



Universidad de Concepción
Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas
Departamento de Geofísica
Concepción, Chile.

**ASOCIACIÓN ENTRE VIENTOS
TERMOFÉRICOS Y
CONCENTRACIÓN ELECTRÓNICA
MÁXIMA DE LA IONÓSFERA SOBRE
CONCEPCIÓN E ISLAS ARGENTINAS.**

Manuel Alejandro Bravo Sepúlveda

17 de enero de 2011

TESIS PRESENTADA PARA OPTAR AL
TÍTULO DE GEOFÍSICO



Índice general

Resumen	XI
Introducción	XIII
1. Concentración electrónica en la atmósfera	1
1.1. Historia	2
1.2. Capas de la Ionósfera	3
1.3. Formación de una capa	5
1.3.1. Producción	5
1.3.2. Pérdida	6
1.3.3. Transporte difusivo	9
1.4. Variabilidad de la concentración electrónica	11
2. Fenómenos de transporte	13
2.1. Mareas	15
2.2. Ondas de gravedad	16
2.3. Vientos Termosféricos	17
2.3.1. Modelo del Servomecanismo	19
2.3.2. Modelo HWM	20
3. Asociación entre NmF2 y velocidad de vientos termosféricos	21
3.1. Planteamiento del problema	21
3.2. Hipótesis	22
3.3. Objetivos	22
3.3.1. Objetivo General	22
3.3.2. Objetivos específicos	22
4. Materiales y métodos	23
4.1. NmF2	23
4.2. Vientos termosféricos meridionales	25
5. Resultados	29
5.1. NmF2	29
5.1.1. Modelo de 2 componentes NmF2	30
5.1.2. Comportamiento Diurno NmF2	32

5.2. Vientos	34
5.2.1. HWM90	34
5.2.2. Servomecanismo	37
5.3. Asociación entre vientos termosféricos y NmF2	38
6. Discusión	43
7. Conclusiones	47
A. Seis posibles explicaciones de las variaciones anual y semianual de NmF2.	55
B. Modelo de 2 componentes con valores medianos mensuales de foF2 representativos de condiciones geomagnética quietas	57
C. Componentes anual y semianual para Concepción entre los años 1958-94.	59
D. Clasificación de espectros de wavelets según cuadro 5.1.	61

Índice de figuras

1.1.	<i>Distribución de temperatura (rojo) y de masa molecular (azul) con la altura (Giraud y Petit, 1978).</i>	1
1.2.	<i>Distribución de gases en la atmósfera (Kelley, 2009).</i>	2
1.3.	<i>Capas de la Ionósfera y la absorción de radiación solar (http://salonhogar.net/Ciencias/La_Atmosfera.htm).</i>	4
1.4.	<i>Curvas de producción tipo Chapman, para diferentes ángulos cenitales χ, las alturas son medidas en unidades de altura de escala H desde el nivel cuando $\chi = 0$. Las tasas de producción q son medidas en unidades de q_0 (Ratcliffe, 1972).</i>	6
1.5.	<i>Distribución electrónica con la altura, de acuerdo a la posición de una altura de transición z_t entre mecanismos α y β con respecto a la altura del máximo de producción z_m. (a) Tasa de Ionización q en función de altura. (b), (d), (e) y (f) n_e como función de la altura, suponiendo diferentes procesos de recombinación, y (c) coeficiente de recombinación β en función de la altura (Aikio y Nigrén, 2008).</i>	8
2.1.	<i>Temperatura exosférica para alta actividad solar y condiciones geomagnéticas quietas, de acuerdo al modelo MSIS83. Las flechas muestran las direcciones aproximadas de los vientos termosféricos. Para el equinoccio de Marzo (izquierda) y el solsticio de Junio (derecha). (Rishbeth, 1988)</i>	17
2.2.	<i>Mecanismo transporte por viento termosférico neutro. I es la inclinación del campo geomagnético. (Burgos, 2002)</i>	18
4.1.	<i>Situación geomagnética (izquierda) y geográfica (derecha) de las estaciones. En la parte geomagnética, la figura de arriba corresponde a la declinación y la de abajo a la inclinación.</i>	24
4.2.	<i>Serie de tiempo de NmF2 para las 00 hrs.(negro segmentado) y 12 hrs.(azul continua), para las estaciones de Concepción (arriba) e Islas Argentinas (abajo).</i>	25
4.3.	<i>Evolución diurna de NmF2 en enero (línea roja continua) y en julio (línea negra segmentada) de 1974, para Concepción (izquierda) e Islas Argentinas (derecha). Las barras verticales representan los rangos intercuartiles.</i>	26

4.4.	<i>Evolución diurna de la velocidad del viento termosférico meridional, según el Modelo Servo, en enero (línea roja continua) y en julio (línea negra segmentada) de 1987, para Concepción.</i>	27
4.5.	<i>Evolución diurna de la velocidad del viento termosférico meridional, según el Modelo HWM90, en enero (línea roja continua) y en julio (línea negra segmentada) de 1974, para Concepción (izquierda) e Islas Argentinas (derecha).</i>	28
5.1.	<i>Ejemplo para las 18 hrs LT (75°W) de valores medianos mensuales de NmF2 (arriba) y su respectivo espectro de wavelet (abajo) para Concepción. La barra de colores muestra la potencia espectral, la línea segmentada los periodos significativos y la línea delgada los límites de validez o cono de influencia.</i>	29
5.2.	<i>Ejemplo del modelo de dos componentes para la evolución anual de valores medianos mensuales de NmF2. Arriba: los peores casos, izquierda, Concepción a las 08 hrs LT (75°W),1975; derecha, Islas Argentinas, 09 hrs LT (75°W),1975. Abajo: mejores casos, izquierda Concepción, 22 hrs LT (75°W),1975; derecha, Islas Argentinas 07 hrs LT (75°W),1979. Los puntos son los valores observados, la línea azul la componente anual mas el promedio y la línea negra corresponde a la componente anual mas la semianual mas el promedio. La línea azul (abajo) es la componente anual y la roja la componente semianual. Las barras verdes muestran el rango intercuartil menor y mayor de los valores medianos mensuales de NmF2, para la hora determinada. Los valores son pequeños y sólo se puede apreciar el rango intercuartil para marzo en la figura inferior derecha.</i>	31
5.3.	<i>Ejemplo de comparación para trio de años definidos por actividad solar, en este caso, baja actividad solar 1974-75-76 (de izquierda a derecha) para Islas Argentinas. Varianza explicada (arriba), fase (centro) y amplitud (abajo) de las componentes anual y semianual del modelo de 2 componentes para la evolución anual de valores medianos mensuales de NmF2. Los triángulos negros es la suma de la componente anual y semianual, los círculos azules la componente anual, y los cuadrados la componente semianual.</i>	32
5.4.	<i>Lo mismo que en la figura 5.3, pero para los años promediados, en baja actividad solar. A la izquierda, Concepción y a la derecha, Islas Argentinas.</i>	33
5.5.	<i>Lo mismo que en la figura 5.4 para alta actividad solar.</i>	34

5.6.	<i>Ejemplo del modelo de dos componentes para la evolución anual de valores medianos mensuales de vientos termosféricos según el modelo HWM. Arriba: los peores casos, izquierda, Concepción a las 05 hrs LT (75°W), alta actividad solar; derecha, Islas Argentinas, 11 hrs LT (75°W), alta actividad solar. Abajo: mejores casos, izquierda Concepción, 04 hrs LT (75°W), baja actividad solar; derecha, Islas Argentinas 15 hrs LT (75°W), baja actividad solar. Los puntos son los valores observados, la línea azul la componente anual más el promedio y la línea negra corresponde a la componente anual más la semianual más el promedio. La línea azul (abajo) es la componente anual y la roja la componente semianual.</i>	35
5.7.	<i>Varianza explicada (arriba), fase (centro) y amplitud (abajo) de las componente anual y semianual del modelo de 2 componentes para la evolución anual de valores mensuales de vientos termosféricos meridionales, según Modelo HWM para Concepción (izquierda) e Islas Argentinas (derecha) en bajo nivel de actividad solar. (Se conservan la nomenclatura anterior).</i>	36
5.8.	<i>Lo mismo que en la figura 5.7 para alta actividad solar.</i>	37
5.9.	<i>Varianza explicada (arriba), fase (centro) y amplitud (abajo) de las componente anual y semianual del modelo de 2 componentes para la evolución anual de valores mensuales de vientos termosféricos meridionales, según el Servomecanismo para Concepción. En la izquierda, baja actividad solar, en la derecha, alta actividad solar. (Se conservan la nomenclatura anterior).</i>	38
B.1.	<i>Varianza explicada, fase y amplitud para valores de foF2 representativos de actividad geomagnética quieta $A_p \leq 20$, para Concepción en años 1974-75-76 (de izquierda a derecha). Varianza explicada (arriba), fase (centro) y amplitud (abajo) de las componentes anual y semianual del modelo de 2 componentes para la evolución anual de valores medianos mensuales de foF2. Los triángulos magenta es la suma de la componente anual y semianual, los círculos azules la componente anual, y los cuadrados la componente semianual</i>	58
B.2.	<i>Lo mismo que la figura anterior pero para años 1979-80-81.</i>	58
C.1.	<i>Valores anuales de flujo solar F10.7 cm. (arriba) y valores medios de la amplitudes (centro) y fases (abajo) de las componentes anual (azul) y semianual (roja). (izquierda) Para horas del día, 10-15 hrs. (derecha) Para horas de la noche, 22-03 hrs. en Concepción (Bravo et al., 2010).</i>	60

D.1. <i>Series de tiempo y espectrogramas respectivos de la concentración electrónica máxima de la ionosfera, en unidades de frecuencia de plasma, foF2 para Concepción (arriba) e Islas Argentinas (abajo), para el INTERVALO I, ambos lugares a las 06 hrs. LT (75° W). En rojo indica valores interpolados de la serie de tiempo por falta de observaciones. La barra de colores muestra la potencia espectral, y la línea negra el cono de significancia.</i>	61
D.2. <i>Lo mismo que la figura D.1 pero para el INTERVALO II, Concepción, 09 hrs. e Islas Argentinas, 09 hrs. LT (75° W).</i>	62
D.3. <i>Lo mismo que la figura D.1 pero para el INTERVALO III, Concepción, 17 hrs. e Islas Argentinas, 14 hrs. LT (75° W).</i>	62
D.4. <i>Lo mismo que la figura D.1 pero para el INTERVALO IV, Concepción, 22 hrs. e Islas Argentinas, 18 hrs. LT (75° W).</i>	63

Índice de cuadros

4.1. Información geofísica de las estaciones utilizadas. Las coordenadas geomagnéticas corregidas corresponden a una altura de 250 km en 1986.	23
5.1. Clasificación resumen del análisis a partir de observaciones de espectros de wavelets (Bravo et al., 2008).	30
5.2. Resumen de la varianza explicada (en %) de NmF2 con el modelo de dos componentes.	32
5.3. Asociación entre componentes de NmF2 y vientos HWM.	39
5.4. Resumen de correlación entre NmF2 y vientos HWM.	40
5.5. Resumen de correlación entre NmF2 y viento Servo.	41
6.1. Comparación entre amplitudes de componentes semianual de NmF2 [10^4cm^{-3}] de este trabajo y Ma et al.(2003). Las amplitudes fueron leídas de la figura 5.	44
6.2. Comparación entre las amplitudes relativas de componentes anual (A_1/A_0) y semianual (A_2/A_0) de NmF2 [10^4cm^{-3}] de este trabajo y Yu et al.(2004). Las amplitudes fueron leídas de las figuras 2 y 5.	44

Resumen

Se estudia la relación entre las evoluciones anuales de concentración electrónica máxima de la ionosfera (NmF2) y las evoluciones anuales de los vientos neutros de la termósfera sobre Concepción (36.8° S, 73.0° W) e Islas Argentinas (65.2° S, 64.3° W), Antártica. El sector de longitudes que se estudia es bastante significativo, ya que en este sector los fenómenos asociados a la radiación solar ondulatoria están mas separados de fenómenos asociados a la geometría del campo geomagnético que en otras partes del mundo, incluida la anomalía geomagnética del Atlántico Sur. Estudios anteriores indican que la evolución anual de la NmF2 muestra claramente una componente anual y otra semianual, cuyas importancias dependen drásticamente de la hora del día. En particular, durante el día la NmF2 es máxima en los equinoccios en lugar de serlo en verano, como se esperaría debido a las variaciones del ángulo cenital del sol, probablemente por la importancia de los fenómenos de transporte de gran escala en la determinación de la NmF2. Se espera que las componentes anual y semianual de los vientos termosféricos expliquen el comportamiento de la evolución anual de la NmF2, y con ello dar peso a una de las posibles explicaciones para la existencia de la componente semianual propuesta en otros estudios. Se analiza la serie de valores medianos mensuales de NmF2 para Concepción e Islas Argentinas, en un periodo de actividad solar alta (1979-1981) y baja (1974-1976), las velocidades medias mensuales de los vientos termosféricos calculados con 2 modelos para Concepción e Islas Argentinas: el modelo de viento Servo y el HWM90. Finalmente, se asocian las componentes anual y semianual de NmF2 con la evolución anual de los vientos termosféricos.

