



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

Estudio de los efectos de las ráfagas
solares sobre la ionosfera terrestre por
medio de ondas de radio de muy baja
frecuencia

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
FÍSICO

P R E S E N T A:
JOAB AQUILES GONZÁLEZ ROSAS



DIRECTOR DE TESIS:
DR. ALEJANDRO LARA SÁNCHEZ

Cd. Universitaria, D.F. 2015



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Dedicado al pilar de mi existencia, la mujer que me ha entregado todo lo que tengo y lo que soy, aquella que ha brindado incondicionalmente su tiempo, ayudándome a eludir la ignorancia a través del sendero de la educación formándome como un hombre íntegro y honesto; sin su orientación y consejos en momentos de mayor aflicción y languidez no hubiera sido posible para mi concluir las metas que me había trazado.

Madre este trabajo es en tu honor, para poder devolverte un pedacito de todas las cosas que me has dado.

Agradecimientos

Agradezco a la Facultad de Ciencias, al Instituto de Geofísica y a la Universidad Nacional Autónoma de México por todos los recursos que me proporcionaron durante mi formación académica y para la elaboración de esta tesis.

A mi asesor el Dr. Alejandro Lara Sánchez por el tiempo y atención que dedicó a disipar mis dudas, así como el cuidado que mostró a mi adecuada orientación sobre el tema.

A toda mi familia, en especial a mi madre Elizabeth Rosas Chacón por todo su apoyo, paciencia y comprensión.

A Paulina Anahí Trigueros Villar que siempre supo usar las palabras precisas en cada situación, alentándome a seguir adelante con todos sus consejos y sugerencias, además de su gran cariño y apoyo moral.

Índice general

Resumen	V
Introducción	VI
1. Ionosfera	1
1.1. Que es la ionosfera y como es su perfil de temperaturas	1
1.2. Mecanismo de formación de la ionosfera terrestre y su composición	3
1.3. Densidad electrónica en la ionosfera y recombinación	5
1.4. Frecuencia de corte del plasma	10
1.5. Ionosfera de día y de noche	11
2. El Sol	13
2.1. Estructura solar	13
2.2. Actividad solar	16
2.2.1. Manchas solares	16
2.2.2. Características de las manchas solares	17
2.2.3. Prominencias o filamentos	18
2.2.4. Eyecciones de masa coronal	19
2.3. Ráfagas solares	21
2.3.1. Explosiones solares	21
2.3.2. Definición de ráfagas	21
2.3.3. Clasificación de las ráfagas solares observadas en rayos X	23
3. Las estaciones SAVNET y LAVNet-Mex	25
3.1. Antenas y dispositivos de LAVNet	28
3.1.1. Antenas de lazo	29
3.1.2. Receptor GPS y la tarjeta de audio delta 44	30
4. Resultados	32
4.1. Fluctuación de la fase con respecto a la potencia	32
4.2. Relación entre la potencia de las ráfagas y la variación de la altura a la que rebotan las ondas de radio VLF	41
4.3. Cálculo de las correlaciones entre los corredores	50

5. Conclusiones	53
5.1. Fluctuación de la fase con respecto a la potencia	53
5.2. Relación entre la potencia de las ráfagas y la variación de la altura a la que rebotan las ondas de radio VLF	54
5.3. Cálculo de las correlaciones entre los corredores	54
Appendices	55
A. Desarrollo de la teoría de Chapman	56
B. Datos recopilados de las ráfagas de marzo del 2011	62
C. Δh y corrección de Δh	67
Bibliografía	74

Resumen

Se analizaron los efectos sobre la ionosfera terrestre de la emisión solar en rayos-X producida durante las ráfagas que fueron observadas en marzo del 2011. Las emisiones de rayos-X provocan un descenso en la altura a la que son desviadas las señales de radio y un desfase de las mismas, por lo que el estudio se dividió en tres partes: En la primera parte se analiza la posible relación entre la pendiente de las gráficas “Logaritmo de la magnitud de la potencia de las ráfagas vs. Logaritmo del cambio en la fase de las señales de radio de muy baja frecuencia” y la distancia que existe entre las estaciones emisoras y la receptora LAVNet-Mex, resaltando la necesidad de usar una mayor cantidad de estaciones emisoras para mostrar resultados concluyentes. En la segunda parte se hace un intento por encontrar una posible relación lineal o cuadrática entre la potencia de las ráfagas y el cambio en la altura a la que rebotan las señales de radio, tratando de explicar los resultados por medio de la orientación de los corredores y por medio de la distancia entre las emisoras y la receptora; aquí se encontró una clara tendencia, ya que conforme la potencia de las ráfagas aumentaba el descenso en la altura a la que rebotaban las señales de radio era mayor, sin embargo no se pudo cuantificar la relación como cuadrática o lineal debido a la gran dispersión de los datos. Finalmente en la parte tres se usan las gráficas de las señales de radio de diez eventos (ráfagas), para correlacionarlas en el segmento del ascenso, concluyendo que entre mayor sea la potencia de las ráfagas más se correlacionarán.

Introducción

En el Instituto de Geofísica de la UNAM (IGEF) existe una antena receptora de ondas de radio de muy baja frecuencia (VLF) llamada LAVNet-Mex, la cual capta la señal emitida por 6 diferentes estaciones alrededor del mundo, estas estaciones usan a la ionosfera como un medio que refleja las ondas de radio y así pueden transmitir su señal hasta la estación LAVNet en México. Cuando la energía de una ráfaga solar incide en las capas ionosféricas la señal de radio que continuamente es recibida en el IGEF por LAVNet es alterada, generándose una variación en la fase (Δf) y en la amplitud (ΔA) de dichas señales. De esta forma con LAVNet se pueden estudiar los efectos de la actividad solar sobre la ionosfera terrestre.

Cabe aclarar que los estudios de los efectos de las ráfagas solares sobre la ionosfera terrestre por medio de ondas de radio de muy baja frecuencia (VLF) son efectuados desde hace ya tiempo. Durante los sesentas fueron observadas anomalías en la fase de las señales de radio VLF en diferentes estaciones receptoras cuando la radiación de ráfagas solares llegaba a la Tierra, razón por la cual diferentes investigadores comenzaron a estudiar estos fenómenos, entre los pioneros que estudiaron este tema tenemos a Wait (1959) un profesor de ingeniería eléctrica de la Universidad de Colorado que se dedicaba al estudio de la propagación de ondas electromagnéticas en medios estratificados (como la ionosfera terrestre).

James Wait y otros autores como Bates y Albee (1965) dedujeron expresiones similares que relacionan la fluctuación en la fase (Δf) de las señales VLF con la variación en la altura (Δh) a la que las ondas VLF son desviadas, señalando que estas variaciones están asociadas a la ionización de la capa ionosférica D producida por emisiones de rayos X durante las ráfagas solares. En este trabajo sin embargo se utiliza la ecuación que dedujo Wait por ser más adecuada para los cálculos.

Ya por los setentas estaba bien establecido que el incremento en la ionización de la capa D era debido a la interacción con rayos X, de longitud de onda menores a 10 \AA y había diversos trabajos en los que se relacionaba Δh con el ángulo cenital (posición del Sol medida en coordenadas geográficas desde la estación receptora) cuando ocurrían los eventos de ráfagas solares, en este

tema encontramos trabajos como los de Chilton et al. (1963), Sengupta (1971) y Ohle et al. (1974), donde los 2 últimos señalaron que Δh depende linealmente del promedio del logaritmo de la secante del ángulo cenital.

En esos años y en los posteriores se realizaron trabajos con el fin de encontrar relaciones entre Δh y el logaritmo de la secante del ángulo cenital conforme a las diversas estaciones del año, de acuerdo a la distancia entre las estaciones emisoras y la receptora, y de acuerdo también a la potencia de las ráfagas emitidas, además de buscar el umbral de la intensidad del flujo en rayos X para el cual se observaban las anomalías de fase (Sudden Phase Anomalys, SPA's).

Hasta nuestros días la relación entre los rayos X en el rango de longitudes de onda de 1 a 8 Å (originados por ráfagas solares) y las SPA's siguen siendo temas de estudio. En el año 2009 debido a estas investigaciones se comenzó a operar una red de estaciones receptoras de ondas VLF establecidas en Sudamérica, la red fue llamada SAVNET (South America Very low frequency NETWORK), sus principales objetivos son el monitoreo constante de la actividad solar y el estudio de la región de la Anomalia Magnética del Atlántico Sur. Se menciona a SAVNET (Raulin et al., 2009) ya que es el antecesor de la principal herramienta de trabajo en esta tesis, la estación LAVNet (Latin America Very low frequency Network), la cual se baso en el diseño de SAVNET.

Entre los demás investigadores que han aportado a este campo de trabajo tenemos a McRae y Thomson (2004), a Pant (1993), a Borgazzi et al. (2014) y a Muraoka, Murata y Sato (1977), de estos 3 últimos se tomó la ecuación que usamos para calcular la variación en la altura a la que rebotan las ondas de radio (aunque esta ecuación fue deducida anteriormente por Wait).

En este trabajo se analizan los datos del flujo de energía de diversas ráfagas solares observadas durante el mes de marzo del 2011, y su relación con la fluctuación en la fase de las señales de radio captadas por la estación LAVNet-Mex, según la distancia que existe entre dicha estación receptora y las diversas emisoras, y de acuerdo a la orientación de los corredores (camino que sigue la onda de radio desde una estación emisora dada, hasta llegar a la estación LAVNet-Mex) de las diferentes estaciones emisoras.

También se pretende encontrar una relación coherente entre la potencia de las ráfagas solares y la fluctuación en la altura a la que son desviadas las señales de radio, además de que se hizo un pequeño análisis de las correlaciones que guardan los datos de radio de acuerdo a la potencia de emisión de las ráfagas para 10 eventos en particular, que afectaron la señal captada de la mayoría de las radioemisiones.

En el capítulo 1 se habla de la ionización de la atmósfera neutra, así como también de las características generales de la ionosfera, como su perfil de

temperaturas según la altura, las diferentes capas que la componen, etc.

Las ondas de radio con una frecuencia por debajo de la frecuencia de corte (frecuencia natural a la que oscilan los electrones en el plasma) no consiguen penetrar una capa dada y son rebotadas hacia la superficie terrestre, razón por la que fue indispensable hablar de dicha frecuencia de corte, esta frecuencia depende principalmente de la densidad electrónica, lo que obligó a hablar de esa densidad electrónica en cada capa de la ionosfera, además de mencionar la composición atómica y molecular en las diferentes capas, ya que el grado de ionización de la atmósfera neutra depende de sus constituyentes a una altura dada.

En este capítulo también fue necesario hablar sobre las diferencias en el comportamiento ionosférico de día y de noche debido a que este estudio se basó en eventos que sucedieron principalmente durante el día, sin embargo hubieron algunos eventos que ocurrieron a horas ya cercanas al anochecer y se tomaron en cuenta.

El capítulo 2 nos habla brevemente de las características generales del Sol y de algunos fenómenos que acontecen en él, como las manchas solares, las eyecciones de masa coronal, los filamentos y principalmente de las ráfagas solares en el rango de los rayos X de 1 a 8 Å de longitud de onda, tema de nuestro interés ya que esta radiación penetra hasta las regiones más bajas de la atmósfera neutra ionizándola, mientras que la demás radiación emitida durante las ráfagas solares es absorbida por las capas más externas de la atmósfera.

El capítulo 3 se refiere a la composición y frecuencias de trabajo de nuestro dispositivo receptor de ondas de radio de muy baja frecuencia plantado en la azotea del IGEF “LAVNet” y a su antecesor SAVNET y su ubicación en el hemisferio sur, además de que habla acerca de las estaciones emisoras de radio de las cuales LAVNet capta la señal.

El capítulo 4 (resultados) habla concretamente de los pasos que se realizaron en este estudio para analizar los efectos de la radiación de las ráfagas sobre la ionosfera terrestre, y de los resultados que se obtuvieron por medio de ese análisis mediante ajustes a los datos obtenidos; finalmente en las conclusiones se proponen posibles soluciones a los problemas presentes durante el trabajo, mientras que los apéndices muestran las tablas de datos recolectados de las ráfagas solares estudiadas, además del proceso del “transporte vertical de iones” y el desarrollo de la teoría de “la capa de Chapman” que nos proporciona la densidad electrónica (o iónica) de la mayoría de las capas ionosféricas.

1

Ionosfera

1.1. Que es la ionosfera y como es su perfil de temperaturas

Para hablar de la ionosfera primero tenemos que mencionar que es un plasma, un plasma es un gas eléctricamente neutro compuesto de partículas cargadas, entre los que se encuentran iones de diferentes elementos, protones y electrones. Debido a la carga de las partículas el comportamiento de los plasmas está regido por fuerzas eléctricas y magnéticas.

Existen diferentes plasmas que se originan de forma natural en el universo, entre ellos se encuentra el viento solar, el plasma formado momentáneamente alrededor de la descarga eléctrica de un relámpago y el plasma en las ionosferas de algunos planetas. En particular el plasma ionosférico terrestre es un plasma frío ya que la razón entre la presión cinética de las partículas en el plasma y la presión que ejerce el campo magnético inducido en él es $\beta \ll 1$ (el llamado parámetro beta del plasma), lo que quiere decir que la presión magnética es mucho mayor que la cinética y en este caso el campo magnético es el que rige el comportamiento del plasma, en el caso contrario cuando $\beta \geq 1$ se le llama un plasma caliente (característico de los plasmas espaciales).

Ya que la ionosfera se forma a partir de la ionización del gas neutral presente en la atmósfera terrestre (ver sección 1.2) y que ambos gases son afectados por la gravedad, pueden ser considerados a primer orden como horizontalmente estratificados. La división de estos 2 gases nos permite fácilmente organizar a la atmósfera neutra en un perfil de temperaturas, mientras que es más provechoso y útil para el fin de este trabajo representar a la ionosfera con un perfil de densidad electrónica (ver sección 1.3 y figura 1.1).

A 1 *km* de altitud la atmósfera neutra típicamente presenta una temperatura aproximada de 281.5 *K* y va disminuyendo a un ritmo de 6.5 *K* cada

kilometro durante la ascensión en la troposfera, al llegar al limite con la estratosfera alrededor de los 10 *km* de altitud, el proceso se invierte y la temperatura comienza a elevarse debido a que el ozono absorbe una porción de la radiación ultravioleta (UV) entrante. Alrededor de los 50 *km* de altitud, en la estratopausa, cesa el incremento y nuevamente comienza a disminuir la temperatura, esta vez en un proceso mucho más rápido llegando a un rango mínimo de entre 130 y 190 *K* aproximadamente a los 90 *km* de altitud. Después de esa altura, en la mesopausa, hay un incremento abrupto en la temperatura llegando hasta un máximo aproximado de 1000 *K* (en la termosfera) debido a la absorción de energía proveniente de los fotones solares (radiación UV y ultravioleta extremo EUV). La figura 1.1 muestra el perfil de temperaturas típico de la atmósfera neutra.

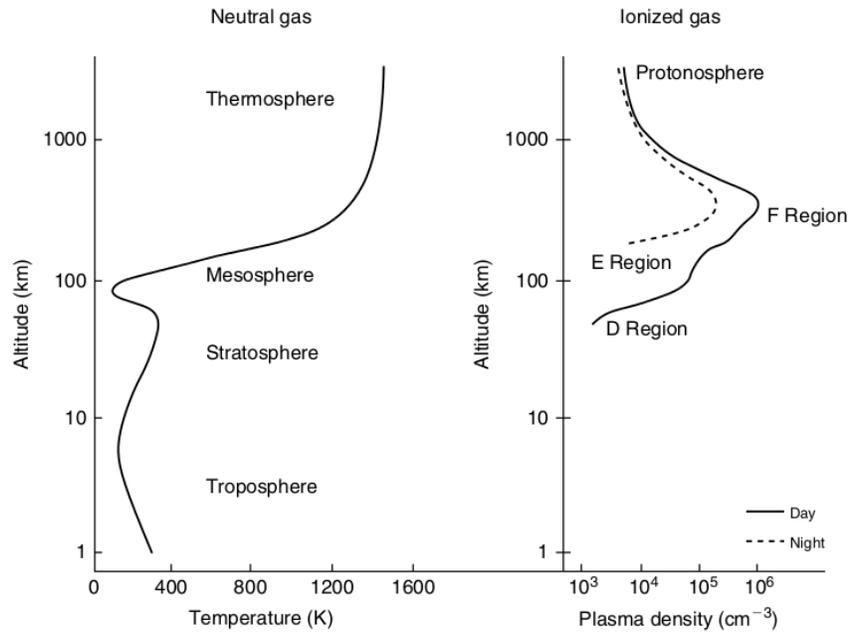


Figura 1.1: Del lado izquierdo de la imagen se muestra el perfil típico de temperaturas en la atmósfera neutra, mientras que del lado derecho se observa el perfil de densidades de las capas ionosféricas a la misma altura, donde la línea sólida representa la densidad durante el día y la línea punteada la densidad cuando es de noche. Fuente: Kelley, M. (2009). *The Earth's Ionosphere: Plasma Physics and Electrodynamics*.

1.2. Mecanismo de formación de la ionosfera terrestre y su composición

La ionosfera es la capa de la atmósfera terrestre que debido a la radiación proveniente del Sol (esta radiación impacta con la ionosfera y desprende electrones de sus partículas componentes, ionizándolas, proceso conocido como fotoionización) se encuentra permanentemente ionizada, su límite superior e inferior varían según el autor, aunque en promedio puede decirse que se extiende aproximadamente entre los 85 y los 700 km de altitud en el lado noche y de 55 a 700 km en el lado día. Las diferentes capas de la ionosfera pueden pensarse como independientes ya que absorben radiación solar a diferentes frecuencias debido a sus constituyentes, los cuales responden de manera diferente al espectro electromagnético solar incidente, por lo que todas tienen un grado de ionización diferente y son:

- Capa D: La capa D solo existe durante el día, esta situada por debajo de los 90 km y el piso de esta capa se encuentra aproximadamente entre los 50 y 75 km de altitud.
- Capa E: Región entre los 90 y 130 km de altitud.
- Capa F: Es la última capa de la ionosfera por lo que no tiene un límite claro establecido a lo alto, se encuentra por arriba de los 130 km de altitud y se subdivide en las capas F1 y F2.

Para que se desarrolle una capa ionosférica o ionosfera en la atmósfera es necesaria la presencia de una atmósfera neutra y una fuente de ionización, en el caso de la Tierra la ionización puede venir de varias fuentes, rayos cósmicos, la magnetósfera, el Sol, o incluso por procesos de aceleración de electrones dentro de la misma ionosfera, sin embargo los factores más dominantes a medianas latitudes son la radiación solar UV y EUV en el rango de 10 a 100 nanómetros, por lo menos en el lado día de la ionosfera.

Como resultado de la ionización la atmósfera terrestre resulta en la mezcla de 2 gases (a la altura de las capas ionosféricas), en la región de la capa D existe una mezcla de una parte neutral llamada mesosfera y de la parte ionizada llamada ionosfera, a la altura de la capa E la mesosfera continúa siendo la parte neutral, mientras que en la capa F la parte neutral se conforma por una parte de la mesosfera y por la termosfera.

Para el estudio de las diferentes capas ionosféricas se ha desarrollado una teoría muy práctica y útil llamada la Teoría de la capa de Chapman (ver apéndice A), en base a esta teoría es posible analizar el perfil de densidad de las especies ionizadas en la ionosfera, sin embargo no todas las capas de la ionosfera cumplen con las características de una capa de Chapman, por lo que es necesario usar otros métodos para determinar las densidades en dichas capas.

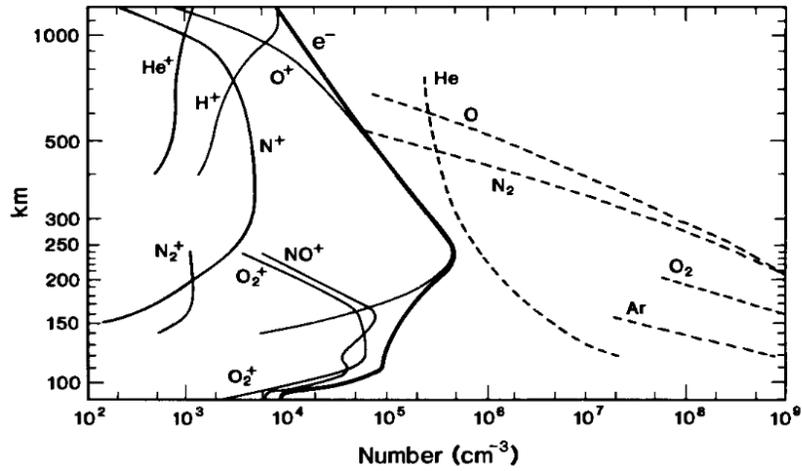


Figura 1.2: Imagen que muestra las diferentes especies iónicas presentes en la ionosfera según la altitud, además de la composición y densidad de la atmósfera neutra en líneas punteadas. Fuente: Kivelson, M y Rusell, C. editores (1995). *Introduction to Space Physics*.

La capa E y F1 se pueden considerar aproximaciones razonables de una capa de Chapman. La composición de la capa F1 es principalmente O^+ y la máxima densidad de electrones ocurre aproximadamente a los 170 km. Mientras que los iones principales en la capa E son O_2^+ y NO^+ , la radiación UV en el rango de 100 – 150 nm y los rayos X en el rango de 1 – 10 nm son los productores de estas especies; para esta capa el transporte vertical de iones es despreciable, por lo que la tasa efectiva de recombinación (coeficiente α de recombinación) se obtiene de la ecuación 1.11. En la figura 1.2 se aprecia el perfil de densidades de las diferentes especies presentes en la ionosfera según la altitud.

La capa F2 está dominada por iones de O^+ y no puede ser descrita en términos de la teoría de la capa de Chapman, debido a que por debajo del pico de densidad iónica (alrededor de los 250 km de altitud) puede haber recombinación del O^+ con O_2 y N_2 (ver ecuación 1.7) y posteriormente una recombinación disociativa sumamente rápida (ver sección 1.5 tercer párrafo) que afecta significativamente la tasa de producción iónica y no permite usar tan fácilmente la ecuación 1.12. Por esta razón la densidad iónica de la capa F2 requiere más bien una explicación en términos de la fotoquímica o movimientos verticales de los iones ocasionados por fricción o por efectos magnetosféricos.

