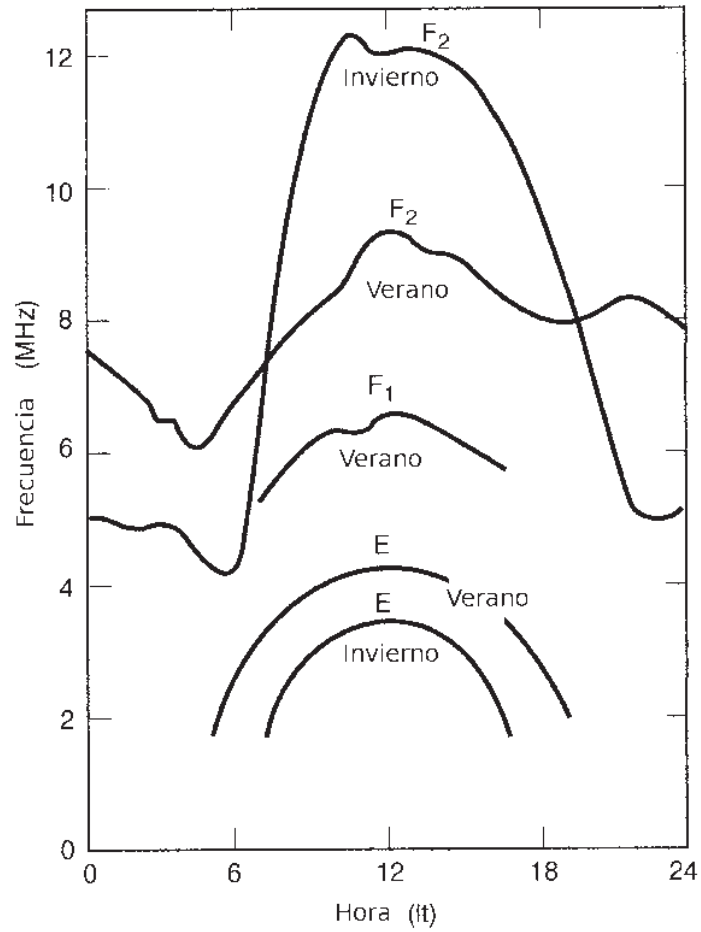


Figura 2.6: Variación diurna media de f_oE , f_oF1 , y f_oF2 durante el verano e invierno en el Hemisferio Norte bajo condiciones de un máximo solar. Note que el máximo en la densidad para la capa E es más grande en verano que en invierno, como lo sugiere la teoría de Chapman.

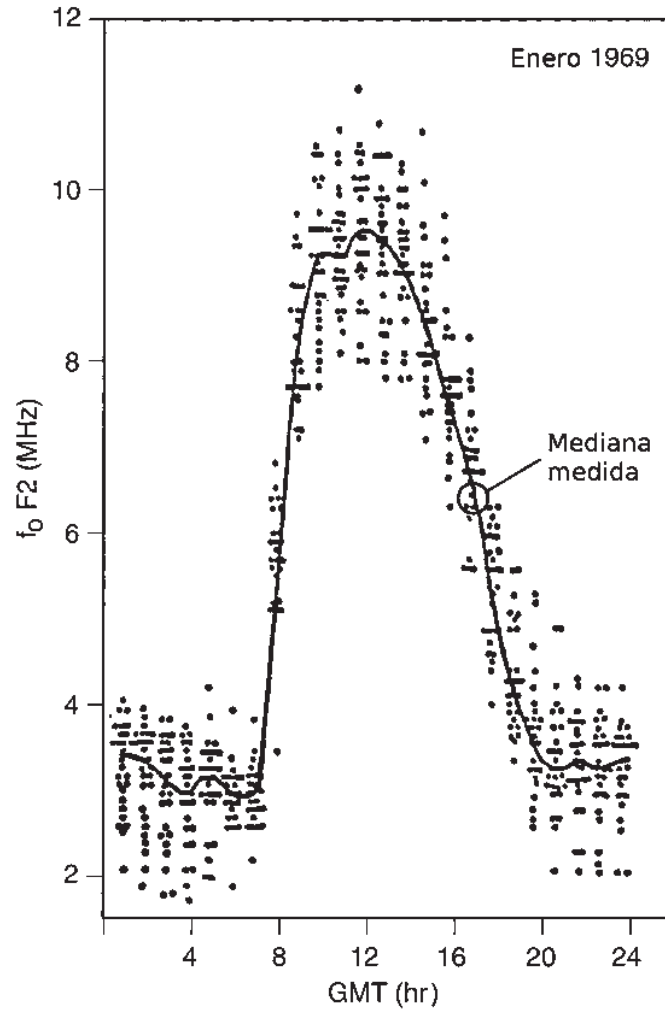


Figura 2.7: Variaciones en los valores horarios de $f_o F2$ como función de la hora del día, para condiciones de un máximo solar en Enero de 1969, medidas en el Hemisferio Norte. El rango de variabilidad diaria en $f_o F2$ es $\pm 10\%$, sugiriendo una variación en $N_{max} F2$ de $\sim \pm 5\%$. Adaptado de Goodman [2005].

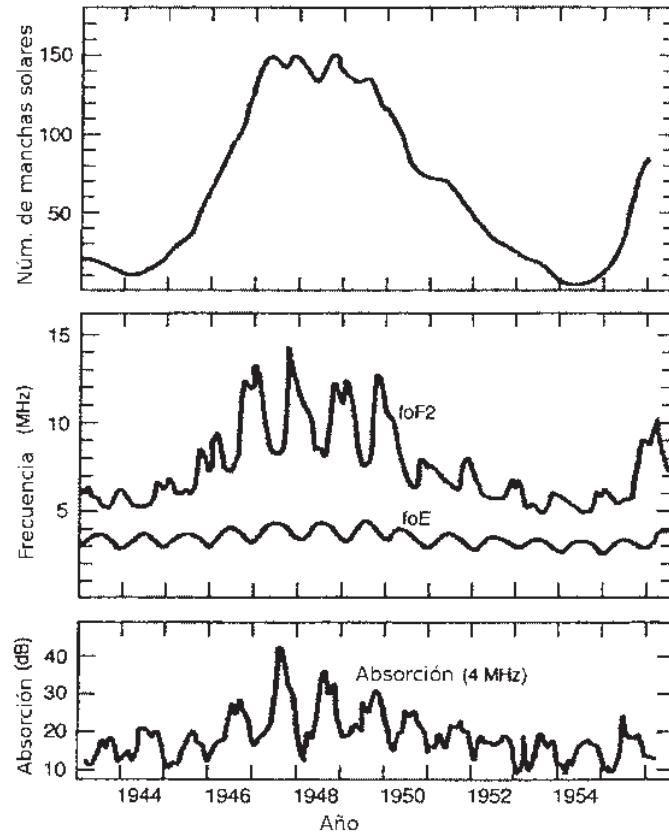


Figura 2.8: Variación en R_{12} , f_oF2 , f_oE y absorción a 4 MHz para el mediodía. Los efectos estacionales son evidentes, las variaciones en f_oE y la capa D están fuera de fase con respecto a las variaciones en f_oF2 (es decir, la anomalía estacional). Adaptado de Goodman [2005].

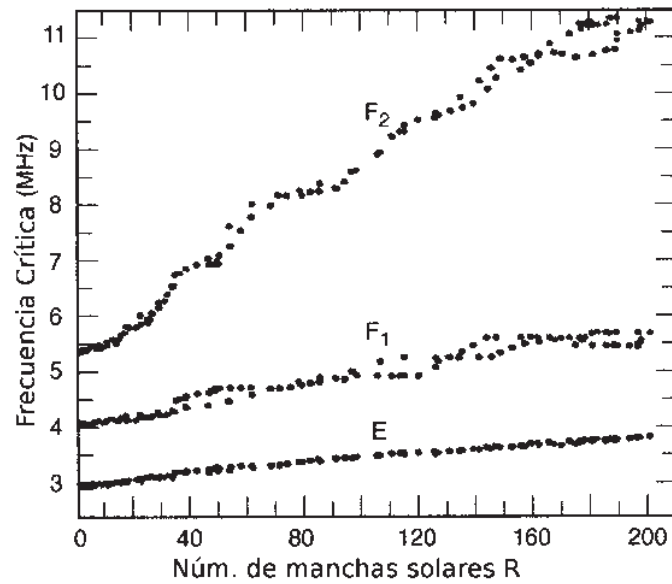


Figura 2.9: Variaciones a largo plazo en R_{12} , de f_oF2 , f_oF1 , f_oE para el mediodía. La frecuencia crítica es la frecuencia más alta para la cual la propagación de las ondas a través de la ionosfera puede ser sostenida para incidencia vertical. La frecuencia crítica ordinaria es equivalente a la frecuencia de plasma del electrón. La frecuencia de plasma, a su vez, es proporcional a la raíz cuadrada de la densidad electrónica. Los efectos estacionales de la Fig. 2.9 aparecen atenuados debido a que se tomaron promedios de 12 meses para esta gráfica. Mientras la frecuencia crítica para las tres capas se incrementa con la actividad solar, la capa $F2$ muestra una gran dependencia del número de manchas solares. Adaptado de Goodman [2005].