Introducción

Si se estudia la distribución de la temperatura de la atmósfera con la altura, se puede distinguir distintas capas o cascarones esféricos sobre la Tierra, como la tropósfera, la estratósfera, la mesósfera, la termósfera, pero si analiza su conductividad eléctrica, o la cantidad de iones y electrones libres que contiene, se puede ver que estos alcanzan máximos a alturas entre los 80 y 500 km. Es aquí donde se encuentra la *Ionósfera*, una región que fue un misterio para muchos científicos del siglo XIX.

La ionósfera, definida como la parte de la alta atmósfera en la cual los electrones libres son suficientemente numerosos como para influir en la propagación de ondas de radio, se encuentra en la termósfera, y es el resultado de la interacción entre la radiación solar y los gases atmosféricos, en presencia de un campo magnético. Sobre los 80 km de altura, las radiaciones ultravioleta extrema y X del sol producen disociación e ionización de gases. Aunque en la ionósfera se encuentra la mayor cantidad de gases ionizados, estos constituyen sólo el 0.1 % de la concentración del aire a unos 200 km. de altura, es decir, los gases en estado neutro siguen siendo mayoritarios en la ionósfera. Por otro lado, la ionósfera es eléctricamente neutra, el número de iones y el de electrones es el mismo (Rishbeth, 1988).

La concentración electrónica máxima de la ionósfera se encuentra entre los 200 y 500 km de altura. En este trabajo se presentará el estudio de variabilidad de la concentración electrónica de este máximo y se discutirá acerca sus posibles causas, sobre 2 localidades.

El trabajo se constituye de 2 partes. En la primera parte (capítulos 1, 2 y 3), se hace una descripción monográfica, considerando para el capítulo 1, los datos históricos, los procesos físicos y químicos que involucran la formación de la ionósfera, las distintas capas en que es subdividida, y la variabilidad de la concentración electrónica en el tiempo con sus respectivos forzantes.

En el capítulo 2 se considera los fenómenos de transporte a gran escala que están involucrados en la ionósfera. Se habla de mareas, ondas de gravedad y vientos termosféricos. De manera específica en este trabajo se utilizan 2 modelos de vientos termosféricos: el Servo mecanismo y el HWM90.

En el capítulo 3 se plantea el problema principal de este trabajo, el por qué aso-

ciar la concentración electrónica máxima con los vientos termosféricos, se establece la hipótesis, se discute la importancia del estudio y se presentan los objetivos de la tesis.

La segunda parte (capítulos 4, 5, 6 y 7) consiste en el trabajo con datos de concentración electrónica máxima y velocidades de vientos termosféricos, para intentar demostrar la hipótesis. En el capítulo 4 se explica la metodología utilizada. Los resultados obtenidos se presentan en el capítulo 5 y la discusión de los resultados se muestra en el capítulo 6. Finalmente, las conclusiones se presentan en el capítulo 7.

Al final de este trabajo, se incorporan apéndices, que desarrollan en mayor detalle, algunos conceptos o citas de resultados de trabajos anteriores, mencionados en esta tesis.

La idea de esta tesis nace de una tarea del curso de Física Solar Terrestre y se desarrollada en los cursos de Tópicos en Física. Durante su desarrollo se presentó en forma oral y en forma de póster en congresos. Finalmente se profundizó concluyendo en la presente Tesis.

Capítulo 1

Concentración electrónica en la atmósfera

La atmósfera está constituida por gases distintos, tanto neutros como ionizados, como se puede ver en la *figura 1.2*. La distribución de estos gases con la altura, al igual como lo hace la temperatura, divide regiones que tienen propiedades características, *figura 1.1*. Se entiende por *Homósfera* a una región donde los gases están bien mezclados y se comportan como uno sólo constituyente y por *Heterósfera* la región donde los gases se distribuyen según la presión y la masa molecular de cada especie de gas, debido a la difusión molecular.

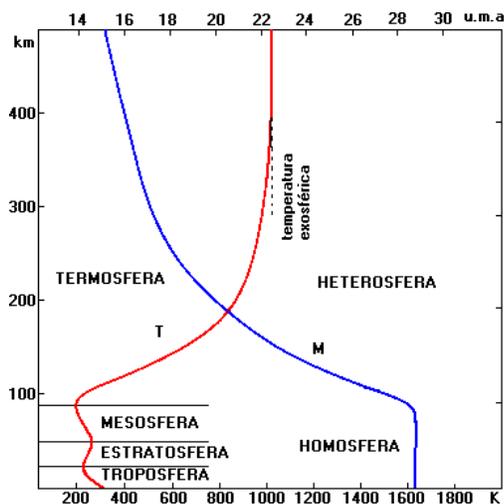


Figura 1.1: *Distribución de temperatura (rojo) y de masa molecular (azul) con la altura (Giraud y Petit, 1978).*

La *figura 1.2* muestra además, la distribución de electrones libres e iones, éstos constituyen una concentración menor, pero son relevantes a una altura entre los 80 y 500 km, en la Ionosfera. Aunque los límites de altura de la Ionósfera no son bien definidos por los autores.

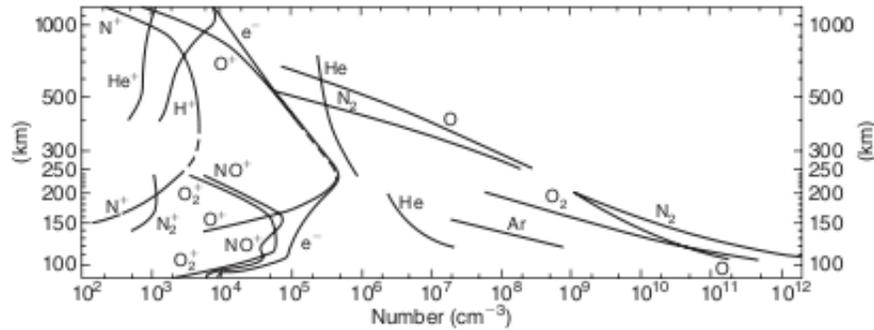


Figura 1.2: *Distribución de gases en la atmósfera (Kelley, 2009).*

Aproximadamente a unos 200 km de altura, donde predomina el oxígeno atómico y el nitrógeno molecular, existe un máximo en la concentración de electrones libres. Esta concentración electrónica máxima, es la que se trabaja en esta tesis. Pero antes de seguir, se hablará cómo investigadores de siglos anteriores se dieron cuenta de la existencia de la ionósfera.

1.1. Historia

Rishbeth (1988) afirma que “Históricamente, la ionósfera fue descubierta por Marconi cuando envió señales de radio a través del Atlántico en 1901“, desde Inglaterra a USA.

MacDonald, según Ratcliffe (1970), trató de demostrar el experimento de Marconi, diciendo que a través de la teoría de la difracción las ondas podían curvarse sobre la Tierra lo suficiente como para viajar la distancia requerida. Esta explicación fue inmediatamente contradecida por el matemático Lord Rayleigh, quien comparó la longitud de onda y el diámetro de la Tierra, dió el ejemplo de la luz sobre una esfera de diámetro de una pulgada, y aseguró que la luz nunca llegaría a los sectores oscuros. Finalmente Kenelly en EEUU y Heaviside en Inglaterra, sugirieron, en términos vagos, que debía existir un reflector a una cierta altura en la alta atmósfera, probablemente formado por cargas eléctricas libres que reflejaban las ondas de radio (Ratcliffe, 1970).

La existencia de esta capa conductora, que más tarde se llamaría *Capa de Heaviside*, corroboraría la idea de Gauss en 1839 y Lord Kelvin en 1860, quienes propusieron

que debía existir una capa conductora, a una cierta altura, en la cual se generaba un sistema de corrientes, que eran las que generaban las variaciones del campo geomagnético observados a nivel del suelo (Giraud y Petit, 1978).

Sin embargo, de manera casi simultánea en 1924, Appleton y Barnet en Inglaterra y Breit y Tuve en EEUU, realizaron experimentos para medir la altura de la Capa de Heaviside, demostrando, en un principio, que durante el crepúsculo una onda de radio que viajaba en dirección cercana a la vertical, también podía reflejarse en la capa y no solo de manera oblicua como en experimentos anteriores. Este método actualmente se utiliza en los radares de incidencia vertical o *ionosondas*. Estos experimentos fueron cruciales y revelaron que se podía utilizar esta herramienta para estudiar la naturaleza de las partículas cargadas de la atmósfera, y así verificar que la ionización se producía por acción de la radiación solar (Ratcliffe, 1970).

Esta idea de que la ionósfera era producida por los rayos ultravioleta extrema (EUV) del sol fue propuesta por Taylor y Fleming, pero fueron Hulburt en 1928 y Chapman en 1931 quienes lo pudieron demostrar cuantitativamente. Por otro lado, como la ionización es sólo uno de los procesos involucrados en la formación de la ionósfera, en 1947, Bates y Massey, propusieron mecanismos de recombinación ión-ion, ión-molécula y recombinación disociativa como los restantes procesos químicos (Giraud y Petit, 1978).

En los experimentos de medición de la altura de la Capa de Heaviside, se aumentó la frecuencia de las ondas de radio hasta que se alcanzó un máximo, ya que las ondas de frecuencias mayores penetraban la capa, pero no se perdían en el espacio, como se esperaba, sino que eran reflejadas por una capa de altura mayor. El descubridor de esta nueva capa, Appleton, denominó como *Capa E* a la Capa de Heaviside, debido al uso de la letra E para designar al campo eléctrico, y a su nueva capa como *Capa F*. Posteriormente, cuando se tubo que nombrar mas capas, se utilizó el resto de las letras que están cerca en el alfabeto (Ratcliffe, 1970).

1.2. Capas de la Ionósfera

Como se dijo en la sección anterior, la ionósfera se dividió en distintas regiones o capas que tomaron el nombre de letras del alfabeto. En la *figura 1.3* se muestra la distribución de concentración eletrónica con la altura. La región mas baja, la región D se encuentra entre los 60 y 90 km de altura con una concentración electrónica de 10^8 - $10^{10} m^{-3}$; la región E entre los 90 y los 150 km de altura con una concentración electrónica de 10^{10} - $10^{11} m^{-3}$; y la región F entre los 150 y 1000 km de altura, con una concentración electrónica de 10^{11} - $10^{12} m^{-3}$ (Aikio y Nigrén, 2008).

Estas regiones son físicamente diferentes debido a la distinta química y sección eficaz de absorción de los iones. La región F por ejemplo, tiene un solo máximo durante la noche y se divide en 2 durante las horas del día, las cuales se denominan

F1 y F2; la región D desaparece generalmente durante la noche; o es como la región E que a altas latitudes puede incrementarse drásticamente en la noche pasando a tener una concentración electrónica mayor que el máximo de concentración electrónica de la región F durante eventos de precipitaciones de partículas aurorales (Aikio y Nigrén, 2008).

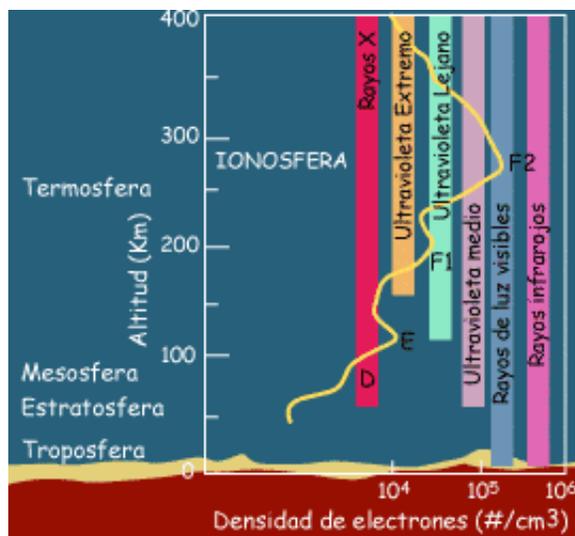


Figura 1.3: Capas de la Ionósfera y la absorción de radiación solar (http://salonhogar.net/Ciencias/La_Atmosfera.htm).

