

5
2 Ejem



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

**LA VARIACION SOLAR DIURNA DEL CAMPO
GEOMAGNETICO PARA DIAS QUIETOS (S_q), DE
1966 A 1977 EN TEOLOYUCAN MEXICO**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE :

INGENIERO GEOFISICO

P R E S E N T A :

GAUDENCIO GALICIA JIMENEZ



Ciudad Universitaria

1994

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



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 está 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.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCION
60-I-019

SR. GAUDENCIO GALICIA JIMENEZ
Presente

En atención a su solicitud, me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor Fis. Adolfo León Orozco Torres, y que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de ingeniero geofísico:

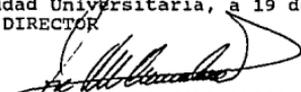
LA VARIACION SOLAR DIURNA DEL CAMPO GEOMAGNETICO PARA DIAS QUIETOS (Sq), DE 1966 A 1977 EN TEOLOYUCAN MEXICO

	INTRODUCCION
I	LA VARIACION SOLAR DIURNA PARA DIAS QUIETOS EN LA COMPONENTE HORIZONTAL GEOMAGNETICA (SqH)
II	LA ACTIVIDAD SOLAR
III	LA IONOSFERA
IV	SqH Y LA RELACION SOL-TIERRA
V	RESULTADOS
	CONCLUSIONES

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que se deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar examen profesional.

A t e n t a m e n t e
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Ciudad Universitaria, a 19 de abril de 1994
EL DIRECTOR


ING. JOSE MANUEL COVARRUBIAS SOLIS

JMCS*EGLM*gtg


Con respeto, cariño y admiración.

A mis padres CARMEN JIMENEZ y GAUDENCIO GALICIA
a quienes por su amor debo mi existencia, mil
gracias por su apoyo incondicional y buenos
consejos.

Con amor.

A ALEJANDRO MOISES, por la inmensa alegría que
con su llegada dio a la familia.

Con cariño.

A mis hermanas TERESA, SOLEDAD , GUADALUPE, por
ser siempre mis amigas y porque juntos haremos
más fácil el camino por la vida.

A la memoria de un buen amigo AQUILES ROMERO DIAS[†].

R E S U M E N .

Este trabajo tiene como objetivo caracterizar los cambios en la Variación Solar Diurna para Días Quietos (Sq), debidos a los efectos de la actividad solar y épocas del año, se analizan 13 años consecutivos de registro, con valores medios horarios de la componente horizontal geomagnética, extraídos de los reportes anuales del Observatorio Magnético de Teoloyucan, Edo. de México. Previa eliminación de la Variación Secular y Variaciones no periódicas, se obtiene que la Variación Sq_H presenta cambios morfológicos respecto de la hora local para las diferentes épocas del año; solsticios y equinoccios, así como también hay cambios en el rango de amplitud de dicha variación. La dependencia con el ciclo de actividad solar se manifiesta en un retraso de 4 años del promedio máximo de Sq_H respecto del máximo de actividad solar, los mínimos coinciden o se presentan con una diferencia de un año. El rango de Sq_H es máximo en el solsticio de verano, mínimo en el solsticio de invierno e intermedio en los equinoccios de primavera y otoño, este último semejante al del promedio anual. La razón de todo esto se debe al cambio en el ángulo de incidencia de la radiación solar sobre la atmósfera terrestre. También la variación en la energía de la radiación emitida por el Sol afecta y produce cambios sobre la variación Sq .

CONTENIDO

	Pag
Resumen.	
Introducción.	1
I La Variación Solar Diurna para Días Quietos en la componente Horizontal Geomagnética (Sq_H).	4
I.1 Campo Magnético Terrestre	
I.1.1 Campo principal.	5
I.1.2 Observaciones Magnéticas.	11
I.1.3 Variación Secular.	12
I.1.4 Variaciones periódicas.	13
I.1.5 Variaciones no cíclicas.	16
I.2 Variación Solar Diurna para Días Quietos Sq .	
I.2.1 Origen de Sq .	17
I.2.2 Comportamiento de Sq .	18
I.3 Obtención de curvas Sq_H .	
I.3.1 Índices de actividad Geomagnética.	23
I.3.2 Elección de los 5 días más quietos.	25
I.3.3 Procesamiento de Datos.	26
II La Actividad Solar.	30
II.1 Ciclo de manchas Solares.	31
II.2 Caracterización del ciclo (1964-1976)	38

III	La Ionosfera.	40
	III.1 Estructura.	41
	III.2 Conductividad.	45
IV	Sq_H y la Relación Sol-Tierra.	56
	IV.1 Las épocas del año.	57
	IV.2 Curvas Estacionales de Sq_H .	61
V	Resultados.	
	V.1 Descripción.	68
	V.2 Análisis.	75
	Conclusiones.	86
	Apéndice A.	
	Agradecimientos.	
	Bibliografía.	

INTRODUCCIÓN

Es ahora común pensar en nuestro planeta Tierra como un sistema global, que es el resultado de las interacciones que ocurren entre la parte sólida de la Tierra y los océanos, su atmósfera y las radiaciones emitidas por el Sol. La importancia de las relaciones entre la atmósfera terrestre y las emisiones solares, radica en el firme interés por mejorar el conocimiento de los cambios climáticos y ambientales que se producen en la superficie de la Tierra, como consecuencia de ésta interacción. Y no sólo, por intereses académicos sino también por la modificación de las condiciones ambientales, que es cada día más interesante la observación de dichas relaciones. Una de las ciencias que se encargan de estudiar las interacciones entre la radiación solar y la parte más externa de la Tierra es el geomagnetismo. A través de la observación de las variaciones del campo magnético terrestre, es como se hace un análisis de algunos aspectos de dicha interacción, estableciendo los procesos físicos involucrados en tales relaciones.

La parte alta de la atmósfera terrestre está formada por gas parcialmente ionizado, ésta parte de la atmósfera recibe el nombre de ionosfera, ahí se desarrollan la mayoría de los procesos físicos anteriormente mencionados. Uno de estos procesos es el de la generación por inducción de un campo magnético secundario,

producido por el movimiento de las partículas cargadas de la ionosfera a través de las líneas de campo magnético terrestre. Este proceso es la fuente de la variación solar diurna, que es denotada por (S), ésta variación tiene dependencia por su origen con la actividad solar, conductividad en la ionosfera y con la latitud geográfica, presentando un período fundamental de 24 hrs. Cuando hay poca actividad geomagnética ésta variación solar diurna presenta un comportamiento regular con patrones inconfundibles, en estos casos, a la variación solar diurna se le llama Variación Solar Diurna para Días Quietos, denotada por (Sq).

En este trabajo se presentan los resultados observacionales de las interacciones entre las emisiones solares y el campo magnético de la Tierra, utilizando los datos obtenidos de los magnetogramas de la componente horizontal geomagnética, del observatorio magnético de Teoloyucan México. Se hace un análisis descriptivo de los efectos, en relación a las diferentes épocas del año y ciclo de manchas solares, sobre la Variación Solar Diurna para Días Quietos, en la componente horizontal geomagnética (Sq_H), utilizando los valores medios horarios tomados de los reportes anuales del observatorio de Teoloyucan. Estos valores medios horarios fueron obtenidos de los magnetogramas, de Noviembre de 1965 a Octubre de 1977.

La razón de elegir éste intervalo de tiempo es que; en primer lugar se pretende un análisis respecto al ciclo de manchas solares, y éste ciclo presenta un período de aproximadamente 11 años, por lo cual, un intervalo de tiempo mayor o igual a 11 años es suficiente para el análisis, por otro lado el observatorio de Teoloyucan desde su funcionamiento y hasta 1964 se reportan solamente valores promedio diarios de los elementos magnéticos y a partir de 1965 se reportan los valores medios horarios de los elementos magnéticos; componente horizontal (H), declinación

magnética (D) y componente vertical (Z). En 1978 el observatorio fué cambiado de posición, por lo que éste año es de instalación y calibración de los aparatos de observación y registro. Así que se cuenta con reportes medios horarios de 13 años consecutivos de funcionamiento del observatorio.

El observatorio magnético de Teoloyucan fue instalado en el año de 1914, está situado a 36 Km al norte de la ciudad de México, a una altitud de 2280 m., sobre el nivel medio de mar. Sus coordenadas geográficas son: Longitud $\lambda=99^{\circ}10'53.4''$ W, Latitud $\phi=19^{\circ}44'47.5''$ N, y las coordenadas geomagnéticas relativas a la posición del polo geomagnético para la época 1985, según el "IGRF" (International Geomagnetic Reference Field Model), son: Longitud $\Lambda=+329.24^{\circ}$, Latitud $\Phi=+29.35^{\circ}$.

En el primer capítulo de la tesis se presentan los conceptos básicos del tema y el tratamiento estadístico a los datos para la obtención de las curvas de $(S_q)_H$. En los capítulos dos y tres se presentan las principales características, tanto de la actividad solar como de las condiciones físicas de la ionosfera respectivamente, para dar cuenta de sus relaciones con las variaciones geomagnéticas en general. El capítulo cuatro se dedica a la obtención de las curvas estacionales y anuales de $(S_q)_H$. Y en el capítulo cinco de la tesis se presentan esbozos de los mecanismos más probables, por los que se dan cambios morfológicos de la Variación Solar Diurna para Días Quietos $(S_q)_H$, con respecto a ambos; épocas del año ó posición relativa Sol-Tierra, y el ciclo de actividad solar.

CAPÍTULO I

LA VARIACIÓN SOLAR DIURNA PARA DÍAS QUIETOS EN LA COMPONENTE HORIZONTAL GEOMAGNÉTICA

INTRODUCCIÓN

El valor del campo Geomagnético que medimos en la superficie de la Tierra es el resultado de la suma de varios campos que son generados por diferentes fuentes. En cuanto a las fuentes de dichos campos se clasifican en fuentes externas y fuentes internas. Otra clasificación de éstos campos se hace tomando en cuenta la variación temporal de los mismos; en éste sentido se clasifican como campos variables y campos permanentes. Los campos variables se clasifican a su vez como campos cíclicos y no cíclicos, los campos cíclicos o periódicos son producidos generalmente por fuentes externas. Dentro de ésta clasificación están la Variación Lunar, denotada por (L) y la Variación Solar Diurna, denotada por (S). Dependiendo del grado de actividad geomagnética, la variación S, para períodos geomagnéticamente perturbados se designa por S_p , llamada perturbación solar diurna, y para períodos geomagnéticamente quietos se designa por S_q llamada variación solar diurna para días quietos. Es el comportamiento de ésta variación en la componente horizontal geomagnética durante estos períodos quietos el que se analiza en este trabajo.

I.1 CAMPO MAGNÉTICO TERRESTRE

I.1.1 CAMPO PRINCIPAL

La existencia dentro de la Tierra de un núcleo líquido, excepto por un pequeño núcleo central sólido, ha sido confirmada por medio de la sismología. El núcleo terrestre está compuesto principalmente de hierro y níquel, formando una aleación conocida como NiFe, fundidos en la parte externa. La aleación tiene alta conductividad eléctrica y la alta temperatura ayuda a los movimientos convectivos. Cuando ésta se mueve bajo la acción de fuerzas térmicas y dinámicas inducidas por gravitación, radioactividad y rotación de la Tierra, la materia fundida actúa como un gran generador eléctrico, resultando en la producción de un campo magnético, cuyo efecto neto es aproximadamente como si existiera un dipolo magnético en el centro de la Tierra. En la superficie de la Tierra y sobreimpuesto al campo de origen interno se localizan anomalías regionales debidas a materiales permanentemente magnetizados en la corteza terrestre. Es a la suma de estos dos campos magnéticos a lo que se considera como campo magnético principal terrestre.

El campo magnético terrestre es un vector, y por lo tanto son necesarias tres cantidades ortogonales para definirlo, usualmente llamadas "elementos" del campo, estos elementos están referidos a tres ejes básicos, norte verdadero (ó norte geográfico), este y eje vertical (positivo hacia abajo). Las componentes cartesianas en esas direcciones se denominan por: X, Y y Z, respectivamente. Otros elementos de uso común son:

D - Declinación magnética: es el ángulo entre el norte geográfico y la componente horizontal del campo.

I - Inclinación magnética: es el ángulo entre la dirección del campo total y la componente horizontal.

H - Intensidad Horizontal: es la magnitud de la componente horizontal del campo.

F - Intensidad total: es la magnitud del vector de campo magnético terrestre.

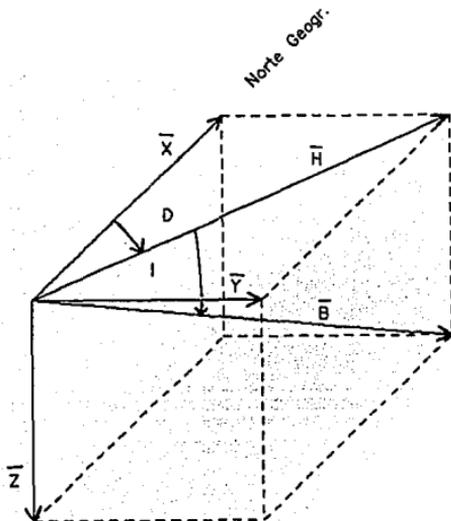


Figura I.1. Elementos del campo magnético terrestre.

Las relaciones entre los elementos magnéticos, por simple trigonometría son las siguientes:

$$\begin{aligned}\tan D &= Y/X \\ \text{sen } D &= Y/H \\ H &= (X^2 + Y^2)^{1/2} \\ \tan I &= Z/H \\ \text{sen } I &= Z/F \\ F^2 &= H^2 + Z^2 = X^2 + Y^2 + Z^2\end{aligned}\quad (1.1)$$

El fenómeno físico del campo magnético es descrito por tres vectores designados por; H , que es la intensidad de campo magnético, B , que es la inducción magnética, y M , es la magnetización (ó intensidad de magnetización). La relación entre B , H y M es:

$$B = \mu_0 (H + M) \quad (1.2)$$

para algunos materiales M es proporcional y paralelo a H y puede expresarse:

$$M = k H \quad (1.3)$$

donde k es la susceptibilidad magnética.

Las unidades (S) de los vectores B , H y M son:

$$\begin{aligned}B & \text{ (tesla)} \\ H & \text{ (amp m}^{-1} \text{)} \\ M & \text{ (amp m}^{-1} \text{)}\end{aligned}$$

Gauss en 1838, usando la teoría del potencial escalar propuesta por Poisson en 1824, desarrolló la expresión matemática para describir el campo magnético terrestre, expresando el potencial escalar en un punto dado, como una suma infinita de funciones armónicas esféricas. Cuando se aplica este método al estudio del campo geomagnético, permite estudiar el campo proveniente tanto de "fuentes internas" como de "fuentes externas".

Considerando que las fuentes responsables del campo magnético principal se encuentran en el interior de la Tierra, y que no hay corrientes eléctricas, ni campos eléctricos variables en la zona donde se quiere expresar este campo, se tiene que, de la ecuación de Maxwell (ley de Ampere):

$$\nabla \times \mathbf{B} = \frac{4\pi}{c} \mathbf{J} + \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad (1.4)$$

se reduce a:

$$\nabla \times \mathbf{B} = 0 \quad (1.5)$$

En este caso, es posible expresar el campo magnético como proveniente de un potencial escalar V .

$$\mathbf{B} = -\nabla V \quad (1.6)$$

y usando la ley de Gauss para el campo \mathbf{B}

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (1.7)$$

se tiene la ecuación de Laplace:

$$\nabla^2 V = 0 \quad (1.8)$$

cuya solución es el potencial magnético escalar total. Expresado en términos de funciones armónicas esféricas en un punto de coordenadas geográficas (r, θ, ψ) , el potencial escalar está dado por:

$$V_t = a \sum_{n=1}^{\infty} \left[\left[\frac{a}{r} \right]^{n+1} T_n^i + \left[\frac{r}{a} \right]^n T_n^e \right] \quad (1.9)$$

donde:

a = Radio medio de la Tierra
 r = Distancia al centro de la Tierra.
 θ = Colatitud geográfica.
 ψ = Longitud geográfica.