2.2.8. Región esporádica E. Características generales.

Estas regiones presentan una variedad de morfologías y tamaños. Suelen aparecer cuasi-aleatoriamente, desafiando los métodos de predicción determinísticos. Las regiones eE se han detectado mediante cohetes y sondeos de radar, y se ha determinado que poseen un espesor del orden de 2 kilómetros. Estas regiones son generalmente estructuras de gran escala con dimensiones horizontales de cientos de kilómetros a latitudes medias. Las formaciones en las regiones polares y ecuatoriales poseen estructuras y mecanismos causales distintos. Las regiones eE presentan un exceso de ionización (comparada con la región normal E de fondo). Las regiones eE exhiben tendencias estacionales y diurnas, las cuales han sido examinadas estadísticamente, descubriéndose al menos tres tipos distintos de ionización esporádica con distintos regímenes geográficos. Éstas son: de baja latitud (o ecuatorial), de latitud media (o templada), y la ionización a altas latitudes (Goodman, [2005]).

Desde un punto de vista morfológico, la región de alta latitud es la parte más interesante de la ionosfera. Se ha dicho que la zona auroral y las características circumpolares asociadas constituyen nuestras ventanas a la distante magnetosfera. El campo magnético interplanetario, el cual puede ser rastreado hasta sus orígenes solares, ha tenido un impacto significativo sobre la geomorfología de la ionosfera a altas latitudes así como sobre su dinámica, incluyendo la evolución de subtormentas magnéticas. La región de alta latitud es una porción de la ionosfera que es caracterizada por la jerarquía de los fenómenos. Éstos son principalmente orquestados por eventos magnetosféricos e interplanetarios (de naturaleza corpuscular) mas que variaciones (electromagnéticas) de flujo solar.

2.2.9. Respuesta ionosférica a las fulguraciones solares

Las *perturbaciones ionosféricas súbitas* (*Sudden Ionospheric Disturbances* o SID), constituyen aquellos eventos que surgen como resultado de la interacción de la atmósfera con el flujo electromagnético de las fulguraciones solares. La figura 2.10 exhibe la jerarquía de los efectos ionosféricos inducidos por el Sol. Hay muchos tipos de perturbaciones observadas, uno de los más importantes es la absorción (o debilitamiento) de onda corta (*Short Wave Fade, SWF*) el cual afecta la comunicación que usa la banda de HF en el lado diurno de la Tierra. La fuente del aumento de ionización de la región D responsable de la SWF es típicamente un estallido de rayos X el cual arroja energía desde el interior de una región activa del sol (generalmente una mancha solar). Una fulguración de rayos X genera un incremento significativo en la ionización de la capa D con un patrón temporal que imita la fulguración misma. Ello resulta en un incremento del producto de la densidad de electrones y la frecuencia de colisión. Es la evolución de este producto lo que cuenta para la absorción de señales de alta frecuencia que pasan a través de la región D. Las fulguraciones tienden a ser más comunes durante el pico de aparición de manchas solares, su duración es de unos cuantos segundos hasta aproximadamente una hora.

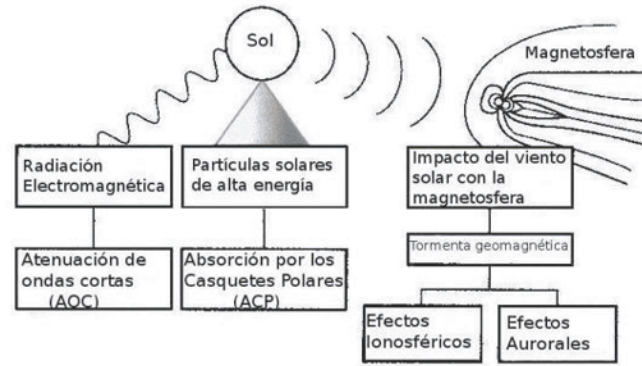


Figura 2.10: Jerarquía de los efectos inducidos por el Sol sobre la ionosfera. Adaptado de Goodman [2005].

2.3. El programa de monitoreo del clima espacial

2.3.1. Clima espacial

De acuerdo al Programa Nacional para el Clima Espacial de los Estados Unidos de Norteamérica, (NSWP por sus siglas en inglés), el *clima espacial* representa *las condiciones en el Sol y el viento solar, la magnetosfera, ionosfera y termosfera que pueden afectar el desempeño y la fiabilidad de los sistemas tecnológicos terrestres y espaciales* [Goodman, 2005]. En el presente trabajo, observaremos esta definición de clima espacial. En esta definición vemos manifiesta la estrecha relación existente entre los fenómenos que ocurren en el Sol y los cambios en la ionosfera terrestre, de la cual se abundará más adelante.

Algunas de las manifestaciones del clima espacial, son conocidas desde muchos siglos atrás. El fenómeno de las *auroras boreales*, con su despliegue de belleza y complejidad, ha sido conocido y narrado desde los orígenes de la escritura. Dentro del contexto histórico actual, este fenómeno está relacionado a una gran variedad de perturbaciones en los sistemas de comunicación a altas latitudes. También cabe destacar otro de los fenómenos indicativos de la actividad solar: las *manchas solares*. Las primeras observaciones de este fenómeno fueron hechas alrededor de 1611 por varios observadores, el más conocido de ellos fue Galileo Galilei. Las manchas solares han sido monitoreadas desde aquella época; se ha observado que exhiben una periodicidad de 11 años, al menos durante los últimos 250 años (Ver figura 2.11). La duración de un ciclo solar está dado por el tiempo que transcurre entre dos mínimos sucesivos.

La región de la alta atmósfera, que se extiende hacia el espacio interplanetario, es permeada constantemente por campos magnéticos altamente variables y, como veíamos anteriormente, por partículas muy energéticas provenientes del Sol. En épocas recientes, la humanidad ha incrementado el uso de instrumentos espaciales para una amplia variedad de tareas, desde aquellas de índole práctica hasta aquellas motivadas por nuestra curiosidad natural que sondean el cosmos en la búsqueda de respuestas. En este contexto, el estudio de la interacción Sol-Tierra constituye, por una parte, un prototipo para

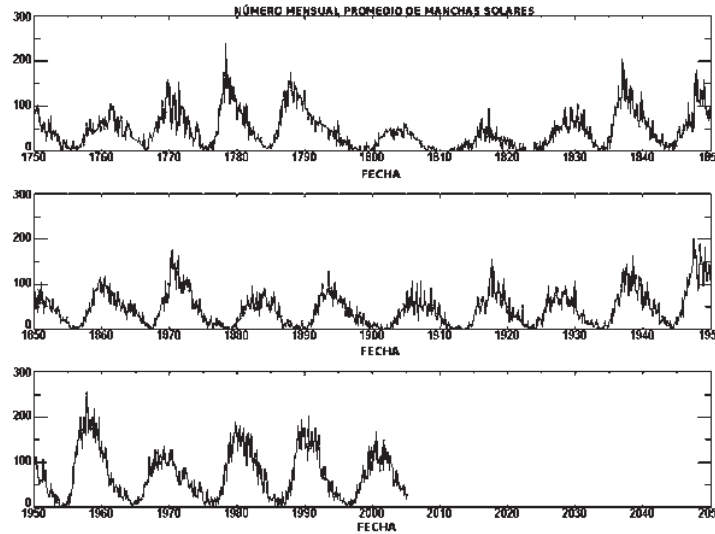


Figura 2.11: El ciclo solar se observa en el número promedio por mes de manchas solares. Entre dos mínimos sucesivos hay aproximadamente 11 años. Adaptado de Goodman [2005].

el entendimiento de los elementos fundamentales de la física magnetosférica, así como un estudio comparativo de los ambientes planetarios, y en última instancia para el entendimiento de nuestro universo de plasma. Por el otro lado, se encuentra la importancia de índole práctica. Los efectos que la actividad solar causa sobre los humanos en el espacio, sobre los sistemas de control de satélites y naves espaciales, sobre redes de suministro de energía eléctrica y probablemente sobre el clima terrestre, hacen que el estudio del clima espacial revista una importancia crucial. Nuestra sociedad actual es cada vez más dependiente de los sofisticados sistemas tecnológicos. Muchos de estos sistemas son muy sensibles a las variaciones del medio espacial cercano a la Tierra. Los detalles de las interacciones Sol-Tierra, y entre las partículas solares y los delicados instrumentos, se han convertido en factores que afectan nuestro bienestar. En particular, el funcionamiento de los satélites, las comunicaciones y los sistemas de navegación sufren interrupciones causadas por condiciones adversas en el espacio exterior.

2.3.2. Efectos del clima espacial sobre la superficie terrestre

La creciente dependencia de energía eléctrica en la sociedad moderna, hace que ésta sea cada vez más susceptible a las fluctuaciones repentinas en el abasto de energía eléctrica [Abelson, 1996]. En su artículo, Abelson hace notar que las interrupciones y caídas de voltaje cuestan a los usuarios norteamericanos entre 3 a 5 billones de dólares al año y alienta a discutir nuevos métodos que pueden ayudar a detectar y corregir estos problemas.

El diseño de las redes para el suministro de energía eléctrica siempre toma en consideración un conjunto de eventos de contingencia y condiciones ambientales severas tales como tormentas eléctricas, vientos, y tormentas de nieve. Notablemente, sin embargo,

el tamaño y la complejidad de las redes modernas ha introducido nuevas vulnerabilidades debidas a la actividad solar [Kappenman, 2001] y [National Academy of Sciences, 2001].

La actividad solar y las erupciones, comúnmente asociadas con el ciclo de manchas solares, pueden producir tormentas magnéticas en la Tierra las cuales han demostrado tener impactos de magnitud creciente sobre los sistemas tecnológicos, como las redes de suministro de electricidad conforme estos se vuelven más sofisticados. Ejemplo de ello fue la tormenta geomagnética ocurrida en Marzo de 1989 que interrumpió el suministro de energía eléctrica durante un día entero en la provincia de Quebec en Canadá. Esta tormenta tuvo el potencial para dejar sin energía eléctrica un área que abarcaría desde los estados de Washington DC hasta Nueva Inglaterra, de acuerdo con una valoración del Consejo Americano de Seguridad Eléctrica.