Ya que la capa D es la más profunda en la ionosfera solo las fuentes de ionización más energéticas son capaces de penetrar hasta ahí, las longitudes de onda de rayos X de 0.1 a 1 nm (región que contiene las longitudes de onda de la banda de 1 a 8 Å de nuestro interés) llegan aproximadamente entre los 80 y

90 *km* representando las principales fuentes de ionización, mientras que entre los 70 y 80 *km* de altitud domina la radiación Lyman α (121.6 *nm*), terminando finalmente con los rayos cósmicos quienes dominan la producción iónica en la región más baja de la ionosfera.

Los iones predominantes en la región D son NO^+ y O_2^+ , sin embargo hay una gran cantidad de especies involucradas en esta capa, a pesar de eso su densidad es demasiado baja comparada con las otras capas y no se comporta como los plasmas que presentan pocas colisiones, debido a que en esta capa la frecuencia de colisión de los iones es de 10^6 *Hz*, la cual es muy similar a la frecuencia de las ondas de radio AM, de esta forma estas señales son altamente absorbidas durante el día y casi nualmente absorbidas durante la noche. Las señales de radio FM y de televisión tienen en cambio una frecuencia de operación mucho más alta y casi pasan en su totalidad por esta capa.

Además de las especies presentes, cabe aclarar que también existen cúmulos de agua que comienzan a agrupar los iones entre los 75 y 85 *km* de altitud, lo que contribuye a una muy alta tasa de recombinación.

La ionosfera puede afectar a las transmisiones de radio al menos en 2 formas, la primera consiste en que las partículas cargadas o iones pueden disipar energía de la onda electromagnética, en el caso límite la energía de la onda puede ser disipada completamente; la segunda forma depende de la densidad electrónica, si la densidad electrónica presente en el camino de la onda de radio a través de la ionosfera no es constante, la onda sufre un cambio en la dirección de su propagación. En la siguiente sección me enfocaré en el segundo aspecto y después en la sección 1.4 explicaré en que consiste el primero y como funciona en la ionosfera para el caso de las radiocomunicaciones.

1.3. Densidad electrónica en la ionosfera y recombinación

La estructura vertical de la ionosfera está en constante cambio, varía de día a noche, con las estaciones del año y con la latitud, a pesar de eso sus características esenciales son fácilmente identificables, excepto durante periodos de intensas perturbaciones geomagnéticas.

La tasa de ionización depende de 2 factores muy importantes, la densidad de la atmósfera neutra, la cual decrece con la altura, y la intensidad de la radiación solar, la cual se incrementa con la altura, esto aunado al hecho de que:

- a) El espectro solar deposita su energía a diferentes alturas dependiendo de las características de absorción de la atmósfera.

- b) La física de recombinación depende de la densidad atmosférica (la cual cambia con la altura).
- c) La composición de la atmósfera cambia con la altura.

Ya que es difícil modelar de manera detallada la formación de una ionosfera en una atmósfera neutra, podemos asumir unas simplificaciones, primero supongamos que un rayo monocromático incide en la atmósfera de composición uniforme, en la cual la densidad varía exponencialmente con la altura, después consideremos a la atmósfera plana y que la absorción depende de la altura y el ángulo cenital de la radiación incidente, es decir una capa de Chapman (ver el desarrollo matemático de la teoría de Chapman en el apéndice A).

Ahora, la densidad de una capa atmosférica usualmente obedece la ecuación hidrostática.

$$n_n m_n g = -\frac{dp}{dh} = -\frac{d}{dh}(n_n k T_n) \quad (1.1)$$

La cual expresa el balance entre la fuerza gravitacional vertical y la fuerza ejercida por el gradiente de presión térmico debido al gas atmosférico. Donde m_n es la masa atómica o molecular, g es la aceleración de la gravedad, p es la presión térmica, k es constante de Boltzmann y T_n la temperatura. Considerando T_n independiente de h (claro que T_n puede depender de h , por lo que la solución no siempre provee de una descripción precisa) esta ecuación tiene la solución:

$$n_n = n_0 \exp \frac{-(h - h_0)}{H_n} \quad (1.2)$$

Donde $H_n = \frac{kT_n}{m_n g}$ define la altura de escala del gas y n_0 es la densidad a la altura de referencia h_0 .

Utilizando las ecuaciones anteriores Chapman desarrolló su teoría, llegando a la conclusión de que la tasa de producción iónica Q en la ionosfera dependiente de la altura h esta dada por:

$$Q = Q_m \exp \left[1 + \frac{(h_m - h)}{H_n} - \exp \left(\frac{h_m - h}{H_n} \right) \right] \quad (1.3)$$

Denotando $y = h - h_m/H_n$ obtenemos:

$$\boxed{Q = Q_m \exp[1 - y - \exp(-y)]} \quad (1.4)$$

La cual es la *función de producción de Chapman*, donde Q representa la tasa de producción iónica y la tasa de fotoelectrones (ya que usualmente se producen en pares), Q_m representa la máxima producción iónica dada a la altura h_m , H_n es la escala de altura como ya se mencionó anteriormente y h la altura a la que incide la luz solar (ver figura 1.4), donde además h_m se obtiene de la

ecuación A.24 y Q_m de la ecuación A.19.

En la ionosfera terrestre la mayor tasa de producción iónica, Q_m , se presenta aproximadamente a la altura h_m de 250 km de altitud y con una concentración de alrededor de 10^6 iones/cm³ al medio día. La figura 1.3 muestra el perfil de densidad iónico n_i (ó electrónico n_e) dependiente de la altura en la ionosfera terrestre.

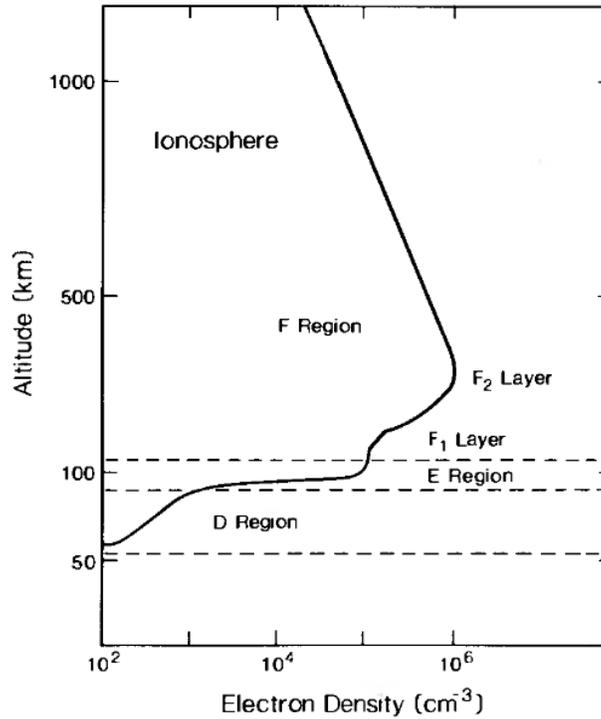


Figura 1.3: Perfil típico de densidad iónica (ó electrónica) en la ionosfera terrestre según la altura. Fuente: Kivelson, M y Rusell, C. editores (1995). *Introduction to Space Physics*.

Pero así como hay producción de iones también hay pérdida de los mismos por recombinación de éstos, principalmente de 2 formas diferentes:

1. Recombinación radiativa $e + X^+ \rightarrow X + h\nu$
2. Recombinación disociativa $e + XY^+ \rightarrow X + Y$
3. Acoplamiento $e + Z \rightarrow Z^-$

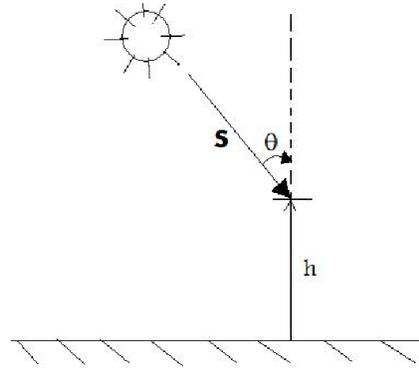
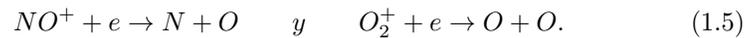


Figura 1.4: Rayos solares incidentes a un cierto ángulo θ .

Donde el tercer punto no se refiere a una pérdida iónica, si no a una pérdida de electrones.

La recombinación radiativa consiste en la emisión de un fotón para conservar la energía y el momento, mientras que la recombinación disociativa requiere que se rompa o disocie el ion molecular.

En la capa E las dos reacciones más rápidas de recombinación que se producen son del tipo:

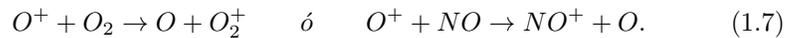


Lo que corresponde a las recombinaciones disociativas de sus iones dominantes como ya se vió en la sección 1.2.

Para el caso de la capa F y en altitudes mayores domina la recombinación:

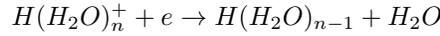


Como se verá en la sección 1.5 éste proceso tiene una tasa de recombinación de 300 horas para la región que está por encima del pico (que se encuentra alrededor de los 250 km de altitud) de densidad iónica, sin embargo por debajo del pico de F los iones O^+ se pierden mucho más rápidamente en 2 pasos, primero uno de los siguientes intercambios de carga ocurren:



Y luego las reacciones disociativas dadas para la región E terminan el proceso de recombinación.

En el caso de la región D, la pérdida de sus iones dominantes NO^+ y O_2^+ , se da por recombinación disociativa, causando las reacciones en la ecuación 1.5, además para la región donde existen iones agrupados en agua, de 75 a 85 km, se tiene otra reacción muy importante conocida como la recombinación de iones agrupados:



En general la recombinación ocurre a un ritmo que depende de la concentración de iones y electrones a una altura dada:

$$\boxed{L = \alpha n_e n_i} \quad (1.8)$$

Donde L es la pérdida de iones, n_e y n_i es la densidad de electrones e iones respectivamente y α es el coeficiente de recombinación (α es determinado por métodos teóricos y empíricos).

En el supuesto de que cada ion solamente pierde un electrón, se tiene que la producción iónica y electrónica es igual, entonces tenemos que $n_i = n_e$, por lo que la tasa de pérdida a una particular altitud resulta proporcional a n_e^2 .

Suponiendo ahora que la tasa de producción y pérdida por recombinación ya esta establecida, resta encontrar la altura de una distribución de densidad n_e dada, considerando además que no hay transporte vertical, es decir que los electrones e iones no se alejan mucho del lugar donde fueron creados, es posible afirmar que las tasas de producción Q y pérdida L obedecen la ecuación de conservación, es decir:

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} = Q - L = 0 \quad (1.9)$$

$$\Rightarrow Q = L = \alpha n_e^2 \quad (1.10)$$

$$\Rightarrow n_e = (Q/\alpha)^{\frac{1}{2}} \quad (1.11)$$

Y sustituyendo el valor de Q de la ecuación 1.3 tenemos:

$$\Rightarrow n_e = \left\{ \frac{Q_m}{\alpha} \exp \left[1 + \frac{(h_m - h)}{H_n} - \exp \left(\frac{h_m - h}{H_n} \right) \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (1.12)$$

La ecuación 1.12 es la ecuación de distribución de equilibrio fotoquímico y describe la distribución espacial de los iones (ó electrones) para el caso en el que el transporte vertical es despreciable.

Para el caso donde los electrones e iones se mueven significativamente lejos de sus puntos de creación antes de recombinarse es necesario considerar un

término de transporte en la ecuación de continuidad (tema que no es de interés en este trabajo).

1.4. Frecuencia de corte del plasma

La frecuencia de corte en el plasma ionosférico es la frecuencia por debajo de la cual una onda de radio no consigue penetrar esa capa de la ionosfera.

Como ya se mencionó en la sección 1.2, la ionosfera es un plasma neutral, es decir que tiene la misma cantidad de cargas positivas que negativas aún en regiones pequeñas del espacio; cuando se viola esta neutralidad por alguna razón, como puede ser colocar una cantidad de carga positiva en una región dada, las fuerzas electrostáticas actúan como una fuerza restauradora, provocando que los electrones (por ser mucho menos masivos que los iones) comiencen a oscilar desde su posición de equilibrio dentro del plasma, sin ninguna fuerza amortiguadora la energía puesta en el plasma para crear la perturbación se mantendrá ahí indefinidamente. La frecuencia de esas oscilaciones esta dada por:

$$W_p = 8980 n_e^{1/2} Hz \quad (1.13)$$

Donde n_e representa únicamente la magnitud de la densidad de electrones medida en cm^{-3} .

Esta es la frecuencia natural de las oscilaciones del plasma resultante de la perturbación de la densidad de carga y depende únicamente de la densidad, donde además puede apreciarse que entre más denso sea un plasma más alta será su frecuencia de oscilación, por lo que es importante conocer el perfil de densidades dado en la sección anterior.

Para que las ondas electromagnéticas puedan atravesar una cierta región de la ionosfera deben de tener una frecuencia superior a la de la “frecuencia natural del plasma” de lo contrario parte de la onda será reflejada y parte será transmitida al plasma, donde a su vez será rápidamente amortiguada por las oscilaciones del plasma.

Ya que la densidad de iones (y electrones) en la ionosfera no es homogénea, como se vio en la sección 1.3, ondas de radio a distintas frecuencias serán reflejadas a distintas alturas y a la altura donde se de la densidad máxima (aprox. a los 250 km de altura) se reflejarán las ondas de máxima frecuencia que pueden ser reflejadas. Ondas con frecuencias mayores que ésta ya no serán reflejadas por la ionosfera, por lo que la máxima densidad de electrones define la frecuencia más alta que puede aún ser reflejada por la ionosfera.

Cabe aclarar que no todas las frecuencias mayores al umbral ionosférico pueden penetrar la atmósfera, ya que hay otros factores que impiden la penetración en ciertas secciones de ésta. Por ejemplo, el infrarrojo es absorbido por las moléculas de agua (presentes en la capa D como se mencionó en la sección 1.3), el UV y los rayos X se capturan para ionizar la atmósfera neutra a la altura de la capa E y F1 (los rayos X más energéticos penetran hasta la capa D como ya se mencionó). De esta forma la ionosfera solo permite el paso de la luz visible y de ciertas ondas de radio actuando como un escudo protector de la luz dañina para nosotros.

1.5. Ionosfera de día y de noche

Haciendo un análisis cualitativo de la figura 1.1 notamos que durante el día cuando la luz solar incide en la atmósfera neutra, provoca un aumento exponencial de la densidad iónica (y electrónica) conforme la altitud disminuye hasta aproximadamente los 250 *km* de altitud, mientras esto sucede los rayos de luz penetrantes depositan su energía por medio de la absorción atmosférica, y van perdiendo intensidad; tomando en cuenta que en la atmósfera alta la densidad del gas neutro es de por si baja y en la región D gran parte de la radiación ionizante ha sido absorbida, tenemos una explicación sencilla para el perfil de ionización en la figura 1.1.

Al caer la noche los iones presentes tienden a neutralizarse mediante recombinación, por lo que se esperaría ese mismo perfil solo que desplazado a la izquierda ya que la fuente principal de ionización, la radiación solar, no esta presente, podemos notar sin embargo cómo la densidad desciende en mucho mayor medida por abajo del pico de densidad en la región F (alrededor de los 250 *km* de altitud), donde dominan los iones moleculares (ver figura 1.2), y por el contrario la densidad casi no cambia por encima de dicho pico de densidad.

Esta diferencia en la caída de la densidad es debido a que en la ionosfera alta (las regiones F1 y F2) predominan los iones atómicos (O^+) y en la baja los iones moleculares (NO^+ y O_2^+ para las regiones E y D), estos 2 tipos de iones tienen tasas de recombinación muy diferentes, como por ejemplo para el nitrógeno molecular es de 10 segundos y sin embargo para el O^+ atómico es de 300 horas, por lo que la tasa de ionización depende de las especies iónicas presentes, dada una sección ionosférica, donde los iones moleculares tienen una tasa mucho más alta de recombinación que los atómicos.

A pesar de su bajísima tasa de recombinación, el O^+ puede recombinarse rápidamente si cede primero su carga a otro ion neutro circundante, que después se recombina disociativamente a una tasa mucho mayor, es por esto que la densidad del O^+ atómico desciende a concentraciones de entre 10^4 y 10^5 iones/*cm*³.

Ahora que la luz solar desapareció existen otras fuentes importantes de ionización presentes a diferentes alturas, como la ionización por impacto en las altas latitudes que crean emisiones de luz auroral cuando las partículas chocan con la atmósfera, estas partículas provienen del viento solar que impacta con la magnetósfera y logran colarse en las zonas polares, durante las ráfagas solares la cantidad de estas partículas aumenta temporal y significativamente, incrementando también la ionización, durante la noche esta es la principal fuente de ionización en la región E, donde los electrones en el rango de energías de $3 - 10 \text{ keV}$ dominan la ionización; los electrones menos energéticos contribuyen también a la ionización de la capa F.

Por su parte la capa D desaparece virtualmente a pesar de que siguen presente los rayos cósmicos como fuente de ionización, llegando a concentraciones de 100 a 1000 iones/ cm^3 hasta la base de la región F.

Por lo que podemos concluir que durante el día la densidad ionosférica depende de la composición iónica a una altura dada y de la variación de la fuente ionizante predominante a dicha altura, como por ejemplo la actividad del Sol que varía periódicamente debido al ciclo solar, mientras que en la noche debido al proceso de recombinación, la densidad iónica depende de la existencia de una buena fuente ionizante, suficiente como para que la tasa de producción sea mayor a la tasa de pérdida debida a la recombinación de las especies iónicas.

2

El Sol

2.1. Estructura solar

El Sol está compuesto por 2 regiones principales, la región correspondiente al interior solar, donde se localizan el núcleo, la zona radiante y la zona convectiva; y la región correspondiente a la atmósfera solar, donde se encuentran la fotosfera, la cromosfera y la corona solar, estas 6 capas tienen distintas características y son ejemplificadas en la figura 2.1.

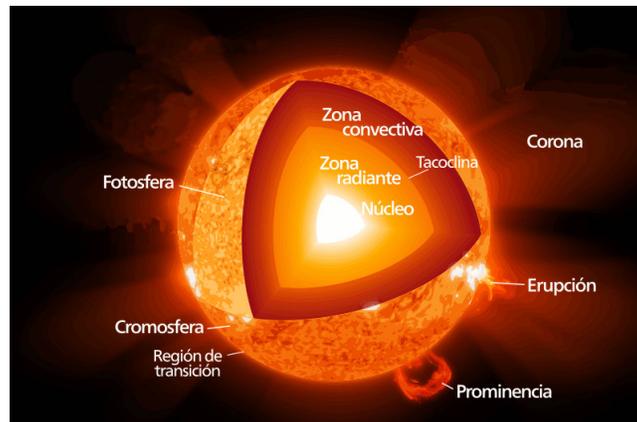
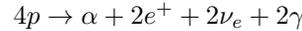


Figura 2.1: Imagen que muestra las capas del Sol. La imagen fue tomada y modificada del repositorio de wikipedia.

El núcleo tiene un radio de $175,000 \text{ km}$ ocupando un 25 % del radio total del Sol, es la región donde se realizan todas las reacciones termonucleares que proporcionan la mayoría de la energía del Sol, y se cree que su temperatura se encuentra entre los 15 y 20 millones de grados kelvin con una densidad central

alrededor de los 100 g/cm^3 .

Se estima que en la producción de energía domina la cadena protón-protón, donde la fusión de 4 núcleos de hidrógeno (4 protones) se transforma en un núcleo de helio (que contiene 2 protones y 2 neutrones), 2 positrones, 2 neutrinos y 2 rayos gamma que se emiten.



La zona radiativa comprende un grosor que va desde 0.25 hasta los 0.86 radios solares, en esta zona los fotones emergentes del núcleo son dispersados, absorbidos y remitidos muchísimas veces debido a la alta densidad, por este hecho el proceso de radiación se vuelve tan ineficiente que un fotón puede llegar a tardar aproximadamente miles de años para salir de la zona radiativa.

Entre la zona de rotación diferencial convectiva y la estable rotación uniforme de la zona radiativa existe una delgada y fuerte capa de transición denominada la tachoclina o tacoclina, esta región es de gran interés e importancia ya que de acuerdo a los modelos actuales de dinámica solar se tiene que esta zona es la probable responsable del dinamo solar, por lo que en ella se generaría el campo magnético que rige muchos de los fenómenos visibles en la superficie del Sol.

Según los modelos más aceptados el espesor de la tacocline esta entre 0.03 y 0.05 radios solares, además de que en esta región se presenta un fuerte cambio en los procesos termodinámicos, señalándola como la probable responsable de la rotación diferencial. Su densidad y temperatura aproximadas son de 0.21 g/cm^3 y $2.3 \times 10^6 \text{ K}$

La zona convectiva abarca el 30 % del interior solar, debido al gradiente de temperaturas existe un mecanismo de transporte donde el material que es desplazado hacia la superficie posee una temperatura mayor formando movimientos convectivos, observados en la fotosfera como gránulos contenidos en celdas con un diámetro típico de 700 a 1500 km .

La fotosfera es considerada la superficie solar ya que fácilmente se distinguen las manchas solares y la granulación en esta. Desde esta capa prácticamente toda la radiación del Sol es emitida, es una capa muy delgada con aproximadamente 350 km de grosor, cuya alta opacidad combinada con el marcado gradiente de densidad del gas fotosferico causan que desde la Tierra sea visible un límite claro entre ésta y las capas que la rodean.

Su densidad cambia aproximadamente desde la base de $2.5 \times 10^{-8} \text{ gm/cm}^3$ hasta $4 \times 10^{-10} \text{ g/cm}^3$ en la parte más exterior y dependiendo de las contribuciones a diferentes profundidades, el espectro continuo corresponde a la radiación de un cuerpo negro con temperatura que varía desde los 4500 hasta los 7500 K ,

siendo más fría en la parte externa. La temperatura efectiva que coincide más con el espectro continuo integrado sobre todo el disco solar es de 5750 K .

Observada en alta resolución la fotosfera tiene la apariencia de una masa hirviente con gránulos o celdas convectivas de 300 a 1800 km de longitud, las celdas convectivas son regiones de convección ascendentes con velocidades del orden de 1 km/seg, rodeadas por intersticios oscuros los cuales son regiones de hundimiento de material, los gránulos o celdas convectivas tienen un tiempo de vida de uno a diez minutos, su apariencia se muestra en la figura 2.2(a).