El nivel de la atmósfera que penetra una radiación de una longitud de onda λ depende de la sección eficaz de absorción σ . Las longitudes de onda de las radiaciones que producen las capas ionosféricas son (Rishbeth, 1988):

- Región F1: EUV 17-80 nm.
- Región E: X 1-17 nm y EUV 91-103 nm.
- Región D: Ly α 121.6 nm y rayos X 0.1-1 nm.
- Región C: MeV rayos cósmicos (capa no significativa).

La radiación solar es el agente que produce la ionización en la atmósfera, pero también hay otros procesos involucrados en la formación de las capas ionosféricas, esto se verá en la siguiente sección.

1.3. Formación de una capa

La ecuación de continuidad para partículas cargadas es:

$$\frac{\partial n_{i,e}}{\partial t} + \nabla(n_{i,e}\mathbf{v}) = q - L(n_{i,e}) \quad (1.1)$$

donde el subíndice i se refiere a los iones y e a los electrones, el término q es el número de pares ión-electrón son creados por unidad de volumen por unidad de tiempo, $L(n_{i,e})$ es el número de pares ión-electrón son perdidos por unidad de volumen por unidad de tiempo, y el $\nabla(n_{i,e}\mathbf{v})$ es el flujo entrante/saliente debido a mecanismos de transporte.

En este capítulo consideraremos los de procesos fotoquímicos en la ionósfera, es decir, producción y pérdida, además del transporte por difusión, dejando para el capítulo 2 los mecanismos de transporte de gran escala.

1.3.1. Producción

La producción de electrones libres para latitudes medias y ecuatoriales es principalmente por fotoionización, es decir, la creación de pares ión-electron por absorción de rayos EUV. Para determinar la producción de electrones se utiliza una teoría simple: la *Teoría de Chapman* (Rishbeth, 1988). Para ello hay que tener en cuenta algunos supuestos:

- La radiación solar es monocromática.
- La atmósfera es estratificada plana, isoterma y con aceleración de gravedad constante.
- Existe solo un constituyente atmosférico que sea un gas ideal.
- El coeficiente de absorción es constante.

Con todos estos supuestos, se obtiene que el número de electrones libres creados por unidad de volumen por unidad de tiempo, q , determinado por:

$$q(h) = I\eta\sigma n \quad (1.2)$$

donde h es la altura, I es la intensidad de radiación monocromática, η la eficiencia de ionización (número de electrones por fotón absorbido), σ es la sección eficaz de absorción y n es la concentración del gas. Si consideramos, además que la intensidad de radiación esta determinada por:

$$I(h, \chi) = I_\infty \exp(-nH \sec \chi) = I_\infty e^{-\tau} \quad (1.3)$$

con I_∞ es la intensidad de radiación solar antes de entrar a la atmósfera, $H = kT/mg$ la altura de escala, χ el ángulo cenital y τ la profundidad óptica, la producción q queda como:

$$q(h) = I_\infty \eta \sigma n e^{-\tau} \quad (1.4)$$

Usando la altura reducida $z = (h - h_0)/H$, con h_0 la altura de referencia, la ecuación queda:

$$q(h, \chi) = \frac{I_\infty \eta}{eH} \exp(1 - z - e^{-z} \sec \chi) \quad (1.5)$$

ésta expresión se denomina *Función de producción de Chapman*.

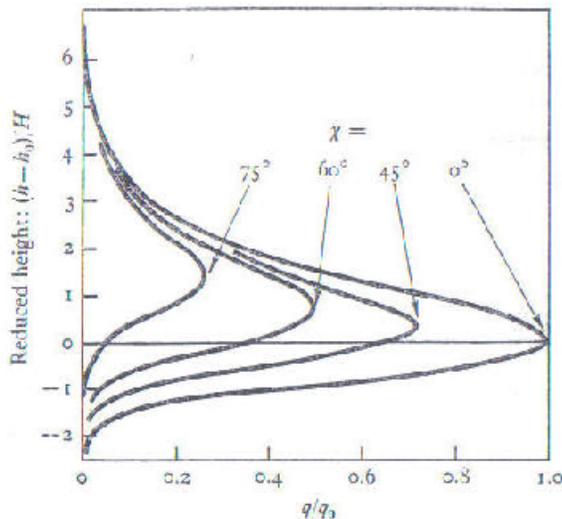


Figura 1.4: *Curvas de producción tipo Chapman, para diferentes ángulos cenitales χ , las alturas son medidas en unidades de altura de escala H desde el nivel cuando $\chi = 0$. Las tasas de producción q son medidas en unidades de q_0 (Ratcliffe, 1972).*

De esta forma, como discute Ratcliffe (1970) y como se puede ver en la figura 1.4, se puede decir que:

1. La altura del máximo de concentración electrónica está determinado por la concentración del gas, por su altura de escala y por la absorbabilidad de radiación solar. Esta altura no depende de la magnitud de la radiación.
2. La tasa de producción de electrones depende de la intensidad de radiación y del ángulo cenital χ , siendo la tasa de producción, en el máximo, proporcional a $\cos(\chi)$.
3. Las curvas de los perfiles de producción para distintos parámetros se pueden escalar, y hacer una curva normalizada.

1.3.2. Pérdida

Muchos autores explican los mecanismos de pérdida, por ejemplo en Aikio y Nigrén (2008), muestra que los electrones pueden perderse por recombinación directa con

iones positivos y formar átomos o moléculas neutras según la reacción:



Ésta es la llamada *recombinación radiativa*.

Ya que la probabilidad que suceda esta reacción es baja, porque necesita simultáneamente que la energía y momentum se conserven, existe otra posibilidad de recombinación que se denomina *recombinación disociativa*:



Esta reacción satisface las leyes de conservación señaladas.

Bajo estas reacciones, el número de electrones perdidos por unidad de volumen y unidad de tiempo debe ser igual al número de iones positivos perdidos por unidad de volumen y unidad de tiempo, por lo que L es proporcional al cuadrado de la concentración electrónica,

$$L(n_e) = \alpha n_e^2 \quad (1.8)$$

donde α es el coeficiente cuadrático de recombinación, que es independiente de la altura y con magnitudes del orden de $10^{-13} \text{ m}^3/\text{s}$ para la combinación disociativa y $10^{-18} \text{ m}^3/\text{s}$ para la combinación radiativa, lo cual indica que la primera es mucho mas rápida que la segunda.

Por otra parte los electrones también se pueden perder por *ligadura* a una molécula neutra, esto es:



En este caso, la pérdida de electrones es proporcional a la concentración electrónica y al número de moléculas neutras, por lo que depende de la altura, y puede ser expresado como:

$$L(n_e) = \beta n_e \quad (1.10)$$

donde β es el coeficiente lineal de ligadura.

De esta manera, considerando la ecuación de continuidad (*ecuación 1.1*) en estado estacionario ($\partial n/\partial t \longrightarrow 0$) y sin difusión ni término de transporte, permite que la producción y la pérdida estén en balance, es decir, en *equilibrio fotoquímico*,

$$q = L \quad (1.11)$$

Entonces, se puede obtener la concentración electrónica o número de electrones por unidad de volumen n_e , considerando una producción del tipo Chapman, y el término de pérdida cuadrático α ,

$$q = \alpha n_e^2 \implies n_e = \sqrt{\frac{q}{\alpha}} = \sqrt{\frac{I_\infty \eta}{eH\alpha}} \exp \left[\frac{1}{2}(1 - z - e^{-z} \sec \chi) \right] \quad (1.12)$$

Si se considera en vez de α el término de pérdida lineal β , la ecuación anterior queda

$$q = \beta n_e \implies n_e = \frac{q}{\beta} = \frac{I_\infty \eta}{eH\beta} \exp[(1 - z - e^{-z} \sec \chi)] \quad (1.13)$$

Mientras que la química para la región D resulta ser complicada, en la región E y F1, formadas principalmente por iones de NO^+ y O_2^+ , domina la recombinación disociativa (ecuación 1.8) como mecanismo principal de pérdida de electrones. En la región F2, constituida principalmente por iones de O^+ , el mecanismo de pérdida de electrones es la ligadura (ecuación 1.10) (Aikio y Nigrén, 2008).

En la región F1 debe existir una altura de transición z_t donde los 2 mecanismos, α y β , son igualmente importantes. La distribución electrónica con la altura dependerá si z_t es mayor o menor que la altura del máximo de producción z_m , como se ve en la figura 1.5.

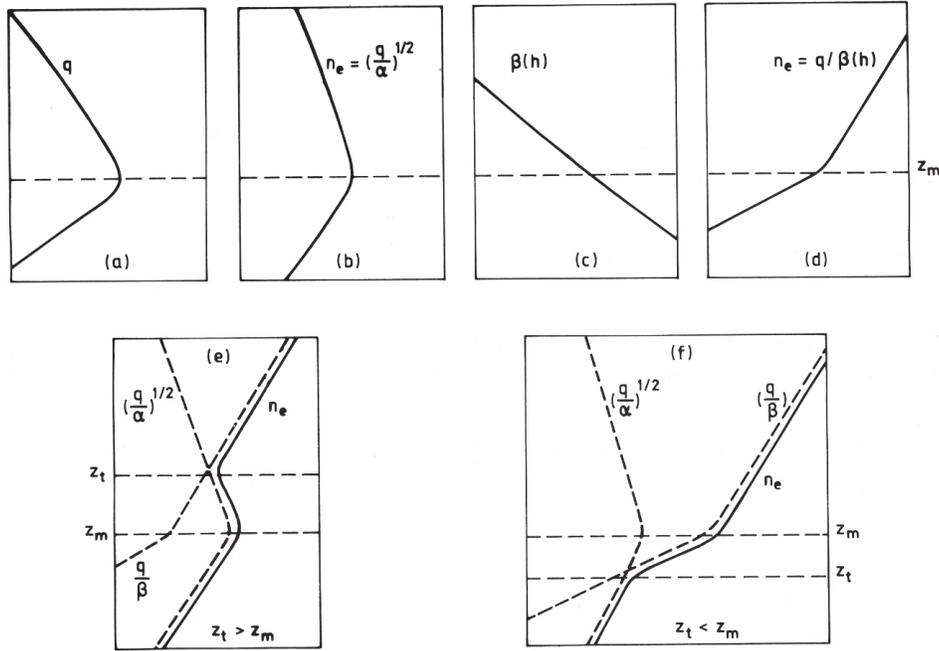


Figura 1.5: Distribución electrónica con la altura, de acuerdo a la posición de una altura de transición z_t entre mecanismos α y β con respecto a la altura del máximo de producción z_m . (a) Tasa de Ionización q en función de altura. (b), (d), (e) y (f) n_e como función de la altura, suponiendo diferentes procesos de recombinación, y (c) coeficiente de recombinación β en función de la altura (Aikio y Nigrén, 2008).

1.3.3. Transporte difusivo

Como es discutido en Arriagada (1988) y posteriormente en Burgos (2002), como sólo interesa estudiar la distribución de ionización con la altura, la discusión se limitará a movimientos verticales. De esta forma, la tasa de aumento de la concentración de electrones debido a estos movimientos es:

$$\frac{dn_e}{dt} = -\frac{\partial(w n_e)}{\partial h} \quad (1.14)$$

donde n_e es la concentración electrónica, w es la velocidad del transporte en la dirección vertical y h es la altura. La velocidad de transporte esta dada por:

$$w = -\frac{D}{n_e} \frac{\partial n_e}{\partial h} \quad (1.15)$$

donde D es el coeficiente de difusión, $D = kT/m\nu_{in}$, k es la constante de Boltzmann, T es la temperatura, m es la masa de las partículas y ν_{in} es la frecuencia de colisión entre iones (electrones) con el gas neutro.

Para movimientos verticales se debe incluir la fuerza de resistencia producida por las colisiones del gas minoritario (iones y electrones) con el gas mayoritario (gas neutro),

$$w n_e m \nu_{in} = -\frac{dP}{dh} - n_e m g \quad (1.16)$$

donde $P = nkT$ es la presión para un gas ideal. Considerando la altura de escala $H = kT/mg$, se puede escribir la ecuación anterior como:

$$w n_e = -D \left(\frac{dn_e}{dh} + \frac{n_e}{H} \right) \quad (1.17)$$

Así la *ecuación 1.14* queda como:

$$\frac{dn_e}{dt} = -\frac{\partial(w n_e)}{\partial h} = \frac{\partial}{\partial h} \left[D \left(\frac{dn_e}{dh} + \frac{n_e}{H} \right) \right] \quad (1.18)$$

Como los gases se difunden con la altura según su altura de escala, y como ésta altura de escala esta determinada por la fuerza gravitacional, ésta es inversamente proporcional al peso de sus átomos o moléculas. Para el caso de los electrones se espera que tengan una altura de escala cercana a una altura de 300.000 km.; por otro lado, los iones positivos, que son mas pesados, deberían alcanzar alturas menores, con alturas de escala de acuerdo a los gases que los componen. Pero no es lo que sucede. Las fuerzas eléctricas de atracción entre los electrones negativos y los iones positivos, empujan los electrones hacia abajo, y los iones hacia arriba. De esta manera, los iones y electrones, se distribuyen como si fueran una sola partícula, duplicando la altura de escala para los iones y disminuyendo la altura de escala de los electrones a un 1/15000 de lo que debiera ser, debido al efecto de la fuerza gravitacional (Ratcliffe, 1970).