T_n^i y T_n^e son combinaciones de funciones armónicas esféricas, de las componentes interna y externa del potencial escalar respectivamente. Estas se expresan como sigue:

$$T_n^{i,e} = \sum_{m=0}^n \left(\left(g_n^m \right)^{i,e} \cos(m\psi) + \left(h_n^m \right)^{i,e} \sin(m\psi) \right) P_n^m(\cos\theta) \quad (1.10)$$

donde:

$P_m^m \cos(\theta)$, son polinomios asociados de Legendre parcialmente normalizados.

y

g_n^m h_n^m , son los coeficientes de Gauss.

Los superíndices i, e , se refieren a las contribuciones internas y externas respectivamente del campo magnético terrestre. Considerando sólo la contribución interna, y sustituyendo la expresión (I.10) en (I.9), la expresión para el potencial escalar interno queda como:

$$V_i = a \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^n \left(\frac{a}{r}\right)^{n+1} \left(g_n^m \cos(m\psi) + h_n^m \text{sen}(m\psi) \right) P_n^m(\cos\theta) \quad (I.11)$$

Conocida la expresión del potencial escalar, el campo magnético se obtiene sustituyendo el lado derecho de la ecuación (I.11) en (I.6), así las componentes cartesianas del campo están dadas por:

$$-B_r = \frac{\partial V_i}{\partial r} = Z \quad (I.12)$$

$$-B_\theta = \frac{1}{r} \frac{\partial V_i}{\partial \theta} = X \quad (I.13)$$

$$B_\psi = \frac{-1}{r \text{sen}\theta} \frac{\partial V_i}{\partial \psi} = Y \quad (I.14)$$

I.1.2 OBSERVACIONES MAGNÉTICAS

El campo magnético terrestre es medido regularmente en una red mundial de observatorios magnéticos distribuidos sobre todo el mundo. En México se cuenta con el observatorio magnético Teoloyucan en el Edo. de México. El observatorio cuenta con el siguiente equipo de observación y registro para las componentes geomagnéticas; inclinación magnética (I), declinación magnética (D), componente horizontal (H) e intensidad magnética total (F).

Para medir intensidades se usan los siguientes aparatos.

Magnetómetro Ruska 3055 (D y H)

Inductor Terrestre Ruska 3055 (I)

QHM (Quarz Horizontal Magnetometer) 584 y 585 (H y D)

Magnetómetro de Protón Geometrics-816 (F)

Los registros continuos o magnetogramas, son producto de los variómetros y nos dan información sobre las variaciones de cada uno de los elementos magnéticos respecto a una línea base en un punto dado sobre la superficie terrestre, y nos permiten establecer las correlaciones entre las variaciones temporales del campo magnético y otros fenómenos geofísicos. Las variaciones se registran automáticamente sobre papel fotográfico que se mueve normalmente a una velocidad de 20 mm/hr. Y generalmente en un observatorio se obtiene un magnetograma diario para los tres elementos magnéticos; declinación (D), inclinación (I) y componente horizontal (H), en un magnetograma se registran las variaciones respecto al tiempo referidas a una línea base para cada uno de los tres elementos.

Los variómetros que están en operación en el observatorio de Teoloyucan, son del tipo Eschenhagen de la casa Askania, modificados en 1952 con imanes compensadores de temperatura, para registrar continuamente los elementos magnéticos H, D, y Z.

I.1.3 VARIACIÓN SECULAR

Este campo magnético principal de la Tierra cambia ligeramente en dirección e intensidad en el transcurso del tiempo. A éste proceso se le conoce como Variación Secular. Esta variación del campo se manifiesta por dos aspectos principales; el primero con la parte no dipolar del campo principal y también con la evidencia de que el momento de dipolo geomagnético está decreciendo aproximadamente dos milésimas de su valor por año. La característica más importante de esta variación es la llamada deriva hacia el Oeste de los cambios en el campo magnético. Como consecuencia de la variación secular, los polos geomagnéticos experimentan un desplazamiento gradual en dirección noroeste (que en el fondo es un cambio en la orientación del dipolo geomagnético). En la figura (I.2), se presenta la variación secular en la componente horizontal (H) del campo geomagnético para Teoloyucan. Graficando los promedios anuales de (H), es como se hace evidente el cambio en la intensidad de la componente (H) a través del tiempo.

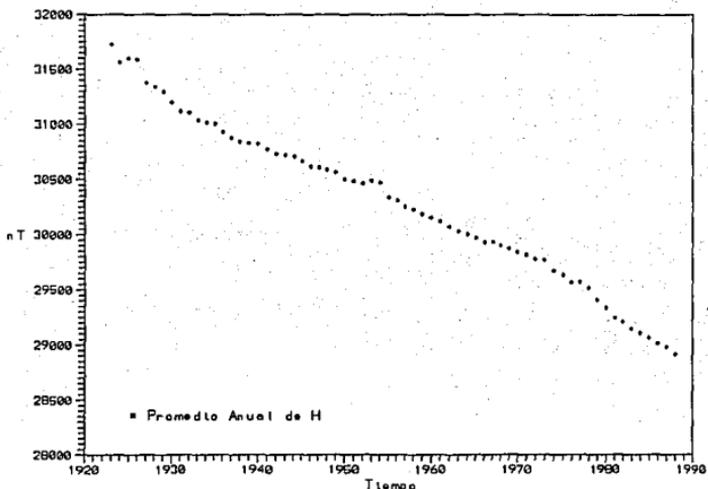


Figura 1.2. Variación Secular en la componente Horizontal Geomagnética (H), Observatorio Magnético de Teoloyucan. Promedios Anuales de 1923 a 1988.

1.1.4 VARIACIONES PERIÓDICAS.

Junto con la Variación Secular, el campo magnético terrestre exhibe una amplia gama de variaciones esporádicas y de períodos cortos y muchas de ellas son cíclicas, aunque sus intensidades son diferentes de un ciclo al siguiente. Las principales variaciones periódicas son, la Variación Solar Diurna (S), la Variación Lunar (L) y la variación de 27 días. La más grande de las variaciones periódicas es la variación solar diurna, con un período

fundamental igual al período de rotación de la Tierra sobre su eje, éste es de un día solar, aproximadamente 24 hrs. Dependiendo del grado de perturbación geomagnética, la variación S presenta diferentes patrones de comportamiento, como se mencionó en la introducción a éste capítulo. En las figuras (1.3 y 1.4), se muestran los casos extremos de su comportamiento. Las variaciones regulares que ocurren en días sin perturbaciones geomagnéticas y que presentan patrones inconfundibles con períodos de 24 horas, son llamados períodos geomagnéticamente quietos y la variación es conocida como Variación Solar Diurna para Días Quietos (ver figura 1.3), designada por Sq. En períodos geomagnéticamente perturbados a S se le designa por Sb, (ver figura 1.4), y es llamada perturbación solar diurna.

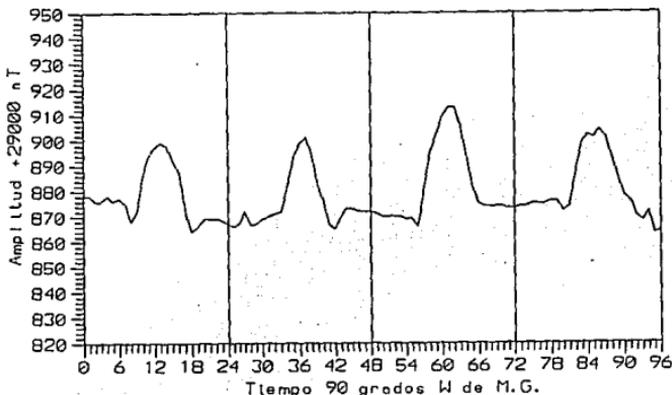


Figura 1.3. Secuencia de 4 días Geomagnéticamente Quietos.
8, 9, 10, y 11 de Mayo de 1970. Tiempo 90° W M.G.
Observatorio Magnético de Teoloyucan.

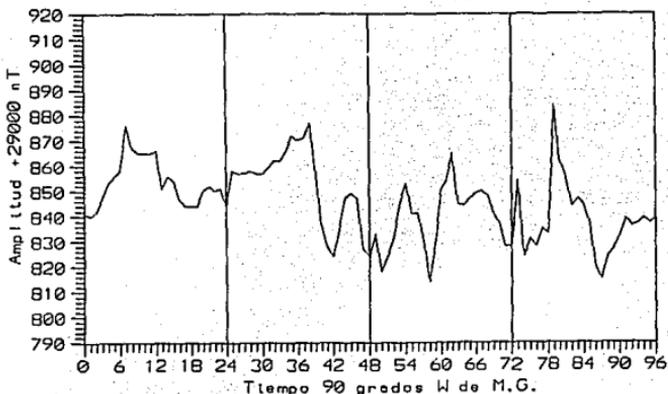


Figura 1.4. Secuencia de 4 días Geomagnéticamente Perturbados.
7, 8, 9 y 10 de Noviembre de 1969.

Típicamente la representación de S_q en un observatorio es el promedio de los valores de campo de una selección de días quietos generalmente distribuidos en un ciclo lunar, con el fin de eliminar de manera razonable la variación por efectos debidos a mareas gravitacionales lunares. La llamada Variación Lunar L tiene una componente fundamental con un período de 24 horas y 50 minutos aproximadamente. Con el promedio también se eliminan las pequeñas perturbaciones de alta frecuencia que no forman parte de S_q . Cuando se toman los promedios sobre todo el ciclo lunar, la componente diurna de (L) se elimina y subsiste principalmente una componente con período igual al período de traslación de la Luna alrededor de la Tierra. Y ésta variación es muy pequeña comparada con la variación solar diurna.

I.1.5 VARIACIONES NO CÍCLICAS.

Como ya se mencionó, algunas de las variaciones tales como la Variación Solar Diurna para Días Quietos S_q , y Variación Lunar L , son periódicas con períodos fundamentales característicos, mientras que otras como el cambio secular y tormentas magnéticas no tienen períodos obvios asociados. Estas variaciones no periódicas por su parte, aunque presentan un comportamiento particular característico, su aparición depende principalmente de la actividad solar y además, su distribución espacial y temporal es irregular. Estas variaciones no cíclicas son las responsables de que los valores, por ejemplo, de la componente horizontal presenten diferencias entre su inicio a las 00 hrs., de un día y el fin a las 24 hrs. del mismo día. Entoces la variación no cíclica consiste en la diferencia entre el valor de los elementos magnéticos al inicio de un día y su valor al final del mismo día. Para el estudio de cualquiera de las otras variaciones es necesario eliminarla previamente.

1.2 VARIACIÓN SOLAR DIURNA PARA DÍAS QUIETOS S_q .

1.2.1 ORIGEN DE S_q .

La variación Solar diurna para días quietos (S_q), es el efecto magnético inducido de corrientes eléctricas generadas por la acción de dínamo atmosférico en la ionosfera. Las corrientes de dínamo resultan del movimiento de un conductor a través de las líneas de fuerza del campo magnético terrestre principal. Ahora bien, el campo principal es aproximadamente constante, pero la conductividad de la ionosfera y el movimiento de ésta, varían con las diferentes épocas del año y con la latitud. Las mareas térmicas solares en la ionosfera dan cuenta de casi toda la variación S_q , ya que las mareas gravitacionales solares son relativamente insignificantes. Una fuente secundaria para (S_q), es el de las corrientes inducidas dentro de la Tierra. La proporción de las fuentes externas y fuentes internas para (S_q) es aproximadamente de 3/1 (Schuster 1908).

En forma general, el proceso de corrientes de dínamo atmosférico es similar al que se utiliza en una planta hidroeléctrica. En la planta hidroeléctrica un cable conductor es movido por la fuerza de las turbinas, a través del campo magnético de un imán estacionario, el movimiento causa una corriente eléctrica que fluye en el cable conductor. Como tal conductor, la región E de la ionósfera (capa E de la ionósfera), en la que, las moléculas de aire han sido ionizadas por la parte de alta

energía del espectro solar (radiación ultravioleta). Este conductor es movido por la expansión y contracción diaria de la atmósfera debido al calentamiento producido por el sol sobre la atmósfera terrestre, y por los vientos de grandes altitudes. Tales fuerzas transportan a la ionosfera a través del gran campo magnético de la tierra. Induciéndose así, un campo magnético que se suma al campo magnético principal terrestre.

I.2.2 COMPORTAMIENTO DE S_q .

El comportamiento de ésta variación está estrechamente relacionado con la orientación relativa de la Tierra y el Sol. El sistema de corrientes S_q , es un sistema que permanece fijo respecto a la línea Sol-Tierra, es decir, la migración de la variación S_q sobre la superficie de la Tierra se da por el movimiento de rotación de la Tierra sobre su propio eje y por el desplazamiento de la Tierra alrededor del Sol. S_q está formada por cuatro grandes circuitos de corrientes eléctricas dos en el hemisferio Norte y dos en el hemisferio Sur; con un circuito en el lado diurno y otro en el lado nocturno para ambos hemisferios (Matsuchita y Campbell 1940). Los sentidos de circulación son opuestos para cada hemisferio, siempre en el lado diurno del hemisferio norte las corrientes circulan en sentido anti-horario, mientras que en el hemisferio sur circulan en sentido horario, para el lado nocturno el sentido de las corrientes es inverso en ambos hemisferios. En las figuras (I.5, I.6, I.7 y I.8, reproducidas de Parkinson 1977), se muestran estos sentidos y la intensidad de corriente eléctrica que circula en cada circuito.

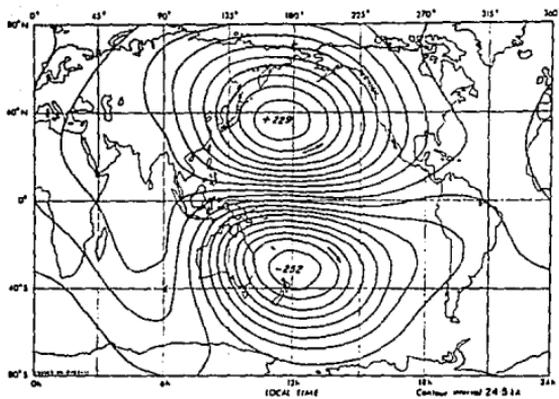


Figura 1.5. Primavera, contornos cada 24.5 kA

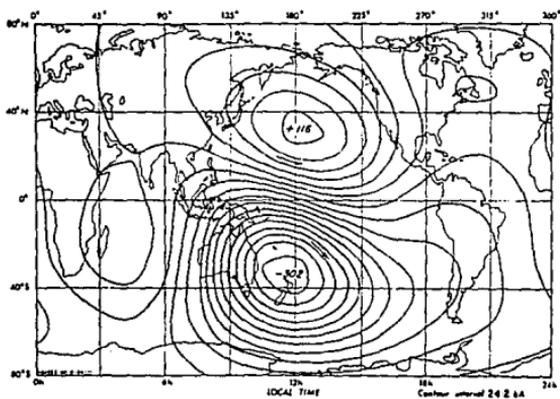


Figura 1.6. Verano del Hemisferio Sur, contornos cada 24.5 kA

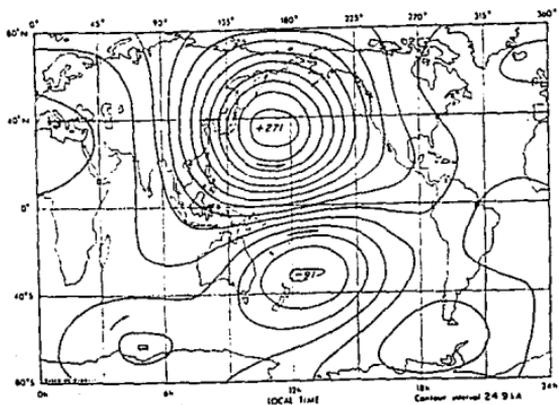


Figura 1.7. Verano del Hemisferio Norte, contornos cada 24.5 kA

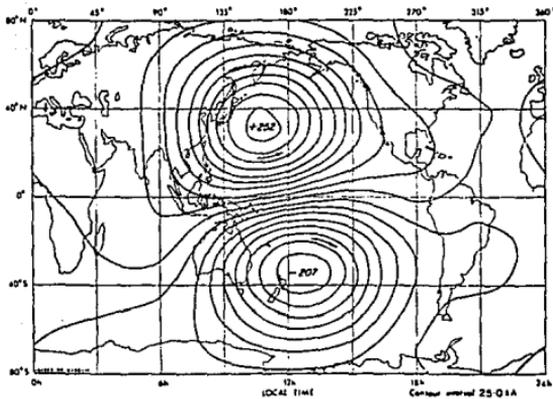


Figura 1.8. Otoño, contornos cada 24.5 kA

La variación solar diurna para días quietos (S_q) y en general la variación diurna tiene la característica principal respecto a la latitud, en que el rango de variación en el ecuador geomagnético es máximo, disminuyendo hacia las zona aurales donde alcanza su valor mínimo para después aumentar hacia los polos aunque siendo menor que en el ecuador. En la figura (1.9), se muestra la variación del rango de S_q , respecto de la latitud geográfica.