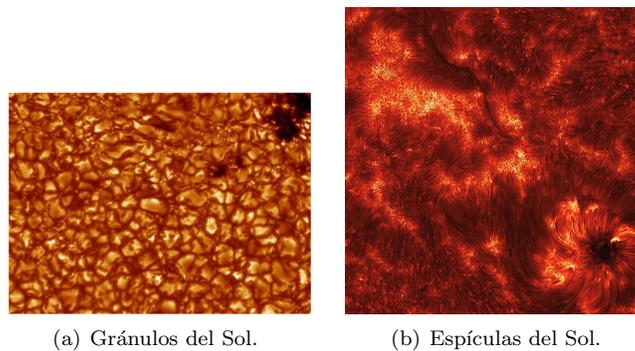


Figura 2.2: Gránulos y espículas del Sol. Fuente: La NASA

La cromosfera esta encima de la fotosfera y tiene un grosor de 10,000 a 15,000 km , es muy inhomogenea y consta de espículas estrechamente espaciadas, las espículas son tuberías de campo magnético llenas de gas caliente en movimiento que alcanzan alturas de 10,000 km , y los gases dentro tienen velocidades de 20 km/s , su tiempo de vida es de pocos minutos (ver figura 2.2(b)).

La cromosfera baja tiene una temperatura de alrededor de 4000 a 5000 K y solo a unos cientos de kilómetros más arriba la temperatura es del orden de los 20,000 K . Las altas temperaturas en la cromosfera permiten la emisión del hidrógeno en líneas de color rojizo y también ionizan el calcio (Ca_{II}).

Fuera de la cromosfera existe una región estrecha que separa la cromosfera de la corona solar, en esta región la luz emitida es dominada por los elementos ionizados del carbón (C_{IV}), el oxígeno (O_V) y el silicio (Si_{II}).

La corona es la capa más externa del Sol y se extiende más allá de la órbita terrestre en forma de viento solar, su rango de densidades va desde 10^9 partículas/ cm^3 en la frontera con la cromosfera, hasta 10^6 partículas/ cm^3 a 3 radios solares de distancia, llegando a ser de 10 partículas/ cm^3 en la órbita terrestre.

La presencia de líneas de emisión de átomos altamente ionizados como el Fe_{XIV} , Fe_{XV} y Fe_{XVI} indica que su temperatura es de $2 \times 10^6 K$ o más.

En la corona se pueden apreciar estructuras tales como las prominencias, eyecciones de masa coronal y las ráfagas solares.

2.2. Actividad solar

2.2.1. Manchas solares

La existencia de las manchas solares es algo bien conocido desde hace ya mucho tiempo por los astrónomos chinos, existen reportes escritos de su existencia desde antes del año 300 después de Cristo, sin embargo su origen es algo que aun no se ha llegado a comprender en su totalidad, los primeros estudios iniciaron después de la invención del telescopio, cuando Galileo Galilei al observar las manchas en 1610, se dio cuenta que al pasar los días cambiaban de posición y al observar una en particular después de aproximadamente 27 días la mancha era visible en la posición inicial. Desde ese momento se comenzaron a contar las manchas solares con regularidad, siendo en 1944 cuando el alemán Heinrich Schawabe descubrió la naturaleza periódica de las manchas o ciclo de manchas solares, señalando que cada 11 años se presenta una cantidad máxima (o una cantidad mínima) de manchas en la superficie solar. (ver figura 2.3).

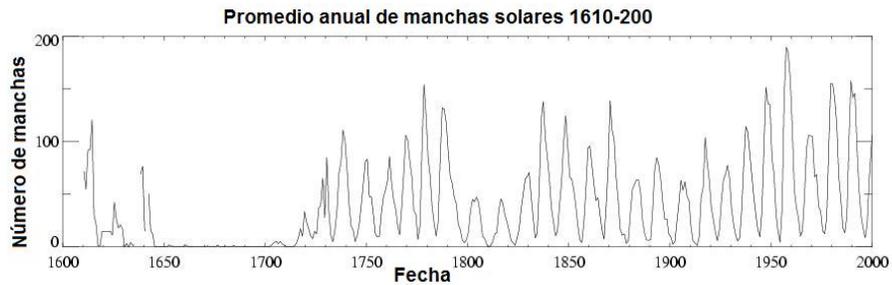


Figura 2.3: Imagen modificada de la página del Spaceweather que muestra el promedio de manchas solares por año.

Posteriormente la llamada “Ley de Spoerer” fue enunciada por el físico alemán Gustav Spoerer basada en observaciones de las manchas a diferentes latitudes, estableciendo que las primeras manchas (durante el mínimo de cada ciclo de 11 años) aparecen aproximadamente a los 30 grados de latitud del ecuador solar hacia el norte y hacia el sur (muy raro es verlas en latitudes

mayores), mientras que las últimas manchas de cada ciclo aparecen alrededor de los 5 grados de latitud del ecuador solar, además la cantidad de manchas va incrementando conforme aparecen a latitudes cada vez más cercanas al ecuador.

2.2.2. Características de las manchas solares

El tamaño de las manchas solares es muy variado pudiendo haber manchas de alrededor de $20,000 \text{ km}$ de diámetro y manchas que apenas son visibles con poderosos instrumentos de alta resolución, siendo su duración también diversa, algunas manchas duran menos de un día y otras hasta algunos meses.

Las manchas solares grandes y estables casi siempre muestran una forma redondeada característica, con un núcleo oscuro denominado umbra, cuya temperatura es de alrededor de 4100 K (1500 K menos que la fotosfera circundante), su campo magnético típico es de unos 3000 Gauss (4000 Gauss para las manchas más grandes), en la umbra la orientación de las líneas magnéticas es vertical, alrededor de ella existe un borde menos oscuro llamado penumbra donde las líneas magnéticas se tornan horizontales. La umbra y penumbra de una mancha solar se muestran en la figura 2.4.

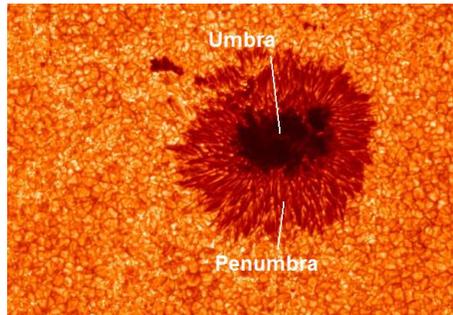


Figura 2.4: Imágen que muestra la umbra rodeada por la penumbra en una mancha solar. Fuente: La NASA

Sin embargo no todas las manchas constan de una penumbra, manchas solares jóvenes carecen de ella y en promedio alrededor del 50% de las manchas no llegan a desarrollarla. Las manchas solares usualmente aparecen conectadas a una región brillante denominada plage con polaridad opuesta a la mancha solar (es muy raro ver una mancha sin su plage correspondiente), también usualmente aparecen en grandes grupos con un par de manchas dominantes (de polaridad opuesta) y sus respectivas plages o aparecen en complejos grupos con distribuciones irregulares de las polaridades. A través de las manchas fluye un tubo de campo magnético que emerge de la zona de convección a la fotosfera, este campo va de una mancha a una plage.

Además de las características anteriores las manchas solares siguen unas reglas de polaridad enunciadas por Hale en 1919:

- La orientación magnética de las manchas solares permanece constante en grupos bipolares en cada hemisferio durante un ciclo solar de 11 años.
- Grupos bipolares en los 2 hemisferios tienen orientación magnética opuesta.
- La orientación magnética de grupos bipolares se invierte de un ciclo a otro.

2.2.3. Prominencias o filamentos

Las prominencias son nubes gigantes de gas sobre la superficie solar soportadas por un campo magnético o especie de cama magnética y sumergidas en un campo intenso de entre 5 y 200 G, su densidad es mayor que la del plasma coronal circundante, pocos de cientos de veces más grande (De 0.5 a 1.0×10^{17} partículas/ m^3) y con una temperatura menor que la misma, de alrededor de 5000 a 10,000 K, incluso menor que la temperatura de la cromosfera por lo que observaciones en H_α muestran a las prominencias como filamentos oscuros vistos contra la cromosfera.

Típicamente la forma de la nube es de una lámina vertical muy estable que llega a vivir hasta 300 días, en general se clasifican en 2 tipos, las prominencias activas y las inactivas.

Las prominencias inactivas reciben su nombre porque se localizan en regiones de baja actividad solar, son más largas que las activas y se extienden por encima de los 30,000 km, su campo magnético va de 5 a 10 G y llegan a durar hasta 300 días (más que las activas). Al contrario de éstas, las prominencias activas (desarrolladas en regiones activas) son más pequeñas y su forma es un poco más curvada, la mayoría no sobrepasa los 30,000 km siendo su densidad y campo magnético (de 20 a 200 G) mayores a las prominencias inactivas.

La polaridad de los filamentos puede ser normal, es decir las líneas de campo magnético que atraviesan el filamento conservan su dirección después de atravesarlo, o inversa donde las líneas de campo invierten su dirección una vez que lo atraviesan, como lo muestra la figura 2.5:

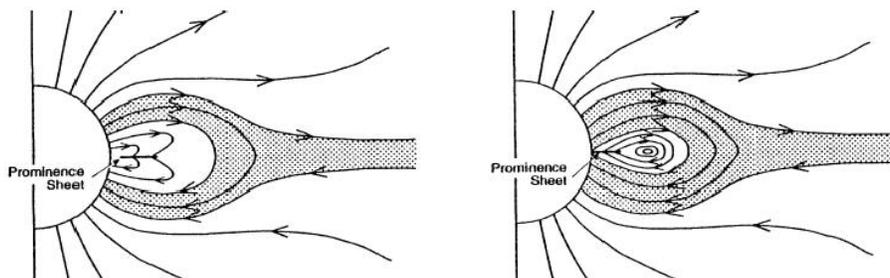


Figura 2.5: Imagen que muestra del lado izquierdo la polaridad normal de una prominencia y del lado derecho la polaridad inversa. Fuente: Koskinen, H. y Vainio, R. (2011). *Lectures on Solar Physics: From the core to the heliopause*.

Tarde o temprano los filamentos se desprenden de la superficie solar y en regiones activas pueden entrar en erupción junto con las ráfagas solares y las eyecciones de masa coronal (CME's), por lo que al ocurrir una CME usualmente se toma como origen la desaparición de un determinado filamento en la superficie solar (ver figura 2.6).

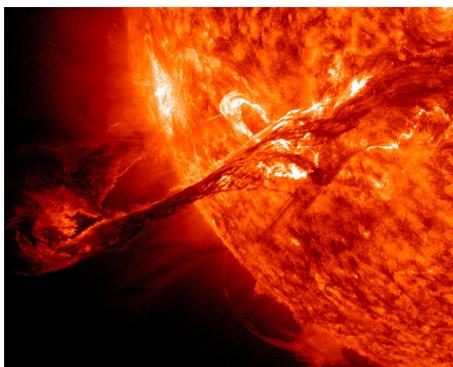


Figura 2.6: Fotografía tomada por el SDO (Solar Dynamics Observatory) el 31 de agosto del 2012 donde se muestra un filamento en erupción captado en una longitud de onda de 131\AA . Fuente: La NASA.

2.2.4. Eyecciones de masa coronal

Las eyecciones de masa coronal (CME's) son grandes nubes de plasma magnético que se desprende del Sol, su masa esta en el rango de $5 \times 10^{12} \text{ kg}$ a $5 \times 10^{13} \text{ kg}$ y salen a velocidades que van desde 100 km/s hasta los 3000 km/s , con una energía aproximada de 10^{32} ergios, dependiendo de su velocidad este material tarda alrededor de 1 a 5 días en impactar la magnetósfera terrestre. A

pesar del nombre y de que el fenómeno es visto en la corona, el plasma eyectado proviene de la atmosfera baja del Sol. La figura 2.7 muestra una típica CME.

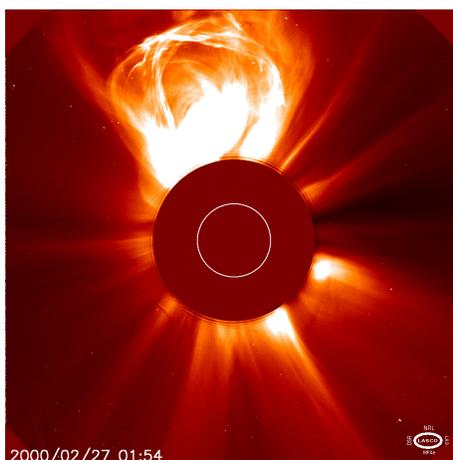


Figura 2.7: Se observa una eyección de masa coronal en la parte superior de la imagen tomada por el coronógrafo C2 de LASCO a bordo del SOHO el 27 de Febrero del 2000. Fuente: La NASA.

Para detectarlas se usan coronógrafos de luz blanca colocados en sondas espaciales ya que la débil luz que llega de las eyecciones se difunde en la atmósfera terrestre, es importante saber que la luz detectada durante la eyección no es propia de la misma (las CME's no radian), esta luz se produce por dispersión de los fotones solares a partir de los electrones en la nube de plasma, por lo que conforme más electrones posea la nube será más fácilmente visible y viceversa.

Las CME's están íntimamente relacionadas con las ráfagas solares y las prominencias eruptivas, sin embargo es más común asociarlas con las prominencias, ya que alrededor del 70% de las eyecciones se les puede relacionar directamente con una prominencia o filamento, mientras que aproximadamente el 40% de las CME's tiene una ráfaga asociada cercana al sitio de la eyección, sin embargo éstas ráfagas pueden tomar lugar antes, simultáneamente o después del desprendimiento de la nube de plasma.

Estimaciones basadas en las observaciones del LASCO (Large Angle and Spectrometric Coronagraph) a bordo del SOHO (Solar and Heliospheric Observatory) durante el ciclo 23, concuerdan con que las CME's son un fenómeno muy común, con una razón de ocurrencia de 0.8 eventos por día (principalmente en la región ecuatorial) en el mínimo solar y de 3.5 eventos por día (en todas las latitudes) durante el máximo.

2.3. Ráfagas solares

2.3.1. Explosiones solares

Dentro de los procesos solares más relevantes se encuentran las erupciones solares, eventos catastróficos de increíble energía que pueden producir abrillamientos transitorios, llamados “ráfagas solares”, e incluso el desprendimiento de material de la corona solar llamadas “eyecciones de masa coronal”, las ráfagas solares inundan el sistema solar con intensa radiación que van desde los rayos X hasta las ondas de radio, estas poderosas ráfagas son fácilmente observadas en estas longitudes de onda invisibles, donde por breves momentos dominan las emisiones solares y algunas veces eclipsan todas las demás fuentes astronómicas.

La palabra ráfaga o llamarada significa una repentina, rápida e intensa variación en el brillo; en minutos la perturbación se esparce a lo largo de campos magnéticos concentrados, liberando energía magnética almacenada equivalente a millones de explosiones nucleares y elevando la temperatura de regiones del tamaño de la Tierra hasta decenas de millones de grados, las ráfagas solares son por lo tanto más calientes que la corona. Algunas veces las ráfagas solares temporalmente se salen de control y pierden el equilibrio, llegando a ser más calientes que el núcleo del Sol por cortos periodos de tiempo.

Otro tipo de actividad energética solar son las prominencias o filamentos que estallan repentinamente e impredeciblemente se abren y expelen su contenido desafiando la enorme gravedad del Sol. Los filamentos en erupción están asociados con las eyecciones de masa coronal, burbujas magnéticas gigantes que se propagan hacia fuera del Sol arrojando billones de toneladas de material al espacio interplanetario.

Las razones de ocurrencia de las ráfagas solares, filamentos eruptivos y eyecciones de masa coronal varían con el ciclo de actividad magnética solar de 11 años, llegando a ser más frecuentes en su punto máximo.

2.3.2. Definición de ráfagas

Son explosiones violentas de energía que tienen lugar en la atmósfera solar, estas provocan aceleración de partículas a altas velocidades, se caracterizan por un rápido incremento en el flujo radiativo seguido de un descenso lento del mismo.

Una ráfaga solar emite en toda la gama del espectro electromagnético, sin embargo es difícil detectarlas en la región del visible debido a la alta luminosidad del Sol, son mucho más fácilmente detectadas en emisiones de H_α y rayos X (frecuencia de nuestro interés) ya que suelen ser varios miles de veces más energéticas que la radiación normal del Sol a esas longitudes de onda.

Las ráfagas solares usualmente ocurren dentro de regiones activas donde las manchas solares y arcos coronales se congregan y cuanto más complejo magnéticamente es el grupo de manchas, más frecuente es la ocurrencia de las ráfagas solares, por eso es muy común detectar una mayor cantidad de ráfagas solares durante las etapas más activas del ciclo solar.

Las emisiones de radio y rayos X indican la presencia de partículas a alta velocidad y gas caliente derivado de la rápida liberación de energía durante las ráfagas solares, desafortunadamente no se cuenta aun con un modelo satisfactorio de los mecanismos que las generan, entre sus aspectos más importantes se encuentran:

- a) El almacenamiento de energía.
- b) Su liberación súbita.
- c) La aceleración de partículas hasta energías relativistas en una fracción muy corta de tiempo.
- d) Alteraciones en la Tierra (de nuestro interés solo los medios de comunicación y la ionosfera).

Las etapas principales de las ráfagas solares son la pre-ráfaga o etapa precursora, la fase impulsiva y la fase térmica o gradual.

2.3.2.1. Pre-ráfaga o etapa precursora

En esta etapa se inicia la liberación de la energía magnética que se ha formado y almacenado en los arcos coronales, haciéndose evidente el cambio en los bajos niveles de rayos X suaves y emisiones de radio dentro de las regiones activas.

Se caracteriza por un aumento gradual en algunas emisiones térmicas como rayos X de bajas energías o suaves, ocasionado por un aumento de la energía libre en una región de campo magnético cerrado, como lo es una región activa.

Los movimientos subfotosféricos y la rotación diferencial son capaces de torcer los tubos de flujo magnético y aumentar su energía, cuando los tubos de flujo cruzan la superficie crecen, elongándose las líneas de campo y aumentando su energía disponible. Ya que la deformación del campo no puede sobrepasar cierto nivel, las líneas de campo se rompen y se reconectan adquiriendo una configuración de más baja energía, acelerando partículas de plasma que se encuentran en la región de reconexión.

2.3.2.2. Fase impulsiva

Es el proceso en el cual se libera súbitamente la energía almacenada por la torcedura del campo magnético, los electrones y protones son acelerados rápidamente y la energía magnética almacenada es liberada en cuestión de segundos o menos gracias a la ruptura del campo y su posterior reconexión. Durante esta etapa hay intensas explosiones de radio, rayos X duros y rayos γ .

Las partículas que son aceleradas durante la fase impulsiva viajan a través de la atmósfera solar perturbando el medio ambiente que encuentran a su paso; las partículas del medio ambiente excitadas radian su exceso de energía en diferentes longitudes de onda, dependiendo de la densidad, temperatura y campo magnético. De este modo es posible observar desde la Tierra en un gran número de longitudes de onda del espectro electromagnético los efectos de esta fase.

2.3.2.3. Fase térmica o gradual

Durante esta fase la energía depositada durante la fase impulsiva es liberada de manera gradual en escalas de tiempo mayores (decenas de minutos). Rayos X suaves se acumulan lentamente y generalmente alcanzan la intensidad máxima.

2.3.3. Clasificación de las ráfagas solares observadas en rayos X

Las ráfagas solares se clasifican de acuerdo a su brillo en rayos X (en el intervalo de longitud de onda de 1 a 8 Å) de menor a mayor intensidad como A, B, C, M y X.

Cuando las más intensas, las de tipo X, se originan en lugares cercanos al centro del disco solar, pueden causar interferencia total en las radiocomunicaciones, tormentas solares de larga duración y auroras boreales extremas, además de que los satélites pueden también sufrir daños.

Las ráfagas de tamaño mediano o clase M pueden ocasionar ligeros apagones de radio en las regiones polares y pequeñas tormentas solares. Únicamente las más grandes ráfagas tipo M dirigidas hacia la Tierra pueden causar tormentas aurorales hasta latitudes medias.

Las ráfagas tipo C son pequeñas y de consecuencias poco notorias en la Tierra.

Las tipo A son explosiones que se originan en manchas solares demasiado pequeñas; y durante el mínimo de actividad solar, donde es mínima la cantidad de manchas solares y de muy pequeña magnitud o definitivamente hay ausencia

de ellas, la actividad solar no se eleva más arriba de ráfagas tipo B. Cada categoría o clase de ráfagas tiene nueve subdivisiones y los rangos de su intensidad se encuentran en el cuadro 2.1

Clase	Intensidad ($Watts/m^2$)
A	10^{-8} a 10^{-7}
B	10^{-7} a 10^{-6}
C	10^{-6} a 10^{-5}
M	10^{-5} a 10^{-4}
X	$> 10^{-4}$

Cuadro 2.1: Clasificación de las ráfagas solares observadas en rayos X.

3

Las estaciones SAVNET y LAVNet-Mex

Material expulsado del Sol durante las eyecciones de masa coronal llegan a la Tierra en un tiempo que va de uno a cuatro días, de manera que puede influir en el comportamiento de la ionosfera, parte de este material alcanza a entrar en zonas cercanas a los polos magnéticos por reconexión de las líneas magnéticas terrestres, creando lo que se conoce como auroras polares que son la muestra visual de la interacción de esas partículas con la ionosfera terrestre, en ocasiones las eyecciones pueden afectar las órbitas satelitales y crear apagones tanto en radio como en sistemas eléctricos mediante lo que se conoce como una tormenta geomagnética (intensas variaciones transitorias del campo magnético terrestre a nivel global).

Por otra parte radiación emitida como los rayos X y radiación gamma durante estas eyecciones o durante eventos explosivos conocidos como ráfagas solares interaccionan con las capas de la ionosfera, ionizándolas más de lo normal. Esta ionización incrementa la densidad de electrones libres, razón por la que cambia la altitud a la que las ondas de radio de muy baja frecuencia (VLF) son desviadas, afectando así las radiocomunicaciones. En la figura 3.1 se observa un diagrama de como las ondas VLF son reflejadas hacia la superficie terrestre.