Esta última difusión de las partículas cargadas, se denomina *Difusión Ambipolar*, cuyo coeficiente de difusión es (Aikio y Nigrén, 2008):

$$D_a = \frac{k(T_i + T_e)}{m_i \nu_{in}} = D \left(1 + \frac{T_e}{T_i} \right) \quad (1.19)$$

con T_i y T_e las temperaturas de los iones y electrones, respectivamente.

La difusión vertical en la alta atmósfera esta regida por la velocidad relativa entre las partículas, ya que el coeficiente de difusión es inversamente proporcional a la frecuencia de colisión de las especies de partículas, por lo tanto es inversamente proporcional a la concentración del gas mayoritario (gas neutro) $n = n_0 \exp(-z)$, entonces,

$$D = D_0(n_0/n) = D_0 \exp(z) \quad (1.20)$$

con D_0 y n_0 son valores de referencia.

Con todo esto podemos construir un modelo fotoquímico simple, tal como lo describe Arriagada (1988) y Burgos (2002), considerando las contribuciones fotoquímica y difusiva. Este modelo propuesto originalmente por Rishbeth (1967), consiste en determinar la concentración electrónica para un elemento de volumen ubicado a una altura donde la concentración es máxima n_m . De manera que la ecuación de continuidad nos queda como:

$$\frac{dn_m}{dt} = q - L_Q - L_D \quad (1.21)$$

con q la rapidez de producción de Chapman, $L_Q = \beta n_m$ la rapidez de pérdida de la concentración electrónica máxima que desaparecen por reacciones químicas y $L_D = dn_m$ la rapidez de pérdida de la concentración electrónica por transporte de difusión solo vertical, donde d es el coeficiente de proporcionalidad.

Las contribuciones L_Q y L_D son ambos proporcionales a la concentración electrónica máxima, por lo que podemos incluir ambas en un solo término de pérdida:

$$L_{Q,D} = c_N \beta n_m \quad (1.22)$$

con c_N fijo. Pero tanto β como d varían exponencialmente con la altura, entonces,

$$L_{Q,D} = c_N \beta_0 n_m \exp(-Kz_m) \quad (1.23)$$

donde z_m es la altura donde la concentración es máxima.

La visión presente que se tiene de la capa F2, es que su forma esta determinada por la difusión de los iones y electrones, además de los procesos de producción, y perdida por recombinación mencionados, para una capa tipo Chapman. El máximo de esta capa, se ubica a una altura por encima del máximo de una capa de Chapman, donde los efectos de difusión y pérdidas de electrones se igualan. Esta teoría explica la separación de la capa F en sus 2 partes, F1 y F2 (Ratcliffe, 1970).

1.4. Variabilidad de la concentración electrónica

Como anteriormente se vió, hay mecanismos en la formación de una capa ionosférica que están directamente relacionados con el sol, y generan gran variabilidad, como por ejemplo:

- Variaciones con el ciclo solar, de aproximadamente 11 años, que afectan en un orden de magnitud a la concentración electrónica de la región F.
- Variaciones estacionales, debido al cambio del ángulo cenital de los rayos solares.
- Variación día-noche, produciendo cambios en varios ordenes de magnitud a la concentración electrónica de parte baja de la región F, E y D.
- Variaciones de corto tiempo, de segundos a semanas, debido a efectos del tiempo espacial, que afectan en varios ordenes de magnitud a la concentración electrónica de la parte baja de la región F, E y D.

Para las distintas latitudes, la evolución diaria y anual de concentración electrónica máxima, o $NmF2$, debieran regir los cambios de ángulo cenital, pero no es así, existen *anomalías* conocidas desde 1935 (Appleton y Naismith, 1935; Yonezawa y Arima, 1959; Yonezawa, 1971; Zou et al., 2000; Rishbeth et al., 2000). Específicamente, la evolución anual muestra claramente que existen una componente anual y una componente semianual, las cuales, dependiendo de la hora del día, tienen distinta importancia. Inclusive, considerando que durante las horas de día, la $NmF2$ debiera ser máximo en verano, ésta es máxima en los equinoccios (en contraste con la noche, que tiene su máximo en verano).

El responsable de la componente semianual, es el elemento central de este trabajo. Algunos posibles mecanismos responsables ya han sido propuestos por autores, como se muestra en el *apéndice A*.

Capítulo 2

Fenómenos de transporte

Las ecuaciones que gobiernan el movimiento de las partículas cargadas (por ejemplo en Aikio y Nigrén, 2008) son:

$$m_i \frac{d\mathbf{v}_i}{dt} = m_i \mathbf{g} + e\mathbf{E} + e\mathbf{v}_i \times \mathbf{B} + m_i \nu_i (\mathbf{u} - \mathbf{v}_i) - \frac{\nabla p_i}{n_i} \approx 0 \quad (2.1)$$

$$m_e \frac{d\mathbf{v}_e}{dt} = m_e \mathbf{g} - e\mathbf{E} - e\mathbf{v}_e \times \mathbf{B} + m_e \nu_e (\mathbf{u} - \mathbf{v}_e) - \frac{\nabla p_e}{n_e} \approx 0 \quad (2.2)$$

que corresponden a los iones positivos (i) y electrones (e) respectivamente. $d\mathbf{v}/dt$ son términos de aceleración, m es la masa de la partícula, \mathbf{g} es la aceleración de gravedad, \mathbf{E} es el campo eléctrico, \mathbf{B} es la inducción magnética, ν la frecuencia de colisiones entre las partículas cargadas (minoritario) y el gas neutro (mayoritario), \mathbf{u} la velocidad del viento neutro, p la presión del gas y n es la concentración electrónica. El término $e(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B})$ corresponde a la *Fuerza de Lorentz*.

Si se considera un plasma estacionario y homogéneo y despreciando el campo gravitacional y los gradientes de presión, la ecuación de momentum para el caso de los iones se hace tan simple como:

$$e(\mathbf{E} + \mathbf{v}_i \times \mathbf{B}) + m_i \nu_i (\mathbf{u} - \mathbf{v}_i) = 0 \quad (2.3)$$

considerando $\mathbf{F} = e\mathbf{E} + m_i \nu_i \mathbf{u}$, la ecuación puede ser escrita como:

$$\mathbf{v}_i = \frac{1}{m_i \nu_i} (e\mathbf{v}_i \times \mathbf{B} + \mathbf{F}) \quad (2.4)$$

Para obtener la solución de esta ecuación se resuelve el producto cruz,

$$\mathbf{v}_i \times \mathbf{B} = \frac{1}{m_i \nu_i} [e(\mathbf{v}_i \cdot \mathbf{B})\mathbf{B} - eB^2 \mathbf{v}_i + \mathbf{F} \times \mathbf{B}] \quad (2.5)$$

Y el producto punto $\mathbf{v}_i \cdot \mathbf{B}$. Así, reemplazando la ecuación (2.5) en (2.4), se tiene,

$$\mathbf{v}_i = \frac{1}{m_i \nu_i} \left(\frac{e}{m_i \nu_i} \left[\frac{e}{m_i \nu_i} (\mathbf{F} \cdot \mathbf{B})\mathbf{B} - eB^2 \mathbf{v}_i + \mathbf{F} \times \mathbf{B} \right] + \mathbf{F} \right) \quad (2.6)$$

Además, si se considera que $\mathbf{B} = B\mathbf{e}_B$, con \mathbf{e}_B el vector unitario en dirección del campo magnético, y si $\omega = eB/m_i$ es la *girofrecuencia angular* o *frecuencia angular de ciclotrón* de los iones, se obtiene,

$$\mathbf{v}_i = \frac{1}{eB} \cdot \frac{\omega_i \nu_i}{\omega_i^2 + \nu_i^2} \left[\left(\frac{\omega_i}{\nu_i} \right)^2 (\mathbf{F} \cdot \mathbf{e}_B) \mathbf{e}_B + \left(\frac{\omega_i}{\nu_i} \right) \mathbf{F} \times \mathbf{e}_B + \mathbf{F} \right] \quad (2.7)$$

Finalmente, si se separa la fuerza \mathbf{F} en sus componentes paralela y perpendicular al campo magnético, se llega a que para los iones:

$$\mathbf{v}_i = \mathbf{k}_i \cdot \mathbf{F} = \mathbf{k}_i \cdot (e\mathbf{E} + m_i \nu_i \mathbf{u}) \quad (2.8)$$

siendo \mathbf{k}_i el *tensor de movilidad* de los iones, el cual es de la forma:

$$\mathbf{k}_i = \begin{pmatrix} k_{iP} & k_{iH} & 0 \\ -k_{iH} & k_{iP} & 0 \\ 0 & 0 & k_{i||} \end{pmatrix} \quad (2.9)$$

donde k_{iP} se denomina *movilidad de Pedersen*, k_{iH} la *movilidad de Hall* y $k_{i||}$ la *movilidad paralela*, las que son:

$$k_{iP} = \frac{1}{eB} \cdot \frac{\omega_i \nu_i}{\omega_i^2 + \nu_i^2} \quad (2.10)$$

$$k_{iH} = \frac{1}{eB} \cdot \frac{\omega_i^2}{\omega_i^2 + \nu_i^2} \quad (2.11)$$

$$k_{i||} = \frac{1}{eB} \cdot \frac{\omega_i}{\nu_i} = \frac{1}{m_i \nu_i} \quad (2.12)$$

En el caso de los electrones, solo basta cambiar la carga e por $-e$.

De esta manera, se puede describir el movimiento producido por el viento neutro y el campo eléctrico en 2 casos particulares:

- Si el viento del aire neutro tiene una componente paralela a lo largo del campo magnético, entonces los iones y electrones se mueven a lo largo de \mathbf{B} con una rapidez $u_{||}$. Si el campo eléctrico tiene una componente paralela a \mathbf{B} , los iones y electrones se mueven en direcciones opuestas.
- A alturas de la capa $F2$, el campo eléctrico mueve a los iones y electrones en la misma dirección con una velocidad $\mathbf{E} \times \mathbf{B}/B^2$. El viento del aire neutro, perpendicular al campo magnético, no produce movimiento de iones y electrones que crucen el campo.

A continuación se describirá algunos fenómenos de transporte de partículas de gran escala, sin considerar el transporte difusivo que ya fue mencionado en el capítulo anterior:

1. Mareas atmosféricas.
2. Ondas de gravedad.
3. Vientos termosféricos.

En términos generales, los dos primeros, afectan principalmente la ionósfera desde regiones de abajo, y el tercero, los vientos termosféricos, lo afecta “in situ”.

2.1. Mareas

De manera solo introductoria, según Lindzen (1974), las mareas son oscilaciones en fluidos producidas por la interacción entre la Tierra, la Luna y el Sol. Las más conocidas son las mareas oceánicas, producidas por efectos gravitacionales de la Luna y el Sol. Pero, también existen las mareas atmosféricas; que corresponden a variaciones diarias de la atmósfera en respuesta a la acción térmica del sol.

Se habla de mareas migratorias las que son solo en función del tiempo local (siguen el movimiento aparente del Sol ó la Luna) y mareas no migratorias las que dependen de la longitud y del tiempo local.

A diferencia de las mareas oceánicas, cuyos registros datan antes del 320 a.C, el primer reconocimiento de oscilaciones atmosféricas, no fue posible hasta el desarrollo del barómetro por Torricelli el año 1643. Sin embargo es en 1799 cuando se concluye que estas mareas atmosféricas se debían a la acción térmica del Sol (Laplace, 1799).

A lo largo de los años, tal como cita Lindzen (1974), se hicieron muchos estudios sobre estas mareas, como el análisis con componentes diurnas, semidiurnas y terdiurnas (Kelvin, 1870), estudio de una posible resonancia atmosférica (Raiyleigh, 1890; Margules, 1890; Taylor, 1932; Pekeris, 1937, Martyn y Pulley, 1936, entre otros.), y estudio del por qué de la predominancia semidiurna (Lindzen, 1967).