Un estudio del laboratorio nacional Oak Ridge de los Estados Unidos indicó que una perturbación de ésta escala podría tener un costo económico de 3 a 6 billones de dólares. Puesto que estas tormentas extremas pueden afectar simultáneamente continentes enteros, sus impactos se clasifican dentro de la categoría equivalente a los grandes huracanes y/o terremotos. Por ello y más es necesario redoblar los esfuerzos encaminados hacia la detección oportuna de estas perturbaciones geomagnéticas [Baker and Kappenman, 1996].

2.3.3. El monitoreo del clima espacial

La Organización de las Naciones Unidas (ONU) a través de la iniciativa de ciencias básicas del espacio realiza un esfuerzo para desplegar el equipo de monitoreo, denominado SID (Sudden Ionospheric Disturbance), a las naciones del mundo como parte de la celebración del Año Heliofísico Internacional (IHY) 2007-2009. Dichos monitores fueron diseñados por el Centro de Estudios Solares de la Universidad de Stanford para ser instalados en los mismos centros escolares, ya que no requieren de mucho poder de cómputo para el análisis y recolección de los datos. Esto permitiría involucrar directamente a los estudiantes en proyectos de investigación más amplios y al mismo tiempo interactuar con otros grupos similares dispersos en todo el planeta.

El monitor descrito anteriormente mide los efectos sobre la Tierra causados por las fulguraciones solares mediante el seguimiento de los cambios en las transmisiones de señales de radio de muy baja frecuencia (VLF) cuando éstas son reflejadas por la ionosfera terrestre. Las ondas de radio VLF provienen de los centros de comunicación submarina.

Se sabe que el Sol afecta a la Tierra principalmente a través de dos mecanismos. El primero es de carácter energético. Siempre que ocurre una fulguración, es usualmente en la forma de rayos X o como radiación ultravioleta (UV). Esta radiación tarda sólo 8 minutos en alcanzar a la Tierra, viajando a la velocidad de la luz, [Scherrer, 2007].

El segundo mecanismo es a través del impacto de materia proveniente del Sol. Plasma o materia ionizada puede ser eyectada desde el Sol durante una fulguración. Estos eventos, como mencionamos anteriormente, son conocidos como eyecciones de masa coronal (EMCs) y en promedio tardan unas 72 horas en alcanzar a la Tierra, [Scherrer, 2007].

Ambas formas de emisión afectan a la Tierra. El SID rastrea la forma energética de la actividad solar.

Además de las fluctuaciones diarias en la cantidad de ionización de la ionosfera, la actividad solar puede causar cambios repentinos y dramáticos sobre la ionosfera. Cuando la energía de una fulguración u otra perturbación alcanza a la Tierra, la ionosfera se vuelve súbitamente más ionizada, cambiando la densidad y localización de las capas que la conforman. De aquí el término *perturbación ionosférica súbita* para describir los cambios que estamos monitoreando.

Los electrones libres en la ionosfera tienen una fuerte influencia sobre la propagación de radio señales. Las radio señales de muy larga longitud de onda (muy baja frecuencia) *rebotan* o se reflejan en la ionosfera, convenientemente para nosotros, permitiendo la radio comunicación sobre el horizonte y alrededor de la superficie curva del planeta.

La intensidad de la señal recibida cambia de acuerdo a la cantidad de ionización presente y del nivel de la ionosfera que refleja dichas ondas.

2.3.4. Estaciones emisoras de ondas de radio de muy baja frecuencia (VLF)

Varias naciones usan las ondas VLF para comunicarse con sus submarinos. Se han dispersado transmisores alrededor del mundo para tales tareas. La ionosfera refleja las señales VLF a muchos kilómetros de distancia de su punto de origen y pueden ser recibidas casi en cualquier parte. Cada monitor SID viene con una frecuencia propia para sintonizar una estación transmisora en particular. Una lista de estaciones transmisoras puede consultarse en el sitio web de la Asociación Americana de Observadores de Estrellas Variables (AAVSO por sus siglas en inglés).

Aunque en la mayoría de los lugares del planeta pueden ser sintonizadas varias estaciones, es conveniente elegir una estación que se encuentre aproximadamente a la misma longitud que el sitio de monitoreo, donde el amanecer y anochecer ocurran casi al mismo tiempo.

Las estaciones transmisoras son usualmente muy grandes, abarcando una superficie de varios kilómetros. Particularmente, la estación de la marina de los Estados Unidos de Norteamérica en Jim Creek, Washington, de la cual recibimos las señales para la elaboración de la presente tesis, consta de 20 torres situadas en las colinas de la cordillera Cascades al norte de Seattle. La longitud de onda de la frecuencia que está siendo transmitida es de alrededor de 12 kilómetros.

Capítulo 3

Equipo e instrumentación y el proceso de recolección de datos

3.1. Equipo e instrumentación

El proyecto de monitoreo del Clima Espacial pretende desplegar una red mundial de sensores a las escuelas secundarias y universidades para facilitar el diagnóstico cuantitativo de las perturbaciones ionosféricas inducidas por el sol, la intensidad de las tormentas geomagnéticas, y el estudio de la actividad magnetosférica, mediante la dotación de instrumentos científicos auténticos y de bajo costo para los centros escolares de todo el mundo, con el propósito de avanzar en el entendimiento de los procesos fundamentales que gobiernan al Sol, la Tierra y la heliosfera. Aún cuando la calidad de los datos generados por tales equipos son adecuados para la investigación (Scherrer, et al., [2008]), no se requiere equipo de cómputo sofisticado para su manejo. Una computadora de escritorio con recursos modestos es más que suficiente.

El equipo que nosotros usamos para la realización de este trabajo consta de:

- La antena.
- Una PC de escritorio con sistema operativo Windows XP.
- El monitor SID.

En las figuras 3.1, 3.2 y 3.3 se muestran la antena y el monitor SID, respectivamente.

La antena es conocida como *antena de circuito cableada* (wire-loop antenna) y no es otra cosa que una estructura que sostiene las vueltas o *bucles* de cable. No hay un tamaño estandar ni una forma específica para el diseño de la antena. Tampoco es necesario que sea construida siguiendo especificaciones dimensionales precisas ni que el cable se encuentre en ciertos intervalos de tolerancias exactas. En suma, hay una gran libertad para la construcción de dicha antena y se alienta a construirla con materiales que sean fácilmente adquiribles.

Las antenas grandes (de dos metros o más) son más sensibles que las pequeñas (menos de 1 metro), pero tienen la desventaja de que son más difíciles de transportar, requieren de mayor espacio y pueden ser tiradas por el viento o la lluvia intensa.



Figura 3.1: Antena utilizada para la recepción de ondas de radio de muy baja frecuencia



Figura 3.2: Monitor SID proporcionado por la Universidad de Stanford. Fuente: <http://solar-center.stanford.edu/SID/pictures.html>.



Figura 3.3: Interior del Monitor SID. Fuente: <http://solar-center.stanford.edu/SID/pictures.html>.

En cuanto al material que conforma la estructura sólo debe cuidarse de que no sea conductor.

3.1.1. Materiales

Los materiales usados en la construcción de la antena fueron:

- Tubo PVC: 1 pulgada de diámetro
- Conectores de PVC
- Alambre aislado.

La antena va conectada al monitor SID mediante un cable coaxial RG-58. Este tipo de cable es estandar entre los radio aficionados, y se consigue fácilmente.

La señal recibida es manejada por el monitor SID y la computadora con ayuda del software SIDMON proporcionado también por la Universidad de Stanford.

Ya instalado todo el equipo es necesario calibrar la señal recibida y registrar los datos de localización geográfica del monitor. La conversión de la señal analógica lo realiza el SID. El equipo realiza un registro de la intensidad de la señal cada 5 segundos. Todos los datos son referidos al tiempo universal (TU).

3.2. Generalidades del funcionamiento del monitor SID

El monitor SID es un receptor de AM sintonizado a una estación transmisora de ondas de muy baja frecuencia (VLF). La señal es captada por la antena y está constituida por una señal de audio y una intensidad de dicha señal. Dentro del SID la señal es filtrada, amplificada, rectificada e integrada para medir su intensidad.

El interior del monitor, (figura 3.4), se encuentra dividido en las siguientes secciones y la señal sigue las siguiente trayectoria:



Figura 3.4: Monitor SID. Teoría de operación. Fuente: <http://solar-center.stanford.edu/SID/pictures.html>.

Fuente de alimentación: Esta sección toma los 10V AC del transformador principal y los convierte a +5V y -5V DC suministrándolos al resto del circuito. Esto es monitoreado desde el panel frontal con los LED's Verde (+5V) y Amarillo (-5V).

Preamplificador: La primera etapa de amplificación desde la antena. La señal de salida es controlada por el potenciómetro (control rectangular azul) que tiene la etiqueta RF Adj sobre el panel frontal.

Tablero de Frecuencia (Filtro): La tarjeta hija que se conecta directamente a la tarjeta madre para seleccionar la frecuencia del SID que será monitoreada. Esta unidad tiene dos arreglos pre-sintonizados que están programados y no pueden ser cambiados.

Post-Amplificador: Amplifica la señal de salida del Tablero de Frecuencias en la etapa post-amplificación antes de entrar a las etapas finales de amplificación. El post-amplificador tiene un switch de tres posiciones, marcados con x1, x5 y x10, que se refieren relativamente a los multiplicadores actuales en su etapa de amplificación. Típicamente se usa a x1.