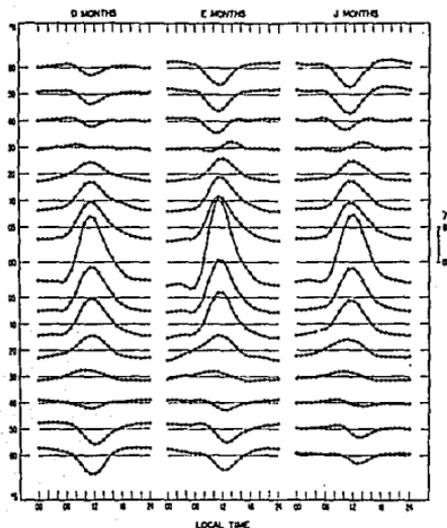


Figura 1.9. Promedios Mundiales de la Variación Solar Diurna para Días Quietos en la componente H, para 1958. (Matsushita y Campbell 1967)

S_q se va modificando conforme va cambiando la orientación respectiva entre el eje de rotación terrestre y la línea Sol-Tierra, debido a que éste cambio de orientación implica un cambio en el ángulo de ataque de la radiación solar sobre la atmósfera y por lo tanto un cambio en la radiación absorbida. Este cambio de orientación es el responsable de las variaciones de S_q con las estaciones del año. En la figura (1.9), se muestra también la variación de S_q , respecto de la posición relativa Sol-Tierra.

La dependencia con el ciclo de actividad solar se debe al aumento de la ionización y la conductividad en la ionósfera, producidas por un aumento en promedio de la intensidad y energía de la radiación ionizante proveniente del Sol.

1.3 OBTENCIÓN DE CURVAS S_q_H

1.3.1 INDICES DE ACTIVIDAD GEOMAGNÉTICA.

Para tener una medida cuantitativa de la actividad geomagnética se han adoptado internacionalmente un grupo de índices con diferentes propósitos para cada uno de ellos. Aquí se mencionan a dos de los más comunmente usados; el primero de ellos es el índice característico C (carácter de figura), el cual puede tomar los siguientes valores 0, 1 ó 2, dependiendo del grado de perturbación geomagnética de un día en tiempo universal. Para días quietos $C=0$; para días moderadamente perturbados $C=1$ y para días severamente perturbados $C=2$. El valor de C se asigna en forma subjetiva, ya que, es por inspección ocular de una serie de magnetogramas la forma en que se determina el grado de perturbación en cada día, y esto, depende de la apreciación de la persona encargada de hacer la clasificación.

El segundo de los índices es el índice tri-horario k. Es un índice para caracterizar la actividad irregular geomagnética originada por el flujo externo de plasma del sol. El propósito del índice k es obtener una medida de los efectos terrestres de la radiación corpuscular solar midiendo la intensidad de la actividad geomagnética causada por las corrientes eléctricas producidas alrededor de la Tierra por la llegada de dicha radiación. El índice k adquiere un valor entre 0 y 9, que se asigna a cada intervalo tri-horario, iniciando con las 0 horas tiempo universal resultando en 8 índices para cada día. El valor del dígito está basado en el rango de variación (R) del elemento en cada intervalo

de tres horas. La relación entre el índice k y la perturbación es semilogarítmica y se define solamente para los elementos: componente horizontal (H) y para la declinación magnética (D). Para el caso de H, el rango de variación en nT es normalizado a una escala estándar. Además el valor estandarizado va a depender de la latitud del observatorio, ya que, como se explicó en párrafos anteriores, la intensidad de las variaciones depende en mucho de la latitud de observación.

En la siguiente tabla se muestran los rangos (R) de (H) en nT correspondientes a los valores del índice tri-horario k , que son asignados en el observatorio magnético de Teoloyucan.

k	R (nT)		
0	0	a	3
1	4	"	7
2	8	"	15
3	16	"	29
4	30	"	49
5	50	"	84
6	85	"	139
7	140	"	229
8	230	"	349
9	> 350		

Tabla de valores para el índice tri-horario k , según el rango de variación de la componente horizontal (H).

El rango se define como la diferencia entre el valor máximo y el valor mínimo en el intervalo de tres horas. Observatorio Magnético de Teoloyucan Edo. de México.

1.3.2 ELECCIÓN DE LOS 5 DÍAS MÁS QUIETOS DE CADA MES.

Algunos investigadores definen a S_q como una idealización de las variaciones absolutamente quietas ya que no se puede estimar exactamente de los datos observados en la superficie terrestre. Por lo tanto se hace necesario tener una definición práctica de S_q , la cual permita efectos de pequeñas perturbaciones. De acuerdo con Chapman y Bartles, la variación solar diurna para días quietos en general se obtiene del promedio de 5 días más quietos por mes.

A partir de los valores medios horarios de la intensidad horizontal geomagnética, extraídos de los reportes anuales del Observatorio Magnético de Teoloyucan, Edo. de Méx., para el período Noviembre de 1965 a Octubre de 1977, se tomaron los 5 días más quietos geomagnéticamente de cada mes. (en los reportes anuales del observatorio están marcados estos 5 días quietos, clasificados según el índice de figura C y la suma de los 8 índices tri-horarios k de cada día). Ahora bien, algunos de los días marcados como quietos en los reportes del observatorio presentaban más de tres valores horarios sin registro, esto debido probablemente a que por alguna razón los variómetros dejaron de registrar por tres horas ó más. En estos casos se optó por tomar los días con registro completo durante todo el día y seleccionandolos según el índice característico "C", y la suma de los 8 índices tri-horarios del día, procurando que ésta suma sea la menor comparada con los días restantes del mes.

Se promedian los valores medios horarios de los 5 días más quietos de cada mes, obteniendo así valores medios horarios mensuales de H para días quietos. Promediando los cinco días más

quietos de un mes se elimina en forma razonable la variación diurna lunar (L), que para nuestro propósito es indeseable. En el Apéndice A, se presenta la lista de los días quietos elegidos para este trabajo, dados por mes y por año.

I.3.3 PROCESAMIENTO DE DATOS.

Con objeto de hacer clara la explicación se adoptó la siguiente notación, para identificar los valores.

año: $i = 1966, 1967, \dots, 1977$
mes: $j = \text{Nov., Dic., \dots, Sep., Oct.}$
hora: $k = 00, 01, \dots, 24$
día: $l = 1, 2, \dots, 5$

IHMH(i,j,k,l), Intensidad Horizontal Media horaria en días quietos. Tomada de los reportes anuales del observatorio magnético de Teoloyucan. Cada serie diaria consta de 25 valores.

IHMP(i,j,k), Intensidad Horizontal Mensual Promedio en días quietos. Calculada como promedio horario para los 5 días quietos de cada mes, dada por:

$$IHMP(i,j,k) = (1/5) \sum_{l=1}^5 IHMH(i,j,k,l) \quad (1.15)$$

Eliminación de la variación no cíclica

Cada serie diaria consiste de 25 valores, el valor promedio de la hora 00, de la hora 01, ..., hasta el de la hora 23, y la hora 24 (u hora cero del día siguiente). Como normalmente los valores de la hora 00 y la hora 24 no son iguales, se hace un ajuste lineal de los 25 valores medios horarios mensuales para que el valor promedio a las 00 horas sea el mismo que el valor promedio horario a las 24 horas, esto con el fin de eliminar las variaciones no cíclicas del campo geomagnético.

IHPC(i,j,k) = Intensidad Horizontal Promedio Mensual
Corregida por variaciones no cíclicas.

$$\text{IHPC}(i,j,k) = \text{IHMP}(i,j,k) - (k \cdot \Delta) \quad (1.16)$$

$$\text{donde } \Delta = [\text{IHMP}(i,j,00) - \text{IHMP}(i,j,24)] / 25 \quad (1.17)$$

Eliminación de la variación secular.

Si bien la Variación Secular no es una variación linealmente dependiente del tiempo, más aún cuando se trata de períodos largos de tiempo, sin embargo para los propósitos de este trabajo el considerar una dependencia lineal no implica incurrir en errores grandes. Con objeto de eliminarla se obtuvo un modelo matemático de la Variación Secular con los valores medios anuales de la intensidad horizontal de 1966 - 1977, por el método de mínimos cuadrados, el modelo al que se ajustó la serie de valores fue una ecuación de primer grado, cuyo coeficiente de correlación resultó 0.98031. (figura 1.10).

$VS(t)$ = Variación Secular en la Intensidad Horizontal cuyo valor se obtiene al evaluar el modelo dado por la ecuación (I.18):

$$VS(t) = -36.580,42 \cdot (t) + 101,892.3 \quad (I.18)$$

donde t es el tiempo en años.

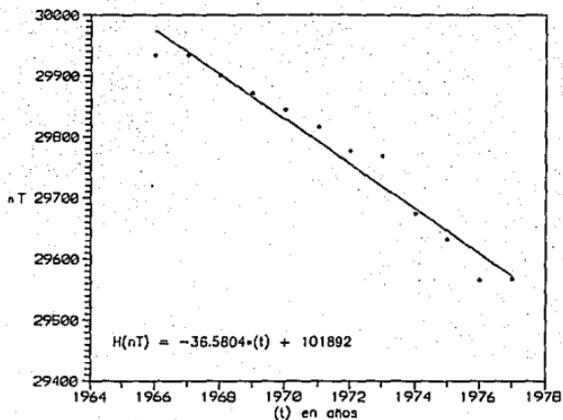


Figura I.10. Variación Secular y Ajuste Lineal, de los promedios anuales de (H), de 1966 a 1977.

A cada valor promedio horario mensual corregido por variaciones no cíclicas se le resta el valor resultado de evaluar el modelo matemático a la mitad del mes correspondiente.

$Sq_H(i,j,k)$ = Variación Solar Diurna para días Quietos.

$$Sq_H(i,j,k) = IHPC(i,j,k) - VS(t) \quad (1.19)$$

De ésta manera se han obtenido valores medios horarios mensuales corregidos por; variación diurna lunar (L), variaciones no cíclicas y por variación secular. Es a éstas series de 25 valores horarios, para cada mes de cada año, a la cual podemos llamar Variación Solar Diurna para Días Quietos en la componente horizontal geomagnética, Sq_H . Representada por la expresión (1.19).

CAPÍTULO II

ACTIVIDAD SOLAR

INTRODUCCIÓN

El Sol no es sólo una fuente de luz, sino también una fuente de partículas de alta energía. Estas partículas y sus campos magnéticos cuando interactúan con el campo magnético y atmósfera terrestres, son el origen de varios fenómenos que pueden tener consecuencias de importancia práctica.

Junto con la emisión de partículas de alta energía el sol también emite continuamente gas ionizado que es llamado viento solar. Este gas está compuesto principalmente de protones y electrones con densidad de alrededor de 8 por cm^3 y temperaturas cercanas a 10^5 grados centígrados. El viento solar viaja a una velocidad de 400 km/s y se encuentra con la Tierra cuatro días más tarde. Las partículas cargadas son deflectadas por el campo magnético terrestre y son las que encabezan la formación de la cavidad llamada magnetosfera. La presencia de ésta cavidad impide que la mayoría de las partículas de baja energía alcancen directamente la atmósfera terrestre.

II.1 CICLO DE MANCHAS SOLARES.

Cuando se habla de las variaciones del sol, la idea general que surge, es en el sentido de la variación en la emisión de luz, sin embargo también hay variaciones en otras bandas espectrales debido a los cambios del campo magnético en la atmósfera solar. Y la emisión total de luz del Sol podría no cambiar notoriamente con el tiempo.

El número de áreas brillantes en la atmósfera solar varía con un período medio de 11 años, y en este sentido el Sol puede ser considerado como una estrella variable. También el número de mancha solares varía con el mismo período promedio. Las manchas solares son el soporte de la fuerza del campo magnético, y el Sol es, por lo tanto, también una estrella variable magnéticamente. Más aún, es posible que el Sol tenga un campo magnético principal que cambia con el tiempo, las manchas solares aparecen en áreas brillantes pre-existentes llamadas *fáculas*, que deben su existencia a campos magnéticos localizados, así hay una unión entre las variaciones luminosas del Sol, y la aparición de fáculas, manchas solares, etc., y las variaciones de campo magnético encontrado en la atmósfera solar. Por lo tanto no podemos discutir un aspecto sin tener en mente el otro.

El bien conocido ciclo de 11 años de manchas solares es sólo un aspecto de una compleja fluctuación magnética de 22 años, durante la cual varía la emisión solar de luz visible, luz ultravioleta, rayos "X" y partículas cargadas. Esas fluctuaciones callentan y expanden la atmósfera superior terrestre causando auroras, comprimiendo las líneas de campo externas, y quizá influyen en el clima.

Esto posiblemente es más que un interés académico, porque algún cambio mayor en la luminosidad del sol o en el nivel de actividad podría afectar la habitabilidad de la Tierra. El conocimiento y cuantificación de esos efectos demanda el entendimiento de otras causas de cambios ambientales, particularmente variaciones de largos períodos en las emisiones solares de luz y partículas cargadas. La primera indicación que tales predicciones pueden ser posibles aparecieron en 1834, cuando Heinrich S. Schwabe, un observador solar Alemán, encontró que el número de puntos oscuros visibles en el disco solar parece variar regularmente con un promedio de 10 años.

En 1855 en Zurich, Wolf siguió el número de manchas solares diarias basado en reportes de observatorios internacionales él también compiló una historia del número de manchas solares basadas en las grabaciones de 150 años previos. Wolf encontró un promedio corregido para el período de alrededor de 11.1 años para el ciclo de manchas solares, aunque ambos el período y amplitud varían considerablemente de ciclo a ciclo.

Las variaciones de 11 años del número de manchas solares es ahora el aspecto visible más conocido de las profundas oscilaciones del campo magnético solar que afecta muchos otros aspectos de la superficie y atmósfera solar, y posiblemente su interior también. George Ellery Hale y sus colaboradores en el observatorio Monte Wilson en California (Peter V. Foukal 1975), encontraron la primera evidencia de la oscilación solar magnética en sus medidas espectrales de manchas solares, ellos descubrieron que ciertas líneas de absorción en el espectro, resaltadas y polarizadas de manera muy semejante a las líneas que se obtienen en los laboratorios espectrales de gases magnetizados. En la figura (II.1), se muestra el ciclo solar de manchas de 11 años.

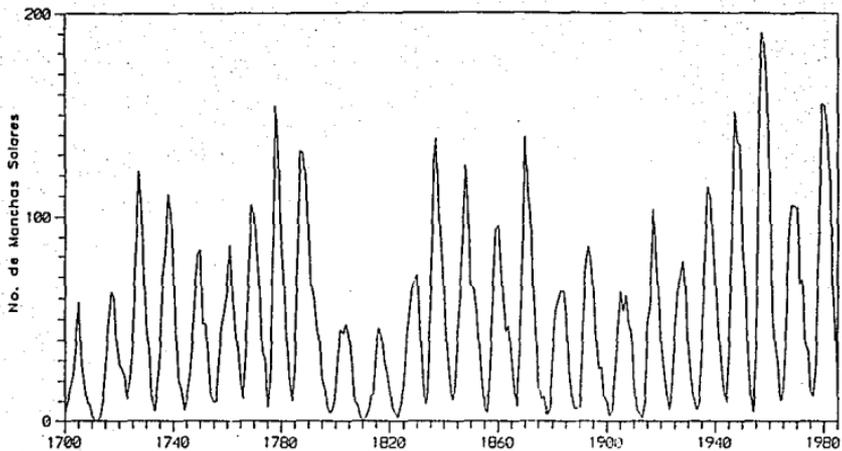


Fig.II.1. Variaciones cíclicas en el número Promedio Anual Diario de Manchas Solares.