Para latitudes mayores que los 30° en ambos hemisferios, la oscilación diurna es incapaz de propagarse verticalmente, ya que sobre el 80% de la excitación diurna queda en modos atrapados (Lindzen, 1966; Kato, 1966) los cuales no pueden propagarse a tierra. Además en latitudes menores de los 30° existen modos diurnos que se propagan verticalmente. Sin embargo, si se considera las propiedades de las ondas gravitacionales internas, se puede decir que estas ondas tienen una longitud de onda muy corta (≤ 25 Km.), por lo tanto están sujetos a algún efecto de interferencia destructiva. Butler y Small (1963) sugieren que estas ondas podrían estar sujetas a algún efecto de interferencia destructiva, para explicar la pequeña amplitud relativa de la marea diurna; sus cálculos insinúan que los modos de propagación reciben solo el

20 % de excitación. De este modo se busca explicar la dominancia de la periodicidad semidiurna por sobre la diurna.

Actualmente la importancia del estudio de las mareas atmosféricas radica en las siguientes razones:

* Es una forma de corroborar las teorías de ondas internas en la atmósfera. Si se conoce su frecuencia y número de onda de las mareas, se puede aislar en las series de tiempo de parámetros atmosféricos.

* Las mareas forman una parte importante de la meteorología de la alta atmósfera (superior a los 50 Km.).

En fin, las mareas atmosféricas esencialmente son ondas gravitacionales internas, modificadas por la esfericidad y rotación de la tierra (Lindzen, 1970).

2.2. Ondas de gravedad

Como muestra Rishbeth (1988), las ondas de gravedad son oscilaciones controladas por la buoyanza del aire o efectos de la gravedad. Son producidas por las perturbaciones troposféricas que generan efectos desde abajo, además de precipitaciones de partículas aurorales y calentamiento atmosférico.

Las ondas de gravedad poseen periodos de corta duración, no mayores a 3 horas. Según esto, se clasifican en 2 tipos:

1. Ondas de gravedad de periodos cortos y medios, desde 5 minutos (*periodo de Brunt-Väisälä o buoyanza*)¹ hasta 30 minutos. Estas ondas tienen longitudes de onda entre 100-300 km y velocidades horizontales de 100-200 m/s. Son generadas por tormentas, montañas, terremotos, erupciones, o por explosiones hechas por el hombre.
2. Ondas de gravedad de periodos largos, entre 0.5-3 horas. Poseen longitudes de onda horizontales de 1000-4000 km y velocidades de 400-700 m/s. Estas ondas son generadas por perturbaciones en la termósfera, principalmente en el *óvalo auroral*². Ellas pueden viajar cientos de kilómetros y son frecuentes en periodos de perturbaciones geomagnéticas.

¹Frecuencia de oscilación de una parcela que se desplaza verticalmente en un fluido cuya estratificación de densidad es estable.

²Zona de mayor frecuencia de ocurrencias de auroras.

2.3. Vientos Termosféricos

La energía que proviene del sol se absorbe en la atmósfera alta por disociación e ionización, fundamentalmente alrededor de los 30 km (ozono) y de los 150 km (ionización del oxígeno). Esto hace que la atmósfera se caliente y tienda a expandirse, produciendo variaciones de temperatura como se puede ver en la *figura 2.1*, originando gradientes de presión horizontales y por ende, vientos producidos por estos gradientes. Estos vientos se denominan *Vientos Termosféricos*, que junto con las corrientes verticales ascendentes y descendentes forman la circulación global que transporta energía desde las fuentes de calor hacia otros lugares (Rishbeth, 1988)

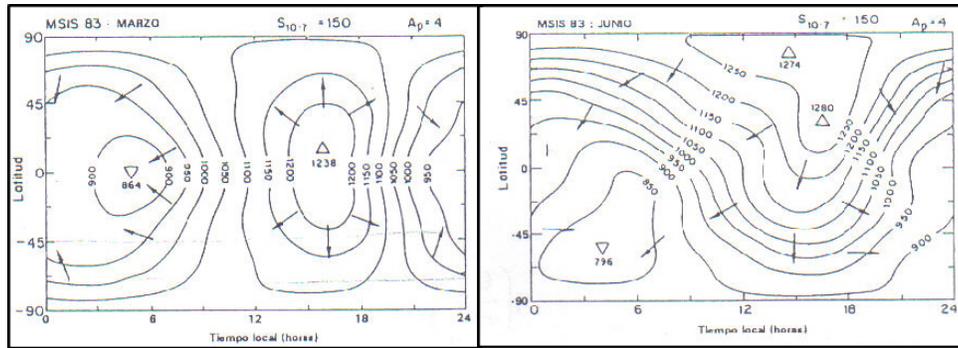


Figura 2.1: *Temperatura exosférica para alta actividad solar y condiciones geomagnéticas quietas, de acuerdo al modelo MSIS83. Las flechas muestran las direcciones aproximadas de los vientos termosféricos. Para el equinoccio de Marzo (izquierda) y el solsticio de Junio (derecha). (Rishbeth, 1988)*

La ecuación de movimiento para estos vientos horizontales es:

$$\frac{d\mathbf{u}}{dt} = \mathbf{F} - 2\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{u} - Kn_e(\mathbf{u} - \mathbf{v}) + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 \mathbf{u} \quad (2.13)$$

donde el término $\mathbf{F} = -(1/\rho)(\partial/\partial x, \partial/\partial y)p$ es el forzante de presión horizontal; el segundo término es la fuerza de Coriolis; el tercero el debido a las colisiones entre el gas mayoritario (gas neutro) con velocidad \mathbf{u} y el gas minoritario (iones y electrones) con velocidad \mathbf{v} , con un coeficiente de colisión K ; el último término que tiene que ver con la viscosidad del gas neutro.

Como los vientos termosféricos van de zonas de mayor a menor temperatura, arrastran consigo las partículas cargadas. Pero estas partículas cargadas no van hacia cualquier lado, sino que, siguen las líneas de campo magnético de la Tierra. Como estas líneas no son paralelas a la superficie (excepto en el ecuador geomagnético) hacen que las partículas cargadas deriven hacia arriba o hacia abajo, según sea día o noche, como se puede ver en la *figura 2.2*. A alturas donde la concentración electrónica es máxima,

el arrastre es mucho mas expedito a lo largo de las líneas de campo geomagnético y si consideramos además que el viento termosférico neutro fluye hacia el sur (para el hemisferio sur), es decir, el viento meridional con una velocidad \mathbf{u} , y la línea de campo tiene una inclinación I , entonces la magnitud de la velocidad de las partículas cargadas \mathbf{v} esta dada por:

$$v = u \cos I \quad (2.14)$$

La deriva vertical \mathbf{w} , tiene una magnitud de la forma:

$$w = u \cos I \sin I \quad (2.15)$$

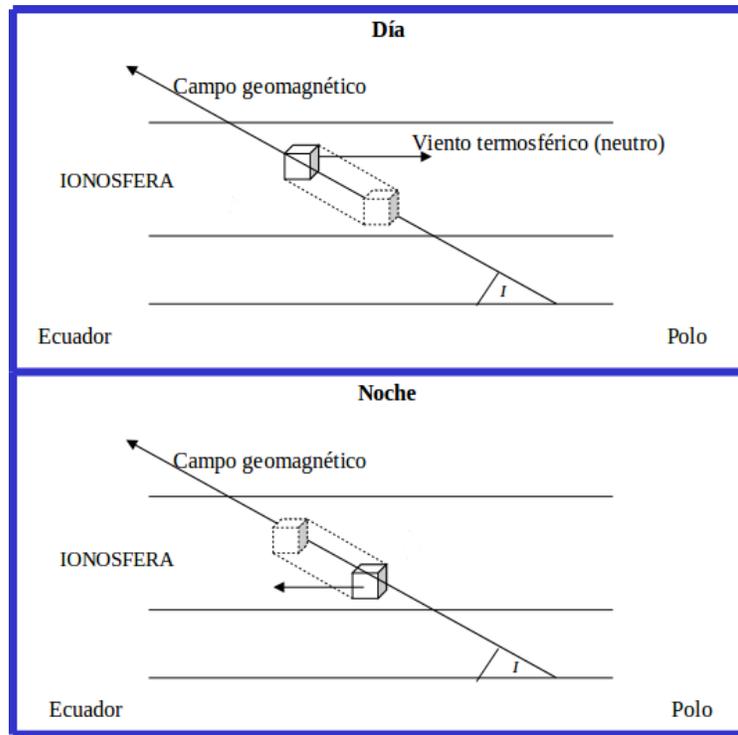


Figura 2.2: Mecanismo transporte por viento termosférico neutro. I es la inclinación del campo geomagnético. (Burgos, 2002)

De esta manera, el viento neutro puede mover hacia arriba (cuando va hacia el ecuador) o hacia abajo (cuando va hacia el polo) la ionización de la capa F, por arrastre. De acuerdo a esta ecuación, no tendrá efecto cuando $I = 0^\circ$ e $I = 90^\circ$, y tendrá un efecto mayor en $I = 45^\circ$ (Flores, 2000).

A pesar de todo, las ecuaciones 2.9 y 2.10 no bastan para representar lo que muestran las observaciones de vientos termosféricos. Por ello, se necesita de modelos que

tratan de representar la realidad. A continuación, se presentan 2 modelos de vientos termosféricos, con los cual se trabaja en esta tesis, el *Modelo del Servomecanismo* (Buosanto, 1986, 1988, 1991) y del *Modelo Empírico HWM* (Hedin, 1987, 1991).

2.3.1. Modelo del Servomecanismo

Tal como lo resume en su trabajo Flores (2000), el modelo supone que la región F de la ionosfera se comporta como un sistema de servomecanismo si se acepta algunas aproximaciones para los procesos de producción fotoquímica de pares electrón ion y de pérdida de pares por reacciones químicas, difusión y transporte (Rishbeth, 1967; Rishbeth et al., 1978). En particular, el hecho que la región se encuentra a una altura de equilibrio determinada por los procesos de perdida química y difusión en ausencia de transporte, hace que el transporte sencillamente cambie a esa altura de equilibrio por otra, a una tasa determinada por la perdida química y la difusión.

La altura de equilibrio ocurre donde la tasa de recombinación β adopta los valores:

$$\beta = \frac{D_a \sin^2 I}{2H^2(kc - 1)/k} \quad (\text{dia}) \quad (2.16)$$

$$\beta = \frac{D_a \sin^2 I}{2H^2(kac - 1)/k} \quad (\text{noche}) \quad (2.17)$$

Aquí, $D_a = D(1 + T_e/T_i)$ es el coeficiente de difusión ambipolar donde D el coeficiente de difusión iones-neutros, T_e la temperatura de los electrones y T_i la temperatura de los iones; I es la inclinación geomagnética, H es la altura de escala del oxígeno atómico, a es un factor de forma, k es un factor de escala de tasa de pérdida y c es una constante empírica, con un valor diurno y otro nocturno.

Por otro lado, las derivas verticales (w) debida a los vientos neutros o campos eléctricos sería:

$$w = H \frac{dz}{dt} + [e^z - e^{-kz}] \frac{D_a \sin^2 I}{2H} \quad (2.18)$$

con $z = (hmF2 - h_0)/H$, $hmF2$ es la altura del máximo de la capa F2 y h_0 es la altura de equilibrio.

De este modo, los cambios de la altura de la región permiten estimar la velocidad de los vientos termosféricos responsables del proceso de transporte. Habitualmente se usa el método sugerido por Buosanto (1991) para determinar la magnitud de los vientos termosféricos, a partir de valores calculados de la altura de la región F usando parámetros de la región leídos desde registros de radares de incidencia vertical.

2.3.2. Modelo HWM

El Horizontal Wind Model o HWM es un modelo empírico de los vientos termosféricos neutros desarrollado usando observaciones de los satélites Atmosphere Explorer E y Dynamic Explorer 2 (Hedin, 1987; Hedin et al., 1991). Las componentes meridional y zonal de la velocidad del viento se determinan para cada lugar, hora local, día del año y niveles de actividad geomagnética y de flujo solar, usando una serie de armónicos esféricos ajustada a las observaciones satelitales.

La velocidad del viento se expresa en términos de una serie de armónicos de la forma:

$$\mathbf{v} = \frac{1}{2} \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{n=0}^l [B_{ln}(t)\mathbf{B}_{ln}(\theta, \phi) + B_{ln}^*(t)\mathbf{B}_{ln}^*(\theta, \phi) + C_{ln}(t)\mathbf{C}_{ln}(\theta, \phi) + C_{ln}^*(t)\mathbf{C}_{ln}^*(\theta, \phi)] \quad (2.19)$$

donde $B_{ln}(t)$ y $C_{ln}(t)$ son coeficientes del desarrollo en serie dependientes del tiempo, $\mathbf{B}_{ln}(\theta, \phi)$ y $\mathbf{C}_{ln}(\theta, \phi)$ son vectores armónicos esféricos rotacional y solenoidal respectivamente, los cuales dependen de la colatitud θ y de la longitud ϕ . El asterisco indica los coeficientes conjugados.