Detector AM: Remueve la parte negativa de la envoltura de la señal de AM mediante rectificación activa.

Salida de Audio: Un buffer de salida para alimentar a un par de altavoces o dispositivo de entrada en línea. La salida de audio es útil únicamente al momento de calibrar el monitor SID.

Intensidad de la señal: Toma promedios de los picos de la señal en la etapa de detección de las ondas AM. La señal es escalada para oscilar entre los dos voltajes de alimentación de energía, proporcionando un rango total de 10V.

Existen dos componentes de las señales de radio: La componente terrestre (*ground wave*) y la componente ionosférica (*sky wave*).

La componente terrestre es principalmente un campo eléctrico E y viaja cerca de la superficie terrestre. Esta señal no contiene ninguna información reelevante para el

SID, porque no interactúa con la ionosfera. Por lo que éstas señales no son de interés para nosotros.

La otra componente es llamada componente ionosférica. Como su nombre implica, es la señal proveniente del cielo que es resultado de uno o más *rebotes* desde la ionosfera. Ésta señal es detectada mediante la antena que se describe al principio de este capítulo. La componente magnética de las ondas de radio es convertida por inducción en una pequeña señal eléctrica y en seguida amplificada por el monitor SID.

3.3. Obtención de los datos

El registro de los datos, se hace mediante el software antes mencionado, que de manera automática genera los archivos correspondientes a un día completo en formato de texto. Dichos datos son una lectura de la intensidad de la señal recibida y constituyen una forma de conocer la respuesta ionosférica a la actividad solar en tiempo presente. Con estos datos es posible generar, día a día, gráficas de voltaje *vs.* tiempo, como la que se muestra a continuación.

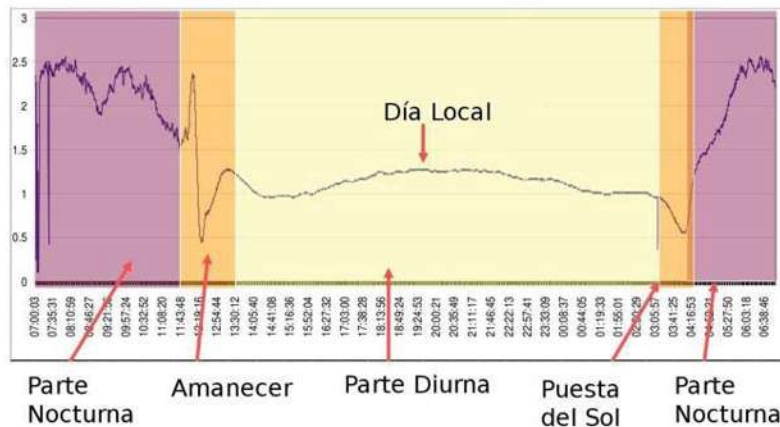


Figura 3.5: Ejemplo del perfil típico de las gráficas que deben generar los datos del SID. Los colores, las flechas y las etiquetas han sido añadidos sólo para mejorar la visualización de la gráfica. (Adaptado de Mitchell, *et al.*, 2007).

Es necesario aclarar que las figuras 3.5 y 3.6 se muestran solamente con fines ilustrativos, es decir que no han sido generadas por datos reales tomados con el equipo descrito anteriormente. Se han colocado aquí con el propósito de resaltar los distintos elementos que las componen de manera que el lector se familiarice con ellas, ya que en el siguiente capítulo se mostrarán aquellas generadas con datos reales.

En la figura 3.5 se muestra un gráfico, sin eventos de fulguraciones solares. En el eje horizontal se mide la hora del día en Tiempo Universal (TU). El Tiempo Universal es,

por acuerdo internacional desde 1928, la hora local en el meridiano de referencia principal, el cual pasa por Greenwich, Inglaterra; también es conocido como Tiempo medio de Greenwich o Tiempo Universal Coordinado. Se usa como una forma generalizada para el tiempo de efemérides y el registro de eventos astronómicos, para evitar así posibles confusiones al usar la hora legal (local) de cada país. Como se sabe, el planeta se ha dividido en 24 zonas horarias, cada una mide 15° de arco que equivalen a una hora de tiempo. Cada una de estas regiones está centrada sobre meridianos estandar que parten del meridiano cero de Greenwich hasta los 180° al este y al oeste. A cada meridiano estandar se le asigna una letra para identificarlo y un número que representa la diferencia en horas con respecto a Greenwich. Para convertir la hora universal TU a la hora legal de algún lugar, primero se debe saber que meridiano estandar o zona horaria rige en ese lugar, después se debe sumar algebraicamente al TU el número asignado a quella región. Dicho número no es mas que el cociente de dividir el meridiano estandar que rige en la zona de interés por 15. Así por ejemplo, para el caso del centro de nuestro país rige el meridiano de 90° , si dividimos 90 por 15 obtenemos 6. En consecuencia si un evento tiene lugar a las 18:45 TU, para el centro del país se verificará a las 12:45. Para las zonas localizadas al oeste del meridiano de Greenwich se resta dicho número del TU, mientras que para aquellas zonas localizadas al este se suma.

Volviendo a la figura 3.5, en el eje vertical se indica la intensidad de la señal recibida medida en volts. La parte de mayor relevancia para nuestro trabajo es la sección diurna, pues es ahí donde se localizarán los eventos que nos interesan. Otra de las características importantes que debemos resaltar en esta figura, son las señales que indican el amanecer y el anochecer locales. Estas caídas en la intensidad de la señal captada son muy deseables de reproducir con los datos reales, ya que indicarían que nuestra antena se encuentra bien orientada durante el proceso de calibración. Aquí sólo se muestra el perfil deseado que se debe obtener cuando la antena ya se encuentra calibrada.

La figura 3.6, por su parte, es un ejemplo típico de la respuesta ionosférica ante fulguraciones solares. Los picos en la parte central de la gráfica, mostrarían la ocurrencia de tales eventos. Los rótulos asignados nos indican el tipo de fulguración de acuerdo a la clasificación que daremos en la siguiente sección. Es necesario hacer notar que dichos picos también pueden ocurrir debido a otros fenómenos tales como interferencia eléctrica u otras fuentes de interferencia que pueden ser: el monitor de la computadora, la televisión encendida, luces fluorescentes, motores y bombas y los interruptores de luz correspondientes a modelos muy viejos. Otra fuente importante de ruido son los relámpagos y/o rayos. Estos pueden ser detectados por la antena aún a distancias muy grandes.

Durante la etapa de calibración y como una forma de proveer confiabilidad a nuestras medidas, es necesario comparar nuestros resultados con las mediciones llevadas a cabo *in situ* por los satélites GOES; esto sólo en caso de que se detecte un evento candidato a ser una fulguración solar. Las mediciones hechas por los satélites se encuentran disponibles en la base de datos en línea del Centro de Medio-Ambiente Espacial (Space Environment Center).

Por su parte el Centro de Investigaciones Solares de la Universidad de Stanford (Stanford Solar Center) ha establecido una base de datos centralizada para reunir y

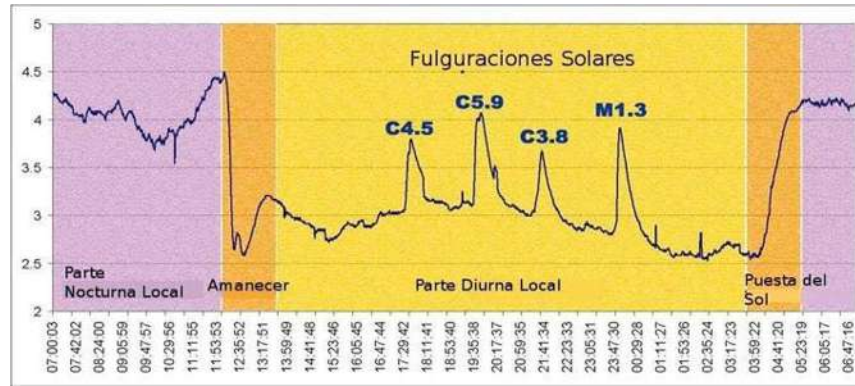


Figura 3.6: La respuesta de la ionosfera a las fulguraciones solares está representada por los cuatro picos de la parte central de esta figura. Cada pico corresponde a un evento distinto. (Adaptado de Mitchell, *et al.*, 2007).

tener disponibles los datos de todos los sitios de monitoreo. Dichos datos pueden consultarse en la siguiente dirección de Internet: <http://sid.stanford.edu/database-browser/>

3.4. Clasificación de la fulguraciones solares

Las fulguraciones solares, Fig. 3.7, son fenómenos transitorios de liberación de energía que se desarrollan en las estructuras magnéticas de las regiones activas del Sol (ver pág. 5). Se clasifican de acuerdo a la intensidad de la radiación emitida en la banda de los rayos X en el rango de longitudes de onda de 1-8 Angstroms. Dicha clasificación abarca cuatro categorías:

Fulguraciones de clase B: Estas son pequeñas y ocurren frecuentemente. El monitor SID no es capaz de detectarlos.

Fulguraciones de clase C: Este tipo de fulguraciones pueden ser bastante grandes. El monitor SID es capaz de detectar las fulguraciones de clase C2.0 o mayores, aunque se han detectado incidentalmente aquellas de clase C1.0. Generalmente no tienen la capacidad de afectar a la Tierra.

Fulguraciones de clase M: Estas son aún mayores que las anteriores y ocurren con menor frecuencia. Se consideran de tamaño medio y pueden causar interrupciones breves en los sistemas de radiocomunicación. Afectan a las regiones polares principalmente. Deberían ser muy aparentes en las gráficas del monitor SID .