La parte más baja de la ionosfera, la capa D, es altamente perturbada por los eventos eruptivos que generan cambios en la ionización de esta capa, modificando así su densidad, pero debido a su altitud, alrededor de los 60 km (de día), es muy difícil estudiarla, los satélites son capaces de monitorear solo altitudes de las capas más altas de la ionosfera, los globos sonda se limitan solo a unos pocos kilómetros sobre el nivel del mar y los GPS integran todo el contenido electrónico a través de la atmósfera haciendo difícil el estudio de los cambios de ionización generados por los eventos eruptivos; sin embargo las ondas de muy baja frecuencia (VLF) son fácilmente desviadas por la ionosfera, por lo que es

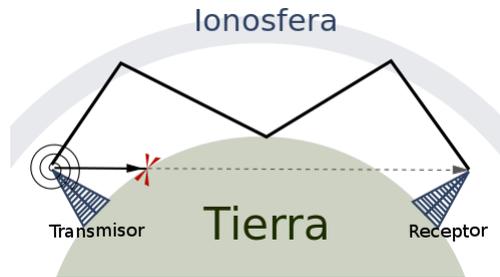


Figura 3.1: Ondas de radio rebotando en la capa baja de la ionosfera, si la capa D de la ionosfera fuera perturbada debido a la energía de una ráfaga solar, las ondas rebotarían a una altura más baja. Fuente: Wikipedia.

conveniente estudiar el transporte de energía desde la capa D hasta las capas más bajas de la atmósfera (específicamente la troposfera) mediante estas ondas de radio. El estudio del cambio en la fase y amplitud de las ondas desviadas conforma una buena herramienta para monitorear la ionosfera.

Para detectar las ráfagas solares y estudiarlas por medio de esta propiedad de rebote o desvío de las ondas de radio existen estaciones receptoras en Sudamérica como lo es SAVNET (South America Very low frequency NETwork) y actualmente en México el Instituto de Geofísica de la UNAM se une a SAVNET y forma una red de antenas llamada LAVNet-Mex (Latin America Very low frequency Network), ésta estación funciona como una extensión de SAVNET, sin embargo trabajan de manera independiente una de la otra.

SAVNET es una red de 7 estaciones receptoras que trabajan en un rango de 3 a 30 kHz, estas estaciones se encuentran distribuidas en Latinoamérica y la Antártida, su principal función es monitorear en largos periodos de tiempo la actividad solar y el estudio de la Anomalía Magnética del Atlántico Sur. Las estaciones constan de 5 dispositivos, los cuales son, dos antenas de lazo, una orientada de N-S y la otra de E-O, una antena vertical, un GPS y para adquirir las señales de las antenas y del GPS una tarjeta de audio profesional.

De los 7 receptores de SAVNET, 2 se encuentran en Perú, específicamente en Piura y Lima y los otras 5 en CASLEO (Complejo Astronómico El Leoncito, Argentina), Palmas en Sao Paulo y Santa María en Brasil, y en la Estación Antártica brasileña Comandante Ferraz (EACF).

La ubicación geográfica de los 7 receptores de la estación SAVNET y la estación receptora LAVNet-Mex se muestra en las figuras 3.2 y 3.3 respectivamente.

Por su parte LAVNet-Mex trabaja en un rango de 10 a 48 kHz y se constituyó originalmente por 3 antenas situadas en la azotea del Instituto de Geofísica de la UNAM (aunque actualmente solo trabaja con un arreglo de 2 antenas de tipo lazo, ver sección 3.1.1), una tarjeta de audio profesional y un GPS, de la misma forma como se constituye SAVNET.

Ambas, LAVNet y SAVNET, detectan ondas electromagnéticas de muy baja frecuencia generadas por 6 fuertes estaciones transmisoras localizados alrededor del mundo (figura 3.3), las cuales forman parte de la “Omega Network” que fue desactivada en 1997. Las estaciones emisoras son la NDK, una estación de comunicación de la marina de EUA situada en LaMour Dakota del Norte, esta estación es parte del sistema de radiodifusión submarina de la OTAN, la NLK, la NPM, que es una estación de comunicación de la marina de EUA situada en Laulualalei, Hawaii, la NWC, la NAU y NAA otra estación de comunicación de la marina de EUA en Cutler (Maine), forma parte también de la radiodifusión submarina interoperable de la OTAN.

En la tabla 3.1 se muestran las coordenadas de las estaciones emisoras, el país al que pertenecen, la frecuencia a la que emiten y su respectiva distancia a LAVNet-Mex.

Gracias a la extensión de antenas receptoras proporcionada por LAVNet-Mex el arreglo total gana una más amplia cobertura y sensibilidad, así como un incremento en la detección de ráfagas, además de que las señales recibidas por LAVNet-Mex son más fuertes que las recibidas por SAVNET debido a que los transmisores se encuentran a menor distancia y por ende las señales pierden menos energía en el trayecto.

Nombre	País dueño	Longitud	Latitud	Frecuencia (kHz)	Distancia (km)
NWC	Australia	114°09' E	21°49' S	19.8	16381.2
NPM	USA	158°08' W	21°25' N	21.4	6119.8
NLK	USA	121°55' W	48°16' N	24.8	3786.2
NDK	USA	98°20' W	46°21' N	25.2	2975.9
NAA	USA	67°16' W	44°38' N	24.0	4060.6
NAU	USA	67°11' W	18°22' N	40.7	3349.2

Cuadro 3.1: Tabla que muestra las coordenadas geográficas, la frecuencia de emisión, el país al que pertenecen las estaciones emisoras y la distancia a la que se encuentra la estación receptora LAVNet-Mex de las estaciones emisoras de radio VLF.



Figura 3.2: Distribución de la red SAVNET en Sudamérica. Autor: Andrea Borgazzi.

3.1. Antenas y dispositivos de LAVNet

En general todas las antenas son dispositivos transductores, su función, en el caso de las antenas receptoras, es captar la señal de una onda de radiofrecuencia dada en un punto del espacio libre (o varias frecuencias en dispositivos complejos como la TV o la radio), transformarla en energía eléctrica y pasarla al receptor, de manera opuesta es la función de una antena transmisora ya que transforma la energía eléctrica que se le suministre en ondas electromagnéticas de radiofrecuencia.

Hay muchos diferentes diseños de antenas, el diseño y las características dependen de la longitud de onda de las radiofrecuencias con las que se trabaje, la fuerza de la señal que se desea, del lugar donde esté ubicada la antena, de si se trata de un antena de emisión o de recepción, del presupuesto con que se cuente y de la finalidad que se requiere, por ejemplo las antenas existen primordialmente de 2 tipos, dependiendo del espacio sobre el que se desea transmitir la energía, existen las omnidireccionales, que es el caso de las emisoras de radio comerciales y de los sistemas móviles (celulares), cuya finalidad es expandir en



Figura 3.3: Ubicación geográfica de Lavnet y las estaciones emisoras de la Omega Network. Autor: Andrea Borgazzi.

lo más posible en todas las direcciones la potencia radiada conforme al área de cobertura requerida, y las directivas o direccionales, es decir dirigidas a una dirección específica de tal manera que no interfiera con otros servicios, este es el caso de las radiocomunicaciones fijas, estas envían su señal más lejos ya que aprovechan la energía que en el caso de las omnidireccionales se utiliza para expandirla en todas direcciones.

Ya mencionamos que LAVNet se compone de 5 dispositivos, de los cuales se hablará un poco en los siguientes apartados.

3.1.1. Antenas de lazo

Estas antenas se componen de un conductor que da una o más vueltas en un circuito cerrado, pueden ser de varias formas, cuadradas, circulares, triangulares, pentagonales, etc., existen en general de 2 tipos; la antena de lazo pequeño, donde la longitud del conductor es más pequeño que la longitud de onda con que se trabaja (menor a un décimo de la longitud de onda) y la de lazo grande o antena de resonancia, en la que la longitud del conductor es comparable con la magnitud de la longitud de onda con que se desee trabajar.

LAVNet utiliza un arreglo constituido por 2 antenas cuadradas de lazo

pequeño, como se muestra en la figura 3.4, una antena esta orientada en la dirección N-S y la otra en sentido perpendicular, es decir en la dirección E-O, de esta manera se puede medir la contribución de los componentes en las direcciones E-O y N-S de la variación del flujo del campo magnético.



Figura 3.4: La figura muestra el arreglo compuesto por 2 antenas de tipo lazo situado en la azotea del IGEF.

La antena orientada en la dirección N-S se compone de una canaleta de aluminio que forma un cuadrado, la longitud de cada lado del cuadrado es de 1.5 m, el cable conductor dentro de la canaleta da 113 vueltas en total y está hecho de un alambre magnético calibre 18; por su parte la antena orientada en la dirección E-O es casi idéntica, también trabaja con un cable magnético calibre 18, sin embargo la antena es un poco más pequeña ya que la canaleta que contiene el alambre magnético cabe dentro del cuadrado formado por la canaleta de la antena en dirección N-S, además el cable magnético de la antena orientada en la dirección E-O da solo 100 vueltas en total dentro de la canaleta.

La variación de la onda VLF que llega a la antena induce una corriente eléctrica en las terminales de ésta, sin embargo la energía que entrega la onda VLF de entrada es pequeña, por lo que la corriente a su vez también lo es, por esta razón se utilizan los dispositivos preamplificadores en las antenas.

3.1.2. Receptor GPS y la tarjeta de audio delta 44

El GPS o Sistema de Posicionamiento Global permite localizar en todo el mundo cualquier objeto o persona dada con una precisión de algunos metros siempre que éste objeto tenga adherido un receptor GPS, éste sistema de navegación está constituido por 24 satélites y fue desarrollado por el departamento

de defensa de los Estados Unidos. Para lograr el posicionamiento el sistema GPS utiliza un reloj muy preciso; este receptor es capaz de determinar su ubicación en base a 4 satélites que proporcionan la información de su posición de manera simultanea.

Para poder generar las gráficas de los datos que se obtienen de las antenas emisoras de radio es necesario contar con un sistema que nos precise a cada momento el tiempo universal y así poder especificar el cambio de la fase (y amplitud) en la señal de radio recibida a cada instante, razón por la que el GPS con el que cuenta LAVNet es esencial.

La señal de radio de las emisoras que es percibida por LAVNet llega desfasada cuando se presenta una ráfaga solar, gracias a que ya se conoce el tiempo en que tardó en llegar a LAVNet la pulsación del GPS de la estación emisora es posible precisar el instante en que hubo un cambio en la fase de la señal de radio y de esta manera graficar las señales de radio (en fase y amplitud) en dependencia del tiempo universal.

La principal misión de la tarjeta de audio delta 44 es procesar los datos recibidos del GPS y de las antenas receptoras de VLF convirtiendo los datos analógicos a digitales por medio del software "Chart6". La señal que las antenas perciben es aumentada en intensidad por medio de preamplificadores que se encargan además de filtrar el ruido.

4

Resultados

4.1. Fluctuación de la fase con respecto a la potencia

Para poder estudiar el comportamiento ionosférico ante la presencia de ráfagas solares, fue necesario primero recolectar datos de las ráfagas detectadas por el satélite espacial “GOES” (dentro del rango de longitudes de onda de 1 a 8 Å de rayos X), obtenidos por el SWPC (Space Weather Prediction Center), que es parte del Servicio Meteorológico Nacional de EU. El SWPC monitorea en tiempo real las emisiones solares y recopila los datos del satélite para mostrar a cada momento una gráfica de los eventos en emisiones de rayos X (<http://www.swpc.noaa.gov/products/goes-x-ray-flux>), como se muestra en la figura 4.1. Los datos de los eventos se encuentran en <ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/warehouse> y específicamente los datos que usamos del año 2011 están en <ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/warehouse/2011/>.

Una vez recopilados los datos de los meses de enero y marzo del 2011, éstos fueron agrupados en 2 archivos de texto plano, con la información de la fecha y hora universal del inicio, máximo y fin del evento detectados por el satélite y la clase de evento al que pertenece.

Posteriormente fue necesario verificar la presencia de las ráfagas en las señales de radio, para esto se usó un programa llamado “Chart6”, éste mostraba la señal continua captada por las antenas receptoras del IGEF, en el que se podía observar la variación en la señal al momento del evento (ver figura 4.2).

Con la hora registrada por el satélite al inicio de la ráfaga era necesario checar la presencia de los eventos en cada señal de las 7 estaciones emisoras (la mayoría de los eventos encontrados estaban muy cerca de la hora marcada), de esta manera se tomó nota de la fase y amplitud inicial (y la hora marcada en ambas), justo antes de que se presentara el evento; además se anotó la amplitud

y la fase en la máxima fluctuación junto con sus respectivos tiempos de aparición.

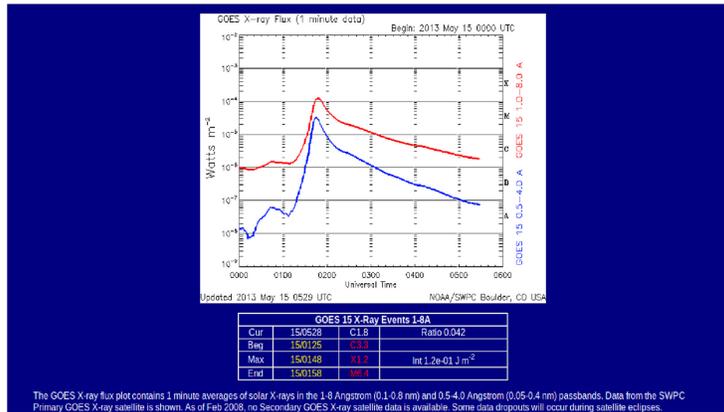


Figura 4.1: Imagen en tiempo real de la gráfica del GOES que muestra el tiempo universal vs. la potencia de la ráfaga, para un evento de magnitud X1.2.

Después se obtuvo la diferencia entre el máximo y el mínimo de las amplitudes y fases así como la diferencia entre las horas de éstas fluctuaciones; para finalmente elaborar una tabla en texto plano con todos esos datos. La tabla con los datos extraídos del GOES se encuentra en el apéndice B, mientras que la tabla final con los datos del mes de marzo así como una descripción detallada de su estructura se encuentran en la dirección electrónica http://cintli.geofisica.unam.mx/?page_id=314 (se omitió la tabla del mes de enero por tener muy pocos eventos y de baja intensidad).

Con el fin de leer los datos y analizarlos con facilidad a pesar de su gran cantidad (alrededor de 77 por cada evento) fué necesario elaborar rutinas de cómputo que pudieran leer los datos de las estaciones que sí detectaron el evento, e ignorar las que no lo hicieron.

Una vez que las rutinas leían adecuadamente los datos se procedió a la elaboración de gráficos cuya variable independiente era la magnitud de la potencia de la ráfaga y la dependiente el cambio en la fase (o amplitud) de las señales de radio debido a las ráfagas, obteniendo los resultados observados en las figuras 4.3 y 4.4.

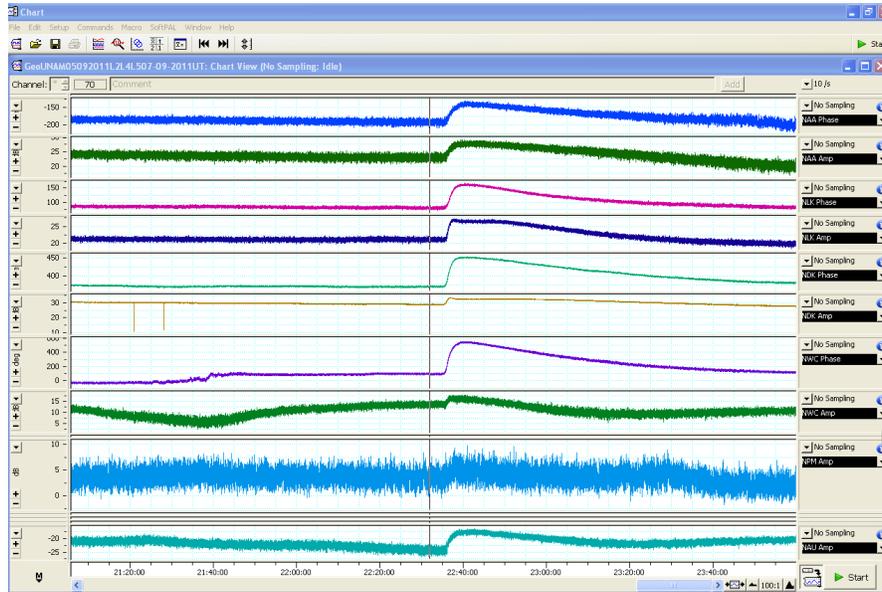


Figura 4.2: Podemos observar un ejemplo de las señales de radio mostradas por el programa Chart6 en el instante en que se detecta una ráfaga, en forma de una elevación repentina cerca de las 22:40 horas tiempo universal, el 7 de Agosto del 2011, el incremento se observó en las emisiones de NAA, NLK, NDK, NWC, NPM y NAU.

Después para observar si el comportamiento era parecido para todas las estaciones se unieron todas las gráficas de fase y amplitud en únicamente 2 gráficas, obteniendo la figura 4.5.

Posteriormente se obtuvieron los ajustes lineales de la relación de los datos en forma logarítmica para ver si entre el valor de las pendientes resultantes y la distancia de las estaciones emisoras a LAVNet-Mex existía algún tipo de correspondencia, de esta manera se podría luego hacer la regresión de los datos que se habían pasado a la forma logarítmica y así obtener ecuaciones en forma de una ley potencial (de aquí en adelante en esta tesis cuando se hable de aplicarle el logaritmo a una variable se entenderá que el logaritmo solo se aplica a la magnitud de la variable, no a sus unidades):

$$y = 10^B x^\alpha \quad (4.1)$$

Donde la y representa la variación de la fase o de la amplitud, la B es la ordenada al origen de los datos cuando se les aplicó el logaritmo base 10, x representa la variable independiente, es decir la potencia de las ráfagas y α representa la pendiente de los datos cuando estaban en forma logarítmica.

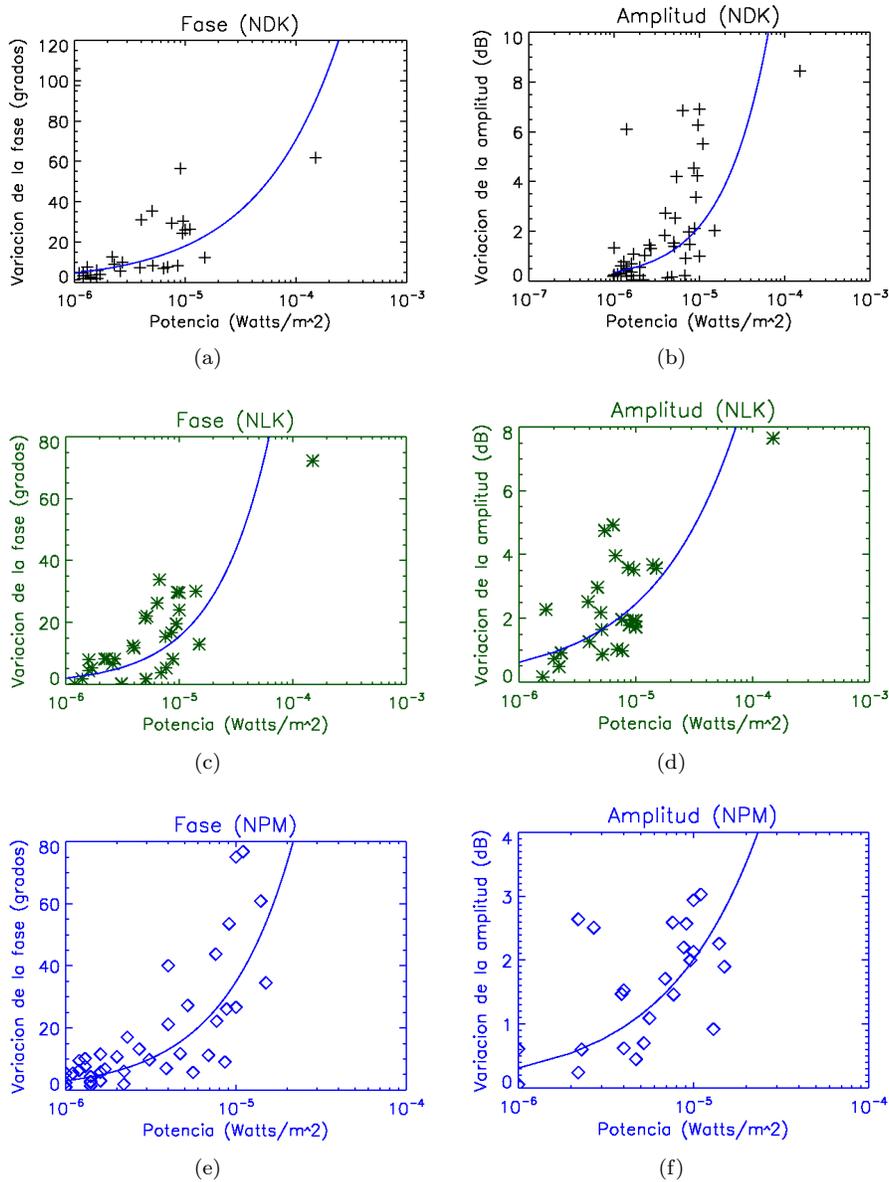


Figura 4.3: Figura que muestra en las partes a), c) y e) las gráficas de “Potencia vs. Variación de la fase” para las estaciones NDK, NLK y NPM respectivamente, mientras que en b), d) y f) se aprecian las gráficas de “Potencia vs. Variación de la amplitud” para las mismas estaciones. En todos los casos el eje x esta en escala logarítmica por lo que el ajuste lineal aplicado a la relación que guardan los logaritmos de las variables muestra una línea curva ascendente.