Se ha determinado que la fuerza del campo magnético alrededor de las manchas solares es de 2000 a 3000 gauss, miles de veces más fuerte que el campo magnético de la Tierra. También se mostró que las manchas aparecen u ocurren agrupandose en pares que se asemejan a dipolos magnéticos gigantes, y que están usualmente orientados (grosso modo) paralelos al ecuador solar.

En 1912 Hale anunció que la polaridad magnética de las manchas solares dipolares cambian de signo en la primera mancha de un nuevo ciclo. Para 1924, coleccionó una enorme información para anunciar que éste cambio de polaridad ocurre en cada mínimo de actividad, y fue una característica básica del ciclo de manchas solares. También concluyó que el ciclo de 11 años en el número de manchas solares es la mitad de un ciclo magnético solar de 22 años durante el cual la polaridad de los grupos de manchas solares se invierte dos veces, ya que regresa a su estado original.

Medidas mucho mas sensitivas del campo magnético solar son ahora hechas sobre una base diaria con magnetogramas. Un sorpresivo hallazgo extraído de tales magnetogramas, y de otras evidencias, es que el magnetismo superficial solar es confinado en pequeñas regiones de intenso campo magnético que cubre sólo en pequeño porcentaje del total del área de la fotosfera (Esponda Gaxiola, A. 1973), la capa que forma la superficie visible del sol. Las grandes áreas de una sola polaridad magnética son los sitios de formación de manchas; las áreas pequeñas variando en tamaño bajo para la resolución límite de los magnetogramas más detallados (alrededor de 200 km), aparecen brillantes en más longitudes de onda de radiación. Esas áreas especialmente luminosas en la superficie solar son llamadas "fáculas", estas fueron vistas por primera vez en el siglo 17.

Hale y sus colaboradores observaron el campo magnético cercano a los polos solares en un esfuerzo por determinar si el Sol tiene un campo dipolar global análogo al campo magnético de la Tierra. Medidas más sensitivas durante los pasados 20 años indican que el campo alrededor del polo norte y polo sur solares lo son realmente en forma usual, opuestos en polaridad y que cambian de signo alrededor del momento de la cumbre de actividad.

Esas observaciones también han revelado que la geometría del campo magnético solar es mucho más complicada que la del campo magnético terrestre, el cual puede ser razonablemente modelado como un dipolo magnético. El campo solar en latitudes bajas puede ser visualizado como una serie de líneas de campo o tubos magnéticos envueltos alrededor del Sol casi paralelos al ecuador solar, sumergidos bajo la superficie solar. Cuando esas líneas de campo emergen hacia la superficie, ellas forman remolinos de campo magnético que se extienden dentro de las capas exteriores de la atmósfera solar, algunas veces alcanzando miles de kilómetros hacia los planetas antes de regresar a conectarse al Sol. Las regiones activas, visibles como manchas y fáculas aparecen cuando esas líneas intersectan la fotosfera.

Los mecanismos que causan el ciclo magnético solar son escasamente conocidos, aunque éste ha sido el foco de intensa investigación durante el medio siglo pasado. Los astrónomos están generalmente de acuerdo en que los cambios observados en el magnetismo solar son causados por los movimientos del plasma solar forzado a través del ya existente campo magnético. El plasma es un gas altamente ionizado y así es eléctricamente conductor. Los movimientos en el plasma solar inducen tanto una corriente en el plasma y en el campo magnético asociado, el cual en su momento intensifica el campo original.

Distinto a un cuerpo sólido como la Tierra, el Sol, en sus regiones externas no rota a la misma velocidad angular en todas las latitudes. Las regiones ecuatoriales del Sol completan una rotación en alrededor de 25 días, aproximadamente 25 por ciento más rápido que en los polos; hay una variación suavizada de velocidad entre ellos. Esta rotación diferencial es probablemente un factor clave en los procesos de dínamo que mantienen el campo magnético solar. Una línea de campo extendiéndose directamente a lo largo de la superficie entre los polos solares y restringida a moverse con el plasma superficial podría ser progresivamente extendida por la mayor rotación ecuatorial. Después de unas pocas rotaciones solares la línea podrá estar en forma paralela al ecuador. Esta deformación de las líneas de campo probablemente explica la geometría del campo magnético solar y la orientación Este-Oeste de los grupos de manchas solares. La extensión de las líneas de campo magnético incrementa la intensidad de los altos valores de campo en las manchas solares.

La erupción de flujo magnético del Sol se cree es parcialmente responsable de los cambios en la polaridad de los campos de las manchas solares entre ciclos. Como los tubos magnéticos ascienden a las regiones activas desde el interior del Sol, este flujo magnético eventualmente se dispersa a través de la superficie solar, al mismo tiempo, el flujo es impulsado fuera de las capas altas de la atmósfera solar por un nuevo campo magnético, el cual surge debajo como resultado de la rotación diferencial solar. El resultado es una emisión de flujo magnético viejo que de algún modo remueve la polaridad original y deja el nuevo flujo con un exceso neto de polaridad opuesta.

La combinación de expulsión de campo magnético viejo por erupción y dispersión y la generación de nuevo campo magnético por

la rotación diferencial es probablemente suficiente para explicar el ciclo magnético solar, pero hay pocos conocimientos sobre los procesos por los cuales el Sol se libera a sí mismo de la vieja polaridad.

Observaciones de las oscilaciones globales solares han provisto una ventana al interior del Sol, haciendo esto posible el análisis de perfiles de la rotación solar y para calcular su influencia sobre el dínamo solar. Recientes descubrimientos indican que el 30% exterior del interior solar rotan diferencialmente, más de lo que la superficie lo hace. Esto sugiere una mayor acción de dínamo en el Sol puede tomar lugar lejos y por debajo de la superficie solar.

Datos de satélite indican que la brillantez del Sol decrece alrededor del 0.1 por ciento entre el máximo de la actividad solar en 1981 y su mínimo en la mitad de 1986. Se ha estimado que durante la pequeña edad de hielo la temperatura media global descendió en alrededor de 0.5° Kelvin abajo del promedio. Si el enfriamiento, fué un resultado del cambio en la luminosidad solar, podría haberse requerido un descenso en la irradiación solar de entre 0.2 y 0.5 por ciento actuando durante varias décadas, de acuerdo a cálculos basados en modelos climáticos estandar.

El alcance de la variabilidad solar se extiende más alla de los cambios en la apariencia y brillantez de la fotosfera. El ciclo magnético también afecta las capas progresivamente altas de la atmósfera solar, conocidas como la cromósfera y corona. La temperatura del plasma en esas regiones excede la de la fotosfera aunque están alejadas del núcleo fuente de calor solar, porque la pérdida de energía de ese tenue plasma es muy baja y es capaz de almacenar mayor cantidad de calor.

II.3. CARACTERIZACIÓN DEL CICLO SOLAR 1964-1976

Como el intervalo de análisis en este trabajo es de 1966 a 1977, el ciclo de actividad solar que cubre este tiempo es el ciclo que va de 1964 a 1976. A continuación se presentan las características en tiempos de ocurrencia de los mínimos y el máximo, así como en el número de manchas solares para cada uno de éstos.

1964 año de mínima actividad.

Promedio anual de manchas solares 10.2 por día, Julio mes de mínima actividad con un promedio de 3.1 manchas por día, en el mes de septiembre del día 15 al 30 no existieron manchas. Fecha del mínimo (T_m) = 1964.64.

1968 año de máxima actividad.

Promedio anual de manchas solares 105.9 por día, Mayo mes de máxima actividad con un promedio de 127.2 manchas por día, del 31 de Enero al 2 de Febrero el promedio de manchas fue mayor a 200. Fecha del máximo (T_M) = 1968.37.

1976 año de mínima actividad.

Promedio anual de manchas solares 12.6 por día, Julio mes de mínima actividad con un promedio de 1.9 manchas por día, donde prácticamente durante todo el mes de julio del 7 al 31 no existió ninguna mancha solar. La fecha del mínimo es (T_m) = 1976.54.

Tiempo del mínimo al máximo (T_{Mm}) = 3.83 años

Tiempo del máximo al mínimo (T_{Mm}) = 8.17 años.

Tiempo del mínimo al mínimo (período) = 12 años.

La característica particular de este ciclo es que tiene un período de 12 años, un años más que el promedio general de 11 años.

CAPÍTULO III

LA IONOSFERA

INTRODUCCIÓN

La ionosfera es una región de la atmósfera donde una fracción apreciable de moléculas del aire están ionizadas. Fue Balfour Stewart en 1882 (Parkinson 1983), la primera persona que sugirió la existencia de una capa conductora de electricidad en la atmósfera terrestre, y que ésta era la fuente de las variaciones diurnas del campo magnético terrestre, aunque en esa época la idea de conductividad eléctrica en gases era incierta. El análisis cuantitativo de Shuster basado en el método de Gauss de armónicos esféricos no dejó duda de que las corrientes podrían fluir en algún nivel de la atmósfera terrestre. En 1901 se realizó la primera transmisión de ondas de radio a través del Océano Atlántico hecha por Marconi, esto sólo puede ser posible por la existencia de una capa eléctricamente conductora en la atmósfera que refleja las ondas de radio, ya que, de no existir ésta capa, dichas ondas escaparían fuera de la Tierra. No fue sino hasta 1925 cuando se probó experimentalmente la existencia de la capa conductora ó ionosfera, por un lado Appleton y Barnett, y por otro Breit y Tuve.

III.1 ESTURCTURA DE LA IONOSFERA

Se presenta una breve introducción a la estructura y comportamiento de la ionosfera, por la importancia que tiene para entender algunas de las características que se discutirán sobre la variación solar diurna para días quietos, ya que la ionosfera juega un papel preponderante en la dinámica y mantenimiento de las variaciones temporales geomagnéticas.

La ionización en la atmósfera superior de la Tierra, se debe fundamentalmente a dos procesos: fotoionización y colisiones. El primero de estos consiste en el desprendimiento de electrones de los diferentes componentes atmosféricos, por la radiación electromagnética solar de alta energía (radiación ultravioleta y rayos X blandos). Esta interacción se presenta a diferentes alturas dependiendo de la temperatura, la composición química y las energías de ionización de las distintas componentes atmosféricas, así como la energía de la radiación ionizante. La variación de estas características con la altura es la responsable de la formación de las diferentes regiones en la ionosfera. El segundo proceso es producto de las colisiones entre la radiación corpuscular solar (básicamente protones y electrones) y las moléculas atmosféricas, este fenómeno es también función de la altura, pues la sección eficaz para una colisión dada depende de la densidad, la temperatura, la energía de la radiación, etc. Esto contribuye a diferenciar aún más las regiones ionosféricas.

La ionización es disminuida por procesos de recombinación que provocan la pérdida de electrones libres. Estos procesos son básicamente tres: recombinación, recombinación disociativa y captura por moléculas neutras. El primero de estos consiste en la

unión de un ion positivo con un electrón para formar una molécula neutra ($A^+ + e^- \rightarrow A$). La recombinación disociativa es la unión de una molécula ionizada con un electrón, de modo que se libera la suficiente energía para disociar la molécula, y en ocasiones dejar a las componentes en estados excitados ($BC^+ + e^- \rightarrow B + C$). El último proceso consiste en la captura de un electrón por una molécula neutra creando un ion negativo ($D + e^- \rightarrow D^-$).

La densidad electrónica y las variaciones en la estructura de la ionosfera en un momento dado, son el resultado del predominio de uno o varios de los procesos mencionados anteriormente, junto con las variaciones en intensidad y energía de la radiación ionizante.

Heaveside en Inglaterra y Kennelly en EE. UU., proponen en forma independiente la presencia de una capa eléctricamente conductora en la atmósfera, a una altura de aproximadamente 80 km. Esta capa fué encontrada posteriormente, y se la dió el nombre de capa Kennelly-Heaveside.

Poco después, Appleton descubrió la existencia de otra región reflectora entre 200 y 400 km. de altura distinta de la anterior, que recibió el nombre de capa Appleton. El mismo Appleton propuso designar a la capa inferior con la letra "E" y a la superior con la letra "F". Posteriormente se encontro que existe una capa inferior a la "E", capa "D" y que la capa "F" durante el día se divide en dos capas "F₁" y "F₂".

Debido al espesor apreciable de estas "capas" se ha cambiado el nombre por el de "regiones" D, E, F₁ y F₂. Wattson propuso el nombre de "ionosfera", para estas regiones ya que su característica esencial es la ionización de los componentes

atmosféricos. Las regiones ionosféricas presentan variaciones con la hora local, la latitud, la época del año y el ciclo de actividad solar.

En la parte de la atmósfera iluminada por la luz solar (lado diurno), los procesos de ionización predominan sobre los de recombinación, pero en el lado noche (lado nocturno), por la ausencia casi total de radiación ionizante, los procesos de recombinación son los principales. Como estos procesos son lentos, aunque no desaparece la ionización, la densidad electrónica disminuye dependiendo de cada región.

Cada región de la ionosfera está caracterizada por una densidad electrónica, y un gradiente de densidad, ambos tiene una dependencia con el tiempo, característico de cada región.

Durante la noche la región D desaparece, las regiones F_1 y F_2 se confunden en una sola y las densidades electrónicas en ciertas regiones disminuyen en factores que varían entre 10 y 100 de la ionización durante el día.

Las variaciones en el comportamiento de la ionosfera con la latitud y con la estación del año, se debe a la dependencia de la penetración de la radiación con el ángulo de incidencia (o de ataque). En invierno, las diferentes regiones de la ionosfera en el hemisferio norte, se localizan a mayores alturas que en verano. En los períodos de máxima actividad solar la intensidad y la energía de la radiación aumenta en promedio dando como resultado un aumento en la densidad electrónica y una disminución en las alturas promedio de las diferentes regiones ionosféricas, por la mayor penetración de la radiación.

En las regiones E y F₁ respecto de la latitud y de la época del año, la densidad electrónica es mayor en el ecuador que en los polos, y, la ionización es mayor durante el solsticio de verano que en el de invierno, mientras que en la región F₂ sucede lo contrario. Existe además, en algunas regiones como la F₂, una clara relación entre la ionización y la actividad solar; la densidad electrónica máxima en esta región exhibe una variación cíclica con período de 11 años idéntico al período de la actividad solar.

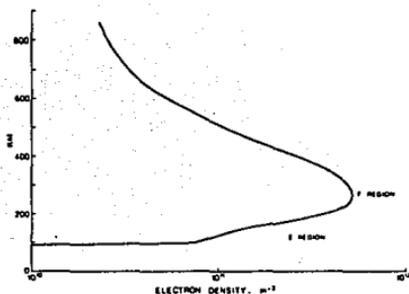


Figura III.1. Densidad electrónica en la Ionosfera,
al medio día a una latitud 42°S en Julio.
(tomada de Parkinson 1983).

El conocimiento de la estructura y comportamiento de la ionosfera es fundamental para el estudio de las variaciones del campo geomagnético, ya que, es en esta región donde se generan las variaciones temporales, siendo además un factor determinante del ambiente electromagnético que rodea a la Tierra. La figura (III.1) muestra la variación de la densidad electrónica con la altura.

III.2 CONDUCTIVIDAD

Para entender el comportamiento de un plasma en presencia de un campo magnético, se estudian las fuerzas impuestas por ambos campos, el eléctrico y el magnético, sobre las partículas cargadas. Consideremos una partícula cargada con masa m y carga e , si ésta partícula se mueve con una velocidad v en un campo magnético B , sobre ésta actúa una fuerza dada por:

$$f = ev \times B \quad (III.1)$$

conocida como "fuerza de Lorentz". Primero consideremos el caso donde v es perpendicular a B . Ya que, f es perpendicular a v , sólo la dirección de v es modificada pero no su magnitud. Más aún, en un campo uniforme los iones se mueven en un círculo en un plano perpendicular a B . Y la fuerza de Lorentz suple la fuerza centrípeta necesaria para mantener al ion en un movimiento con patrón circular.