Fulguraciones de clase X: Son las más intensas. Se caracterizan por ser enormes y muy fáciles de detectar. Si su trayectoria está dirigida hacia la Tierra, pueden causar graves trastornos en la comunicación celular, de radio y redes eléctricas. Usualmente el monitor SID no puede manejarlas, pues el pico se sale del rango causando un efecto meseta.

Cada categoría, tiene a su vez, nueve subdivisiones que van desde, por ejemplo, X1 a X9, M1 a M9, etc. El número que acompaña a cada letra es un multiplicador que especifica el nivel dentro de cada clase. Así, por ejemplo, una fulguración clasificada

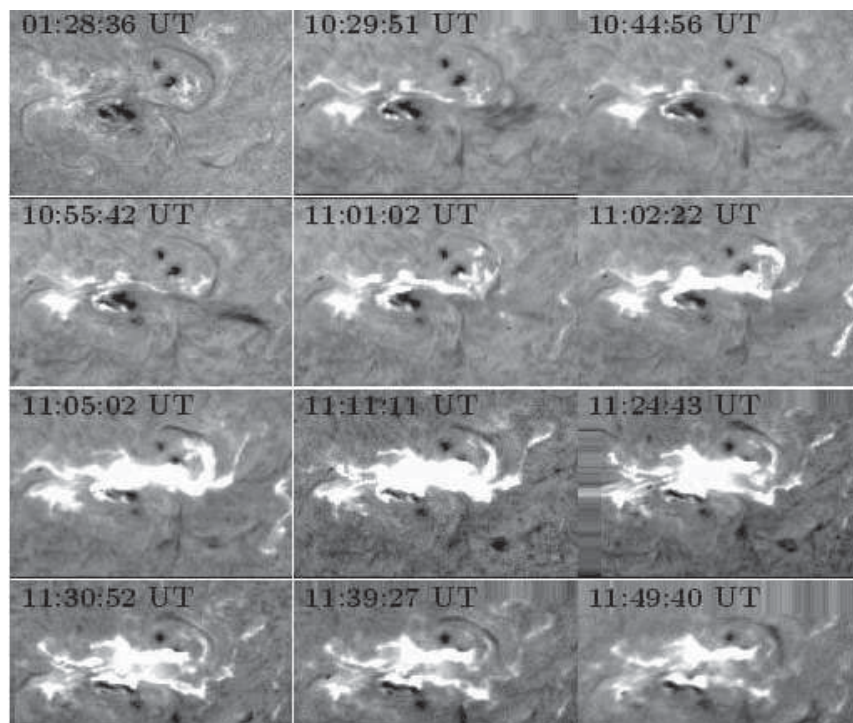


Figura 3.7: Evolución de la fulguración solar, en H-alfa, del 28 de Octubre de 2003, de clase X17.2, (observada por el Instituto de Investigación Aryabhata de Ciencias Observacionales de la India (ARIES, por sus siglas en inglés)). Fuente: <http://www.aries.res.in/ARIES.sun.html>.

como M6 tiene una intensidad de $6 \times 10^{-5} \text{ W/m}^2$ (ver Tabla 3.1). La fulguración del 14 de Julio de 2000 de magnitud X6, desató una tormenta de radiación alrededor de la Tierra conocido como el evento del Día de la Bastilla (Bastille Day event).

Así, la clasificación de las fulguraciones de acuerdo a su intensidad (I) es como sigue:

Tabla 3.1: Clasificación de las fulguraciones solares de acuerdo a su intensidad. Fuente: <http://spaceweather.com/glossary/flareclasses.html>.

Clase	Intensidad (W/m^2)
B	$I < 10^{-6}$
C	$10^{-6} \leq I < 10^{-5}$
M	$10^{-5} \leq I < 10^{-4}$
X	$10^{-4} \leq I$

Usaremos esta clasificación en el siguiente capítulo.

Capítulo 4

Tratamiento de los datos y resultados

4.1. Tratamiento de los datos

El tratamiento de los datos se realizó mediante el programa IDL (Interactive Data Language) el cual es ampliamente utilizado en las ciencias espaciales, la astronomía y en diversos campos de la ciencia en los cuales es necesario procesar grandes cantidades de datos así como procesamiento de imágenes.

Se escribieron algunos programas pequeños para poder trabajar con los archivos de texto generados directamente por el SID, así como los datos disponibles en los sitios web de las misiones espaciales que estudian al Sol. Principalmente, lo que se buscó fue generar las gráficas correspondientes a los datos de un periodo de 24 horas. Éstas gráficas inician a las 00:00 horas TU y terminan a las 24 horas del mismo.

Enseguida mostramos las gráficas obtenidas durante el proceso de calibración y puesta en marcha de nuestro monitor SID.

En la figura 4.1 se muestra el registro correspondiente al día 20 de Noviembre de 2008. Como puede apreciarse claramente, el perfil obtenido es muy parecido con el mostrado en la figura 3.5. Los efectos en la intensidad de la señal, debidos al amanecer y al anochecer son notorios en esta gráfica. Esto nos permitió, después de superada la etapa de calibración, estar en condiciones de enviar nuestros datos al repositorio central de la Universidad de Stanford.

La figura 4.2 es más reciente, data del 15 de Mayo de 2009. Se han cotejado los datos con los de otros sitios de observación y no se observan los dos picos que se muestran en esta figura, el de las $\sim 14:00$ TU y el de las $\sim 21:00$ TU. Los datos de los GOES para esta fecha no se encuentran disponibles. Descartamos que se trate de fulguraciones solares, ya que no hay reportes de observación de tales eventos. Como se apuntaba anteriormente, estos registros pueden deberse a algún otro fenómeno como relámpagos de alguna tormenta o ruido debido a otras fuentes.

En la figura 4.3 se muestran la totalidad de las mediciones hechas en la etapa del proceso de calibración que comprende del 1 de enero de 2009 al 31 de mayo de 2009. Es una gráfica de intensidad *vs.* tiempo, con la única particularidad de que el tiempo está medido por día del año y no en TU como las anteriores. Se puede observar que

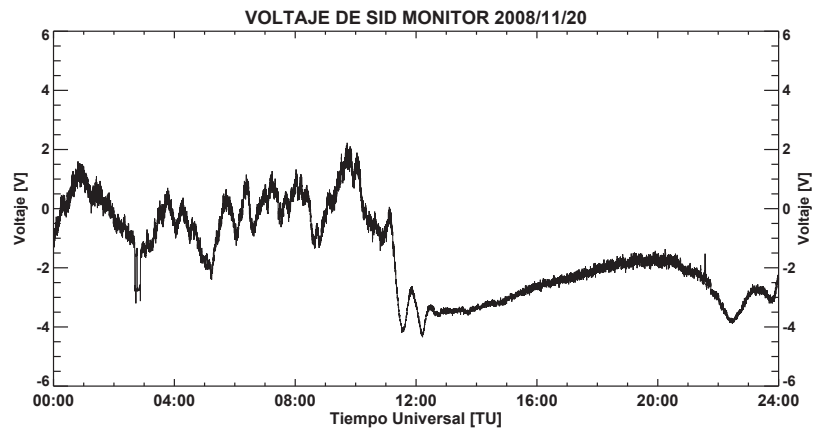


Figura 4.1: Los primeros resultados obtenidos con nuestro monitor. Note los efectos característicos debidos al amanecer y al anochecer.

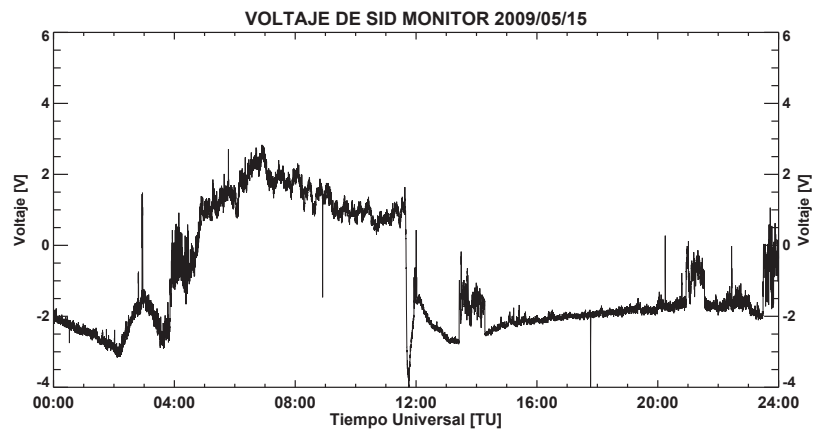


Figura 4.2: Datos más recientes mostrando dos eventos que no corresponden a fulguraciones solares.

al inicio es mas irregular que al final, ello se debe a que los datos iniciales presentan inherentemente esa irregularidad. La parte mas regular indica que la antena es más estable y la lectura de la respuesta ionosférica es cada vez mas confiable. También es preciso resaltar la presencia de situaciones ajenas a uno mismo, ellas se encuentran representadas por la ausencia de puntos en la gráfica, las cuales se deben a periodos en las que, por ejemplo, las fallas en el suministro de electricidad provocaron una interrupción en las mediciones. Hubo también un periodo en el que el monitor SID, fue usado para suplir a otro defectuoso.