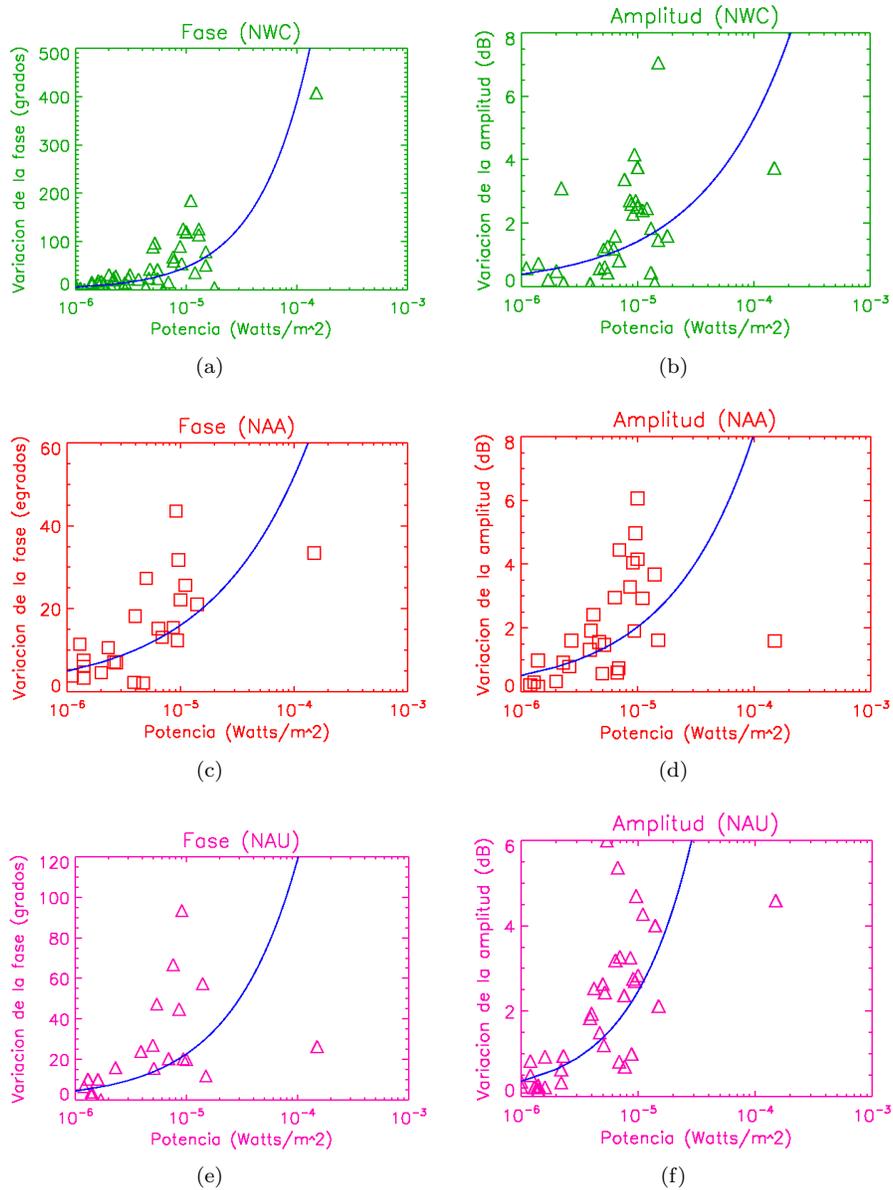


Figura 4.4: Figura que muestra en las partes a), c) y e) las gráficas de “Potencia vs. Variación de la fase” para las estaciones NWC, NAA y NAU respectivamente, mientras que en b), d) y f) se aprecian las gráficas de “Potencia vs. Variación de la amplitud” para las mismas estaciones. En todos los casos el eje x esta en escala logarítmica por lo que el ajuste lineal aplicado a la relación que guardan los logaritmos de las variables muestra una línea curva ascendente.

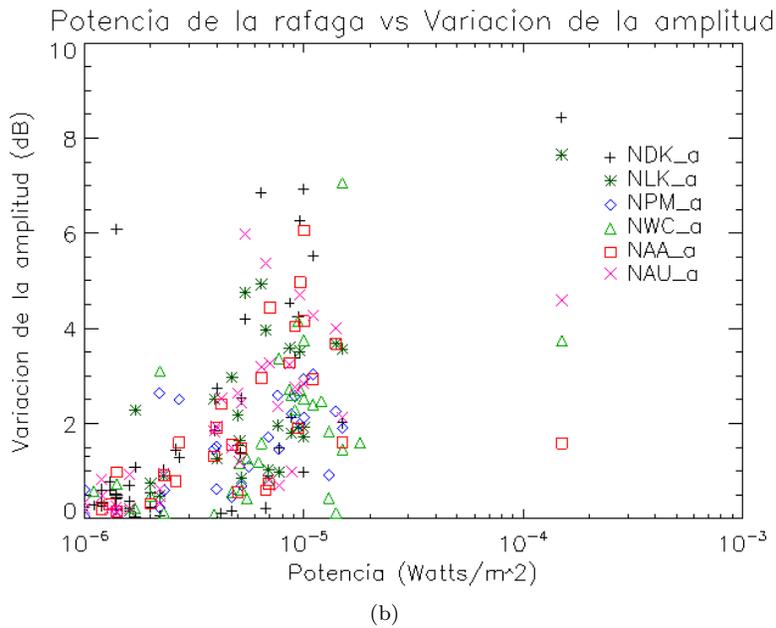
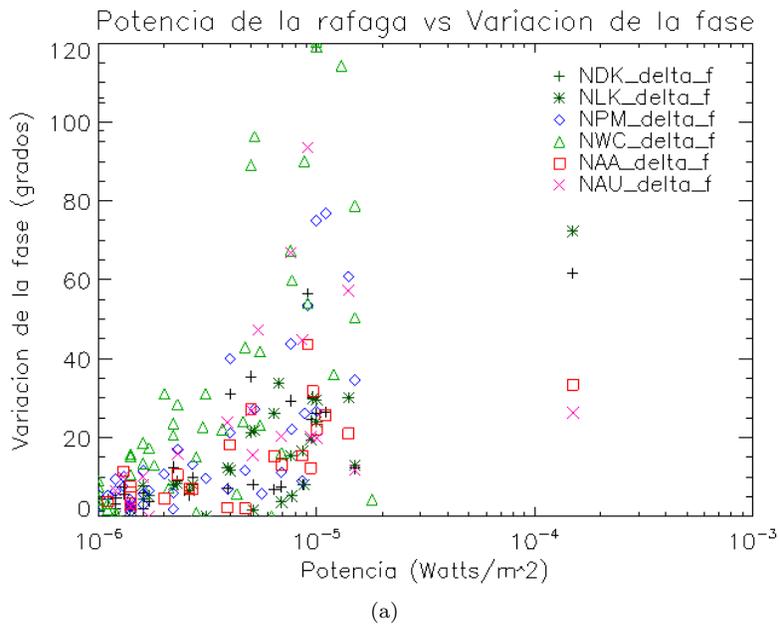


Figura 4.5: Gráfica de “Potencia vs. Variación de la fase” para las señales de todas las estaciones emisoras en a) y gráfica de “Potencia vs. Variación de la amplitud” para las señales de todas las estaciones emisoras en b), con una escala logarítmica en el eje x.

En las gráficas 4.3 y 4.4 también se muestra el ajuste lineal que se aplicó a los logaritmos (base 10) de la potencia y de la fluctuación en la fase (o amplitud) de cada estación, la curva ascendente representa ese ajuste, es una curva a pesar de hablar de un ajuste lineal debido a que el eje x se encuentra en escala logarítmica para visualizar mejor los datos.

Ahora queremos ver si el valor de la variable α guarda alguna relación con la distancia a la que se encuentran las estaciones emisoras de LAVNet-Mex, para eso podemos observar la tabla 4.1 donde se muestran las pendientes y las ordenadas al origen de todos los ajustes correspondientes a las 6 estaciones emisoras, para la fase y la amplitud.

Estación	Fase			Amplitud		
	B	α	$b = 10^B$	B	α	$b = 10^B$
NWC	6.272	0.920	1873548.875	3.003	0.570	1008.774
NPM	6.909	1.073	8114133.500	4.369	0.813	23419.541
NAA	3.758	0.510	5733.373	3.316	0.601	2071.346
NLK	5.700	0.902	502268.937	3.387	0.599	2442.377
NAU	4.953	0.719	89840.695	4.612	0.844	40988.437
NDK	4.227	0.594	16879.302	4.404	0.812	25361.242

Cuadro 4.1: Muestra las pendientes y ordenadas al origen obtenidas de la relación: “Log. De la potencia de la ráfaga vs Log. de la variación de la fase” de las 6 estaciones.

Las estaciones emisoras ordenadas conforme la magnitud de su distancia a la estación receptora LAVNet-Mex en forma descendente y las pendientes obtenidas en la tabla 4.1 se encuentran en la tabla 4.2.

Estación	Distancia (km)	α Fase	α Amplitud
NWC	16381.2	0.920	0.570
NPM	6119.8	1.073	0.813
NAA	4060.6	0.510	0.601
NLK	3786.2	0.902	0.599
NAU	3349.2	0.719	0.844
NDK	2975.9	0.594	0.812

Cuadro 4.2: Estaciones por orden descendente de distancia a LAVNet-Mex junto con las pendientes de las gráficas para la amplitud y fase.

Por lo que se observa de la tabla 4.2 la magnitud de la pendiente α no guarda alguna relación clara con la distancia de las estaciones emisoras a la

estación receptora LAVNet-Mex, por lo que también se realizó una gráfica de “Distancia a la estación LAVNet-Mex vs. Pendiente” para ver más claramente si en realidad existe dicha relación. En la figura 4.6 se muestra esta gráfica para el caso de las pendientes de las gráficas de la fase y la amplitud.

Como puede notarse en figura 4.6 las variables implicadas no parecen mostrar alguna relación específica, ni para el caso de las pendientes en la fase ni para las pendientes en la amplitud, pero hay algo que no hemos tomado en cuenta hasta este momento y es el hecho de que el corredor (camino que sigue la onda de radio desde una estación emisora dada hasta llegar a la estación LAVNet-Mex) de la NWC rara vez esta totalmente iluminado al momento de la incidencia de la mayoría de las ráfagas solares, mientras que los otros corredores en su mayoría están totalmente iluminados o tienen una fracción grande de iluminación.

Esto es debido a la longitud del corredor que como puede verse en la tabla 4.2 es de 16,381.2 km. Este corredor está ubicado en una dirección muy similar al ecuador terrestre, tomando en cuenta que el radio ecuatorial terrestre es aprox. de 6,378.1 km, entonces es posible calcular la longitud de la línea ecuatorial para la mitad de la Tierra que presenta iluminación usando:

$$S_{día} = \frac{\cancel{2}\pi R}{\cancel{2}} = \pi(6378.1) \approx 20037.3 \quad (4.2)$$

Para obtener el porcentaje que representa el corredor de la NWC con respecto a la longitud ecuatorial del lado día “ $S_{día}$ ” usamos:

$$x = \frac{16,381.2}{20,037.3} \approx 0.8 \quad (4.3)$$

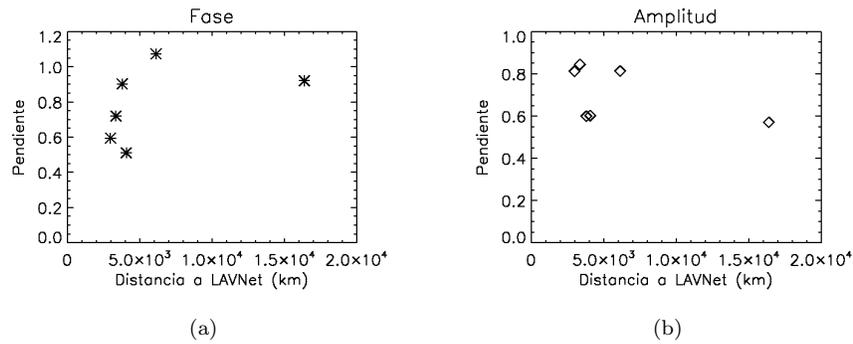


Figura 4.6: Gráficas de la “Distancia a la estación receptora LAVNet-Mex vs. Pendiente”, en a) para el caso de la fase y en b) para el caso de la amplitud.

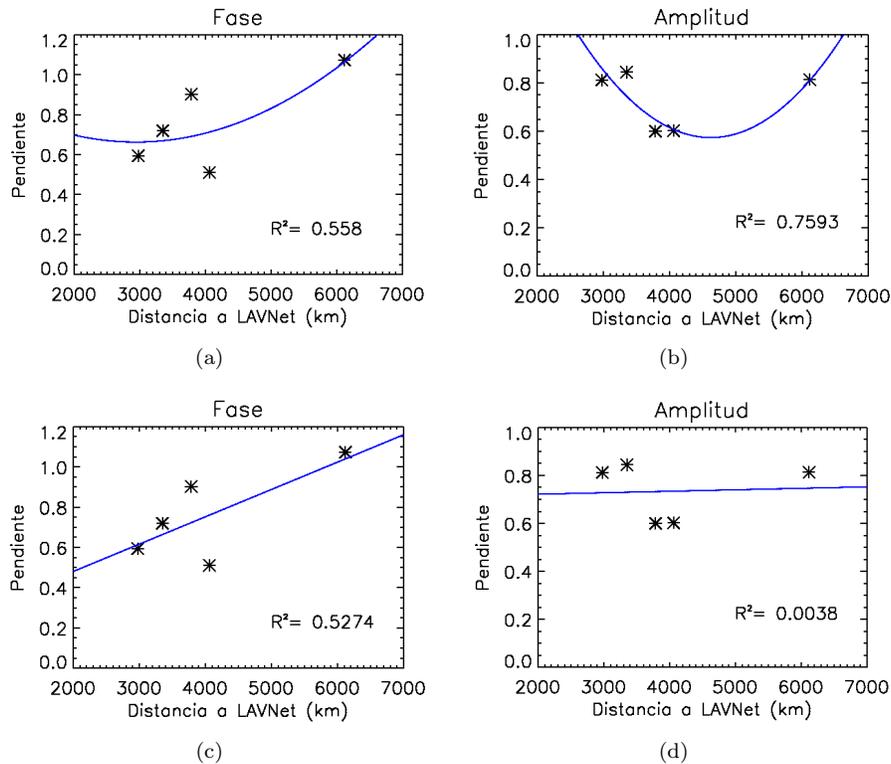


Figura 4.7: Figura que muestra en las partes a) y b) un ajuste cuadrático de la gráfica “Distancia a la estación receptora LAVNet-Mex vs. Pendiente” una vez que el dato del corredor NWC se ha omitido, en la parte a) las pendientes se refieren a los ajustes hechos a los datos del “Logaritmo de la potencia vs. el logaritmo de la variación en la fase”, mientras que en la parte b) las pendientes se refieren a los ajustes hechos a los datos del “Logaritmo de la potencia vs. el logaritmo de la variación en la amplitud”. En las partes c) y d) se muestra el correspondiente ajuste lineal.

Es decir que 16,381.2 km representa el 80 % de la longitud ecuatorial del lado día “ $S_{día}$ ”, por lo que será muy difícil que el corredor de la NWC este totalmente iluminado cuando se presente una ráfaga solar, así que definitivamente podemos excluir el dato de este corredor en la gráfica 4.6 para poder realizar un ajuste adecuado.

La figura 4.7 muestra la gráfica de “Distancia a la estación LAVNet-Mex vs. Pendiente” con dos tipos de ajustes, en las partes a) y b) se aprecia un ajuste cuadrático, mientras que en las partes c) y d) un ajuste lineal.

Para el ajuste cuadrático en la figura 4.7 no es posible describir física-

mente el comportamiento simétrico de la gráfica a partir de una distancia dada, por lo que a pesar de parecer un mejor ajuste no tiene sentido hablar de él.

De lo contrario para el caso del ajuste lineal en la figura 4.7 tendría más sentido hablar de una ecuación que relacione las variables, sin embargo las rectas no representen un ajuste adecuado según el valor de los mínimos cuadrados.

Por el momento es prudente afirmar que al aplicar el logaritmo a los datos de las potencias de las ráfagas tanto como a las fluctuaciones en la fase (o a las fluctuaciones en la amplitud) y graficarlos, la pendiente resultante del ajuste lineal no depende de la distancia a la que se encuentre la estación emisora dada de la estación receptora, por lo que no podemos relacionar el valor de la potencia de las ráfagas con el cambio en la fase de las señales VLF mediante una ley de potencias.

4.2. Relación entre la potencia de las ráfagas y la variación de la altura a la que rebotan las ondas de radio VLF

Como ya se mencionó una vez que un evento eruptivo como una ráfaga solar incide en la ionosfera, causa perturbación en las radiocomunicaciones, esto debido a la ionización de las diversas capas ionosféricas y principalmente a la ionización en la capa más baja, la capa D, que tiene un rol importante en las telecomunicaciones.

Cuando la densidad de los electrones (e iones) de la ionosfera aumenta por la energía de una ráfaga, también aumenta su frecuencia de corte (ver ecuación 1.13), debido a que esta frecuencia depende directamente de la densidad de los electrones. Las ondas de radio VLF que antes rebotaban a una altura dada ahora rebotan a una altura inferior, ya que la densidad electrónica en las zonas bajas de la capa D ha aumentado y las señales de radio no pueden atravesar una región que oscila con una frecuencia mayor a la suya.

A ese descenso en la altura a la que son reflejadas las ondas de radio VLF se le llamará por practicidad simplemente “descenso” en los ejes de los gráficos (es importante aclarar que no existe descenso de material ionosférico hacia una posición inferior, simplemente se generó nuevo material ionizado en la zona baja de la capa D).

Según Muraoka et al. (1977), si suponemos que la ionización producida por una ráfaga incidente es debida a una emisión de rayos X monocromática, a pesar de tener diferentes longitudes de onda, pero suponiendo una longitud de onda efectiva λ_{eff} , se asume que la ecuación de Chapman es aplicable, con

una tasa de producción electrónica dada por la suma de las tasas de producción sobre toda la banda de los rayos X de 1 a 8 Å.

Con estas suposiciones es posible aplicar la ecuación 4.4 para calcular la variación de la altura (Δh) a la que son desviadas las señales de radio VLF para los diferentes corredores por los cuales se desplazan la ondas hasta llegar a la estación receptora LAVNet-Mex. Los valores de Δh para cada corredor y cada ráfaga solar durante el mes de marzo se presentan en el apéndice C.

$$\Delta h = \frac{\Delta f}{360 \left(\frac{d}{\lambda} \right) \left(\frac{1}{2R} + \frac{\lambda^2}{16(h_o^3)} \right)} \quad (4.4)$$

Donde:

Δh = Variación de la altitud a la que son reflejadas las ondas de radio VLF en km (en la capa D).

Δf = Variación de fase en grados sexagesimales.

d = Longitud del corredor en km.

λ = Longitud de onda de la estación emisora en km.

R = Radio terrestre en km.

h_o = Altura inicial de la ionosfera antes de la perturbación (se usó el valor de 70.5 km propuesto por Thomson, 2010).

Con los datos de la variación en la altitud para los eventos estudiados es posible ahora realizar gráficas de las variables “Potencia de la ráfaga vs. Variación de la altitud”, para así poder determinar si existe una relación entre estas variables; sin embargo sabemos que la mayor intensidad de los rayos solares los percibimos cuando el Sol se encuentra justo encima de nuestras cabezas, es decir cuando el ángulo de incidencia de los rayos solares es de 0° con respecto a la vertical (posición denominada cenit) y va menguando conforme el Sol se aleja del cenit, por lo que sería bueno en base a este hecho realizar alguna corrección a los datos reales ya que si la intensidad de radiación no es idónea los valores de Δh podrían variar significativamente (debido a que la cantidad de fotoionización variaría y esto a su vez influiría en la variación de la fase que sufren las señales de radio que rebotan en la capa D).

Muy pocas ráfagas solares de nuestro estudio incidieron cuando el Sol se encontraba en el cenit con respecto a la estación LAVNet-Mex, por lo que nos pareció adecuado realizar una corrección en los datos de la variación en la fase (para las señales de radio recibidas) para todos los casos en los que la posición solar no era la más idónea, en estos casos se hizo una corrección a la variación

de la fase de las señales recibidas con la ecuación 4.5:

$$\Delta f_{max} = \frac{\Delta f}{\cos\theta} = \sec(\theta) \cdot \Delta f \quad (4.5)$$

Donde:

θ = Ángulo entre el punto subsolar y la estación LAVNet-Mex en coordenadas geográficas.

Δf = Es la variación en la fase de las señales de radio cuando inciden las ráfagas.

Al aplicar esta corrección estamos suponiendo que la variación en la fase (a la que llamaré Δf) de las señales de radio recibidas decrece conforme aumenta el ángulo entre el punto subsolar y LAVNet-Mex (al que llamare ángulo-sub-lav), es decir, esa variación es máxima cuando el ángulo-sub-lav es cero y mínima cuando el ángulo-sub-lav es de 90° , es lógico pensar esto ya que la intensidad de los rayos solares es máxima cuando estos inciden en el cenit y va decreciendo conforme el ángulo de incidencia aumenta, llegando a ser mínima a los 90° , pues si se pasa de ahí, la región del corredor tanto como la estación receptora y su correspondiente emisora se encontrarían obscurecidas (es decir será de noche o de madrugada).

La figura 4.8 muestra la posición del punto subsolar para un evento dado y la región iluminada en el mundo en esos momentos, mientras que la figura 4.9 muestra el ángulo de separación (el llamado ángulo-sub-lav) entre el dicho punto subsolar y LAVNet-Mex. El programa “terminator_map” calcula la latitud y longitud del punto subsolar de cada evento (conocemos ya las coordenadas de LAVNet-Mex), para obtener el ángulo entre el punto subsolar y LAVNet-Mex bastó con agregar unas líneas al programa usando el teorema de Pitágoras.

Por lo ya mencionado con anterioridad tenemos entonces que cuando la intensidad es máxima habrá una mayor cantidad de energía inyectada en la ionosfera, por lo que Δh será mayor y suponemos que también aumentará la Δf de acuerdo a la ecuación 4.5, por estas razones se considera que la variación en la fase será máxima conforme la intensidad sea mayor y viceversa.

Podemos entonces suponer que la variación en la fase se comporta como una función coseno, de manera que tenemos que la máxima o idónea variación en la fase dada una ráfaga incidente, se calcula aplicando una corrección, que resulta justamente ser $1/\cos\theta$, esta corrección estaría dada por la ecuación 4.5, ya que como se observa de la figura 4.10 los valores de Δf que son representadas por la función coseno, serán cambiados por la secante multiplicada por el valor de su respectiva Δf .