El modelo HWM90 es una extensión del HWM87, el cual incorporaba variaciones con la altitud y la actividad solar. Recientemente, se ha propuesto una nueva versión del modelo, la HWM07 (Drob et al., 2008), que provee de una representación estadística de campos de vientos meridionales desde los 0-500 km., incluyendo representaciones de la circulación zonal promedio, ondas planetarias estacionarias, mareas migratorias y modulaciones estacionales. HWM07 tiene de 2 componentes: una componente para condiciones de tiempo geomagnético quieto de base y una componente para tiempo de tormenta geomagnética o Disturbance Wind Model (DWM07).

DWM07 (Emmert et al., 2008) representa los promedios de las perturbaciones de tormentas inducidas a la alta atmósfera por el geoespacio. Se basa en los datos del Wind Imaging Interferometer a bordo del satélite Upper Atmosphere Research, el Wind and Temperature Spectrometer a bordo del Dynamics Explorer 2 y 7 interferómetros del tipo Fabry-Perot.

Capítulo 3

Asociación entre NmF2 y velocidad de vientos termosféricos

3.1. Planteamiento del problema

Como se dijo en la *sección 1.4*, el origen de la componente semianual de la concentración electrónica máxima, ha sido discutida ampliamente y por muchos años. Se ha visto que existe esta periodicidad semianual en varias características (Ivanov-Kholodnyi, 1975), tales como en la temperatura y densidad de la alta atmósfera, la intensidad del campo geomagnético, la absorción de rayos cósmicos, las alturas de las capas E y F de la ionosfera, entre otros.

A esta variación se la puede asociar, con fuentes de tipo radiación electromagnética, gravitacionales o corpuscular, proveniente del sol. Sin embargo, esto no explica la amplitud que tienen las variaciones semianuales, por lo que debiera existir algún otro tipo de mecanismo desconocido que produce amplificación.

De las posibles explicaciones que Rishbeth et al. (2000) resume para la variación anual y semianual (*Apéndice A*), consideraremos el mecanismo de los vientos termosféricos, para comprobar una posible asociación con la concentración electrónica máxima, NmF2, y por consiguiente el origen de la variación semianual.

Consideraremos observaciones hechas en Concepción y en Islas Argentinas (Antártica). Estos lugares son especiales, porque los fenómenos asociados a la radiación solar ondulatoria están mas separados de los fenómenos asociados a la geometría del campo geomagnético que en otras partes del mundo, incluida la anomalía geomagnética del Atlántico sur.

En resumen, tal como fue expuesto en el informe del Proyecto de Tesis (2009), la hipótesis y objetivos en la presente Tesis son los siguientes.

3.2. Hipótesis

- El modelo de solo 2 componentes de vientos termosféricos es suficiente para explicar su evolución anual para ambos lugares, en ambos niveles de actividad solar.
- Hay una estrecha relación entre la concentración electrónica máxima y los vientos termosféricos.
- Las oscilaciones termosféricas asociadas a otros forzantes, como ondas de gravedad y/o mareas que se propagan hasta la termosfera desde alturas menores, tienen un efecto de segundo orden en NmF2.

3.3. Objetivos

3.3.1. Objetivo General

Asociar la concentración electrónica máxima a los vientos termosféricos neutros en la ionosfera sobre el sector Sudamericano (Concepción) y la Península Antártica (Islas Argentinas).

3.3.2. Objetivos específicos

- Determinar las características de la evolución anual de la componente meridional magnética horizontal de los vientos termosféricos.
- Comparar estas características con las de la evolución anual de la NmF2.
- Intentar vincular las evoluciones anuales de la NmF2 con las evoluciones anuales velocidades de vientos termosféricos.

Capítulo 4

Materiales y métodos

En este capítulo, se determinan las componentes anual y semianual de las evoluciones anuales de la concentración electrónica máxima NmF2 y de la componente meridional magnética del viento termosférico horizontal.

4.1. NmF2

En este análisis, se usan valores medianos mensuales de concentración electrónica máxima de la ionósfera para cada hora del día, en hora local del meridiano 75° Oeste, determinados de observaciones hechas con radares de incidencia vertical (*ionosondas*) ubicados en Concepción (C: 36,8°S; 287,0°E) e Islas Argentinas (IA: 65.2°S, 295.7°E). La información geofísica de estas estaciones esta dada en el *cuadro 4.1* y en la *figura 4.1*.

	Coordenadas Geográficas	Coordenadas Geomagnéticas	Parámetro L	Inclinación	Declinación
Concepción	36.8°S; 287.0°E	22.7°S; 359.2°E	1.22	36.8°	8.85°
Islas Argentinas	65.2°S; 295.7°E	49.78°S; 8.70°E	2.49	59.0°	16.3°

Cuadro 4.1: *Información geofísica de las estaciones utilizadas. Las coordenadas geomagnéticas corregidas corresponden a una altura de 250 km en 1986.*

La concentración electrónica máxima NmF2 [cm^{-3}] se determina a partir de la frecuencia de plasma máxima observada por el radar, foF2 [MHz], mediante la expresión:

$$NmF2 = 1,24 * 10^4 (foF2)^2 \quad (4.1)$$

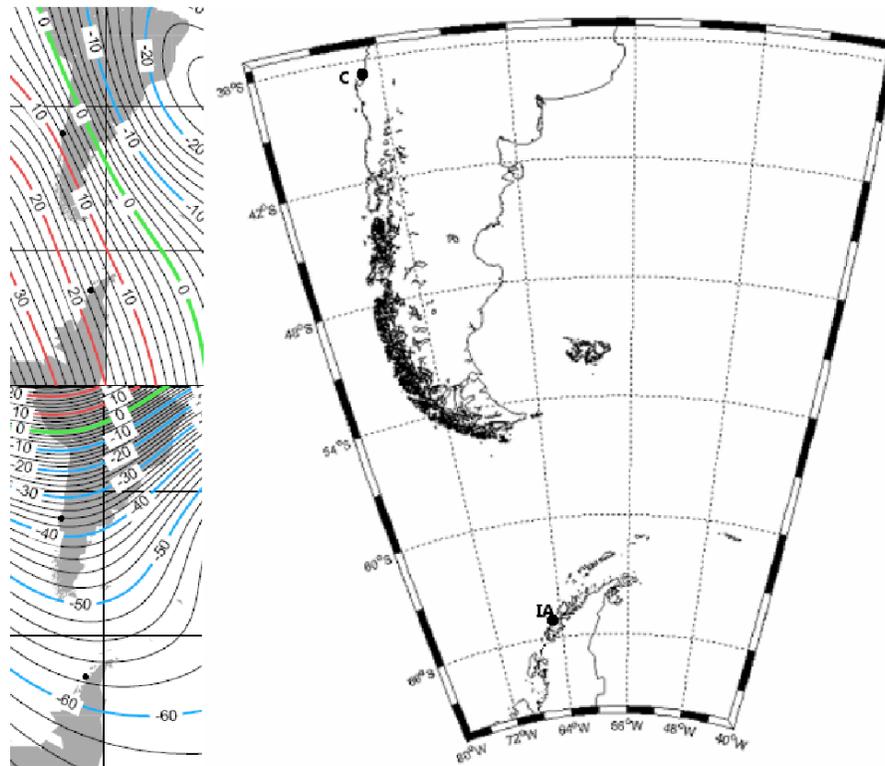


Figura 4.1: Situación geomagnética (izquierda) y geográfica (derecha) de las estaciones. En la parte geomagnética, la figura de arriba corresponde a la declinación y la de abajo a la inclinación.

La serie de tiempo de NmF2 para cada uno de los lugares se comporta de la forma vista en la *figura 4.2*. Éste es un ejemplo de los valores medianos mensuales para medianoche y para mediodía. Se pueden ver las variaciones de la NmF2 mencionadas en la *sección 1.4*, como también diferencias de amplitudes entre ambos lugares y entre el día y la noche.

El intervalo de tiempo estudiado corresponde a 3 años, caracterizados por un nivel de actividad solar baja (1974-76), medido en términos de flujo solar 10.7 cm de longitud de onda y 3 años de nivel alto de actividad solar (1979-81).¹

Vale la pena notar que las evoluciones diurna de NmF2 (*figura 4.3*) parecen no ser como se espera en verano para Islas Argentinas, ya que el máximo de concentración electrónica es cercano a medianoche, en vez de mediodía. Ésta situación también ha sido descrita por Foppiano (1993) en otra estación de la Antártica, la estación Isla

¹En algunos casos se utilizan los años 1985-87 para baja actividad solar.

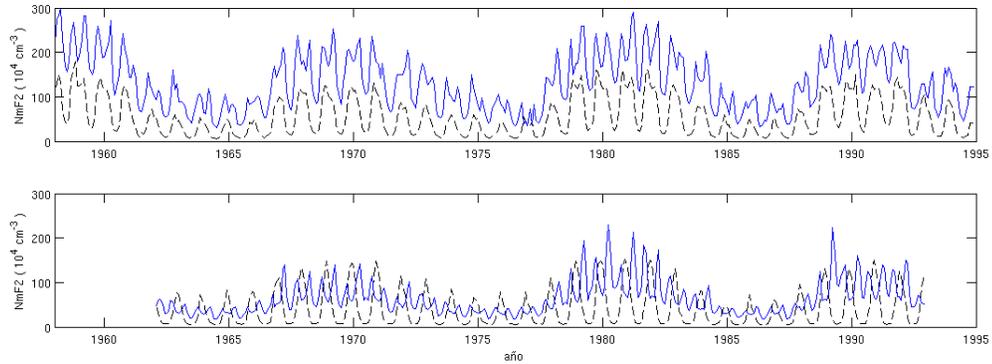


Figura 4.2: Serie de tiempo de NmF2 para las 00 hrs. (negro segmentado) y 12 hrs. (azul continua), para las estaciones de Concepción (arriba) e Islas Argentinas (abajo).

rey Jorge (62° 12'S, 58° 54'W).

En primer lugar se determina el espectro de la cada hora del día de serie de tiempo de NmF2 utilizando el método de wavelets con una base del tipo Morlet (Bravo et al., 2008). Se procede luego a hacer una descomposición de Fourier a las evoluciones anuales de la NmF2 para cada hora del día y cada uno de años de los intervalos indicados anteriormente. Se determina la amplitud y la fase de 6 primeras componentes. Luego se reconstruye las evoluciones anuales utilizando solo con el promedio sumado a sus 2 primeras componentes, de la siguiente forma:

$$NmF2(d) = A_0 + A_1 \cos \frac{2\pi}{T}(d - \phi_1) + A_2 \cos \frac{4\pi}{T}(d - \phi_2) \quad (4.2)$$

donde d es el número del día del año, T es el número total de días en el año (365), A_0 es el promedio anual, A_1 , ϕ_1 y A_2 , ϕ_2 son las amplitudes y fases de las componentes anuales y semianuales de la NmF2, respectivamente. De esta manera se determinaron las componentes anual, semianual y el modelo de 2 componentes, con sus respectivas bondades o varianzas explicadas (Tópico II, 2008b; Bravo et al., 2010).

4.2. Vientos termosféricos meridionales

Para el caso de la componente meridional geomagnética del viento termosférico horizontal, se utilizan los valores medios mensuales de dos modelos: el Modelo Servo, y el Modelo HWM90, que ya fueron descritos en la sección 2.3.1 y 2.3.2, respectivamente.

Las velocidades de los vientos del Modelo del Servomecanismo fueron tomados del trabajo de Flores (2000), con los parámetros que se especifican en la sección 2.3.1

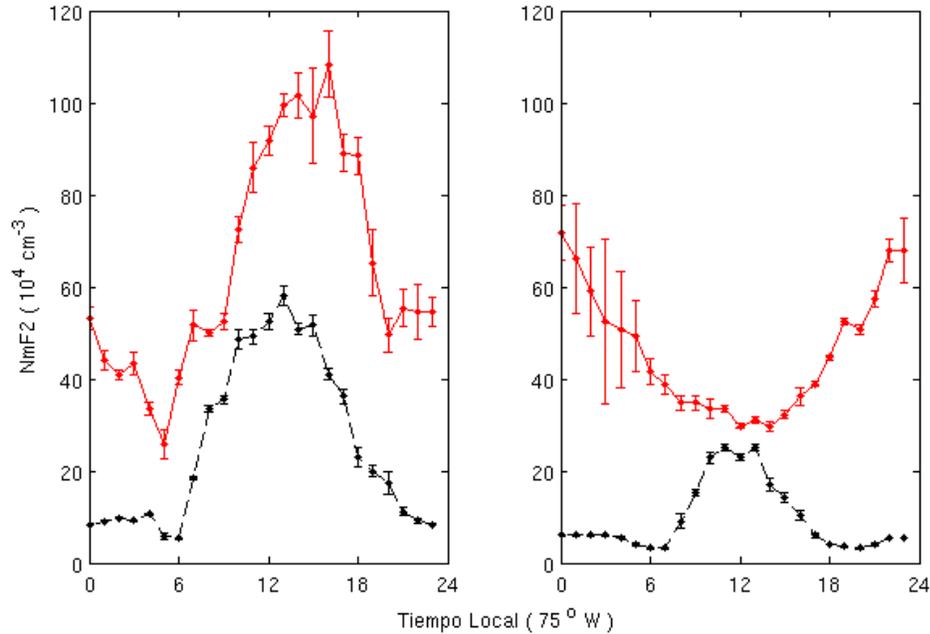


Figura 4.3: Evolución diurna de NmF2 en enero (línea roja continua) y en julio (línea negra segmentada) de 1974, para Concepción (izquierda) e Islas Argentinas (derecha). Las barras verticales representan los rangos intercuartiles.

y considerando condiciones de actividad geomagnética quietas, es decir, con índice magnético $A_p \leq 20$.