El radio del círculo de giro está dado por:

$$\frac{m|v^2|}{r} = e |v| |B|$$
$$r = \frac{m |v|}{e |B|} \quad (III.2)$$

La velocidad angular de rotación del ion es:

$$\omega = \frac{|v|}{r} = \frac{e|B|}{m} \quad (\text{III.3})$$

es llamada "giro-frecuencia". Esta es una propiedad del ion e intensidad del campo magnético, y es independiente de la velocidad. Debido a su pequeña masa, un electrón tiene mayor girofrecuencia que los iones atómicos y, con la misma velocidad, un menor radio de giro. Si la velocidad v es paralela al campo magnético B , no experimenta la fuerza de Lorentz, y continúa sin cambiar, si no hay otras fuerzas actuando sobre el ion. La combinación de movimientos, por lo tanto describe una espiral a lo largo de la línea de fuerza del campo.

Ahora, supongamos que hay un campo eléctrico perpendicular a B . El ion será acelerado por el campo eléctrico durante la mitad de la trayectoria circular y desacelerado durante la otra mitad. Asumimos que el campo magnético es suficientemente intenso ó que el campo eléctrico es suficientemente débil, para que el ion continúe en una trayectoria que es casi un círculo. El radio de curvatura cambiará continuamente, siendo mayor cuando el potencial eléctrico es un máximo o un mínimo (de acuerdo con el signo de la carga), y menor en el lado opuesto del círculo.

Sí tomamos el campo eléctrico (E) en la dirección X y el campo magnético (B) en la dirección Z , las ecuaciones diferenciales que gobiernan el movimiento del ion son:

$$m \frac{\delta v_x}{\delta t} = e|B|v_y + e|E| \quad (III.4)$$

$$m \frac{\delta v_y}{\delta t} = -e|E|v_x \quad (III.5)$$

que son satisfechas por la ecuación (III.3):

$$x = r \cos \omega t \quad (III.6)$$

$$y = r \sin \omega t - \frac{|E|}{|B|} \quad (III.7)$$

Se obtiene el resultado de que el ion, también como se mueve en un círculo, deriva no en dirección del campo eléctrico pero sí en ángulos rectos a ambos el campo eléctrico y el magnético, el movimiento puede ser dibujado como un movimiento circular sobre un centro guía que deriva uniformemente con velocidad $|E|/|B|$.

Un campo magnético tiene una fuerte influencia sobre el movimiento de las partículas que forman un plasma. Este impone un movimiento con dirección preferencial lo cual influye tanto en la conductividad eléctrica, como en el movimiento masivo del plasma. Investigemos la situación cuando hay un campo eléctrico en varias orientaciones relativas al campo magnético.

En un estado estable la fuerza electromagnética total sobre un ion, es igual a la fuerza resistiva debido a colisiones (Parkinson 1983, p.p. 222). El campo eléctrico experimentado por un ion con carga positiva e , moviéndose con velocidad v es:

$$E + v \times B \quad (III.8)$$

donde v y B son relativas al mismo marco de referencia. Por lo tanto:

$$e(E + v \times B) = m \nu v \quad (III.9)$$

ν se toma como el promedio de velocidad de deriva y ν es la frecuencia de colisiones. Un tratamiento más riguroso podría tomar en cuenta la distribución de velocidades, pero para el presente tratamiento basta para mostrar las características importantes del movimiento anisotrópico.

Pongamos a B en dirección Z , así que, $B = kB$. Derivando la velocidad de un ion individual en un campo eléctrico E con varias orientaciones y de esto se deriva la movilidad y conductividad. La movilidad es definida como:

$$k = \frac{\nu}{|E|} \quad (III.10)$$

La densidad de corriente, debida al movimiento de una especie particular de iones con número de densidad N es:

$$J = N e |v| = N e |E| k \quad (\text{III.11})$$

La conductividad total debida a igual número de iones positivos y electrones es por lo tanto.

$$\sigma = \frac{|J|}{|E|} = N (ek_i - ek_e) \quad (\text{III.12})$$

donde k_i y k_e son las movilidades de iones positivos y electrones respectivamente. Ignorando la contribución de iones moleculares negativos.

Campo eléctrico E paralelo al campo magnético B .

En esta caso $E = |E| k$. En el plano XY los iones circulan sobre las líneas de fuerza, sin ninguna velocidad de deriva neta. En la dirección Z , de la ecuación (9).

$$v = \frac{e |E|}{vm} \quad (\text{III.13})$$

y la movilidad es:

$$k_0 = \frac{e}{\nu m} \quad (\text{III.14})$$

para cada especie de iones, y la conductividad es:

$$\sigma_0 = N e^2 \left(\frac{1}{\nu_1 m_1} + \frac{1}{\nu_0 m_0} \right) \quad (\text{III.15})$$

La movilidad cambia de giro con el signo de la carga, así iones positivos y electrones se mueven en direcciones opuestas, paralelas al campo magnético, en respuesta al campo eléctrico paralelo. Ambos contribuyen a una corriente eléctrica en la misma dirección. k_0 y σ_0 son llamadas "movilidad directa" y "conductividad directa" respectivamente. Tienen el mismo valor que la movilidad y conductividad en la ausencia de un campo magnético.

La ecuación (III.15) indica que cuando σ_0 tiende a ∞ , entonces ν tiende a 0. En la región E de la ionosfera, σ_0 puede ser muy grande.

Campo eléctrico E perpendicular al campo Magnético B.

Para este caso tomemos a $E = |E| \hat{i}$. Sustituyendo dentro de la ecuación (III.9) la componente X se hace:

$$E + v_y \left(\frac{m \omega}{e} \right) = \left(\frac{m v}{e} \right) v_x \quad (\text{III.16})$$

y la componente Y:

$$-v_x \left(\frac{m \omega}{e} \right) = \left(\frac{m v}{e} \right) v_y \quad (\text{III.17})$$

donde se ha substituido $(m \omega / e)$ por B de (3), resolviendo esas ecuaciones simultáneas se tiene que:

$$v_x = \left(\frac{e E}{m} \right) v (v^2 + \omega^2)^{-1} \quad (\text{III.18})$$

La movilidad en la dirección X es por lo tanto

$$k_1 = \left(\frac{e}{m} \right) v (v^2 + \omega^2)^{-1} \quad (\text{III.19})$$

para cada tipo de ion. La conductividad resultante es:

$$\sigma_1 = N e^2 \left[\frac{v_i / m_i}{v_i^2 + \omega_i^2} + \frac{v_e / m_e}{v_e^2 + \omega_e^2} \right] \quad (\text{III.20})$$

k_1 y σ_1 son conocidas como "movilidad Pedersen" y "conductividad Pedersen"; se refieren a la deriva y corriente paralela al campo eléctrico, pero perpendicular al campo magnético. Nuevamente la deriva es en direcciones opuestas para electrones e iones positivos, así ambos contribuyen a una corriente en la misma dirección.

La velocidad tiene también una componente en la dirección Y, dada por (III.16) y (III.17)

$$v_y = \left(\frac{e E}{m} \right) \omega (v^2 + \omega^2)^{-1} \quad (\text{III.21})$$

conduciendo a la movilidad

$$k_2 = \left(\frac{e}{m} \right) \omega (v^2 + \omega^2)^{-1} \quad (\text{III.22})$$

y conductividad.

$$\sigma_2 = N e^2 \left[\frac{\omega_1 / m_1}{v_1^2 + \omega_1^2} + \frac{\omega_0 / m_0}{v_0^2 + \omega_0^2} \right] \quad (\text{III.23})$$

donde k_2 y σ_2 , son "movilidad Hall" y "conductividad Hall", representan movimiento y corriente en ángulos rectos, tanto al campo eléctrico como al campo magnético.

ω_1 y ω_0 tienen signos opuestos, así los movimientos de iones positivos y electrones representados por (22) tienen la misma dirección. Por lo tanto así como hay una corriente perpendicular a ambos campos, un campo eléctrico causa una deriva de todo el plasma. Esta es llamada "deriva Hall".

Es digno de consideración ver como esa deriva y corriente varían con el cambio de la frecuencia de colisión, ν . Para grandes valores de frecuencia de colisión ν ($\nu \gg \omega$), la movilidad Pedersen k_1 se aproxima a k_0 y ambas decrecen en proporción a ν^{-1} . La movilidad Hall, k_2 , decrece como ν^{-2} con el incremento de ν . Así para frecuencias de colisión suficientemente grandes ambos, deriva y conductividad se hacen isotrópicos, y se aproximan a valores que podrían tener en la ausencia de un campo magnético.

La movilidad Pedersen alcanza un máximo, cuando $\nu = \omega$, de modo que:

$$k_1 = e (2 m \omega)^{-1} = \frac{1}{2|B|} \quad (II.24)$$

No se puede determinar la conductividad máxima por la adición de las movilidades máximas y sustituyendo en la ecuación (III.12) debido a que ω_e y ω_i son muy diferentes, y las movilidades del ion y electrón alcanzan su máximo en diferentes altitudes.

Cuando ν se aproxima a cero k_1 tiende a $e\nu/\omega^2 m = 0$, así ambas la deriva y la conductividad Pedersen decrecen a cero con ν^{-1} . La movilidad Hall k_2 se aproxima a $em/\omega = 1/B$ la cual se aplica a ambos iones positivos y electrones en valores suficientemente bajos de ν . El efecto de esta movilidad, la cual es igual para ambas especies de iones, es que los iones y electrones derivan juntos y no hay una corriente Hall neta para muy bajos valores de ν . Hay, sin embargo, una deriva, ambas especies viajan con una velocidad dada por:

$$v_D = E / B \quad (\text{III.25})$$

en ángulos rectos a ambos campos. Esto puede ser expresado por la ecuación vectorial (III.26), que representa la deriva o arrastre por campo eléctrico.

$$v = \frac{E \times B}{B^2} \quad (\text{III.26})$$

Ambos v y E son medidas relativas al mismo sistema de referencia. El campo eléctrico medido relativo al sistema de referencia que se mueve o deriva con el plasma es

$$\begin{aligned} E' &= E + v_D \times B = E + B^2 (E \times B) \times B \\ &= 0 \end{aligned} \quad (\text{III.27})$$

Así la deriva Hall impone una velocidad al plasma tal que éste no experimenta algún campo eléctrico. El comportamiento de los iones es muy importante debido a que la magnetósfera es prácticamente un plasma sin colisiones.

La densidad iónica de la ionosfera es muy variable, depende de la hora del día, estación del año, latitud y número de manchas solares. La mayor parte de la conductividad directa es debida a electrones, debido a su mucho mayor movilidad. La mayor parte de la conductividad Pedersen es debida a iones positivos, aunque las movillidades de los iones y electrones alcanzan el mismo valor

máximo, la movilidad Pedersen de los electrones alcanza su máximo cuando la densidad iónica es menor que la contribución a la conductividad. La conductividad Hall es debida a la diferencia entre las movilidades de electrones e iones positivos y desaparece cuando son iguales a altura por sobre los 170 kms.

En la figura (III.2), se muestran las conductividades; directa, Pedersen y Hall, así como la conductividad integrada como función de la altura. El parámetro ionosférico importante para el geomagnetismo, es la conductividad integrada sobre la altura.

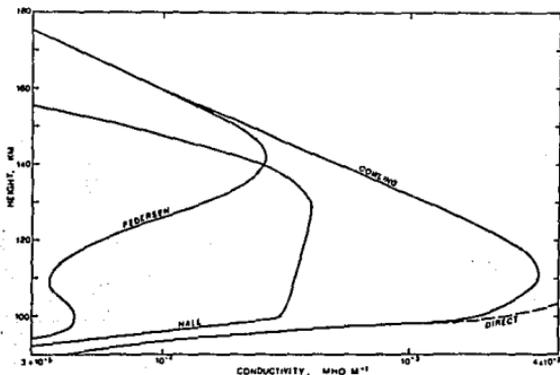


Figura III.2. Conductividades directa, Pedersen y Hall (tomada de Parkinson 1983).

CAPÍTULO IV

Sq_H Y LA RELACIÓN SOL-TIERRA

INTRODUCCIÓN.

La Tierra en su movimiento de traslación alrededor del Sol describe una trayectoria elíptica con el Sol en uno de los focos, este movimiento se realiza con un ángulo constante de inclinación del eje de rotación terrestre de $23^{\circ} 27''$ respecto al plano de la eclíptica, y ambos son responsables de las diferencias climáticas en los hemisferios Norte y Sur terrestres. Y también afectan en las diferencias de densidades electrónicas en la ionosfera así como en las mareas termodinámicas atmosféricas.

Estas características de la posición Sol-Tierra serán usadas para explicar la forma y amplitud de la curva de Variación Sq_H .

IV.1 LAS DIFERENTES EPOCAS DEL AÑO.

IV.1.1 SOLSTICIO DE VERANO

Para ésta época del año la Tierra se encuentra en su afelio (punto de mayor distancia al Sol), y sin embargo es la época más cálida en el hemisferio Norte, y la época más fría en el hemisferio Sur de la Tierra. Esto debido a que el ángulo de incidencia o de ataque de la radiación solar sobre la atmósfera terrestre en el hemisferio Norte es casi perpendicular, o por lo menos se acercan a ángulos rectos los formados por la radiación solar y la atmósfera terrestre en este hemisferio. Por el contrario para el hemisferio Sur, tales ángulos de ataque o incidencia de la radiación solar son mayores sobre el hemisferio Sur, por lo que habrá mayor difracción de la radiación solar que en el hemisferio Norte, es decir menor calentamiento y menor ionización de las partículas atmosféricas. Por este hecho la radiación absorbida por la atmósfera es máxima y la ionización de las moléculas de aire también será máxima en el hemisferio Norte terrestre. Cabe anotar aquí que el observatorio magnético de Teoloyucan se localiza en el hemisferio Norte.

En la figura IV.1, se muestra la posición relativa entre la línea Sol-Tierra y el eje de rotación terrestre, donde además se señalan los solsticios verano e invierno y los equinoccios primavera y otoño.

IV.1.2 SOLSTICIO DE INVIERNO

En esta época del año la Tierra se encuentra en su perihelio (punto de menor distancia al Sol), la energía por unidad de área que recibe la Tierra proveniente del Sol es máxima por la cercanía, sin embargo, debido al ángulo oblicuo de incidencia de esta radiación en el hemisferio Norte la cantidad neta absorbida es mínima, y máxima en el hemisferio Sur, esto es, las condiciones descritas en el párrafo anterior se invierten en esta época del año. Esto quiere decir que el grado de ionización y calentamiento de la radiación solar sobre las moléculas de la atmósfera terrestre es mínima en el hemisferio Norte.

IV.1.3 EQUINOCIOS DE PRIMAVERA Y OTOÑO

En estas épocas del año la distancia entre la Tierra y el Sol es la distancia media de su órbita alrededor del mismo, en esta posición la radiación absorbida por la atmósfera terrestre, proveniente del sol es máxima en el ecuador geográfico y menor pero semejante en ambos hemisferios, entonces la ionización y calentamiento que esta radiación produce sobre la atmósfera se considera moderada tanto en el hemisferio Sur como en el hemisferio Norte.

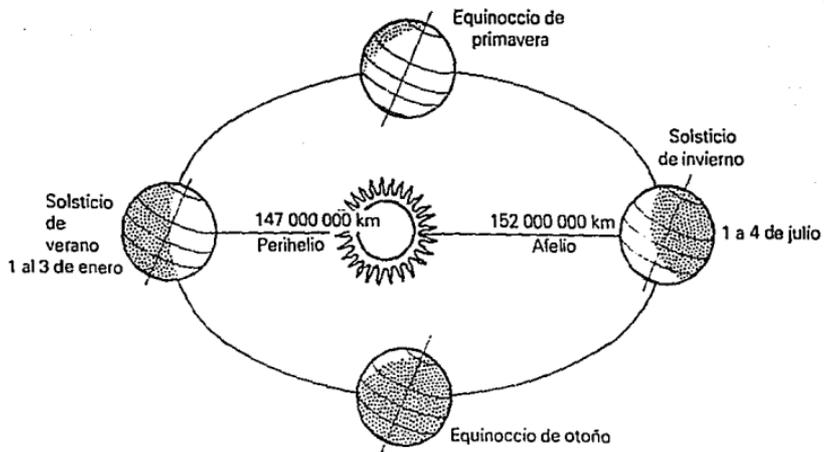


Figura IV.1. Posición de la Tierra respecto al Sol, solsticio de verano (Afelio, 152×10^6 km.), solsticio de invierno (Perihelio, 147×10^6 km.) y equinoccios de primavera y otoño (Distancia Media, U.A.= 150×10^6 km.).