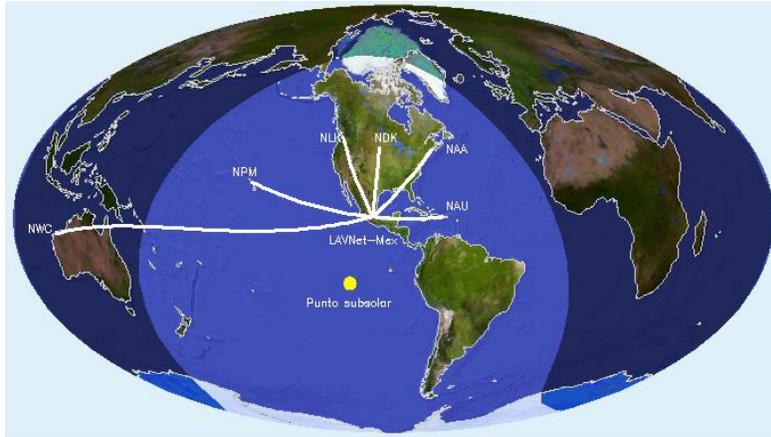


Figura 4.8: En la figura se muestra la imagen producida por el programa “terminator_map” que proporciona las zonas iluminadas del mundo a una fecha y hora determinadas, en este caso la fecha corresponde al día 3 de marzo del 2011 a las 13:24 horas, en letras blancas se muestran las posiciones de las antenas emisoras, mientras que las líneas muestran los diversos corredores que van de LAVNet-Mex (donde se unen las líneas) a cada una de las emisoras, también se aprecia un círculo pequeño que corresponde al punto subsolar.

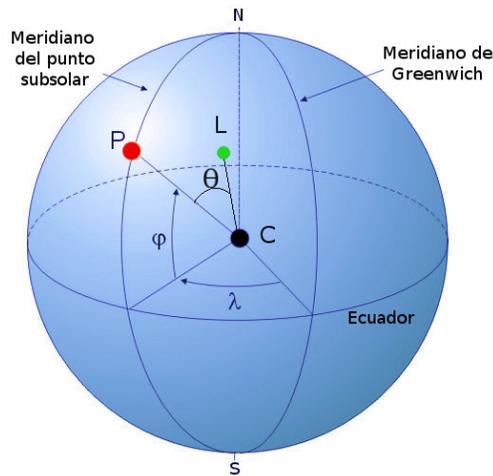


Figura 4.9: Se puede apreciar el punto subsolar marcado con una letra P, el centro de la Tierra en C, una supuesta posición de la estación LAVNet-Mex en L y el ángulo θ entre P y L medido desde el centro de la Tierra que representa el ángulo entre el punto subsolar y LAVNet-Mex, φ y λ representan la latitud y la longitud del punto subsolar respectivamente (también medidos desde el centro de la Tierra). Imagen modificada del repositorio de wikipedia.

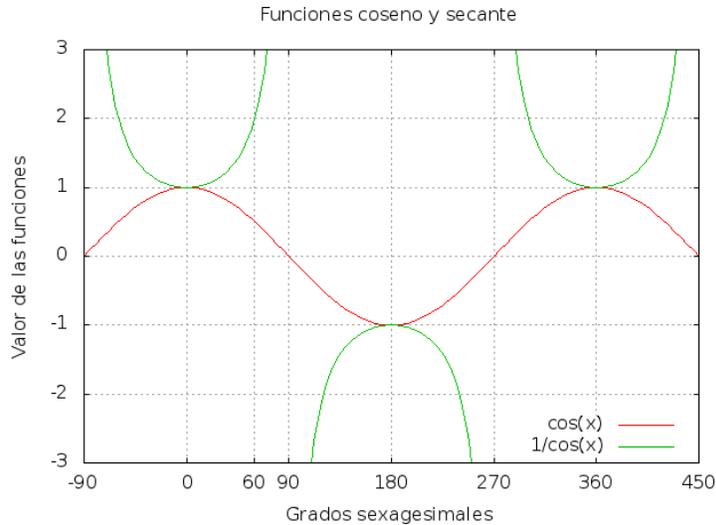


Figura 4.10: Se observan la secante y el coseno en una misma gráfica, donde el coseno representa el comportamiento de Δf y la secante representa la corrección aplicada con la ecuación 4.5.

Así nuestra corrección aplicada permite que exista una compensación en Δf dada por la secante de ese mismo ángulo que pensamos “compone las cosas” (ver figura 4.10), aunque la intensidad en la radiación solar disminuye conforme aumenta la abertura del ángulo-sub-lav, esta compensación aumenta conforme el ángulo-sub-lav se aproxima a 90° .

Los valores omitidos se debieron a que el ángulo-sub-lav era mayor o igual a 90° , de no ser así esto implicaría que a pesar de esas circunstancias era posible la detección de las ráfagas solares en ese momento, esto repercutiría en la obtención de los valores de Δh corregidos, pues se obtendrían distancias negativas (ver figura 4.10), o en su defecto si se llegara a tomar el valor absoluto se obtendrían valores de Δh muy grandes que causarían ruido en las gráficas de las correcciones.

Aparte de estas omisiones se agregó un tope más debido a que la función de corrección de las variaciones en la fase (es decir la función secante de la ecuación 4.5) toma valores muy elevados cuando Δf se aproxima demasiado a los 90° , por lo que se decidió tomar solamente valores que cumplan que $\Delta f \leq 60^\circ$. Las correcciones de las variaciones en la fase se encuentran en el apéndice C, junto con los valores de Δh calculados debido a dichas correcciones.

Como los valores de las potencias pueden llegar a variar en algunos órdenes de magnitud de una ráfaga a otra y no así para los valores de Δh ,

resulta conveniente graficar el logaritmo base 10 de ambos, de esta manera podremos apreciar más fácilmente si existe una relación entre ambas variables con tan solo mirarlas.

Las gráficas de las variables de “Logaritmo de la Potencia de las ráfagas vs. Logaritmo de la variación en la altitud” se encuentran en las figuras 4.11 y 4.12, los datos reales (sin la corrección mencionada anteriormente) están representados mediante triángulos, mientras que la corrección que se mencionó es representada con rombos, en las partes a), c) y e) se aprecian los ajustes lineales aplicados a los datos reales y a las correcciones, mientras que en las partes b), d) y f) se observan los ajustes cuadráticos de ambos tipos de datos.

Para poder determinar si los ajustes de las gráficas eran adecuados, tanto los lineales como los cuadráticos, se hizo uso del valor estadístico “chi cuadrado” (χ^2) o prueba de bondad del ajuste, este valor nos indica que tan bueno es un ajuste dado, comparando los valores de los datos obtenidos contra un ajuste teórico propuesto, conforme este valor se aproxima más a cero quiere decir que el ajuste de la gráfica es el adecuado y conforme el valor sea mayor quiere decir que los resultados no corresponden a las expectativas del modelo teórico planteado.

Las tablas 4.3 y 4.4 muestran los valores de χ^2 para los ajustes lineales y cuadráticos respectivamente en las gráficas ya mencionadas, tanto para los datos reales como para los corregidos. De esta forma es posible analizar si los ajustes teóricos en los datos corregidos resultaron ser más adecuados que los ajustes teóricos en los datos reales.

Como se observa de ambas tablas el valor de χ^2 es mejor para los ajustes hechos en los datos corregidos que en los datos reales, ya que se aproximan más a cero, en general las correcciones aplicadas si mejoraron notablemente el comportamiento de los datos reales, sin embargo el valor de χ^2 esta en su mayoría por encima de 1, esos valores nos indican que no es posible afirmar que las variables implicadas en los datos reales se comporten de forma teóricamente lineal o cuadrática, el único caso que muestra un comportamiento de χ^2 más cercano a cero es el caso de la estación NAA, sin embargo esta estación no muestra nada en particular para poder afirmar que el planteamiento teórico propuesto es adecuado, si nos fijamos en el corredor que conecta a la estación NAA con LAVNet-Mex (ver figura 4.8) notamos que su orientación es de S a NE muy similar a como lo es el corredor de la estación NDK, sin embargo el valor de χ^2 para el caso de los datos de la estación NDK es superior a 1 en ambas tablas 4.3 y 4.4, por lo que esa orientación no advierte de alguna característica especial del comportamiento de la ionosfera en dicha zona.

De la tabla 3.1 notamos que la distancia de la estación NAA a LAVNet-Mex es de 4060.6 km y esta longitud tampoco tiene alguna característica especial, de lo contrario la estación NLK presentaría un valor similar de χ^2 debido a que su distancia a LAVNet-Mex es de 3786.2 km, sin embargo eso no ocurre.

χ^2 Ajustes lineales		
Estación	Datos reales	Datos corregidos
NDK	6.69197	2.04857
NLK	6.63665	3.04021
NPM	3.71933	2.40910
NWC	14.3111	1.37605
NAA	1.85463	0.449491
NAU	6.27228	5.46004

Cuadro 4.3: Tabla que muestra el valor de χ^2 para los ajustes lineales de los datos reales obtenidos y de los datos corregidos para las gráficas de “Log. base 10 de la potencia de la ráfaga vs. Log. base 10 de la variación en la altitud”.

χ^2 Ajustes cuadráticos		
Estación	Datos reales	Datos corregidos
NDK	6.68071	1.50757
NLK	6.24987	2.72303
NPM	3.70826	2.14078
NWC	14.1925	1.10798
NAA	1.76303	0.313201
NAU	4.87182	4.43705

Cuadro 4.4: Tabla que muestra el valor de χ^2 para los ajustes cuadráticos de los datos reales obtenidos y de los datos corregidos para las gráficas de “Log. base 10 de la potencia de la ráfaga vs. Log. base 10 de la variación en la altitud”.

Aclarando además que el valor de χ^2 para los datos de la estación NAA no es suficientemente cercano a cero como para poder hacer alguna afirmación, se piensa más bien que esta aproximación a cero se debe a que el valor original de χ^2 con los datos reales se acerca más a la unidad que la mayoría de las otras estaciones, por lo que ni la orientación de éste corredor, ni la distancia de la estación NAA a LAVNet-Mex dan indicios de un comportamiento diferente al de las demás estaciones.

No hay en ningún caso valores de χ^2 que muestren una relación teórica aceptable entre el logaritmo de la potencia de las ráfagas solares y el logaritmo de los valores de Δh de cada corredor, existe sin embargo una clara tendencia ya que conforme la magnitud de la potencia aumenta también incrementa Δh , aunque no podemos cuantificar esa relación como lineal o cuadrática debido a la gran dispersión que hay en los datos.

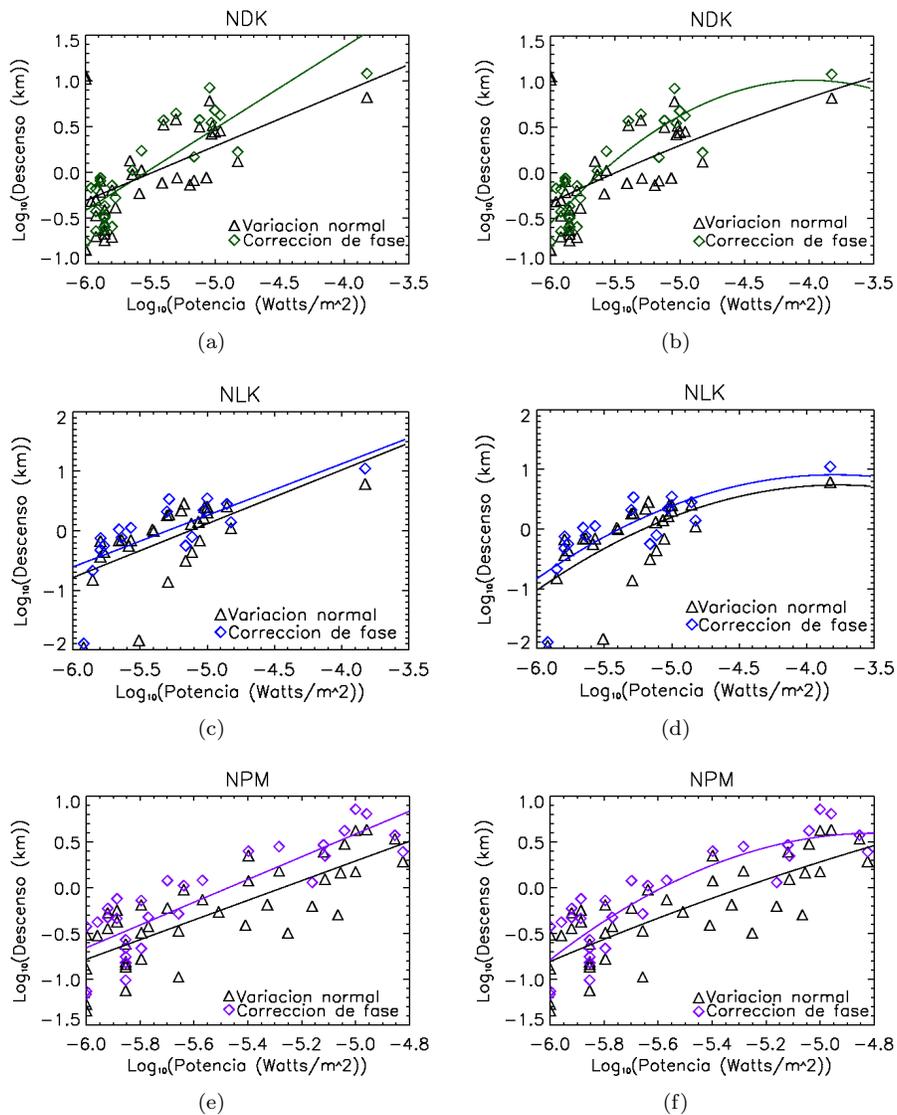


Figura 4.11: Figura que muestra las gráficas de “Logaritmo base 10 de la Potencia de las ráfagas vs. Logaritmo base 10 de la variación en la altitud” para las estaciones NDK, NLK y NPM, en las partes a), c) y e) se observan los ajustes lineales hechos a los datos reales representados por triángulos y los ajustes lineales hechos a los datos corregidos representados por rombos, mientras que en las partes b), d) y f) se aprecian los ajustes cuadráticos de ambos tipos de datos.

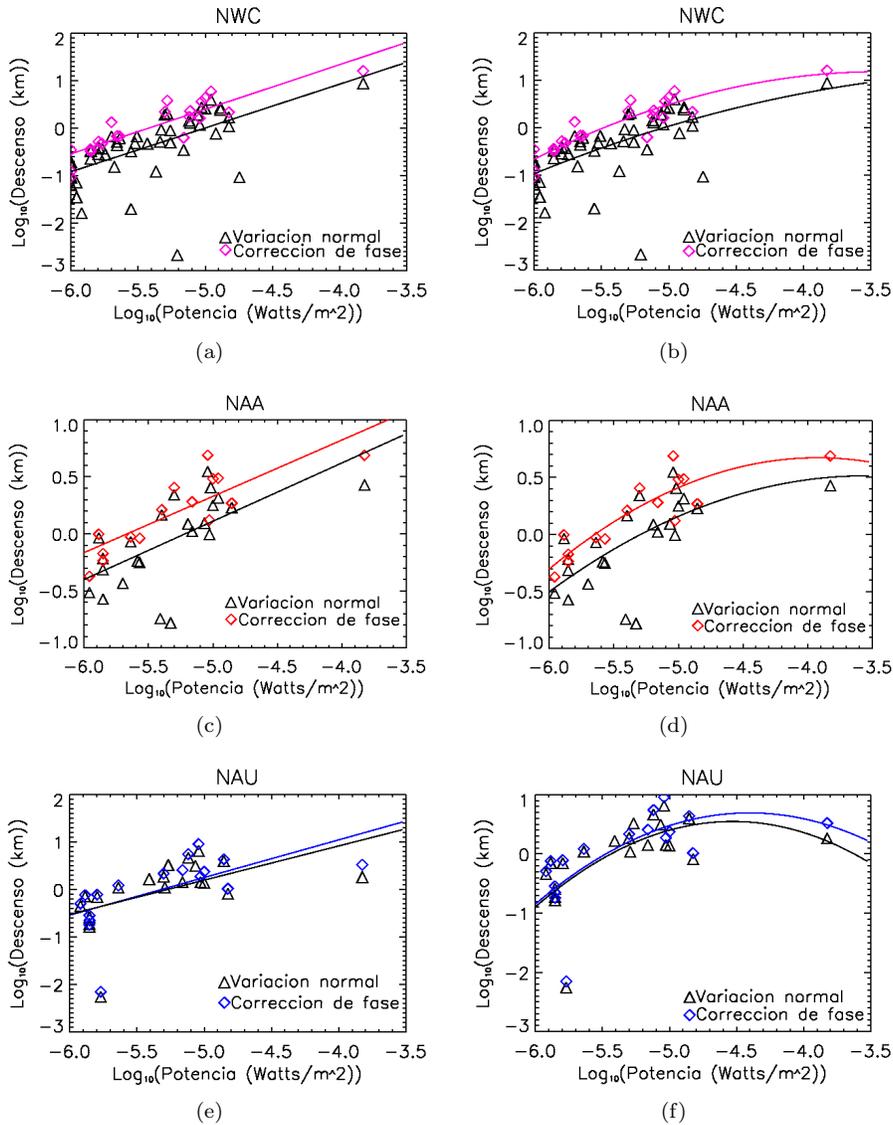


Figura 4.12: Figura que muestra las gráficas de “Logaritmo base 10 de la Potencia de las ráfagas vs. Logaritmo base 10 de la variación en la altitud” para las estaciones NWC, NAA y NAU, en las partes a), c) y e) se observan los ajustes lineales hechos a los datos reales representados por triángulos y los ajustes lineales hechos a los datos corregidos representados por rombos, mientras que en las partes b), d) y f) se aprecian los ajustes cuadráticos de ambos tipos de datos.

4.3. Cálculo de las correlaciones entre los corretores

Para estudiar las ráfagas desde otra perspectiva se tomaron los datos de 10 eventos que estuvieran presentes en la mayoría de las señales de radio de las 6 estaciones emisoras, procurando que la potencia de éstas fuera distinta, obteniendo 3 ráfagas de magnitud C, 5 de magnitud M y 2 de magnitud X presentes durante los años 2011 y 2012. Las magnitudes precisas de las 10 ráfagas, las fechas en las que se presentaron y la hora universal en que sucedieron se presentan en la tabla 4.5.

Con las fechas y horas en que ocurrieron los eventos se verificó la variación en la fase de las señales de radio con el programa “Chart6”, después se elaboraron programas de cómputo que ajustaran una recta al segmento del ascenso (ver figura 4.13) debida a la variación de la fase en dichas señales. Los programas también calculaban las correlaciones en la subida entre las 6 señales.

Las posibles correlaciones entre las estaciones podían ser 15 en total si es que el evento fue registrado por las 6 estaciones de radio y eran NAA-NAU, NAA-NLK, NAA-NDK, NAA-NPM, NAA-NWC, NAU-NLK, NAU-NDK, NAU-NPM, NAU-NWC, NLK-NDK, NLK-NPM, NLK-NWC, NDK-NPM, NPM-NWC y NDK-NWC.

Cada evento o ráfaga contaba entonces con aproximadamente 15 correlaciones (en el mejor de los casos), por lo que se calculó el promedio de esas correlaciones para cada ráfaga, elaborando a su vez una gráfica que mostrara ese promedio (línea oscura continua) y el ajuste (curva ascendente) adecuado para esos datos, en la figura 4.14 puede verse esa gráfica junto con las barras de error colocadas a partir de los datos promedio.

Ráfaga	Magnitud	Fecha	Hora universal
1	C2.7	11/02/2012	20:38
2	C5.3	11/02/2012	19:08
3	C7.7	11/02/2012	18:47
4	M1.2	24/09/2011	21:23
5	M3.0	24/09/2011	19:09
6	M3.1	24/09/2011	17:19
7	M5.8	24/09/2011	20:29
8	M9.3	30/07/2011	2:04
9	X1.8	07/09/2011	22:32
10	X2.1	06/09/2011	22:12

Cuadro 4.5: Ráfagas solares elegidas por estar presentes en la mayoría de las señales de radio de las estaciones emisoras.

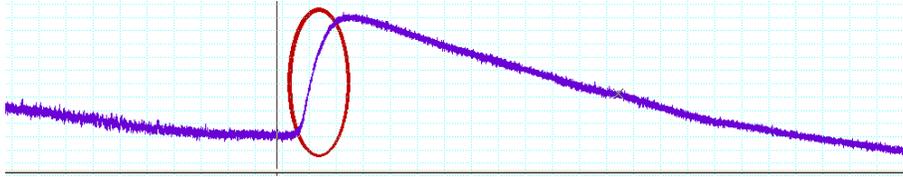


Figura 4.13: Ráfaga de magnitud X2.2 que ocurrió el 15 de febrero del 2011 a la 1:44 horas tiempo universal, se puede apreciar un ejemplo de la subida o elevación en la señal de la NWC encerrada en un ovalo, la cual es la zona a la que los programas de cómputo ajustan una recta para después poder correlacionarla con las demás señales de radio que captaron el evento.

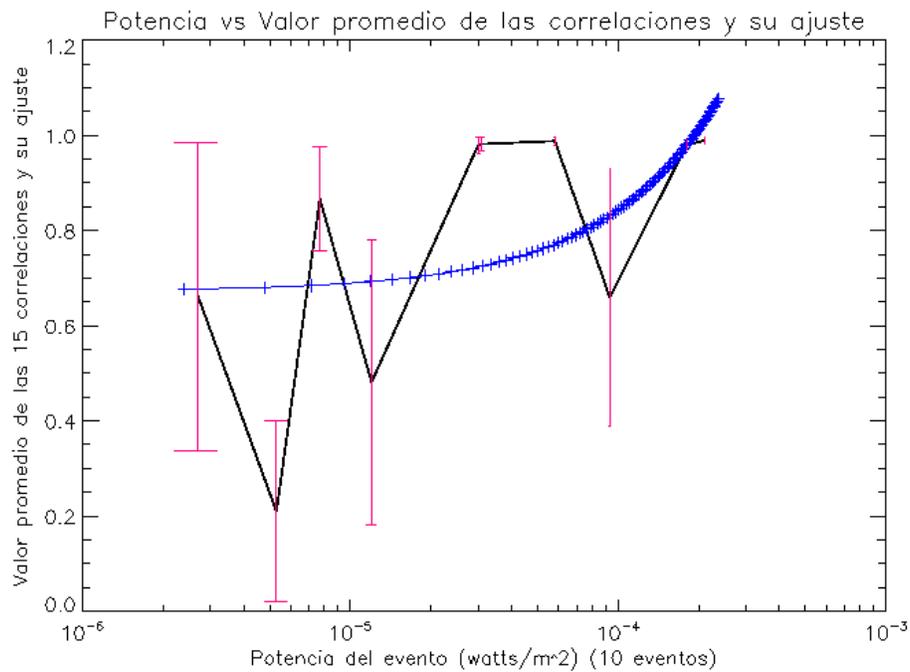


Figura 4.14: Gráfica que muestra el promedio de las correlaciones (línea continua), las barras de error colocadas a partir de los datos promedio para los 10 eventos y el ajuste lineal adecuado representado con una curva ascendente.