Sólo se dispone de valores para Concepción. En cuanto a los años, sólo se dispone de los años de alto nivel de actividad solar elegidos (1979-81), no así para bajo nivel de actividad solar, por lo que utilizó valores para el intervalo 1985-87 en su reemplazo.

Un ejemplo de la evolución diurna de vientos del modelo del Servomecanismo para enero y julio, se muestra en la *figura 4.4* para el año 1987. En Flores (2000), se muestran las evoluciones diurnas para los intervalos 1979-80 y 1985-86. Cuando se le compara para un mismo mes, se aprecian algunas similitudes en las formas de variación de los vientos en 1979-80, pero no así para el periodo 1985-86 (Flores, 2000).

Sólo se disponía de las velocidades de los vientos del Modelo HWM90 para Concepción. Las velocidades para los otros casos se calcularon usando el modelo.

Para ello se promedian los índices A_p y flujo solar 10.7 cm de los días en condiciones geomagnética quietas, con índice $A_p \leq 20$, para luego ingresarlos en la interface

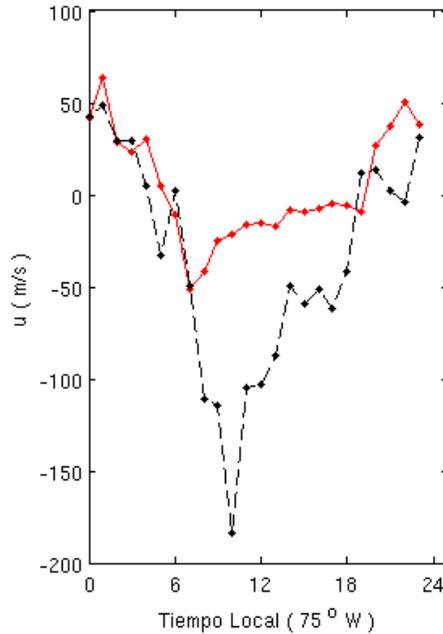


Figura 4.4: Evolución diurna de la velocidad del viento termosférico meridional, según el Modelo Servo, en enero (línea roja continua) y en julio (línea negra segmentada) de 1987, para Concepción.

del modelo y así obtener los valores medios mensuales de velocidad del viento para cada hora del día, cada lugar, y ambos niveles de actividad solar.

La figura 4.5 se muestra como un ejemplo las evoluciones diurna para enero y julio para ambos lugares.

Al igual que en el caso de la NmF2, las evoluciones anuales de velocidad de vientos termosféricos de los dos modelos mencionados anteriormente, se le realiza una descomposición de Fourier para cada hora del día y cada uno de años de los intervalos indicados anteriormente, determinando la amplitud y la fase de 6 primeras componentes y posteriormente, se reconstruye las evoluciones anuales con sólo con el promedio sumado a sus 2 primeras componentes.

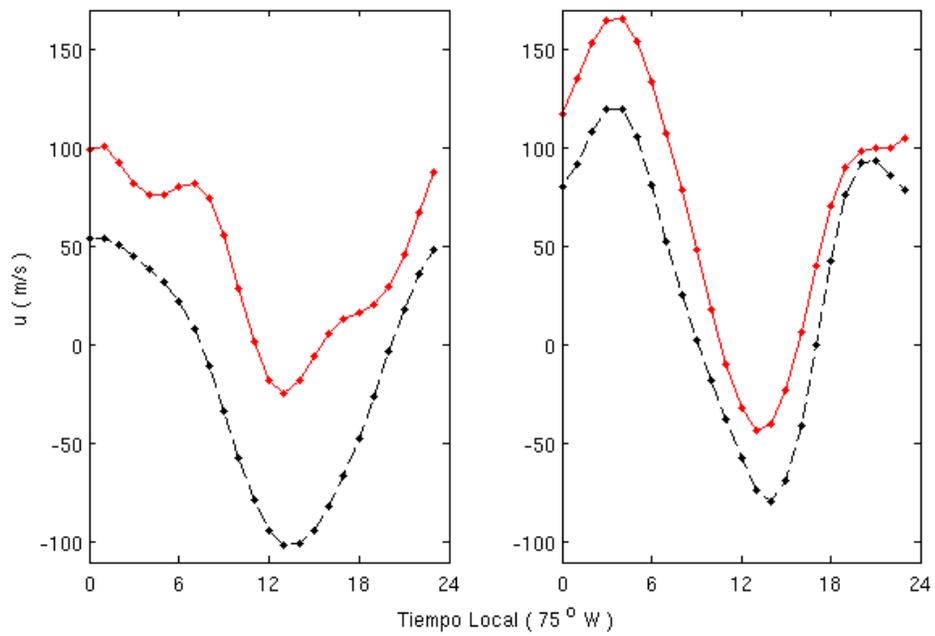


Figura 4.5: Evolución diurna de la velocidad del viento termosférico meridional, según el Modelo HWM90, en enero (línea roja continua) y en julio (línea negra segmentada) de 1974, para Concepción (izquierda) e Islas Argentinas (derecha).

Capítulo 5

Resultados

5.1. NmF2

Los resultados del análisis de wavelets, mostraron claras periodicidades en la concentración electrónica máxima sobre Concepción e Islas Argentinas (Bravo et al., 2008). Un ejemplo de ello se ve en el espectro wavelet de la *figura 5.1* para una hora determinada del día, en este caso, Concepción a las 18 horas en tiempo local ($75^{\circ}W$).

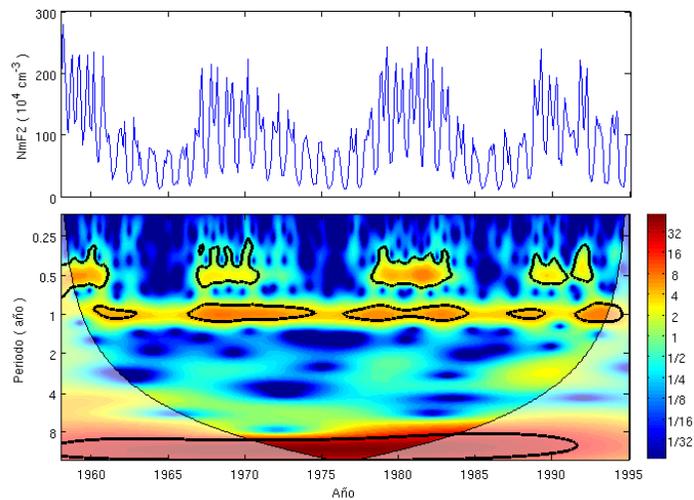


Figura 5.1: Ejemplo para las 18 hrs LT ($75^{\circ}W$) de valores medianos mensuales de NmF2 (arriba) y su respectivo espectro de wavelet (abajo) para Concepción. La barra de colores muestra la potencia espectral, la línea segmentada los periodos significativos y la línea delgada los límites de validez o cono de influencia.

Se pueden ver las periodicidades undecadal, anual, y semianual (en algunos años), variabilidades que fueron discutidas en la *sección 1.4*.

Una tabla resumen del análisis de las amplitudes de la periodicidad anual y semianual, con intervalos de horas clasificados según ciertas características observadas en los periogramas, se muestra en el *cuadro 5.1*. En el *apéndice D* se dan ejemplos representativos de cada uno de los intervalos de clasificación.

Clasificación	Concepción (hrs.)	Islas Argentinas (hrs.)
Intervalo I: Amplitud anual máxima Amplitud semianual mínima	03 - 07	21 - 07
Intervalo II: Amplitud anual mínima Amplitud semianual incrementa	08 - 11	08 - 13
Intervalo III: Amplitud anual constante Amplitud semianual máxima	12 - 20	14 - 17
Intervalo IV: Amplitud anual incrementa Amplitud semianual decrece	21 - 03	17 - 20

Cuadro 5.1: *Clasificación resumen del análisis a partir de observaciones de espectros de wavelets (Bravo et al., 2008).*

5.1.1. Modelo de 2 componentes NmF2

Al aplicar la descomposición de Fourier de 6 componentes a las evoluciones anuales de NmF2 en los intervalos de años seleccionados, se nota que con solo el promedio mas las 2 primeras componentes, representan casi en su totalidad la evolución anual. Un ejemplo de este modelo de dos componentes es mostrado en la *figura 5.2*, para una hora y año determinados. Se puede ver el mejor y peor modelo para cada lugar.

Cuantitativamente, el resumen de la varianza explicada de este modelo, considerando una clasificación por horario, lugar y actividad solar, se muestra en el *cuadro 5.2*. Se puede ver que lo muy bueno que es el modelo, considerando que la varianza explicada menor es de 61 % para Concepción y de 72 % para Islas Argentinas. Los valores menores de varianza explicada, se encuentran alejados del promedio, y en muchos casos, se deben a las bajas amplitudes de las evoluciones anuales de NmF2.

Un trabajo que utiliza el modelo de 2 componentes de NmF2 sobre Concepción se puede revisar en Bravo et al.(2010b) o de forma breve en el *apéndice C* de este trabajo, para una mayor gama de años (1958-1994).

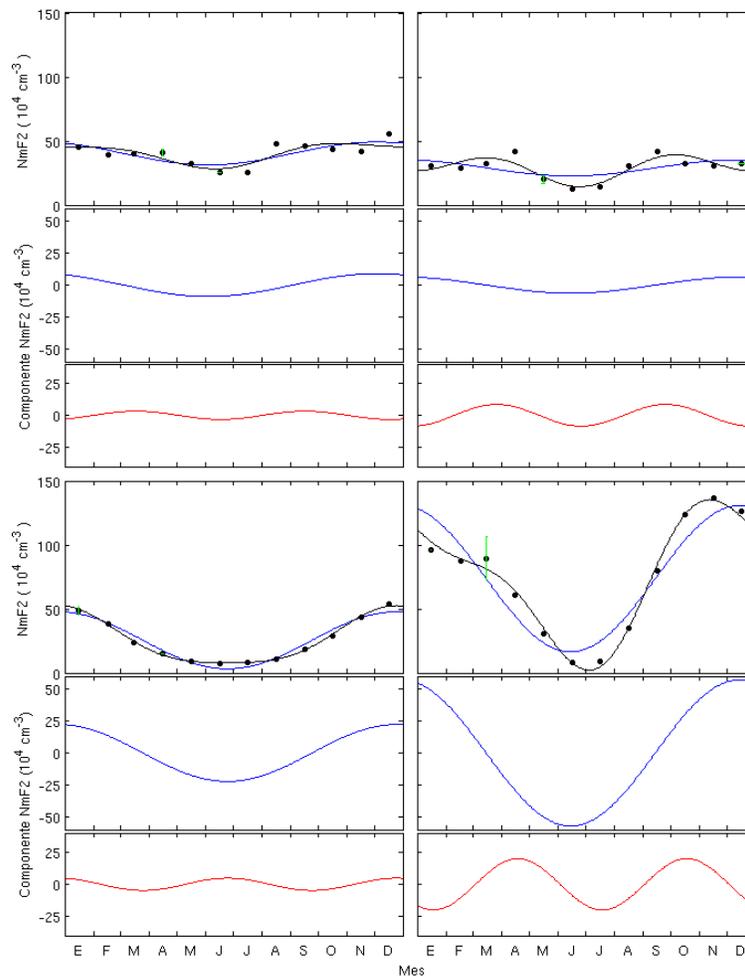


Figura 5.2: Ejemplo del modelo de dos componentes para la evolución anual de valores medianos mensuales de NmF2. Arriba: los peores casos, izquierda, Concepción a las 08 hrs LT (75°W), 1975; derecha, Islas Argentinas, 09 hrs LT (75°W), 1975. Abajo: mejores casos, izquierda Concepción, 22 hrs LT (75°W), 1975; derecha, Islas Argentinas 07 hrs LT (75°W), 1979. Los puntos son los valores observados, la línea azul la componente anual mas el promedio y la línea negra corresponde a la componente anual mas la semianual mas el promedio. La línea azul (abajo) es la componente anual y la roja la componente semianual. Las barras verdes muestran el rango intercuartil menor y mayor de los valores medianos mensuales de NmF2, para la hora determinada. Los valores son pequeños y sólo se puede apreciar el rango intercuartil para marzo en la figura inferior derecha.