El ángulo de incidencia de la radiación solar varía en dos veces el ángulo de inclinación del eje de rotación terrestre, esto es, en un rango de $46^{\circ}54'$. Por ejemplo, en el ecuador geográfico la variación va de $+23^{\circ}27'$ a $-23^{\circ}27'$ durante una traslación completa de la Tierra alrededor del Sol. Esto se muestra en la figura (IV.2), en la que se presenta el ángulo de incidencia de la radiación solar según la época del año sobre la atmósfera terrestre.

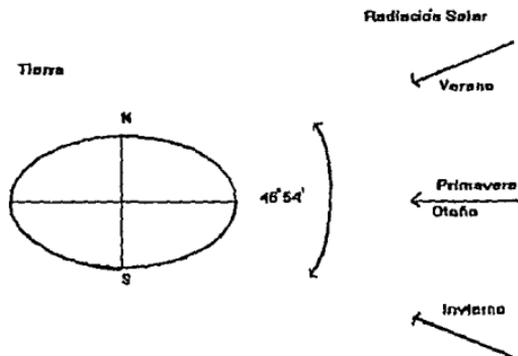


Figura IV.2. Angulos de incidencia de la radiación solar para las diferentes épocas del año, la variación total durante una traslación completa es de $46^{\circ}54'$.

IV.2 CURVAS ESTACIONALES DE Sq_H .

De acuerdo a la clasificación estacional de los meses del año adoptada durante el Año Geofísico Internacional 1958 (Matsushita y Campbell 1967), los meses se clasifican según la posición entre el eje de rotación terrestre y la línea Sol-Tierra, a saber: equinoccios de Primavera y Otoño, solsticio de Invierno y solsticio de Verano. Se forman así 3 grupos de 4 meses. El primero incluye los meses alrededor del solsticio de Invierno llamados meses "D", éste grupo se forma de la siguiente manera (Nov., Dic., Ene. y Feb.), de dos años consecutivos, es decir, no se toman estos meses del mismo año; el segundo grupo de meses incluye a los equinoccios Primavera y Otoño (Mar., Abr., Sep. y Oct.) llamados meses "E", tomados del mismo año, y considerando el salto de 4 meses en el análisis; por último el grupo que incluye los meses de Verano (May., Jun., Jul., Ago.) llamados meses "J". En este trabajo un año comienza en el mes de noviembre del año civil anterior. Como ejemplos diremos que el año de 1966 para este trabajo comienza en el mes de Noviembre de 1965 y termina en Octubre de 1966, de la misma manera el año de 1977 en este trabajo comienza en Noviembre de 1976 y termina en Octubre de 1977.

Retomando las curvas calculadas en la sección (I.3) para $Sq_H(i,j,k)$ dadas por la expresión (I.19). El siguiente paso fue obtener una serie de valores horarios para cada estación del año; Solsticio de Invierno o meses "D" (Noviembre, Diciembre, Enero y Febrero), Equinoccios de Otoño y Primavera o meses "E" (Marzo, Abril, Septiembre y Octubre), Solsticio de Verano o meses "J" (Mayo, Junio, Julio y Agosto). Para esto se promediaron los cuatro valores medios horarios, correspondientes de cada grupo de meses para cada año de 1966 a 1977, mediante el siguiente proceso:

SqD(i,k)= Variación Solar Diurna para Días Quietos en
meses D.

$$SqD(i,k) = (1/4) \sum_j Sq_H(i,j,k) \quad (IV.1)$$

Para j = Nov., Dic., Ene. y Feb.

SqE(i,k)= Variación Solar Diurna para Días Quietos en
meses E.

$$SqE(i,k) = (1/4) \sum_j Sq_H(i,j,k) \quad (IV.2)$$

Para j = Mar., Abr., Sep., y Oct.

SqJ(i,k)= Variación Solar Diurna para Días Quietos en
meses J.

$$SqJ(i,k) = (1/4) \sum_j Sq_H(i,j,k) \quad (IV.3)$$

Para j = May., Jun., Jul., y Ago.

Hecho todo ésto se obtiene una curva de Sq_H para cada clasificación de meses D, E y J para todos los años comprendidos en el período 1966-1977. Ya que el objetivo de este trabajo es encontrar el efecto que produce, sobre la variación diurna solar para días quietos del campo magnético de la tierra, la variación en la posición relativa entre la línea Sol-Tierra y el eje de rotación terrestre y el período de actividad solar.

En las figuras IV.3, IV.4, IV.5 y IV.6, muestran las curvas que representan a la Variación Sq_H para los meses D, meses E y meses J, para cada año de 1966 a 1977, como resultado de las expresiones (IV.1), (IV.2) y (IV.3), respectivamente.

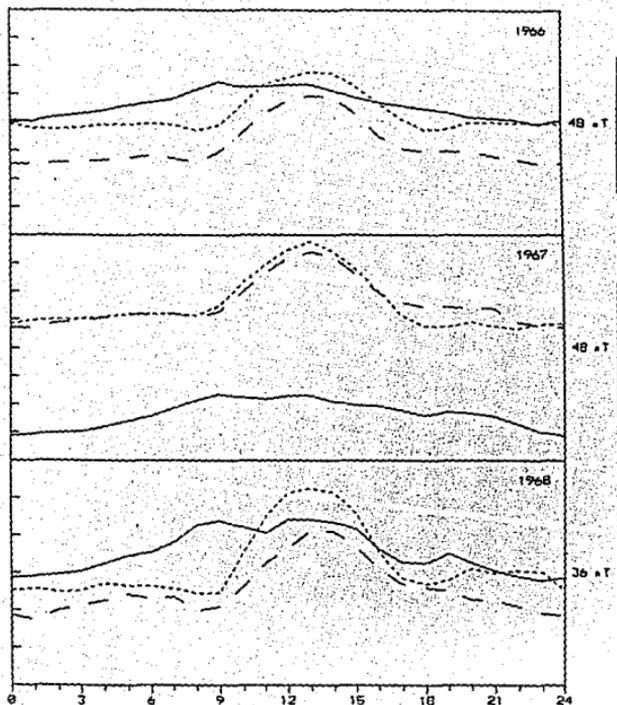


Fig.IV.3. Curvas de Variación Solar Diurna para Días Quietos.
 Observatorio magnético de Teoloyucan, Estado de México.
 Línea continua: meses D, línea discontinua: meses E y línea
 punteada: meses J. Tiempo 90 W Meridiano de Greenwich.

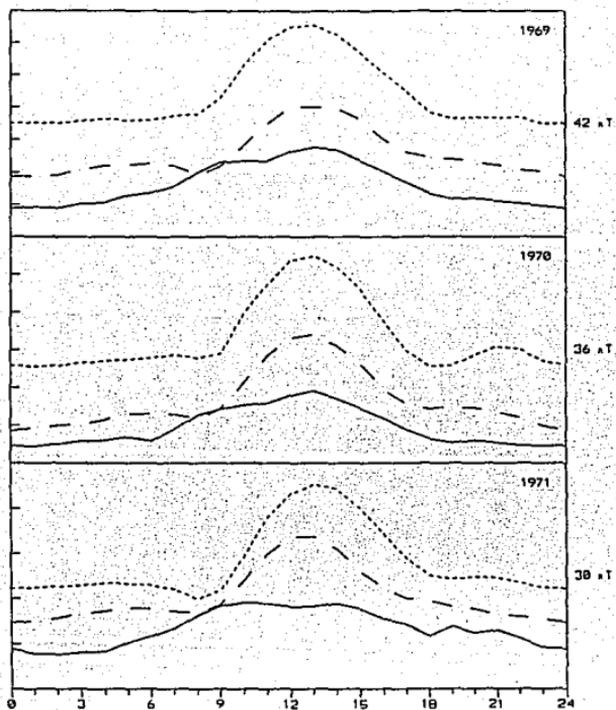


Fig.IV.4. Curvas de Variación Solar Diurna para Días Quietos.
 Observatorio magnético de Teoloyucan, Estado de Mexico.
 Línea continua: meses D, línea discontinua: meses E y línea
 punteada: meses J. Tiempo 90 W Meridiano de Greenwich.

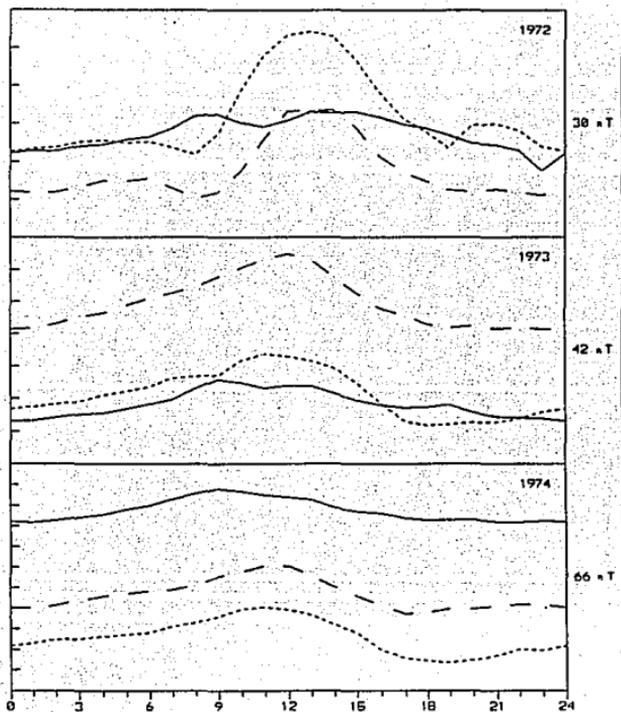


Fig.IV.5. Curvas de Variación Solar Diurna para Días Qulotos. Observatorio magnético de Teoloyucan, Estado de México. Línea continua: meses D, línea discontinua: meses E y línea punteada: meses J. Tiempo 90 W Meridiano de Greenwich.

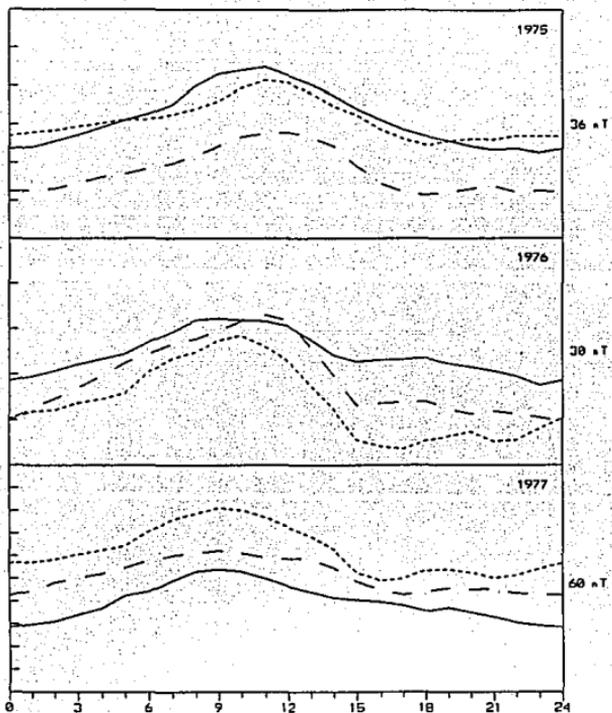


Fig.IV.6. Curvas de Variación Solar Diurna para Días Quietos. Observatorio magnético de Teoloyucan, Estado de México. Línea continua: meses D, línea discontinua: meses E y línea punteada: meses J. Tiempo 90 W Meridiano de Greenwich.

CAPÍTULO V

RESULTADOS

V.1 DESCRIPCIÓN

V.1.1 MESES "D"

Las curvas de $Sq_H(D)$ (ver figura V.1), se comportan en forma general de la siguiente manera, en la primera parte del día son ascendentes de las 00 horas hasta el medio día, después son descendentes hasta las 24 horas (tiempo 90° W de Gr.), dicho comportamiento se realiza con pendientes suaves, por lo anterior, Sq_H presenta cierta simetría alrededor del medio día, donde se localiza el máximo de Sq_H , esto para los años de 1966 a 1975, aunque para 1976 y 1977 el máximo se presenta alrededor de las 9 horas. Otra característica que resalta del grupo de curvas es la tendencia de aumento en la amplitud de 1966 a 1973 después un descenso de la amplitud de 1973 a 1976. Es también notorio que el nivel de las curvas para 1966 y 1976 son semejantes.

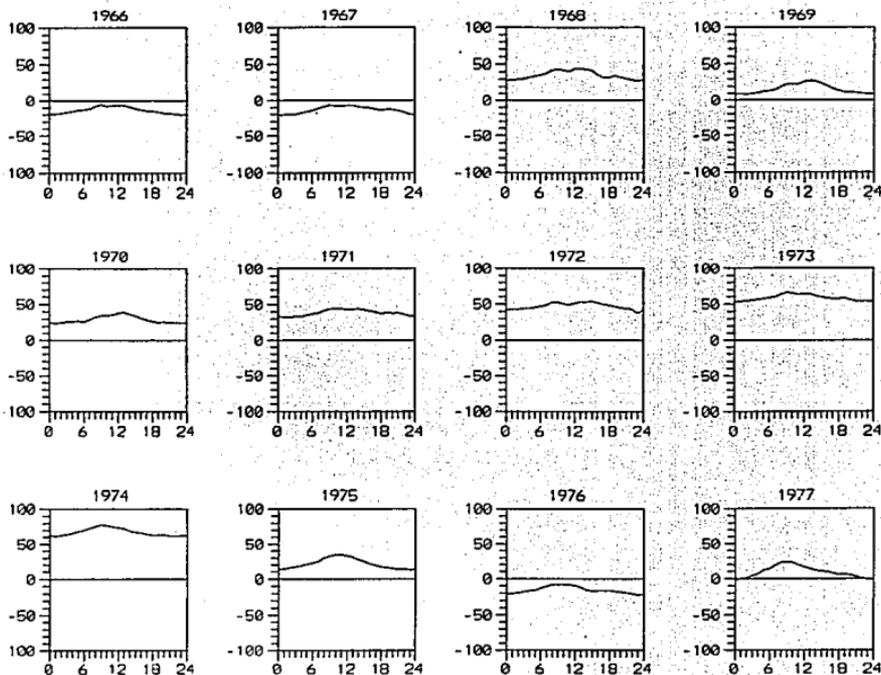


Fig.V.1. Curvas de Sq para los meses D (Nov.,Dic.,Ene.,Feb.) Soledad de Invierno. escala horizontal (tiempo local en horas), escala vertical (nT).

V.1.2 MESES "E"

Este grupo de curvas de $Sq_H(E)$ (ver figura V.2), tienen una forma general diferente a las descritas anteriormente, ya que, presentan una cresta bien definida alrededor del medio día, antes y después de esta cresta el valor se mantiene más o menos constante al valor de las 00 horas, esto para los años de 1966 a 1972. Para el resto de los años considerados en este trabajo la forma de las curvas es antisimétrica respecto del medio día es decir en la primera mitad del día tienen pendientes positivas y para la segunda mitad del día tienen pendientes negativas. De la misma forma que para los meses D, se presenta un incremento en la amplitud de 1966 a 1973 y un descenso de 1973 a 1976, y también para esta época los niveles de los años 1966 y 1976 son semejantes.

V.1.3 MESES "J"

Este grupo de curvas de $Sq_H(J)$ (ver figura V.3), tienen forma semejante a la de las curvas de $Sq_H(E)$, sólo que para $Sq_H(J)$ la amplitud de la cresta es mayor. De la misma manera que $Sq_H(D)$ y $Sq_H(E)$, la amplitud de las curvas de $Sq_H(J)$ aumenta de 1966 a 1973, y disminuye de 1973 a 1976, también para ésta época los niveles de las curvas de los años 1966 y 1976 son semejantes.