Ya que el eje x de la gráfica 4.14 esta en escala logarítmica el ajuste parece una línea curva, aunque en realidad es un ajuste lineal dado por la ecuación:

$$y = 1705.74x + 0.672315 \quad (4.6)$$

Además del hecho de que resulta un ajuste lineal, observando cuidadosa-

mente la gráfica 4.14 se nota que conforme la potencia de la ráfaga aumenta, el promedio en las correlaciones y el ajuste se van acercando más a 1, esto significa que las pendientes en la subida de los 10 eventos para cada estación que los detectó se van pareciendo cada vez más, es decir, entre más potente sea una ráfaga serán más similares las pendientes en la subida para todas las señales de radio, siguiendo una relación dada por la ecuación 4.6 en este caso.

Por lo que se puede afirmar que conforme las ráfagas aumentan en intensidad la correlación en la parte de la subida de todas las señales de radio que detectaron los eventos se va pareciendo más a 1.

5

Conclusiones

5.1. Fluctuación de la fase con respecto a la potencia

Podemos observar de la gráfica 4.7(c) que al aplicarle el logaritmo a los datos de las potencias de las ráfagas y a sus respectivas variaciones en la fase, la pendiente obtenida de dicha relación parece indicar una cierta tendencia, de manera que conforme aumenta la distancia de las emisoras a la estación receptora esta pendiente parece ser cada vez mayor, sin embargo para poder afirmar que existe una relación, es necesario cubrir un amplio rango de distancias a LAVNet-Mex, con la construcción de otras emisoras que proporcionen más datos y faciliten así la realización de una mejor estadística, no obstante la baja cantidad de éstas no permite actualmente establecer dicha relación.

Por su parte la gráfica 4.7(d) que toma en cuenta las variaciones en la amplitud no muestra ninguna tendencia y a pesar de que las gráficas 4.7(a) y 4.7(b) con los ajustes cuadráticos parecen arrojar un mejor ajuste no tienen una explicación física lógica.

La tabla que contiene las variaciones en la fase (y amplitud) así como la hora en que ocurrieron esas variaciones en las señales de radio para todas las ráfagas recolectadas puede encontrarse en la dirección http://cintli.geofisica.unam.mx/?page_id=314; podemos notar que el número del evento en esa tabla no siempre es continuo, esto es debido a que algunas ráfagas, a las que se decidió nombrar extendidas, mostraban un comportamiento diferente a las ráfagas usuales, debido al tiempo de inyección de energía que las caracterizaba, estas ráfagas tenían un intervalo de tiempo en algunas ocasiones de hasta horas entre el máximo y el mínimo en la variación de la fase, por lo que no fueron tomadas en cuenta, sería conveniente para un estudio posterior analizar éstas ráfagas “extendidas”.

5.2. Relación entre la potencia de las ráfagas y la variación de la altura a la que rebotan las ondas de radio VLF

En las gráficas de las figuras 4.11 y 4.12 se puede notar una tendencia clara ya que mientras mayor sea el valor de la potencia de la ráfaga mayor será el valor de la variación en la altitud a la que rebotan las señales de radio, sin embargo existe una gran dispersión en todos las gráficas, es por ello que el valor estadístico χ^2 arroja números no muy cercanos a cero (mayores a 1 en su mayoría) tanto para los datos reales como para las correcciones realizadas a esos datos. Por lo que se concluye que en este caso para poder encontrar una relación confiable entre las variables es recomendable trabajar con una mayor cantidad de datos de ráfagas solares, tal vez con los datos de 2 meses más para poder hacer un estudio que proporcione una mejor estadística.

5.3. Cálculo de las correlaciones entre los corretores

Se concluye que conforme la potencia de la ráfaga analizada es mayor, la correlación en el segmento de la subida en las señales de radio que la detectaron será más parecida y viceversa, por lo que para un estudio posterior sería bueno tomar en cuenta únicamente ráfagas de gran intensidad.

Appendices

Apéndice A

Desarrollo de la teoría de Chapman

Para poder describir la teoría de Chapman debemos analizar la figura A.1 y definir las siguientes variables:

n_n = Densidad de partículas neutras (m^{-3}).

h = Altura (m).

I = Intensidad de radiación (eV/m^2s).

σ = Sección transversal donde se da la absorción de los fotones (m^2).

Q = Tasa de producción de iones ($electrones/m^3s$).

s = Longitud del camino que sigue la línea de luz (m).

θ = Ángulo cenital (grados).

C = Número de electrones producidos durante la absorción por unidad de energía absorbida ($electrones/eV$).

Ahora conforme la radiación es absorbida su intensidad decrece como

$$-\frac{dI}{ds} = \sigma n_n I \quad (\text{A.1})$$

Ya que la tasa de producción de iones debe ser proporcional a la razón con la cual la radiación es absorbida, es posible escribir

$$Q = -C \frac{dI}{ds} = C \sigma n_n I \quad (\text{A.2})$$

Derivando para obtener el pico en la razón de producción (a lo largo de s) tenemos

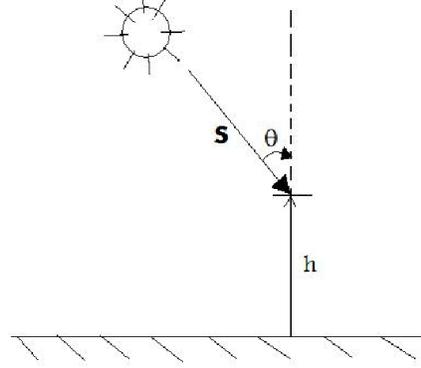


Figura A.1: Rayos solares incidentes a un cierto ángulo θ .

$$\frac{dQ}{ds} = C\sigma(I \frac{dn_n}{ds} + n_n \frac{dI}{ds}) = 0 \quad (\text{A.3})$$

$$\Rightarrow \frac{1}{n_n} \frac{dn_n}{ds} = -\frac{1}{I} \frac{dI}{ds} \quad (\text{A.4})$$

Ahora mirando con detenimiento la figura A.1 notamos que $ds \cos \theta = -dh$ ó $ds = -dh \sec \theta$ por lo que podemos escribir para el lado izquierdo de la ecuación A.4

$$\frac{1}{n_n} \frac{dn_n}{ds} = -\frac{1}{n_n} \frac{dn_n}{dh} \cos \theta \quad (\text{A.5})$$

Derivando la ecuación 1.2 con respecto a h tenemos

$$\frac{dn_n}{dh} = \left(-\frac{1}{H_n}\right) n_0 \exp\left(-\frac{(h-h_0)}{H_n}\right) = \left(-\frac{1}{H_n}\right) n_n \quad (\text{A.6})$$

Implementando la ecuación anterior a la ecuación A.5 tenemos

$$\frac{1}{n_n} \frac{dn_n}{ds} = -\frac{1}{n_n} n_n \left(-\frac{1}{H_n}\right) \cos \theta \quad (\text{A.7})$$

$$\Rightarrow \frac{1}{n_n} \frac{dn_n}{ds} = \frac{\cos \theta}{H_n} \quad (\text{A.8})$$

Por otro lado de la ecuación A.1 tenemos

$$-\frac{1}{I} \frac{dI}{ds} = \frac{1}{I} (\sigma n_n I) \quad (\text{A.9})$$

$$\Rightarrow -\frac{1}{I} \frac{dI}{ds} = \sigma n_n \quad (\text{A.10})$$

Por lo que igualando los extremos derechos de las ecuaciones A.8 y A.10 tenemos

$$\frac{\cos \theta}{H_n} = \sigma n_n \quad (\text{A.11})$$

Así la tasa de producción alcanza un máximo (subíndice m) en

$$\Rightarrow \boxed{\sigma H_n n_m \sec \theta = 1} \quad (\text{A.12})$$

Denotemos como sigue a la integral de la densidad n_n a lo largo de la longitud del camino que sigue la luz s_m hasta llegar al pico máximo de producción

$$N_{nm} = \int_{\infty}^{s_m} n_n ds \quad (\text{A.13})$$

Luego de la ecuación A.1 tenemos

$$\frac{dI}{I} = d \ln I = -\sigma n_n ds \quad (\text{A.14})$$

Ahora integrando desde el tope de la atmósfera (∞) hasta s tenemos

$$\ln \frac{I(s)}{I(\infty)} = -\sigma \int_{\infty}^s n_n ds = -\sigma N_{ns} \quad (\text{A.15})$$

$$\Rightarrow I(s) = I(\infty) \exp(-\sigma N_{ns}) = I(\infty) \exp(-\tau) \quad (\text{A.16})$$

Donde τ es la profundidad óptica, la cual describe la atenuación de la radiación ionizante a través del camino que sigue la luz y en donde en el pico de producción $\sigma N_{ns} = \sigma N_{nm} = 1$.

De la ecuación A.12 tenemos

$$n_m = (\sigma H_n \sec \theta)^{-1} \quad (\text{A.17})$$

Por lo que de la ecuación anterior, la ecuación A.2 y la ecuación A.16 notamos que para el pico de producción:

$$Q_m = C \sigma n_m I_m = C \sigma (\sigma H_n \sec \theta)^{-1} (I(\infty) \exp(-1)) = \frac{CI(\infty) \cos \theta}{H_n \exp(1)} \quad (\text{A.18})$$

$$\Rightarrow Q_m = \frac{CI(\infty) \cos \theta}{H_n \exp(1)} \quad (\text{A.19})$$

De esta manera de la ecuación A.12 dado un perfil de altitud n_n , es posible determinar la altura del pico de producción h_m resolviendo

$$\sigma H_n n_m \sec \theta = 1 = \sigma H_n n_0 \exp\left(\frac{-(h_m - h_0)}{H_n}\right) \sec \theta \quad (\text{A.20})$$

$$\Rightarrow \frac{\cos \theta}{\sigma H_n n_0} = \exp \left(\frac{-(h_m - h_0)}{H_n} \right) \quad (\text{A.21})$$

$$\Rightarrow \frac{-(h_m - h_0)}{H_n} = \ln \left(\frac{\cos \theta}{\sigma H_n n_0} \right) \quad (\text{A.22})$$

$$\Rightarrow h_m - h_0 = -H_n \ln \left(\frac{\cos \theta}{\sigma H_n n_0} \right) \quad (\text{A.23})$$

$$\Rightarrow \boxed{h_m = h_0 - H_n \ln \left(\frac{\cos \theta}{\sigma H_n n_0} \right)} \quad (\text{A.24})$$

También es posible determinar la dependencia de la intensidad de la radiación I con respecto a h usando la ecuación A.16

$$I(s) = I(\infty) \exp(-\sigma N_{ns}) = I(\infty) \exp \left(-\sigma \int_{\infty}^s n_n ds \right) \quad (\text{A.25})$$

Sustituyendo n_n de la ecuación 1.2

$$I(s) = I(\infty) \exp \left[-\sigma \int_{\infty}^s n_0 \exp \left(\frac{-(h - h_0)}{H_n} \right) ds \right] \quad (\text{A.26})$$

Sustituyendo $ds = -dh \sec \theta$ y sacando de la integral los términos constantes (renombramos la variable h ya que es muda)

$$I(h) = I(\infty) \exp \left[\sigma n_0 \sec \theta \int_{\infty}^h \exp \left(\frac{-(\eta - h_0)}{H_n} \right) d\eta \right] \quad (\text{A.27})$$

Integrando

$$I(h) = I(\infty) \exp \left\{ (-H_n) \sigma n_0 \sec \theta \left[\exp \left(\frac{-(\eta - h_0)}{H_n} \right) \right]_{\infty}^h \right\} \quad (\text{A.28})$$

$$= I(\infty) \exp \left\{ (-H_n) \sigma n_0 \sec \theta \left[\exp \left(\frac{-(h - h_0)}{H_n} \right) - \exp \left(\frac{-(\infty - h_0)}{H_n} \right) \right] \right\} \quad (\text{A.29})$$

$$\boxed{I(h) = I(\infty) \exp \left\{ -H_n \sigma n_0 \sec \theta \exp \left(\frac{-(h - h_0)}{H_n} \right) \right\}} \quad (\text{A.30})$$

Para obtener la función de la tasa de producción iónica Q de Chapman dependiente de h usamos la ecuación A.2, la ecuación 1.2 y la A.30

$$Q = C\sigma n_n I = C\sigma \left[n_0 \exp\left(\frac{-(h-h_0)}{H_n}\right) \right] \times \left[I(\infty) \exp\left\{ -H_n \sigma n_0 \sec \theta \exp\left(\frac{-(h-h_0)}{H_n}\right) \right\} \right] \quad (\text{A.31})$$

$$\Rightarrow Q = C\sigma n_0 I(\infty) \exp\left[\frac{-(h-h_0)}{H_n} - H_n \sigma n_0 \sec \theta \exp\left(\frac{-(h-h_0)}{H_n}\right) \right] \quad (\text{A.32})$$

Ahora de la ecuación A.19 despejamos $CI(\infty)$

$$CI(\infty) = Q_m \exp(1) H_n / \cos \theta \quad (\text{A.33})$$

$$\Rightarrow Q = \sigma n_0 \left(\frac{Q_m \exp(1) H_n}{\cos \theta} \right) \exp\left[\frac{-(h-h_0)}{H_n} - H_n \sigma n_0 \sec \theta \exp\left(\frac{-(h-h_0)}{H_n}\right) \right] \quad (\text{A.34})$$

Reagrupando

$$= \left(\frac{n_0 H_n \sigma}{\cos \theta} \right) Q_m \exp\left[1 - \frac{(h-h_0)}{H_n} - H_n \sigma n_0 \sec \theta \exp\left(\frac{-(h-h_0)}{H_n}\right) \right] \quad (\text{A.35})$$

Notamos que extendiendo la ecuación A.12 tenemos

$$\sigma H_n n_m \sec \theta = \sigma H_n n_0 \exp\left(\frac{-(h_m-h_0)}{H_n}\right) \sec \theta = 1 \quad (\text{A.36})$$

Y despejando

$$\sigma H_n n_0 \sec \theta = \frac{1}{\exp\left(\frac{-(h_m-h_0)}{H_n}\right)} \quad (\text{A.37})$$

Por lo que la ecuación A.35 nos da

$$= Q_m \left(\frac{1}{\exp\left(\frac{-(h_m-h_0)}{H_n}\right)} \right) \times \exp\left[1 - \frac{(h-h_0)}{H_n} - \frac{1}{\exp\left(\frac{-(h_m-h_0)}{H_n}\right)} \exp\left(\frac{-(h-h_0)}{H_n}\right) \right] \quad (\text{A.38})$$

$$= Q_m \exp\left(\frac{h_m - h_0}{H_n}\right) \exp\left[1 - \frac{(h - h_0)}{H_n} - \exp\left(\frac{h_m - h_0}{H_n}\right) \exp\left(\frac{-(h - h_0)}{H_n}\right)\right] \quad (\text{A.39})$$

$$= Q_m \exp\left[1 - \frac{h - h_0}{H_n} + \left(\frac{h_m - h_0}{H_n}\right) - \exp\left(\frac{-(h - h_0)}{H_n} + \frac{(h_m - h_0)}{H_n}\right)\right] \quad (\text{A.40})$$

$$= Q_m \exp\left[1 + \frac{(-h + \cancel{h_0} + h_m - \cancel{h_0})}{H_n} - \exp\left(\frac{-h + \cancel{h_0} + h_m - \cancel{h_0}}{H_n}\right)\right] \quad (\text{A.41})$$

$$= Q_m \exp\left[1 + \frac{(h_m - h)}{H_n} - \exp\left(\frac{h_m - h}{H_n}\right)\right] \quad (\text{A.42})$$

Denotando $y = h - h_m/H_n$ tenemos

$$\boxed{Q = Q_m \exp[1 - y - \exp(y)]} \quad (\text{A.43})$$

La cual es la *función de producción de Chapman*, donde Q representa la tasa de producción iónica y la tasa de fotoelectrones ya que usualmente se producen en pares.

Apéndice B

Datos recopilados de las ráfagas de marzo del 2011

La siguiente tabla muestra los datos recopilados del satélite GOES del mes de marzo del 2011 para las ráfagas con longitudes de onda dentro de la banda de 1 a 8 Å, de izquierda a derecha se observan: la fecha en que ocurrió el evento, la hora universal al inicio de la ráfaga, la hora universal en el máximo de intensidad, la hora universal en que terminó el evento y finalmente la clasificación de las ráfagas según su intensidad.

Fecha	Comienzo	Máximo	Término	Clasificación
2011/03/01	02:30	04:13	04:40	C6.0
2011/03/01	08:52	09:18	09:34	C2.9
2011/03/01	14:35	14:38	14:40	C1.1
2011/03/01	16:25	16:47	16:59	C1.0
2011/03/01	17:42	17:47	17:54	C1.3
2011/03/01	18:06	18:19	18:26	C1.0
2011/03/01	19:34	19:57	20:17	C1.6
2011/03/02	13:11	13:18	13:21	C1.4
2011/03/03	11:29	11:34	11:43	C1.2
2011/03/03	14:12	14:20	14:31	C5.4
2011/03/03	19:24	19:36	19:44	C1.2
2011/03/03	20:27	20:50	21:02	C2.7
2011/03/03	23:24	23:34	23:46	C2.0
2011/03/03	23:53	23:58	00:04	C2.1
2011/03/04	13:57	14:00	14:03	C1.7
2011/03/04	17:15	17:19	17:23	C1.0
2011/03/05	01:05	01:10	01:12	C2.2

Fecha	Comienzo	Máximo	Término	Clasificación
2011/03/05	02:40	02:49	02:58	C1.6
2011/03/05	05:19	05:22	05:24	C1.2
2011/03/05	05:41	09:08	09:18	C2.2
2011/03/05	09:01	09:08	09:15	C2.2
2011/03/05	10:13	10:17	10:21	C1.4
2011/03/05	11:42	11:49	11:58	C1.6
2011/03/05	12:06	12:10	12:14	C1.2
2011/03/05	12:24	12:26	12:29	C1.0
2011/03/05	12:40	12:41	12:42	C1.0
2011/03/05	12:46	12:48	12:53	C1.1
2011/03/05	13:30	13:41	13:52	C1.3
2011/03/05	14:22	14:25	14:30	C1.0
2011/03/05	20:05	20:10	20:16	C1.4
2011/03/05	20:51	21:44	21:53	C2.9
2011/03/06	00:23	00:26	00:29	C1.6
2011/03/06	01:29	01:33	01:37	C1.8
2011/03/06	02:03	02:08	02:11	C2.1
2011/03/06	03:37	03:45	03:51	C3.7
2011/03/06	04:07	04:15	04:20	C1.8
2011/03/06	04:33	04:44	04:48	C1.7
2011/03/06	05:28	05:32	05:36	C4.6
2011/03/06	06:59	07:07	07:09	C2.8
2011/03/06	07:30	07:33	07:35	C2.4
2011/03/06	08:30	08:33	08:37	C1.6
2011/03/06	08:49	09:04	09:07	C2.6
2011/03/06	09:54	10:01	10:06	C3.1
2011/03/06	10:31	10:40	10:55	C7.5
2011/03/06	11:56	12:09	12:12	C5.1
2011/03/06	13:31	13:50	14:16	C6.0
2011/03/06	14:41	14:44	14:47	C8.6
2011/03/06	15:21	15:27	15:30	C3.9
2011/03/06	16:02	16:19	16:22	C4.7
2011/03/06	16:25	16:30	16:33	C6.9
2011/03/06	19:32	19:37	19:41	C2.3
2011/03/06	21:17	21:21	21:25	C1.4
2011/03/06	21:51	21:57	22:05	C1.4
2011/03/06	23:33	23:35	23:37	C2.2
2011/03/07	02:02	02:12	02:22	C3.0
2011/03/07	04:20	04:39	04:47	C5.0
2011/03/07	05:00	05:13	05:19	M1.2
2011/03/07	07:11	07:18	07:30	C3.6
2011/03/07	07:49	07:54	07:56	M1.5
2011/03/07	07:59	08:07	08:15	M1.4

Fecha	Comienzo	Máximo	Término	Clasificación
2011/03/07	09:14	09:20	09:28	M1.8
2011/03/07	10:16	10:21	10:27	C4.9
2011/03/07	13:45	14:30	14:56	M1.9
2011/03/07	16:05	16:09	16:12	C5.1
2011/03/07	18:18	18:23	18:41	C7.6
2011/03/07	19:43	20:12	20:58	M3.7
2011/03/07	21:45	21:50	21:55	M1.5
2011/03/08	00:14	00:19	00:25	C4.7
2011/03/08	02:24	02:29	02:32	M1.3
2011/03/08	03:37	03:58	04:20	M1.5
2011/03/08	05:04	05:08	05:12	C5.5
2011/03/08	09:32	09:35	09:39	C4.7
2011/03/08	10:35	10:44	10:55	M5.3
2011/03/08	18:08	18:28	18:41	M4.4
2011/03/08	19:46	20:16	21:19	M1.4
2011/03/08	23:10	23:14	23:19	C7.7
2011/03/08	23:32	23:37	23:40	C8.8
2011/03/09	01:52	01:59	02:07	C5.6
2011/03/09	02:18	02:21	02:25	C4.7
2011/03/09	02:30	02:33	02:36	C6.4
2011/03/09	08:23	08:55	09:06	C9.4
2011/03/09	10:35	11:07	11:21	M1.7
2011/03/09	13:17	14:02	14:13	M1.7
2011/03/09	15:42	15:48	15:53	C2.6
2011/03/09	16:42	16:48	16:53	C2.7
2011/03/09	21:03	21:10	21:22	C5.0
2011/03/09	21:35	21:42	21:45	C2.9
2011/03/09	22:03	22:12	22:14	C9.4
2011/03/09	23:13	23:23	23:29	X1.5
2011/03/10	03:50	03:58	04:17	C2.9
2011/03/10	07:03	07:12	07:15	C6.2
2011/03/10	09:07	09:13	09:27	C2.4
2011/03/10	13:19	13:25	13:34	C4.2
2011/03/10	13:42	13:46	13:50	C4.7
2011/03/10	14:21	14:24	14:28	C2.0
2011/03/10	19:00	19:07	19:17	C4.0
2011/03/10	22:34	22:41	22:49	M1.1
2011/03/11	00:29	00:33	00:39	C1.4
2011/03/11	01:46	01:50	01:57	C1.1
2011/03/11	02:24	02:29	02:36	C2.8
2011/03/11	04:15	04:32	04:39	C5.5
2011/03/11	06:59	07:03	07:08	C3.0
2011/03/11	07:22	07:27	07:32	C4.3