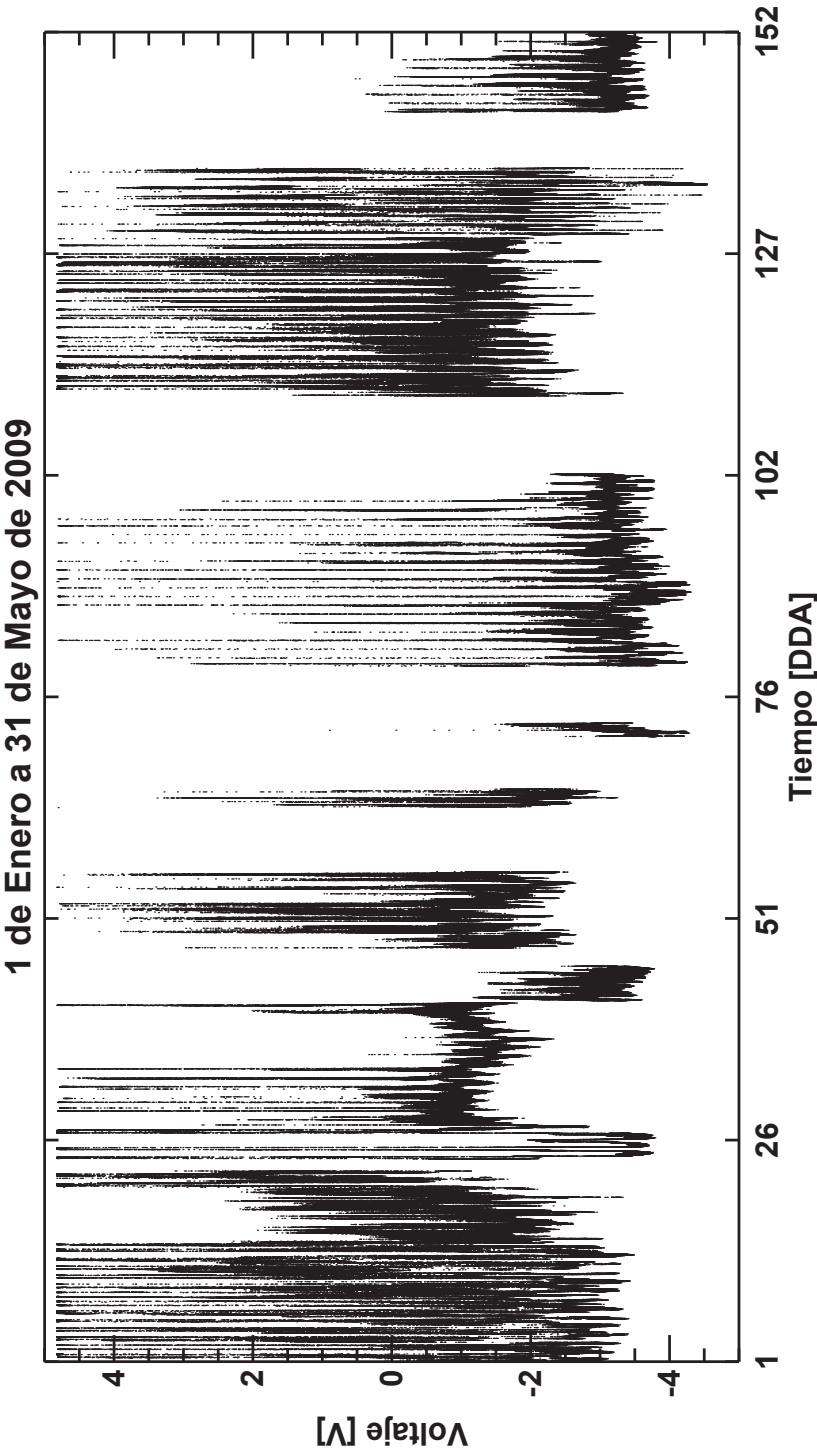


Figura 4.3: Datos del SID. Periodo completo.

4.2. Descripción de algunas fulguraciones solares

Como se mencionó en el capítulo 2, el Sol presenta un ciclo de actividad caracterizado por periodos de máxima actividad y periodos donde su actividad se reduce al mínimo. Las fulguraciones solares son más frecuentes durante periodos de máxima actividad. Los expertos predecían que el mínimo mas reciente finalizara en el año 2008. Pero esto no fue así, ya que en 2009 el número de manchas solares disminuyó aún más que en 2008 (véase por ejemplo el artículo *Un profundo mínimo solar* en el sitio: http://ciencia.nasa.gov/headlines/y2009/01apr_deepsolarminimum.htm). Antes de continuar, debemos aclarar que durante el periodo en que monitoreamos la actividad solar no ocurrieron fulguraciones. Debido a nuestro interés por este tipo de fenómenos hemos tomado datos registrados por otros sitios de observación correspondientes a años anteriores, que sí captaron una fulguración. Los sitios mencionados, cuentan con un equipo similar al nuestro.

A continuación mostramos los registros de 6 eventos de fulguraciones solares ocurridas durante los años 2006-2008. Estos datos se han corroborado con las mediciones, hechas por los satélites GOES (Geostationary Operational Environmental Satellite) de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA) de los Estados Unidos. La serie de satélites GOES están monitoreando al Sol constantemente en la banda de rayos X. Los datos generados por ellos se encuentran disponibles para su consulta en línea en la página web: <http://goes.ngdc.noaa.gov/data/avg/>. En las figuras siguientes, las curvas de color azul y rojo corresponden a los datos del satélite GOES-10. Para estos datos se grafica el flujo de rayos X por unidad de área en el eje vertical (margen izquierdo) *versus* el tiempo en el eje horizontal. Mientras que los datos del SID (curva en color negro) se grafica el voltaje medido en el eje vertical (margen derecho) *versus* tiempo en el eje horizontal. La curva de color azul corresponde a mediciones hechas en el rango de longitudes de onda de 1-8 Angstroms, mientras que la de color rojo fue hecha en el rango de 0.5-3 Angstroms. Los eventos fueron seleccionados tomando en cuenta su magnitud, principalmente; ya que como se apuntó en el capítulo anterior, los monitores SID están diseñados para detectar fulguraciones de clase C 2.0 o superiores. Nuevamente, el tiempo está referido al tiempo universal (TU). Los datos se tomaron de la página web del SID: <http://solar-center.stanford.edu/SID/sidmonitor/>.

4.2.1. Evento I: 26 de abril de 2006

La Figura 4.4 muestra el registro de la fulguración ocurrida el 26 de Abril de 2006, captada por el Observatorio Solar Wilcox en Stanford, California (trazo de color negro). Tiene una duración de 19 minutos. Inicia a las 16:51 TU y termina a las 17:10 TU. El máximo de la fulguración tiene lugar a las 17:02 TU. Las coordenadas de localización en la superficie del sol de la fulguración óptica correlacionada son 8° Sur y 38° Este. Esta fulguración corresponde a una de clase M con intensidad de 1.3.