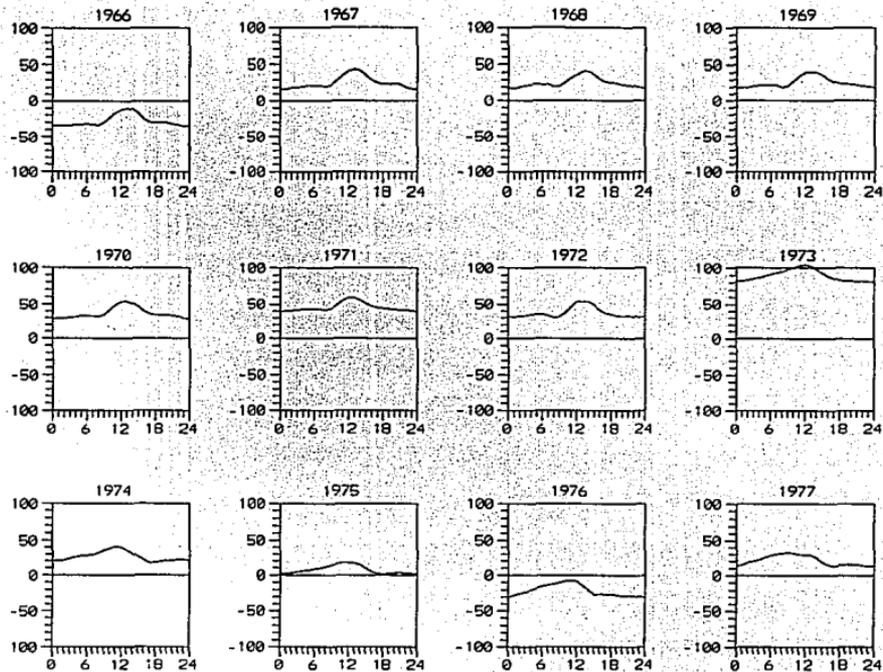


Fig.V.2. Curvas de Sq para los meses E (Mar.,Abr.,Sep.,Oct.), Equinoccios.
escala horizontal (tiempo local en horas), escala vertical (nT).

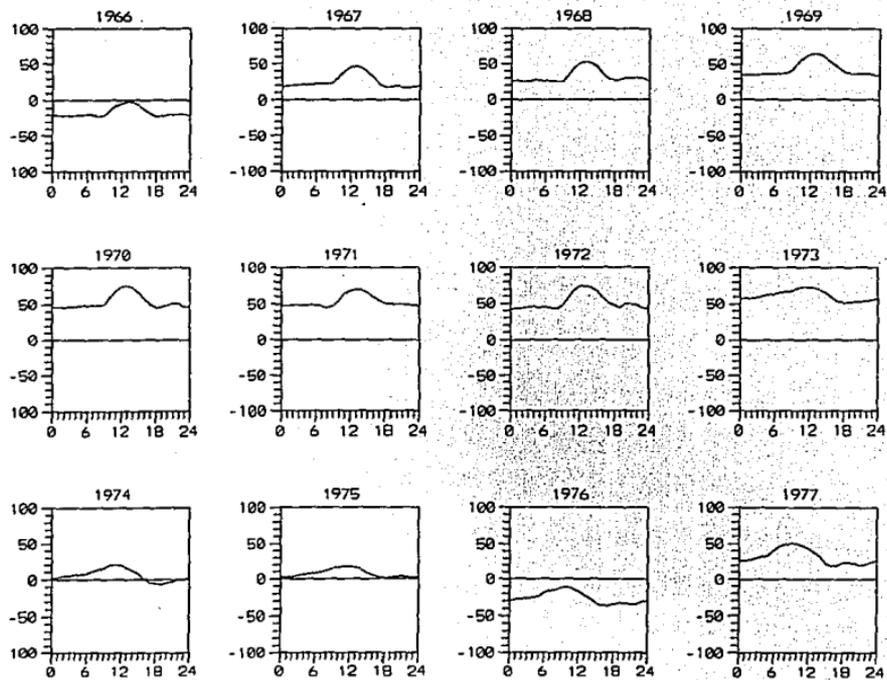


Fig.V.3 Curvas de Sq para los meses J (May.,Jun.,Jul.,Ago.) Solsticio de Verano. escala horizontal (tiempo local en horas), escala vertical (nT).

V.1.4 CURVAS ANUALES DE Sq_H .

Las curvas anuales de Sq_H (ver figura V.4), se obtienen de promediar los valores de los tres tipos de curvas $Sq_H(D)$, $Sq_H(E)$ y $Sq_H(J)$ correspondientes de cada año, estas curvas anuales se obtienen para hacer resaltar los cambios durante el ciclo solar eliminando en gran medida la variación estacional mediante el promedio, las características dominantes de Sq_H y poder hacer un análisis de tales características. La primera de éstas características es que en la forma de la curva se presenta la cresta alrededor del medio día, como en $Sq_H(E)$ y $Sq_H(J)$, sólo que con amplitud intermedia, esto concuerda con el hecho de que la variación Sq presenta su máxima intensidad al medio día en tiempo local. La segunda característica dominante, es el incremento de la amplitud de 1966 a 1973, y un descenso de 1973 a 1976. La tercera características de este grupo, es que las curvas para 1966 y 1976 tiene aproximadamente el mismo nivel.

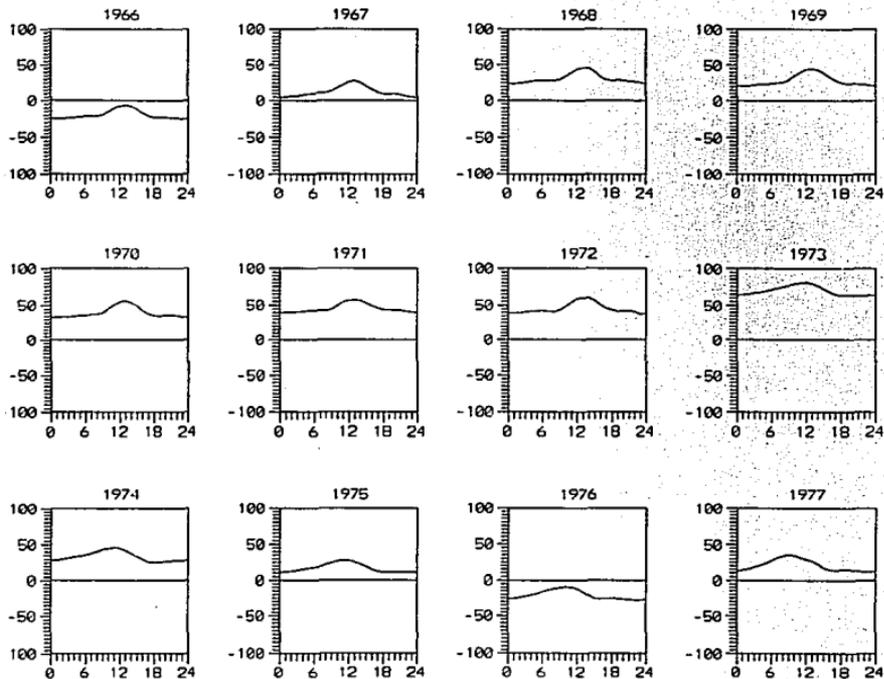


Fig.V.4 Curvas de Sq Anuales, con modelo de V.S. lineal (1966-1977).
 escala horizontal (tiempo local en horas), escala vertical (nT).

V.2 ANÁLISIS.

De las características de las curvas de Sq_H se puede hacer la siguiente observación, si se consideran a los años 1966 y 1976 como el inicio y fin de un ciclo respectivamente, ya que, poseen el mismo nivel de amplitud respecto a la línea base (Variación Secular), esto por el incremento de la amplitud de 1966 a 1973, años de mínima y máxima amplitud respectivamente y el descenso de amplitud de 1973 a 1976 año de mínima amplitud. Se puede decir que en estas características se reflejan los efectos del ciclo de actividad solar sobre la Variación Solar Diurna para Días Quietos de la componente horizontal Geomagnética".

Respecto a la tercera característica se puede atribuir la diferencia de amplitud de la cresta entre los meses E y J, a que en los meses J o de Verano la radiación solar incide sobre la atmósfera con ángulos mayores a los de incidencia en los meses E o meses equinocciales, esto es porque en los meses J existe mayor cantidad de ionización en la atmósfera que en los meses E.

La notoria variación en la amplitud de las curvas Sq_H anuales respecto de la línea base, con el tiempo, como se describe en la sección anterior, sugiere que existe una dependencia con el ciclo de actividad solar, presentándose un retraso en la amplitud máxima de la variación Sq_H , con respecto al máximo del ciclo solar, éste retraso es de 4 años.

Los rangos (rango es la diferencia entre el máximo y mínimo) de variación de las curvas Sq_H se presentan en la tabla V.1, y las relaciones de amplitud entre las diferentes épocas y amplitud anual se presentan en la tabla V.2. Que se muestran a continuación.

TABLA 2

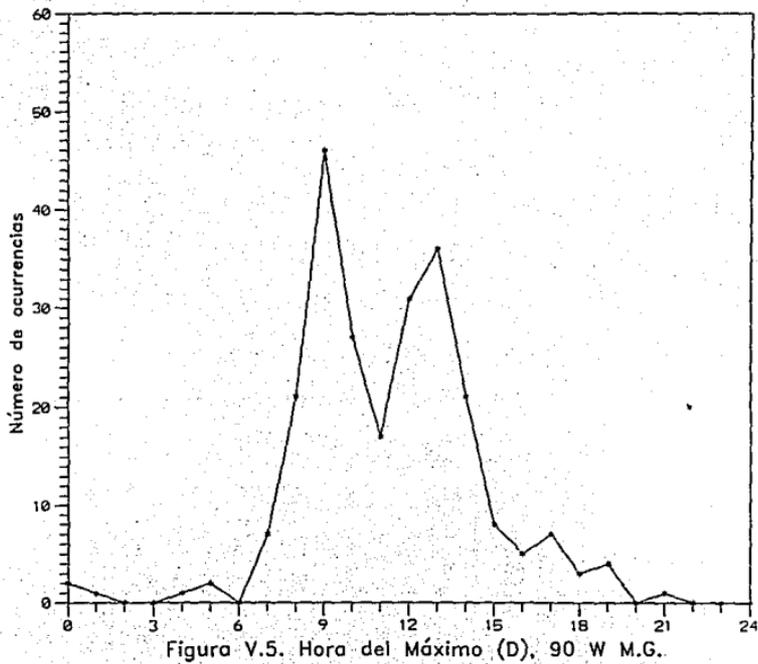
año	Máximo de Sq. hora 90°W de M. G.				Amplitud de la curva Sq (valores en nT)			
	D	E	J	A	D	E	J	A
1966	9	13	13	13	14.96	24.28	20.65	19.01
1967	9	13	13	13	14.74	26.90	31.17	23.54
1968	13	13	13	13	16.21	23.83	28.43	22.01
1969	13	13	13	13	18.92	21.62	30.60	23.67
1970	13	13	13	13	14.72	25.59	29.85	23.19
1971	10	13	13	13	11.42	19.01	25.41	17.37
1972	15	14	13	13	15.62	23.47	32.55	23.03
1973	9	12	11	12	12.82	23.44	22.22	17.49
1974	9	11	11	11	16.43	23.43	25.97	19.97
1975	11	12	11	11	22.28	16.01	16.88	17.29
1976	9	11	10	10	14.87	23.28	25.35	18.45
1977	9	9	9	9	25.61	18.95	32.33	23.97
Promedios					16.55	22.48	26.78	20.75

TABLA 3

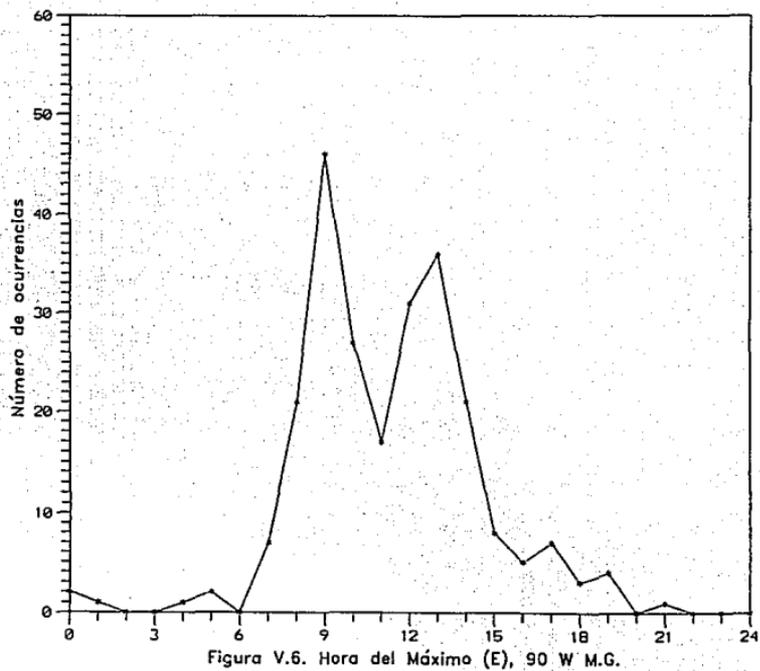
año	Relación de Amplitudes					
	E/D	J/D	J/E	D/A	E/A	J/A
1966	1.6	1.4	0.9	0.79	1.28	1.09
1967	1.8	2.1	1.2	0.63	1.14	1.32
1968	1.5	1.8	1.2	0.74	1.08	1.29
1969	1.1	1.6	1.4	0.80	0.91	1.29
1970	1.7	2.0	1.2	0.63	1.10	1.29
1971	1.7	2.2	1.3	0.66	1.09	1.46
1972	1.5	2.1	1.4	0.68	1.02	1.41
1973	1.8	1.7	0.9	0.73	1.34	1.27
1974	1.4	1.6	1.1	0.82	1.17	1.30
1975	0.7	0.8	1.1	1.29	0.93	0.98
1976	1.6	1.7	1.1	0.81	1.26	1.37
1977	0.7	1.3	1.7	1.07	0.79	1.35
Prom.	1.4	1.6	1.2	0.80	1.09	1.29

En promedio el rango en los meses D es de 16.55 nT, para los meses E es de 22.48 nT, para los meses J es de 26.78 nT y el promedio anual de 20.75. De las relaciones de las amplitudes dadas en la tabla 3. Se observa que en promedio el rango en los meses E es mayor en un 40% que en los meses D y para los meses J es mayor en un 60%. La comparación de las amplitudes con el promedio anual se tienen los siguientes resultados, meses D 80%, meses E es prácticamente el mismo valor y para los meses J es de 30% mayor. Las amplitudes de Sq_H están directamente relacionadas con la conductividad o bien con la ionización de la atmósfera, estos resultados por tanto coinciden con los registros de ionización para los respectivos meses.

En teoría el máximo de Sq , debe presentarse al medio día hora local, sin embargo, en este estudio la hora de ocurrencia del máximo se presenta en una diversidad de tiempo, que va de las 8 horas a las 13 horas (tiempo $90^\circ W$ M.G.), tabla 2. En las figuras (V.5), (V.5) y (V.7), se presentan las gráficas del número de ocurrencias en cada hora, en las que se consideraron todos los días de cada época, en estas gráficas, en general las mayores frecuencias de ocurrencia del máximo se presentan alrededor del medio día. Aunque para los meses D y meses E existe una tendencia hacia antes del medio día (11 horas), y para los meses J la tendencia es hacia después del medio día (13 horas).