Fecha	Comienzo	Máximo	Término	Clasificación
2011/03/11	08:13	08:18	08:25	C1.1
2011/03/11	11:10	11:15	11:22	C2.0
2011/03/11	11:43	11:47	11:49	C3.6
2011/03/11	16:04	16:07	16:10	C1.1
2011/03/11	22:14	22:20	22:27	C1.0
2011/03/11	22:38	22:43	22:50	C1.0
2011/03/12	04:33	04:43	04:48	M1.3
2011/03/12	10:21	10:27	10:31	C2.2
2011/03/12	12:22	12:29	12:37	C2.2
2011/03/12	12:53	13:00	13:06	C7.0
2011/03/12	15:19	15:29	15:34	C9.6
2011/03/12	16:26	16:37	16:45	C1.6
2011/03/12	17:32	17:38	17:44	C1.2
2011/03/12	17:58	18:01	18:04	C1.0
2011/03/12	22:20	22:23	22:25	C1.4
2011/03/12	22:42	22:51	22:57	C2.2
2011/03/13	13:25	13:33	13:40	C6.7
2011/03/13	14:36	14:42	14:44	C6.4
2011/03/13	21:50	21:59	22:13	C1.7
2011/03/14	00:13	00:20	00:31	C4.0
2011/03/14	05:04	05:08	05:13	C1.0
2011/03/14	08:07	08:15	08:25	C1.4
2011/03/14	16:02	16:09	16:17	C2.2
2011/03/14	19:30	19:52	19:54	M4.2
2011/03/14	23:17	23:37	23:51	C5.2
2011/03/15	00:18	00:22	00:24	M1.0
2011/03/15	05:04	05:18	05:28	C2.1
2011/03/15	06:52	06:57	07:07	C1.4
2011/03/15	08:46	08:52	09:09	C1.5
2011/03/15	09:25	09:42	09:58	C2.6
2011/03/15	11:21	11:25	11:27	C1.1
2011/03/15	17:28	17:35	17:39	C2.9
2011/03/16	08:35	08:47	08:49	C1.3
2011/03/16	13:47	13:51	13:54	C1.4
2011/03/16	17:52	20:34	23:24	C3.7
2011/03/21	11:45	11:47	11:50	C2.6
2011/03/21	11:52	11:57	12:03	C1.0
2011/03/21	15:31	17:19	18:30	C4.2
2011/03/22	03:20	03:25	03:29	C1.9
2011/03/22	03:31	03:37	03:40	C3.9
2011/03/22	15:42	15:50	16:02	C2.5
2011/03/22	21:19	22:12	22:34	C1.6
2011/03/23	02:03	02:17	02:24	M1.4

Fecha	Comienzo	Máximo	Término	Clasificación
2011/03/23	17:06	17:10	17:13	C1.1
2011/03/24	12:01	12:07	12:11	M1.0
2011/03/24	15:31	15:37	15:42	C1.6
2011/03/24	17:01	17:06	17:10	C9.1
2011/03/24	18:51	18:57	19:14	C1.3
2011/03/24	20:53	20:57	21:00	C1.4
2011/03/25	00:38	00:42	00:45	C1.0
2011/03/25	00:57	01:01	01:04	C1.0
2011/03/25	16:47	17:13	17:22	C1.0
2011/03/25	23:08	23:22	23:30	M1.0
2011/03/26	00:55	00:58	01:02	C1.0
2011/03/27	00:06	00:14	00:20	C3.1
2011/03/27	16:58	17:03	17:05	C1.1
2011/03/27	23:18	23:26	23:34	C1.0
2011/03/28	11:30	11:39	11:46	C1.4
2011/03/29	05:11	05:15	05:24	C1.1
2011/03/29	21:21	21:29	21:59	C1.2
2011/03/30	19:42	20:05	20:13	C1.9
2011/03/31	01:57	02:02	02:07	C1.2
2011/03/31	15:26	15:35	15:46	C2.6
2011/03/31	22:07	22:21	22:32	C1.6

Apéndice C

Δh y corrección de Δh

Las siguientes tablas muestran la variación en la fase (Δf) de las señales de radio recibidas de las estaciones emisoras NDK, NLK, NPM, NWC, NAA y NAU junto con la respectiva Δh (variación de la altura a la que son reflejadas las señales de radio VLF) para cada evento detectado, así como también muestran las correcciones de la Δf que fueron hechas en base a la ecuación 4.5 y las correcciones de la Δh realizadas a partir de la ecuación 4.4. Nótese que algunos eventos no presentan las debidas correcciones en la Δf ni en la Δh , como ya se mencionó esto es debido a que al hacer dichas correcciones se tomaron en cuenta únicamente eventos en los que se cumpliera que $\Delta f \leq 60^\circ$.

NDK				
Potencia (w/m^2)	Δf (grados)	Δh (km \pm 0.1866 km)	Corrección en Δf (grados)	Corrección en Δh (km \pm 0.0779 km)
1e-06	1.33	0.1425	1.62	0.1745
1.4e-06	1.70	0.1821	2.20	0.2361
1.6e-06	1.84	0.1971	2.38	0.2554
1.2e-06	1.86	0.1992	2.13	0.2289
1.4e-06	2.00	0.2142	2.39	0.2565
1.4e-06	2.21	0.2367	3.09	0.3319
1.4e-06	2.68	0.2871	2.97	0.3184
1.2e-06	3.13	0.3353	3.50	0.3756
1.4e-06	3.64	0.3900	4.01	0.4301
1.7e-06	3.87	0.4146	4.91	0.5264
1.1e-06	4.53	0.4853	6.32	0.6781
1.2e-06	4.69	0.5025	6.16	0.6609
2.6e-06	5.52	0.5914	13.45	1.4418
1.3e-06	5.68	0.6086	7.59	0.8137

Potencia (w/m^2)	Δf (grados)	Δh (km \pm 0.1866 km)	Corrección en Δf (grados)	Corrección en Δh (km \pm 0.0779 km)
1.6e-06	5.99	0.6418	6.72	0.7207
6.4e-06	6.84	0.7328	42.30	4.5332
3.9e-06	7.20	0.7714	22.42	2.4033
1.3e-06	7.55	0.8089	8.14	0.8728
6.9e-06	7.61	0.8154	13.80	1.4795
5.1e-06	8.14	0.8721	16.72	1.7920
8.6e-06	8.21	0.8796	50.93	5.4577
2.3e-06	8.93	0.9568	9.86	1.0575
2.7e-06	9.90	1.0607	16.10	1.7256
1.5e-05	12.27	1.3147	15.60	1.6723
2.2e-06	12.53	1.3425	25.13	2.6931
9.4e-06	24.50	2.6251	32.64	3.4983
1e-05	26.04	2.7901	44.49	4.7672
1.1e-05	26.49	2.8383	39.43	4.2253
7.6e-06	29.36	3.1458	35.10	3.7614
9.6e-06	30.25	3.2412	91.10	9.7617
4e-06	31.14	3.3366	34.68	3.7164
5e-06	35.44	3.7973	41.05	4.3992
9.1e-06	56.44	6.0474	78.82	8.4460
1.5e-04	61.80	6.6217	112.31	12.0338
1e-06	97.68	10.4663		
1e-06	106.11	11.3695		

NLK				
Potencia (w/m^2)	Δf (grados)	Δh (km \pm 0.1696 km)	Corrección en Δf (grados)	Corrección en Δh (km \pm 0.2601 km)
1.2e-06	0.13	0.0110	0.14	0.0126
3.1e-06	0.17	0.0144	0.45	0.0386
5.1e-06	1.63	0.1383	3.34	0.2843
1.4e-06	1.79	0.1519	2.50	0.2130
6.9e-06	3.66	0.3107	6.64	0.5638
1.6e-06	4.32	0.3667	5.59	0.4752
7.7e-06	5.20	0.4414	9.30	0.7904
1.7e-06	5.22	0.4431	6.62	0.5626
2.6e-06	6.60	0.5603	16.08	1.3660
1.6e-06	7.90	0.6707	8.87	0.7532

Potencia (w/m^2)	Δf (grados)	Δh (km \pm 0.1696 km)	Corrección en Δf (grados)	Corrección en Δh (km \pm 0.2601 km)
2.2e-06	8.10	0.6877	12.42	1.0547
8.8e-06	8.12	0.6894	16.77	1.4245
2.7e-06	8.16	0.6928	13.27	1.1270
2.3e-06	8.25	0.7004	9.11	0.7741
4e-06	11.68	0.9916	34.57	2.9357
3.9e-06	12.39	1.0519	38.59	3.2770
1.5e-05	12.95	1.0995	16.47	1.3986
7.6e-06	15.44	1.3109	49.54	4.2066
8.6e-06	16.64	1.4127	103.23	8.7651
9.4e-06	19.55	1.6598	26.05	2.2119
5.0e-06	21.41	1.8177	24.80	2.1059
5.2e-06	21.93	1.8619	40.32	3.4234
1e-05	23.98	2.0359	40.97	3.4786
6.4e-06	26.18	2.2227	161.93	13.7487
1e-05	29.60	2.5131	92.75	7.8752
9.6e-06	29.77	2.5275	89.65	7.6123
1.4e-05	30.12	2.5572	32.99	2.8016
6.7e-06	33.79	2.8688		
1.5e-04	72.29	6.1376	131.37	11.1540

NPM				
Potencia (w/m^2)	Δf (grados)	Δh (km \pm 0.0644 km)	Corrección en Δf (grados)	Corrección en Δh (km \pm 0.0836 km)
1e-06	0.81	0.0454	1.22	0.0686
1e-06	0.96	0.0538	1.32	0.0740
1.4e-06	1.35	0.0757	1.75	0.0981
2.2e-06	1.89	0.1059	15.89	0.8913
1e-06	2.32	0.1300	9.49	0.5322
1.4e-06	2.45	0.1373	2.70	0.1515
1.4e-06	2.62	0.1469	3.13	0.1758
1.4e-06	2.79	0.1564	3.91	0.2192
1.6e-06	2.99	0.1676	3.87	0.2172
1.4e-06	4.34	0.2433	4.81	0.2698
1.1e-06	5.38	0.3016	7.51	0.4215
1e-06	5.49	0.3078	6.72	0.3771
5.6e-06	5.72	0.3207		

Potencia (w/m^2)	Δf (grados)	Δh (km \pm 0.0644 km)	Corrección en Δf (grados)	Corrección en Δh (km \pm 0.0836 km)
1.6e-06	5.76	0.3229	19.89	1.1156
2.2e-06	6.03	0.3381	9.24	0.5185
1.2e-06	6.40	0.3588	8.41	0.4719
1.7e-06	6.70	0.3756	8.50	0.4769
3.9e-06	6.98	0.3913	21.74	1.2193
1.3e-06	7.63	0.4278	8.23	0.4616
8.6e-06	9.02	0.5057	55.96	3.1379
1.2e-06	9.48	0.5315	10.61	0.5953
3.1e-06	9.77	0.5478	26.13	1.4653
1.3e-06	10.12	0.5674	13.53	0.7587
2e-06	10.73	0.6016	21.31	1.1953
6.9e-06	11.23	0.6297	20.37	1.1426
1.6e-06	11.55	0.6476	12.97	0.7273
4.7e-06	11.71	0.6566	35.79	2.0070
2.7e-06	13.22	0.7413	21.50	1.2059
2.3e-06	17.01	0.9538	18.80	1.0541
4e-06	21.16	1.1865	62.64	3.5126
7.7e-06	22.16	1.2426	39.67	2.2247
8.8e-06	26.10	1.4635	53.93	3.0241
1e-05	26.63	1.4932	83.44	4.6793
5.2e-06	27.26	1.5285	50.12	2.8105
1.5e-05	34.53	1.9362	43.92	2.4630
4e-06	40.07	2.2468	44.63	2.5026
7.6e-06	43.78	2.4549	52.34	2.9352
9.1e-06	53.53	3.0016	74.76	4.1921
1.4e-05	60.84	3.4115	66.65	3.7374
1e-05	75.00	4.2055	128.14	7.1856
1.1e-05	76.80	4.3064	114.32	6.4108

NWC				
Potencia (w/m^2)	Δf (grados)	Δh (km \pm 0.1631 km)	Corrección en Δf (grados)	Corrección en Δh (km \pm 0.1802 km)
6.2e-06	0.10	0.0021		
1.2e-06	0.75	0.0161		
2.8e-06	0.93	0.0200		
1.1e-06	1.64	0.0352		

Potencia (w/m^2)	Δf (grados)	Δh (km \pm 0.1631 km)	Corrección en Δf (grados)	Corrección en Δh (km \pm 0.1802 km)
1e-06	2.89	0.0622	4.36	0.0939
1.1e-06	3.29	0.0708		
1e-06	4.17	0.0897	5.73	0.1234
1.8e-05	4.32	0.0929		
1e-06	4.43	0.0953	26.77	0.5764
1e-06	4.43	0.0953	25.45	0.5479
4.3e-06	5.70	0.1226		
2.1e-06	7.16	0.1541		
1e-06	7.55	0.1625	30.88	0.6648
1e-06	8.98	0.1932	16.25	0.3498
1.4e-06	10.65	0.2292	14.92	0.3213
1.8e-06	13.01	0.2800	644.15	13.8650
1.6e-06	13.50	0.2905	46.63	1.0037
2.8e-06	15.11	0.3252		
1.4e-06	15.14	0.3258	16.69	0.3593
1.7e-06	17.44	0.3753	22.14	0.4765
1.6e-06	18.61	0.4005	24.11	0.5190
2.2e-06	20.63	0.4440	31.64	0.6810
3.7e-06	22.09	0.4754		
3e-06	22.69	0.4883		
5.5e-06	23.23	0.5000		
2.2e-06	23.63	0.5086	198.74	4.2778
4.6e-06	24.13	0.5193		
2.3e-06	28.36	0.6104	31.34	0.6746
3.1e-06	31.12	0.6698	83.23	1.7916
2e-06	31.12	0.6698	61.82	1.3307
1.2e-05	35.98	0.7744		
5.5e-06	41.85	0.9007		
4.7e-06	42.92	0.9238	131.18	2.8236
1.5e-05	50.41	1.0850		
9.1e-06	54.16	1.1657	75.64	1.6281
7.7e-06	59.90	1.2893	107.24	2.3083
7.6e-06	67.32	1.4490	80.49	1.7325
1.5e-05	78.79	1.6958	100.22	2.1572
5e-06	89.03	1.9163	103.14	2.2200
8.8e-06	90.07	1.9386	186.11	4.0060
5.2e-06	96.27	2.0721	177.00	3.8099
1.3e-05	114.19	2.4578		
1e-05	119.11	2.5637	203.51	4.3804
1e-05	120.41	2.5917	377.32	8.1215
1.3e-05	125.49	2.7010		

Potencia (w/m^2)	Δf (grados)	Δh (km \pm 0.1631 km)	Corrección en Δf (grados)	Corrección en Δh (km \pm 0.1802 km)
9.4e-06	126.44	2.7215	168.49	3.6267
1.1e-05	185.11	3.9843	275.56	5.9312
1.5e-04	408.29	8.7881	741.99	15.9707
1.4e-06	615.78	0.3396	58.08	1.2502
6.9e-06	616.15	0.3476	29.30	0.6307

NAA				
Potencia (w/m^2)	Δf (grados)	Δh (km \pm 0.4903 Km)	Corrección en Δf (grados)	Corrección en Δh (km \pm 0.6533 Km)
4.7e-06	2.06	0.1657		
3.9e-06	2.25	0.1809	7.00	0.5638
1.4e-06	3.32	0.2670		
1.1e-06	3.78	0.3040	5.28	0.4248
2e-06	4.58	0.3684	50.71	4.0794
1.4e-06	6.03	0.4850	7.21	0.5807
2.7e-06	6.98	0.5615	11.35	0.9134
2.6e-06	7.18	0.5775	17.50	1.4080
1.4e-06	7.57	0.6089	8.34	0.6715
2.3e-06	10.59	0.8519	11.70	0.9415
1.3e-06	11.45	0.9210	12.35	0.9938
9.4e-06	12.32	0.9910	16.41	1.3207
6.9e-06	13.08	1.0522	23.73	1.9092
6.4e-06	15.20	1.2227	94.01	7.5631
8.6e-06	15.42	1.2404	95.66	7.6959
4e-06	18.18	1.4624	20.24	1.6289
1.4e-05	21.06	1.6941	23.07	1.8560
1e-05	22.09	1.7770	37.74	3.0361
1.1e-05	25.68	2.0658	38.22	3.0752
5e-06	27.32	2.1977	31.65	2.5461
9.6e-06	31.74	2.5533	95.59	7.6897
1.5e-04	33.43	2.6892	60.75	4.8872
9.1e-06	43.58	3.5057	60.86	4.8962

NAU				
Potencia (w/m^2)	Δf (grados)	Δh (km \pm 0.1023 km)	Corrección en Δf (grados)	Corrección en Δh (km \pm 0.2102 km)
1.7e-06	0.08	0.0055	0.10	0.0070
1.4e-06	2.36	0.1637	2.61	0.1815
1.4e-06	2.71	0.1879	3.24	0.2250
1.4e-06	3.72	0.2580	4.10	0.2845
1.2e-06	6.53	0.4529	7.31	0.5073
1.6e-06	10.06	0.6978	11.29	0.7836
1.3e-06	10.20	0.7075	11.00	0.7634
1.5e-05	11.74	0.8143	14.93	1.0359
5.1e-06	15.61	1.0828	32.07	2.2248
2.3e-06	15.88	1.1015	17.55	1.2174
1e-05	19.90	1.3804	34.00	2.3585
9.4e-06	20.30	1.4081	27.05	1.8765
6.9e-06	20.38	1.4137	36.98	2.5652
3.9e-06	23.84	1.6537	74.26	5.1517
1.5e-04	26.35	1.8278	47.88	3.3217
5.e-06	26.93	1.8680	31.19	2.1641
8.6e-06	44.82	3.1090	278.06	19.2888
5.4e-06	47.22	3.2755	1459.30	101.2270
1.4e-05	57.33	3.9768	62.80	4.3567
7.6e-06	66.82	4.6351	79.89	5.5420
9.1e-06	93.42	6.4802	130.47	9.0505

Bibliografía

- [1] Albee, P. y Bates, H. (1965). VLF observations at college, Alaska, of various D-Region disturbance phenomena. *Planet, Space Sci.* 13, 175-206.
- [2] Benestad, R. (2006). *Solar activity and Earth's climate*, (2a ed). New York: Springer.
- [3] Borgazzi, A. et al (2014). The ionosphere and the Latin America VLF Network Mexico (LAVNet-Mex) station. *Adv. Space Res.* 54, 536–545.
- [4] Centro de Vuelo Espacial Goddard, Aeronáutica Nacional y Administración Espacial (1965). *Introduction to space science*. New York: Gordon and breach science publishers.
- [5] Chilton, C. et al. (1963). Very-Low-Frequency phase observations of solar flare ionization in the D region of the ionosphere. *J. Geophys. Res.* 68, 5421-5435.
- [6] Díaz, M. (2009). *Receptor de muy baja frecuencia (VLF) SAVNET-México*. México: Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería.
- [7] Friedman, H. (1986). *Sun and Earth*. New York: Scientific American Library.
- [8] Hannu, K. and Rami, V. (2011). *Lectures on Solar Physics: From the core to the heliopause*. Extraído de http://theory.physics.helsinki.fi/~sol_phys/uploads/Solar11.pdf
- [9] Harold, Z. (1988). *Astrophysics of the sun*. Cambridge: Cambridge University Press.
- [10] Hernández, T. (2010). *Eventos energéticos solares detectados por el Observatorio Milagro durante el ciclo solar 23*. México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- [11] Kelley, M. (2009). *The Earth's Ionosphere : Plasma Physics and Electrodynamics*. New York: Elsevier.

- [12] Kivelson, M. y Rusell, C. (Ed) (1995). Introduction to space physics. Cambridge: Cambridge University Press.
- [13] Lang, K. (1997). Sun, Earth and Sky, (2a ed). New York: Springer.
- [14] McRae, W., Thomson, N. (2004). Solar flare induce ionospheric D-region enhancements from VLF phase and amplitude observations. *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* 66, 77–87.
- [15] Mullan, D. (2010). Physics of the Sun: A first course. Boca Raton: CRC Press.
- [16] Muraoka, Y., Murata, H., Sato, T. (1977). The quantitative relationship between VLF phase deviations and 1-8 Å solar X-ray fluxes during solar flares. *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* 39, 787–792.
- [17] Ohle, K. et al. (1974). On the information content of ionospheric solar flare effect observations-II. Some model considerations on the interpretation of solar flare effects in the ionosphere. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics.* 36, 525-535.
- [18] Pant, P. (1993). Relation between VLF phase deviations and solar X-ray fluxes during solar flares. *Astrophys. Space Sci.* 209 (2), 297–306.
- [19] Raulin, J. et al. (2009). The South America VLF NETwork (SAVNET). *Earth Moon Planet.* 104, 247-261.
- [20] Raulin, J. et al. (2010). Solar flare detection sensitivity using the South America VLF Network (SAVNET). *J. Geophys. Res.* 115, A07301.
- [21] Sengupta, P. (1971). A study of two flares on 8 July 1968 in the light of their ionospheric effects. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics.* 33, 1953-1971.
- [22] Thomson, N. (2010). Daytime tropical D region parameters from short path VLF phase and amplitude. *J. Geophys. Res.* 115, A09313.
- [23] Torres, M. (2011). Un Modelo Hidrodinámico de la Tachoclina Solar. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias.
- [24] Wait, J. (1959). Propagation of radio waves over a stratified ground. *Society of Exploration Geophysicists.* 18(2), 416-422.
- [25] Wood, T. (2010) .The Solar Tachocline: A Self-Consistent Model of Magnetic Confinement. Cambridge: Universidad de Cambridge.
- [26] <http://www.spaceweather.com/glossary/flareclasses.html?PHPSESSID=5qv4uvsgqust180492106a5eg7>
- [27] <http://www.spaceweatherlive.com/en/help/the-classification-of-solar-flares>

[28] <http://www.swpc.noaa.gov/products/goes-x-ray-flux>

[29] <ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/warehouse>

[30] <ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/warehouse/2011/>