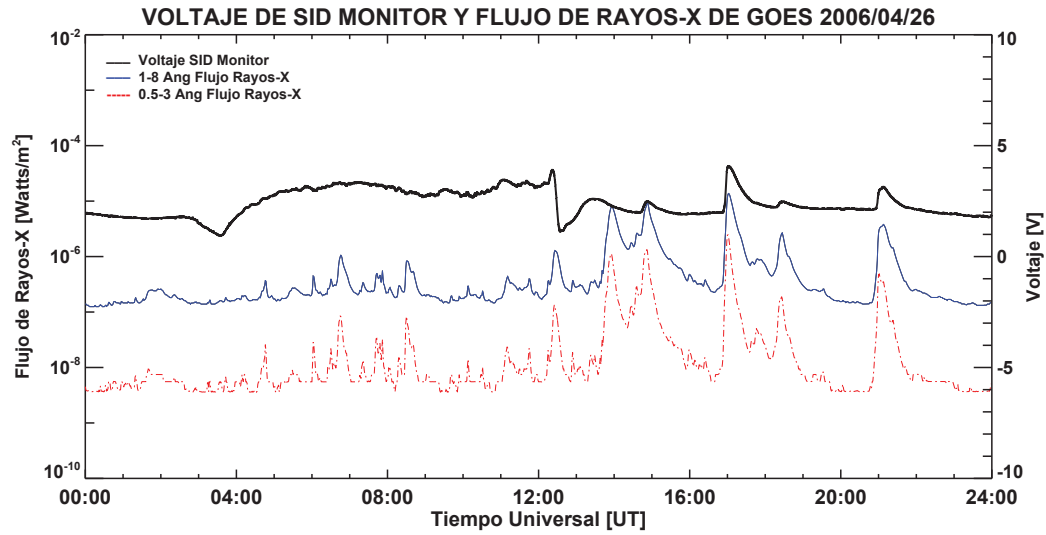


Figura 4.4: Registro de la fulguración del 26 de Abril de 2006. Clase M13

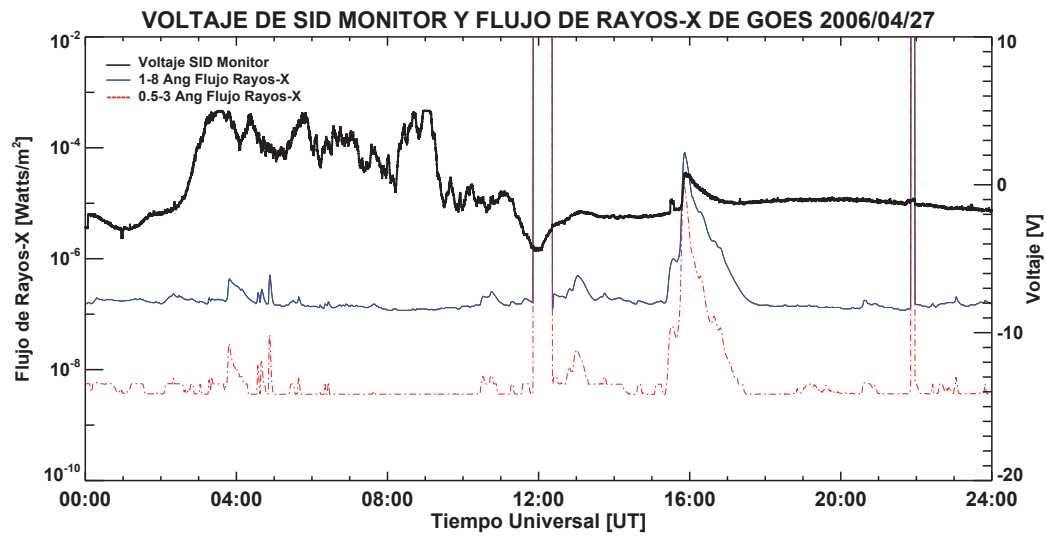


Figura 4.5: Registro de la fulguración del 27 de Abril de 2006. Clase M79

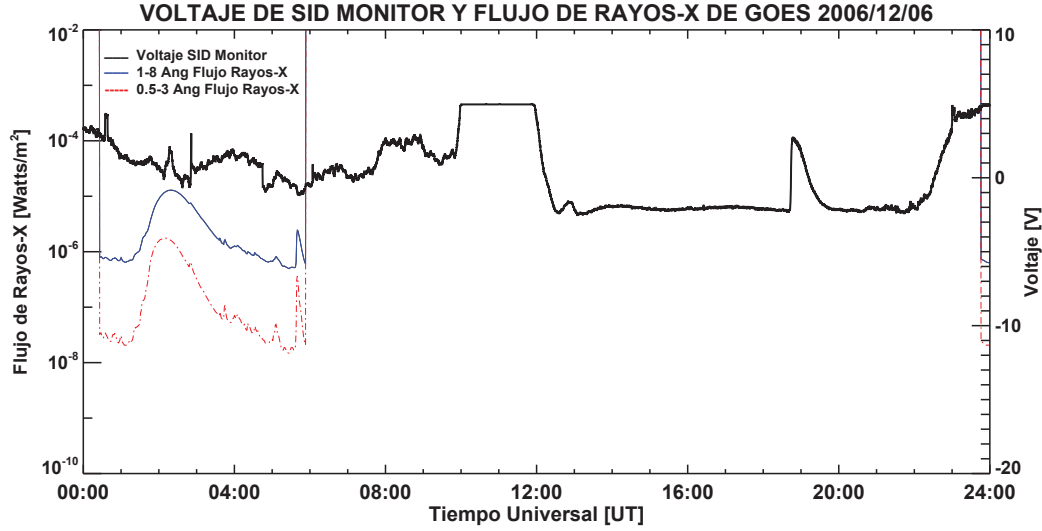


Figura 4.6: Fulguración solar del 6 de Diciembre de 2006. Clase X65

4.2.2. Evento II: 27 de abril de 2006

La figura 4.5 muestra otra fulguración captada por el Observatorio Solar Wilcox desde Palo Alto, California. Ésta ocurrió el 27 de abril de 2006 y tuvo una duración de 36 minutos. Inicia a las 15:22 TU y termina a las 15:58 TU, el máximo fue localizado a las 15:52 TU. Las coordenadas de posición son 8° Sur, 26° Este. Es una fulguración de clase M y magnitud 7.9. Los datos en las pequeñas regiones alrededor de las 12:00 horas y las 22:00 horas no se consideran válidos ya que corresponden a datos erróneos en las lecturas tomadas por los satélites..

4.2.3. Evento III: 6 de diciembre de 2006

La Figura 4.6 muestra la fulguración captada desde Nueva York el 6 de diciembre de 2006. Con una duración de 31 minutos, inicia a las 18:29 TU y culmina a las 19:00 TU, el máximo ocurrió a las 18:47 TU. Sus coordenadas son 5° Sur, 64° Este. A diferencia de las anteriores ésta corresponde a la clasificación más alta, a saber de clase X, y magnitud 6.5. Desafortunadamente, en la gráficas correspondiente a los datos de los GOES, en su mayor parte son erróneos, y no es posible ver la parte correspondiente a la fulguración en sí. Sin embargo los datos tomados por el SID muestran claramente dicho evento.

4.2.4. Evento IV: 14 de diciembre de 2006

La Figura 4.7 muestra nuevamente una fulguración de alta intensidad y larga duración, captada desde el estado de Utah. Ésta fulguración ocurrió el 14 de diciembre de 2006 y tuvo una duración de 1:19 horas, inició a las 21:07 TU para culminar a las

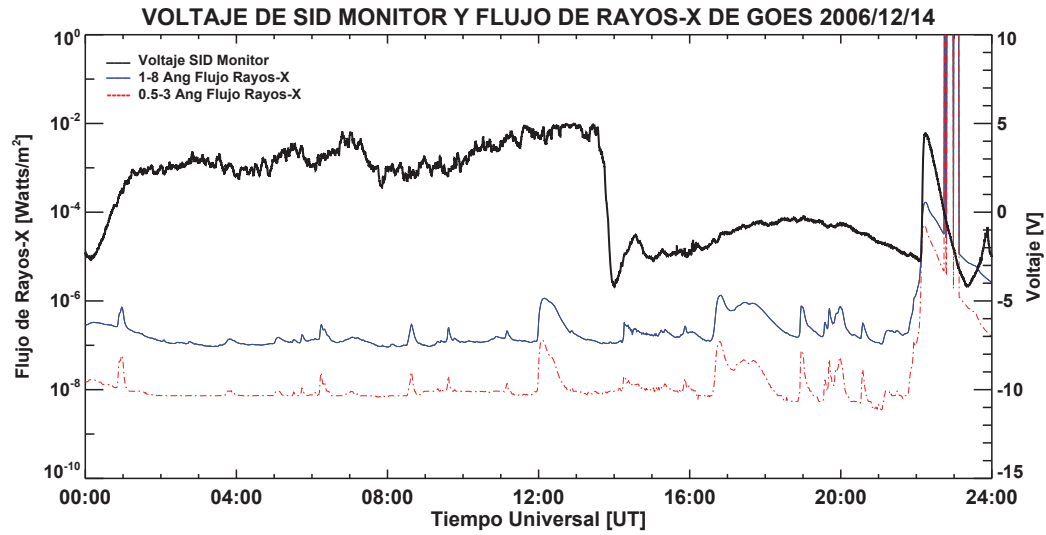


Figura 4.7: Fulguración solar del 14 de Diciembre de 2006. Clase X15

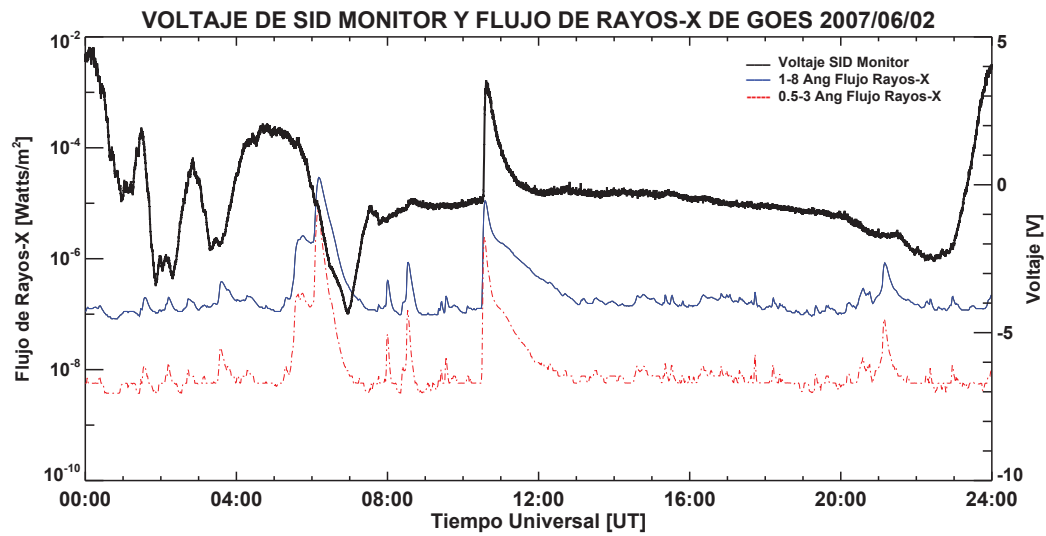


Figura 4.8: Fulguración del 2 de Junio de 2007. Clase M10

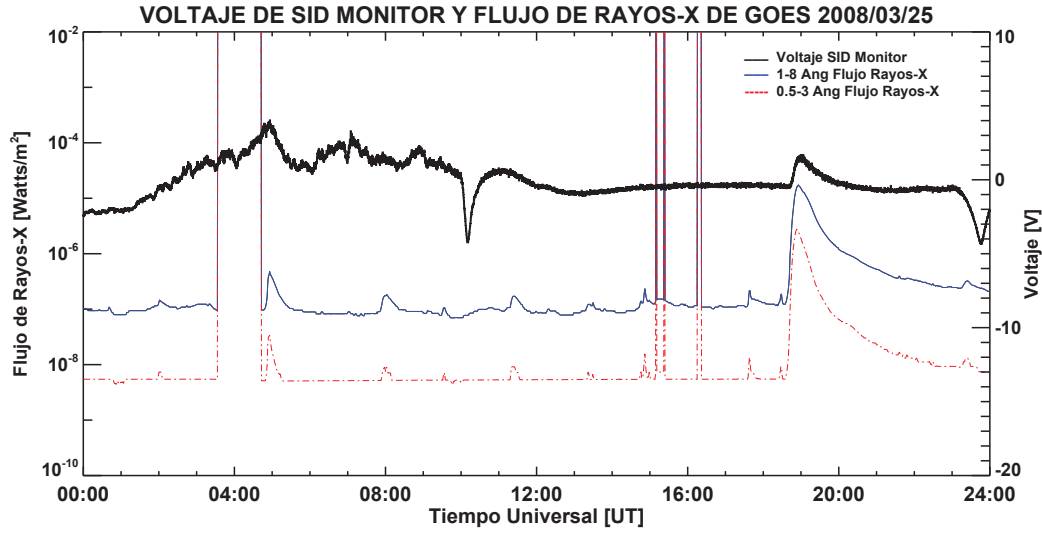


Figura 4.9: Fulguración del 25 de Marzo de 2008. Clase M17

22:26 TU. El máximo tuvo lugar a las 22:15 TU. Fue localizada en las coordenadas 6° Sur, 46° Oeste. Su magnitud fue de 1.5, clase X. De nuevo hay una pequeña región casi al final de las gráficas correspondientes a datos inexactos del GOES.