CON TESIS NO SE
SALIR DE LA BIBLIOTECA



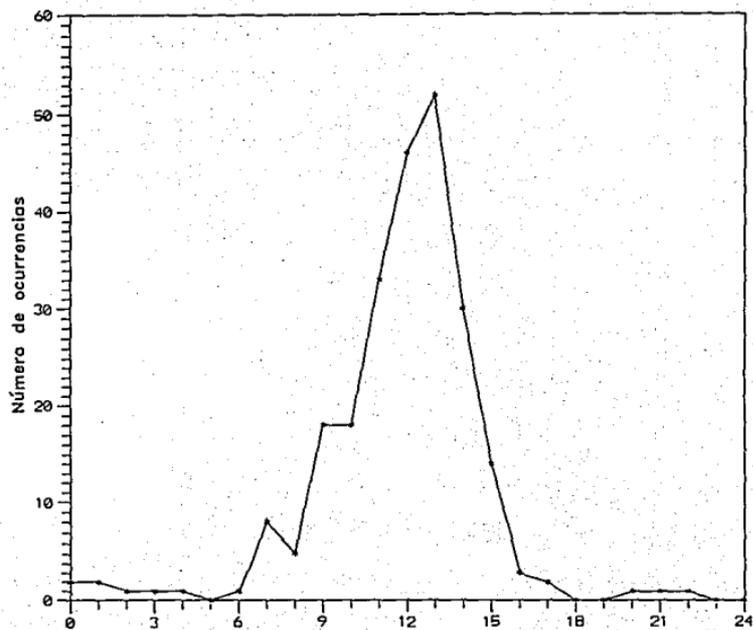
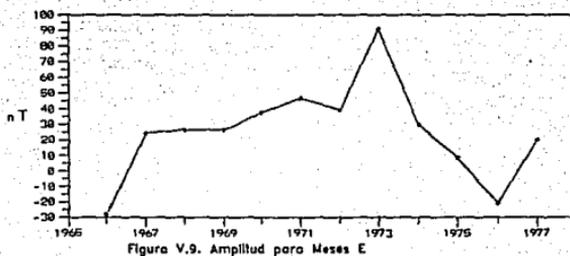
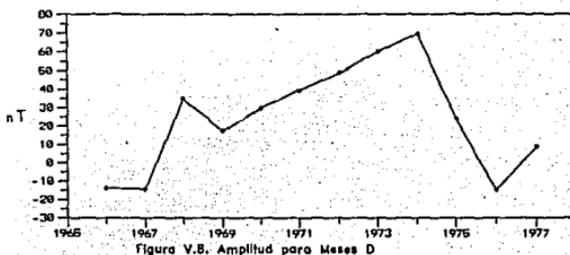


Figura V.7. Hora del Máximo (J), 90 W M.G.

Para analizar la dependencia de Sq_H con el ciclo de actividad solar, se cálculo el promedio de los 25 valores horarios de Sq_H para cada época y se graficaron contra el tiempo. Las figuras (V.8), (V.9) y (VI.0), muestran que la amplitud máxima de Sq_H , en general se presenta en 1973 para los meses J y meses E; en 1974 para los meses D, y la amplitud mínima se presenta en los años 1966 y 1976, indicando un comportamiento semejante para los tres grupos de meses.



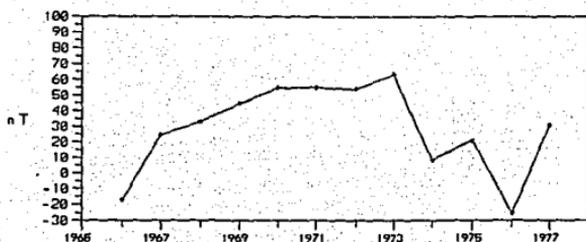


Figura V.10. Amplitud para Meses J

Los rangos de variación de Sq_H se muestran en las figuras (V.11), (V.12) y (V.13). Mediante un ajuste lineal de los rangos para los tres grupos de meses (ves figura V.14), se confirma que, en el verano la variación Sq_H es mayor que los meses de primavera y otoño y que en los meses de invierno la variación Sq_H es menor.

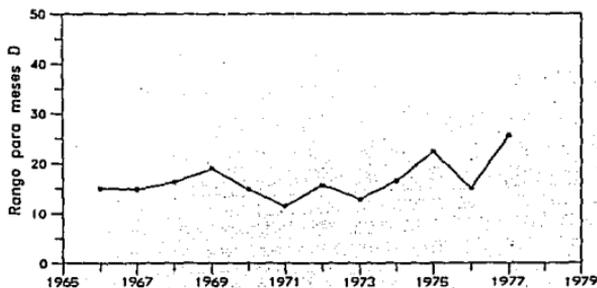
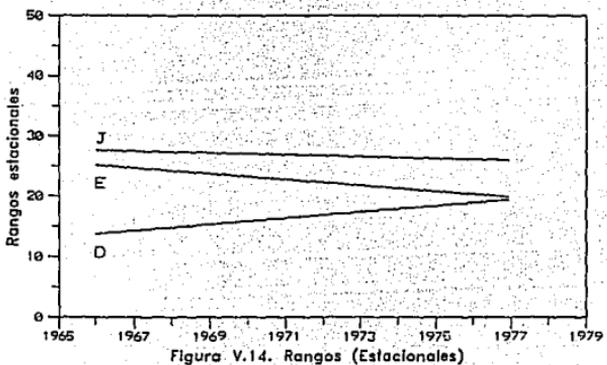
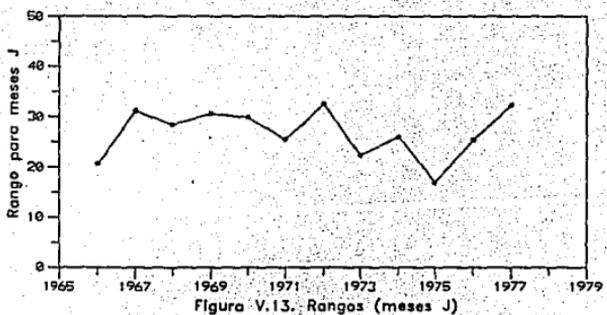
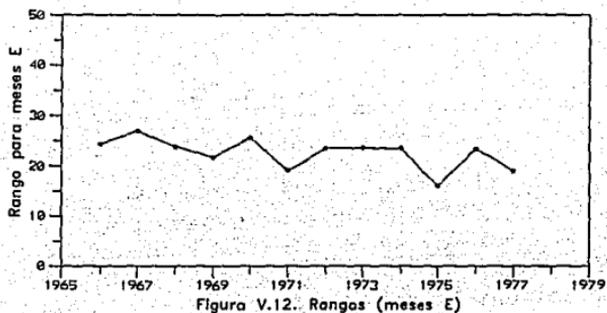


Figura V.11. Rangos (meses D)



Finalmente para desechar los efectos estacionales, se promedian los rangos de los tres grupos de meses, para así obtener los rangos anuales de Sq_H , mostrados en la figura (V.15), donde se puede observar que existe una modulación de la variación Sq_H por el ciclo de actividad solar.

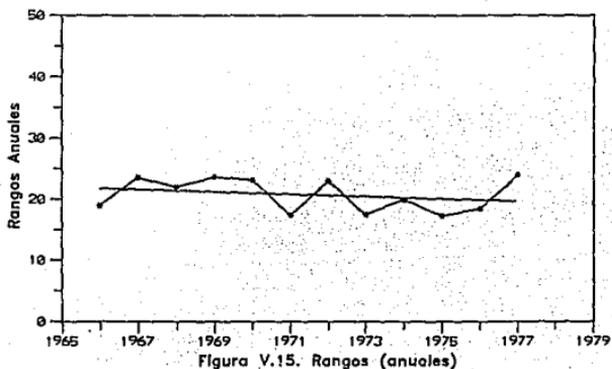


Figura V.15. Rangos (anuales)

CONCLUSIONES

Ya que el objetivo de este trabajo es el de analizar la dependencia de la Variación Solar Diurna para Días Quietos Sq_H en la componente horizontal geomagnética, respecto de ambos; el ciclo de actividad solar y la posición relativa entre el eje de rotación terrestre y la línea Sol-Tierra. Se presentan, de los resultados obtenidos las siguientes conclusiones:

Respecto al ciclo de actividad solar.

1.- De los resultados obtenidos se observa una modulación del rango de variación de Sq_H , respecto de la variación en la emisión de radiación solar.

2.- El ciclo de actividad solar es el factor principal de las variaciones en la magnitud de la componente horizontal geomagnética. Claro está, después de haber corregido por Variación Secular. Es decir, la variación en la intensidad de la componente horizontal geomagnética se debe primero, a la Variación Secular y segundo, a los efectos producidos por el ciclo de actividad solar.

Respecto de las épocas del año

Dos aspectos son importantes en los efectos de la posición relativa entre la línea Sol-Tierra y el eje de rotación terrestre, sobre las curvas de la variación Sq_H . (efectos estacionales).

1.- El rango de amplitud de la variación Sq_H es máximo para la época solsticio de Verano, mínimo para la época del solsticio de Invierno e intermedio para la época de equinoccios. Y estos últimos muy parecidos a los rangos anuales.

2.- Morfología de la variación Sq_H . En éste sentido la forma de las curvas para Sq_H , varían notoriamente entre las épocas de solsticio de invierno y las épocas de los equinoccios y solsticio de verano. Presentándose en los dos últimos una semejanza en la forma de la curva, esto es, con una cresta bien definida en las horas diurnas y con el máximo alrededor del medio día. Las curvas para los solsticios de Invierno no presentan esa cresta, sino más bien son monotonamente crecientes hasta el medio día donde se presenta el máximo, para después decrecer al valor mínimo inicial. Estas características generales se deben a la diferencia en el ángulo de ataque de la radiación solar en las diferentes épocas.

Perspectivas. Un análisis más completo de la variación Sq_H podría contemplar un intervalo de tiempo de por lo menos 22 años, para ser caracterizada durante dos ciclos solares, y ratificar su comportamiento. Además de esto, a los días quietos seleccionados para futuros análisis, se recomienda se tomen valores promedio cada media hora, para poder detectar la diferencia en tiempo del máximo de Sq_H , entre los solsticios de Verano e Invierno.

Tomando en cuenta que este trabajo puede contener omisiones y errores involuntarios, considerémoslo como una contribución positiva al estudio del geomagnetismo en México. Y se espera sea útil para otros estudios en este campo.

A P E N D I C E A

Lista de los Días Quietos usados para este trabajo. Todos los días considerados fueron tomados de los reportes anuales del Observatorio Magnético de Teoloyucan. Los días reportados como quietos pero que en los magnetogramas presentaban más de tres horas consecutivas sin registro no fueron considerados para este análisis y se sustituyen por los días del mismo mes que presentaron semejante actividad geomagnética, tales días están marcados con *.

	1965	1966	1967	1968	1969	1970
E N E		01	04	04	06	06
		05	05	08	10	07
		09	12	09	22	10
		13	24	10	23	25
		16	31	25	29	26
F E B		01	02	06	04	06
		07	03	07	07	07
		17	12	23	09	20
		26	14	25	17	21
		28	18	26	18	22
M A R		02	02	01	03	11
		07	11	08	04	12
		18	12	09	13	14
		24	14	21	27	21
		31	16	22	28	22
A B R		10	11	08	08	01
		11	13	09	10	10
		12	14	19	19	11
		19	27	20	23	13
		27	30	25	26	14
M A Y		07	06	05	04	08
		09	09	06	07	09
		10	16	16	11	10
		19	21	25	26	11
		29	23	28	29	26
J U N		10	01	05	03	06
		18	03	06	06	09
		22	11	21	22	22
		28	12	24	29	23
		29	23	25	30	29

	1965	1966	1967	1968	1969	1970
J U L		02 03 04 06 25	02 03 08 09 31	06 09 17 20 24	03 04 05 18 29	07 08 19 20 28
A G O		02 16 17 22 28	01 02 03 09 28	01 02 25 29 30	01 16 21 22 30	01 05 20 21 24
S E P		12 17 18 21 22	04 06 24 25 26	17 18 19 25 27	01 02 13 22 26	06 07 11 23 26
O C T		02 03 20 21 22	03 19 20 21 26	04 11 21 22 23	08 14 23 29 30	08 09 15 21 26
N O V	10 14 16 24 26	06 09 14 22 23	06 07 18 19 21	06 12 19 21 30	01 14 15 16 17	01 13 15 29 30
D I C	07 14 15 17 31	03 11 12 18 31	11 12 13 24 25	07 09 15 17 26	01 17 21 28 30	01 02 11 17 18

	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977
E N E	07	06	02	07	11	02	02
	08	07	03	08	12	08	09
	09	08	07	11	21	09	21
	20	14	18	13	22	15	26
	21	31	22	23	25	28	27
F E B	04	05	12	05	04	06	04
	06	09	13	07	20	22	12
	11	12	18	08	22	23	16
	13	22	19	09	27	24	26
	22	27	20	18	28	25	27
M A R	07	05	03	13	07	21	02
	21	10	07	15	08	22	03
	22	11	08	18	19	23	04
	28	12	11	19	20	24	05
	29	19	14	20	21	25	07
A B R	02	03	06	12	02	15	13
	08	07	07	13	03	18	22
	20	08	10	14	15	19	23
	24	16	22	15	28	20	27
	25	27	26	16	30	21	28
M A Y	11	07	24	01	11	01	21
	12	08	25	11	12	09	26
	13	21	29	12	15	13	27
	20	22	30	13	24	14	29
	22	23	31	14	31	27	30
J U N	07	02	07	07	08	01	09
	09	08	17	08	10	02	12
	10	11	21	09	21	14	13
	19	12	22	21	23	18	15
	20	21	25	25	24	22	22

	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977
J U L	10	04	04	01	02	06	23
	11	05	05	17	03	12	25
	17	14	06	19	12	13	26
	20	29	07	21	23	20	27
	29	31	10	31	30	21	28
A G O	03	03	11	01	03	06	21
	06	14	16	13	04	11	22
	19	23	17	14	13	12	28
	20	24	18	15	18	15	30
	27	25	19	17	23	17	31
S E P	02	19	13	09	03	01	04
	21	20	14	10	04	09	05
	22	21	19	11	05	10	06
	23	22	29	12	20	24	07
	29	26	30	17	23	28	29
O C T	18	05	01	04	02	03	07
	19	06	07	05	18	04	09
	21	08	25	07	24	08	10
	26	09	26	08	25	11	20
	27	17	27	31	26	29	21
N O V	02	05	01	01	08	03	
	14	08	11	02	13	06	
	15	10	12	03	14	07	
	16	11	19	29	23	24	
	17	14	30	30	27	28	
D I C	06	05	13	01	07	05	
	07	06	24	05	20	19	
	14	09	25	06	21	21	
	15	20	26	14	24	23	
	28	27	27	30	31	26	

AGRADECIMIENTOS

Al departamento de Geomagnetismo del Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México. Especialmente al Fís. Adolfo León Orozco Torres, por la dirección de la tesis y por sus valiosos comentarios y sugerencias en la revisión de la parte escrita.

A los doctores Jaime Urrutia F. y Oscar Campos E., así como al M.C. J. Antonio López Cruz Abeyro y al Ing. J. Esteban Hernández Q., por aceptar formar parte del jurado de examen profesional.

A mis amigos, profesores y compañeros de la facultad de ingeniería.

A todos ellos gracias

BIBLIOGRAFÍA

- Alcántara Sánchez, G. A., Análisis de la Variación Solar Diaria para Días Quietos en México. Tesis de licenciatura. U.N.A.M., Facultad de Ciencias. 1978.
- Afanas'eva, V.I., Diurnal Variations of the Magnetic Field of the Earth and the Structure of the Terrestrial Magnetosphere. Geomagnetism and Aeronomy. Vol 24, 1984. 379-384.
- Bhargava, B.N. and Yacob A., Solar Cycle Response in the Horizontal Force of the Earth's Magnetic Field. Journal of Geomagnetism and Geoelectricity. Vol 21, No. 1, 1969, 385-397.
- Chapman, S. and J. Barles, Geomagnetism, Oxford Univ. Press. London and New York, Vol I. 1940.
- Foukal, Peter V., The Variable Sun. Scientific American, February 1990. 26-33.
- Gupta, J.C. and Mallin, S.R.C., Seasonal Variations in the Solar and Lunar Daily Geomagnetism Variations. Geophys. J. R. Astr. Soc. (1972) 30, 11-18.

Leroy R. Alldredge, Effects of Solar Activity on Anual Means of Geomagnetic Components. Journal of Geophysical Research. Vol 8, No 17, 1976, 2990-2996.

Malin, S.R.C., Anna Cecere and Palumbo A., The Sunspot Cycle Influence on Lunar and Solar Dally Geomagnetic Variation. Geophys. J. R. astr. Soc. (1975) 41, 115-126.

Matsushita, S. and Maeda, H. (1967). On the Geomagnetic Solar Quiet Daily Variation field during the I.G.Y. J. Geophys. Res. Vol 70, 2535-2558.

Grozco Torres, A.L., El Campo Geomagnético y sus Fuentes Externas. Tesis de licenciatura. U.N.A.M., Facultad de Ciencias. 1970.

Parkinson W.D. (1983), Introduction to Geomagnetism.

Sakurai Kunitomo, Magnetic Structure of Sunspot Groups which Produce Solar Proton Flares. Journal of Geomagnetism and Geoelectricity. Vol 21, No. 1, 1969. 461-749.

Suzuki Akira, A New Analysis of the Geomagnetic Sq Field., J. Geomag. Geoelectr. Vol 25, 1973. 259-280.