4.2.5. Evento V: 2 de junio de 2007

En la figura 4.8 se muestra la fulguración ocurrida el 2 de junio de 2007. Los datos corresponden a los registros del monitor SID situado en Bergen, Alemania. Es una fulguración de corta duración, con tan solo 13 minutos, inicia a las 10:28 TU y termina a las 10:41 TU. El máximo tuvo lugar a las 10:35 TU. Dentro de los datos del satélite no se encuentran las coordenadas de su localización geográfica. Ésta corresponde a una fulguración de clase M y su intensidad es de 1.0.

4.2.6. Evento VI: 25 de marzo de 2008

Finalmente, la figura 4.9 corresponde a la fulguración del 25 de marzo de 2008. Esta fue captada desde la localidad de Ancaster, en Ontario, Canadá. Su duración fue de 37 minutos; inició a las 18:36 TU y culminó a las 19:13 TU, el máximo ocurrió a las 18:56 TU. Las coordenadas geográficas de su localización son 13° Sur, 78° Este. Su magnitud fue de 1.7, catalogado como de clase M.

Capítulo 5

Conclusiones

Durante el desarrollo de la presente tesis, hemos conseguido calibrar el equipo descrito en el capítulo 3. Dicho equipo se encuentra operando cumpliendo así el objetivo para el cual fue diseñado. Para ello realizamos el rastreo de ondas de radio de muy baja frecuencia midiendo su intensidad al ser recibidas por nuestra antena. Si bien, como se aclaró en el capítulo 4, durante el desarrollo de la presente tesis no ocurrió ninguna fulguración, ello no impidió llevar a cabo con éxito el proceso de calibración del equipo. Con los datos obtenidos generamos las gráficas mostradas en el capítulo anterior, las cuales presentan un perfil característico que indica que el equipo funciona adecuadamente. Al finalizar el presente trabajo hemos llegado a las siguientes conclusiones:

1. El desempeño del equipo descrito en el capítulo 3 es óptimo. La antena una vez calibrada, es capaz de generar los perfiles deseados en las graficas como aquellas que se muestran en el capítulo 4. Esto indica también que hay una buena recepcion de la señal para este sitio de observación.
2. Hemos anexado un sitio de observación más a la red mundial de observatorios terrestres interconectados, ampliando y respaldando las mediciones que ya realizan algunas misiones espaciales. Por ejemplo, en la Figura 4.6, hay una porción muy amplia en la gráfica (aproximadamente 75 % del total de los datos) correspondiente a errores en la lectura del satélite, y justo en esta parte se registra una fulguración, que los datos de uno de los monitores SID muestran claramente.
3. El perfil de las gráficas presentadas en el capítulo precedente, nos permite inferir el surgimiento de un patrón de las fluctuaciones en la ionosfera como resultado del ciclo día/noche.
4. Para finalizar, es importante señalar que el estudio de los fenómenos inducidos por el Sol es una tarea muy compleja que requiere del concurso de distintos campos de la ciencia. Tanto a nivel teórico como observacional, existen muchas interrogantes que esperan ser respondidas por las futuras generaciones. A manera de ejemplos de proyectos futuros en los que pueden ser de utilidad los datos de la red de observatorios, se encuentran: (a) la comparación y entendimiento de los efectos causados por el amanecer y el anochecer en diferentes latitudes,

longitudes y estaciones anuales, (b) el monitoreo y entendimiento de los efectos ionizantes tales como el ciclo día/noche, los efectos debidos a eclipses solares, tormentas eléctricas, meteoros y eventos de rayos gamma, (c) la identificación de los cambios ionosféricos como indicadores previos de terremotos, (d) la manera en cómo afecta el diseño de las antenas a su funcionamiento, por citar algunos.

Bibliografía

- [1] Aguilar-Rodríguez, E., Características y Evolución de las Eyecciones de Masa Coronal, Departamento de Física Espacial del Instituto de Geofísica, UNAM, 2006.
- [2] Abelson, P. H., Science, 271-273, 1996.
- [3] Alfvén H., and C. G. Fälthammar., Cosmical Electrodynamics: Fundamental Principles, Second Edition, Oxford University Press, 1963.
- [4] Anderson, D., and T. Fuller-Rowell, The Ionosphere, Space Environment Center, 1999.
- [5] Aschwanden, Markus J., Physics of the solar corona : an introduction with problems and solutions, Springer, 2006.
- [6] Baker, D. N., Effects of the Sun on the Earths Environment, Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics 62, 1669-1681, 2000.
- [7] Baker, D. N., and J. G. Kappenman, Science, 273, p.168, 1996.
- [8] Barr, R., et al., ELF and VLF Radio Waves, Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics 62, 1689-1718, 2000.
- [9] Blanco-Cano, X., El descubrimiento del viento solar, Boletín Skylab, Número 10, 1998.
- [10] Bothmer, V. and I. A. Daglis, Space Weather Physics and Effects, Springer, 2007.
- [11] Bravo, S., El Clima Espacial, Boletín Skylab, Número 12, 1998.
- [12] Bravo, S., Plasmas en Todas Partes, Fondo de Cultura Económica, 1997.
- [13] Burrell, B., Space Weather Forecast. A Space Weather Curriculum for High Schools Students. Chabot Space & Science Center, 2008.
- [14] Castro-Castro, D. A., and O. G. Vásquez-A., Termodinámica del Plasma, Ingeniería & Desarrollo 2, 23-27, Universidad del Norte, Colombia, 1997.
- [15] González-Esparza, J. A., Introducción a la Dinámica de Gran Escala del Medio Interplanetario, Comunicación Técnica, Serie Docencia, Instituto de Geofísica, UNAM, 2000.
- [16] Goodman, John M., Space Weather & Telecommunications, Springer, New York, 2005.
- [17] Gossard, E. E., and W. H. Hooke, Waves in the Atmosphere, Elsevier Scientific Pub.Co., Amsterdam, Oxford, and New York, 1975.
- [18] Hanslmeier, A., The sun and space weather, Kluwer Academic Publishers, 2004.
- [19] Kamide, Y., From Discovery to Prediction of Magnetospheric Processes, Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics 62, 1659-1668, 2000.

- [20] Kappenman, J. G., Space Storms and Space Weather Hazards, Cap. 13, p. 335, Kluwer Academic Publishers, 2001.
- [21] Kivelson, M. G., and C. T. Russell, Introduction to Space Physics, Cambridge University Press, 1995.
- [22] Lanzerotti, L. J., Space Weather, Geophysical Monograph 125, p. 11, American Geophysical Union, Washington, DC, 2001.
- [23] Mitchell, R., D. Scherrer, and S. Lee, Space Weather Monitor. Sudden Ionospheric Disturbance Users Manual, Stanford Solar Center, 2007.
- [24] National Academy of Sciences, Severe Space Weather Events. Understanding Societal and Economic Impacts: A Workshop Report. Space Studies Board, Division on Engineering and Physical Sciences, The National Academies Press, Washington, D. C., 2001.
- [25] Robinson, P. A., Jr., Spacecraft environmental anomalies handbook, JPL Report GL-TR-89-0222, Pasadena, CA, 1989.
- [26] Rodger, A. S., and M.J. Jarvis, Ionospheric Research 50 Years Ago, Today and Tomorrow, Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics 62, 1629-1645, 2000.
- [27] Scherer, K., H. Fichtner, B. Heber, U. Mall (Editores). Space Weather, Lecture Notes in Physics 656, Springer, Berlin Heidelberg, 2005.
- [28] Scherrer, D., Research with Space Weather Monitor Data. A Guide for Teachers, Stanford Solar Center, Stanford University, 2007.
- [29] Scherrer, D., et al., Distributing Space Weather Monitoring Instruments and Educational Materials Worldwide for IHY 2007: The AWESOME and SID project, Advances in Space Research 42, 1777-1785, 2008.
- [30] Singer, H. J., et al., Space Weather, Geophysical Monograph 125, p. 23, American Geophysical Union, Washington, DC, 2001.
- [31] Tousey, R., *The Solar Corona*, Proceedings of Open Meetings of Working Groups of the 15th Plenary Meeting of the Committee on Space Research (COSPAR), Madrid, Spain, May 10-24, 1972, Berlin: Akademie Verlag, and Oxford: Pergamon, 1973, edited by M.J. Rycroft and S.K. Runcorn, 1973.
- [32] Turner, R., IEEE Transactions on Plasma Science, 28, 2103, 2000.
- [33] Whitehead, J. D., Production and Prediction of Sporadic E, Reviews of Geophysics, 8, p. 65-144, 1970.