Nivel de Actividad Solar	Horas del día (75°W)	Concepción			Islas Argentinas		
		min	max	prom	min	max	prom
Baja	07-17	61	98	85.5	72	99	90.4
	18-06	78	100	93.2	88	99	94.9
Alta	07-17	90	100	95.5	85	99	91.4
	18-06	88	99	95.1	91	99	96.9

Cuadro 5.2: Resumen de la varianza explicada (en %) de NmF2 con el modelo de dos componentes.

5.1.2. Comportamiento Diurno NmF2

Al observar que los tríos de años de NmF2 seleccionados por nivel de actividad solar tienen el mismo comportamiento de varianzas explicadas, fases y amplitudes a lo largo del día (figura 5.3), se procedió a promediar los valores, determinando, una evolución anual por cada nivel de actividad solar. Se descompuso con Fourier esta evolución y se modela con sus 2 primeras componentes, obteniéndose la información que se detalla en las figuras 5.4 y 5.5, para los distintos niveles de actividad solar.

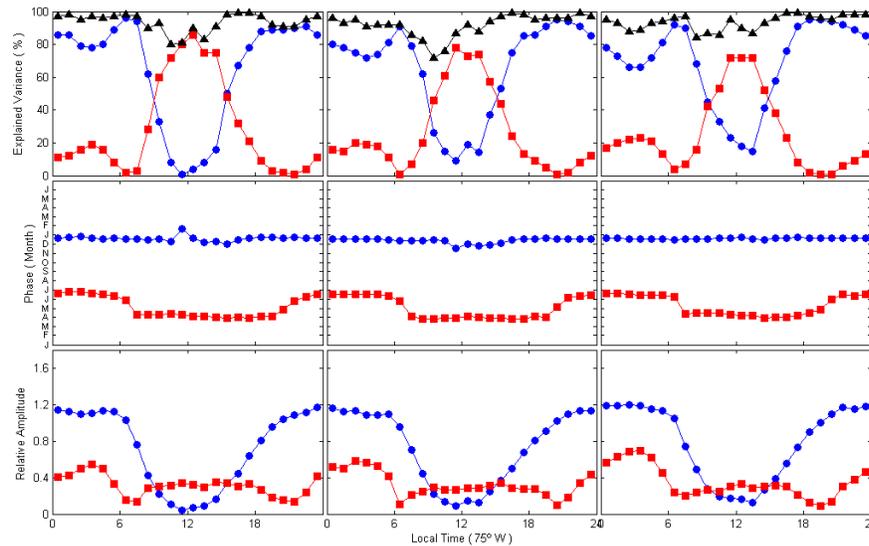


Figura 5.3: Ejemplo de comparación para trio de años definidos por actividad solar, en este caso, baja actividad solar 1974-75-76 (de izquierda a derecha) para Islas Argentinas. Varianza explicada (arriba), fase (centro) y amplitud (abajo) de las componentes anual y semianual del modelo de 2 componentes para la evolución anual de valores mediano mensuales de NmF2. Los triángulos negros es la suma de la componente anual y semianual, los círculos azules la componente anual, y los cuadrados la componente semianual.

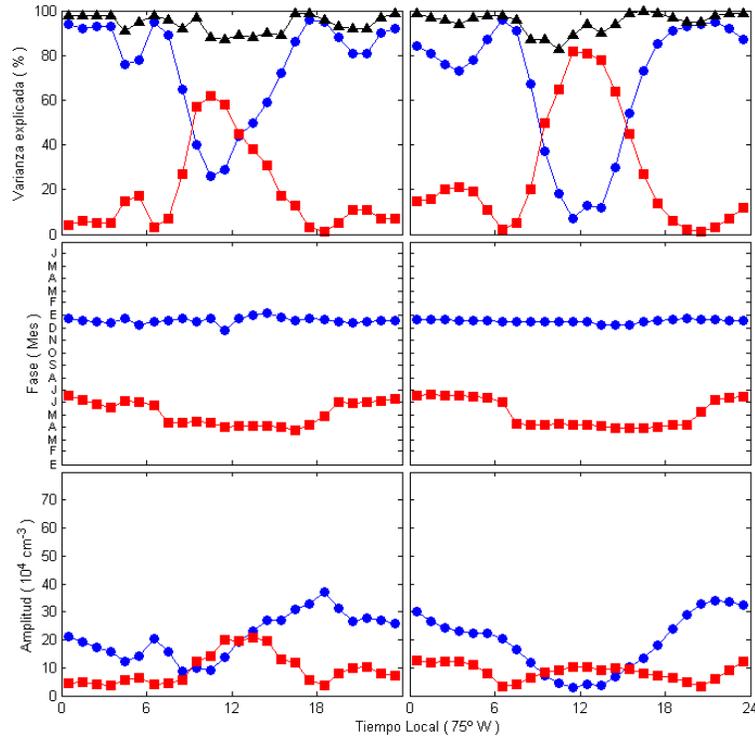


Figura 5.4: Lo mismo que en la figura 5.3, pero para los años promediados, en baja actividad solar. A la izquierda, Concepción y a la derecha, Islas Argentinas.

En este caso, la varianza para los promedios de NmF2 por nivel de actividad solar, siempre superan el 80% para Concepción y el 90% en Islas Argentinas. Se puede observar que las significancias de las componente anual y semianual, cambian de manera sistemática con la hora del día. Particularmente, la componente anual es más significativa en horas cercanas a la media noche, mientras que la semianual es más significativa en horas cercanas al mediodía. Esto ocurre para ambos lugares y niveles de actividad solar. Si se compara las dos estaciones, resulta que la componente semianual es mucho mas significativa en Islas Argentinas. En cuanto al nivel de actividad solar, en alta la componente anual es mas significativa. Se puede observar que las transiciones entre las varianzas de las componentes, mostraban un intervalo de tiempo mas corto durante transición noche-día, que la transición día noche.

En cuanto a la fase, la componente anual tiene su máximo cercano al solsticio de verano, para todas las horas, todos los lugares y todos los niveles de actividad solar (excepto algunas pocas horas de Islas Argentinas en alta actividad solar). La componente semianual tiene su máximo en el solsticio de invierno para horas de la noche y en equinoccio de otoño para horas del día, menos en Concepción para un nivel de

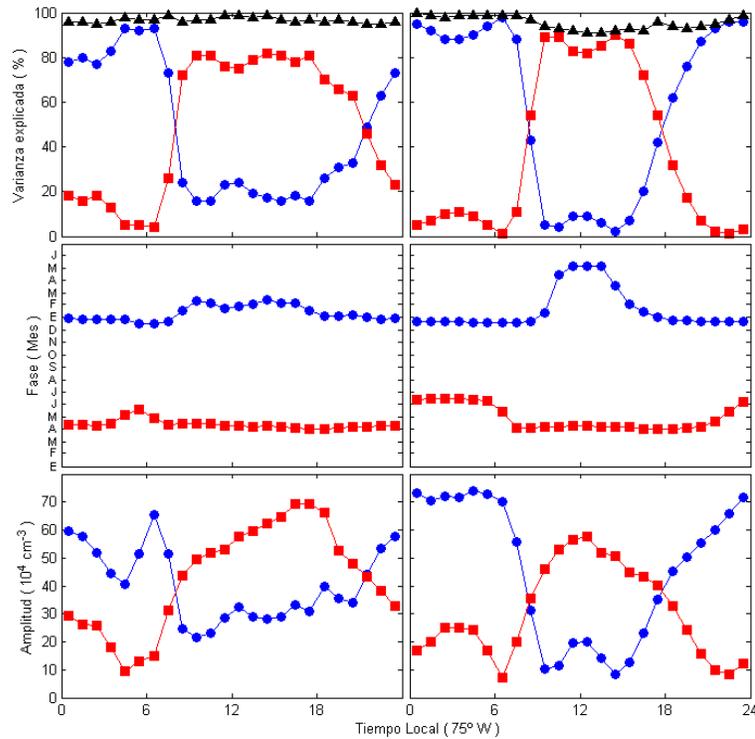


Figura 5.5: Lo mismo que en la figura 5.4 para alta actividad solar.

actividad solar alto, que es en el equinoccio de otoño en casi todas las horas.

Las amplitudes de la componente anual y semianual aumentan considerablemente en intervalos de alta actividad solar.

Inicialmente, se había considerado una serie de tiempo de foF2 representativa de condiciones geomagnética quieta, esto se puede ver en el *apéndice B*.

5.2. Vientos

Como se dijo anteriormente, se trabaja con 2 modelos de vientos termosféricos: el Modelo del Servomecanismo, y el Modelo empírico HWM.

5.2.1. HWM90

Como se puede ver en la *figura 5.6*, el modelo de 2 componentes se ajusta muy bien a las velocidades de los vientos termosféricos según el modelo HWM, con una

varianza explicada mínima de 99 % para Concepción y un 81 % para islas Argentinas.

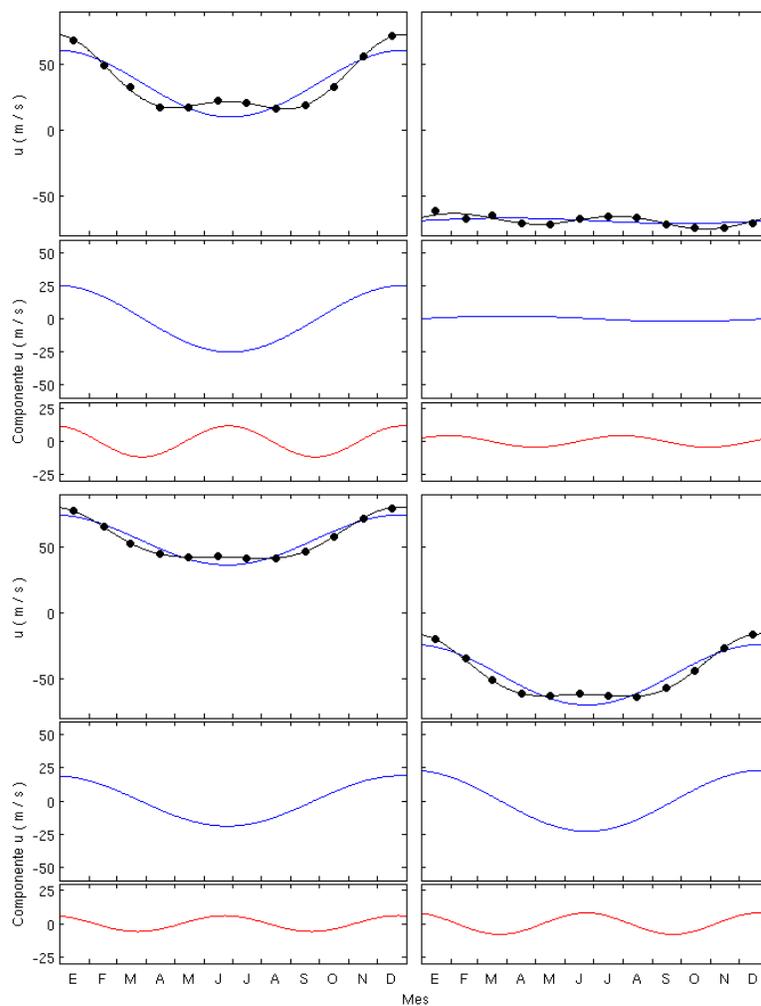


Figura 5.6: Ejemplo del modelo de dos componentes para la evolución anual de valores medianos mensuales de vientos termosféricos según el modelo HWM. Arriba: los peores casos, izquierda, Concepción a las 05 hrs LT ($75^{\circ}W$), alta actividad solar; derecha, Islas Argentinas, 11 hrs LT ($75^{\circ}W$), alta actividad solar. Abajo: mejores casos, izquierda Concepción, 04 hrs LT ($75^{\circ}W$), baja actividad solar; derecha, Islas Argentinas 15 hrs LT ($75^{\circ}W$), baja actividad solar. Los puntos son los valores observados, la línea azul la componente anual más el promedio y la línea negra corresponde a la componente anual más la semianual más el promedio. La línea azul (abajo) es la componente anual y la roja la componente semianual.

Los resultados de la descomposición de Fourier a las evoluciones promedio de cada nivel de actividad solar se ven en las *figuras 5.7 y 5.8*, para cada nivel de actividad solar.

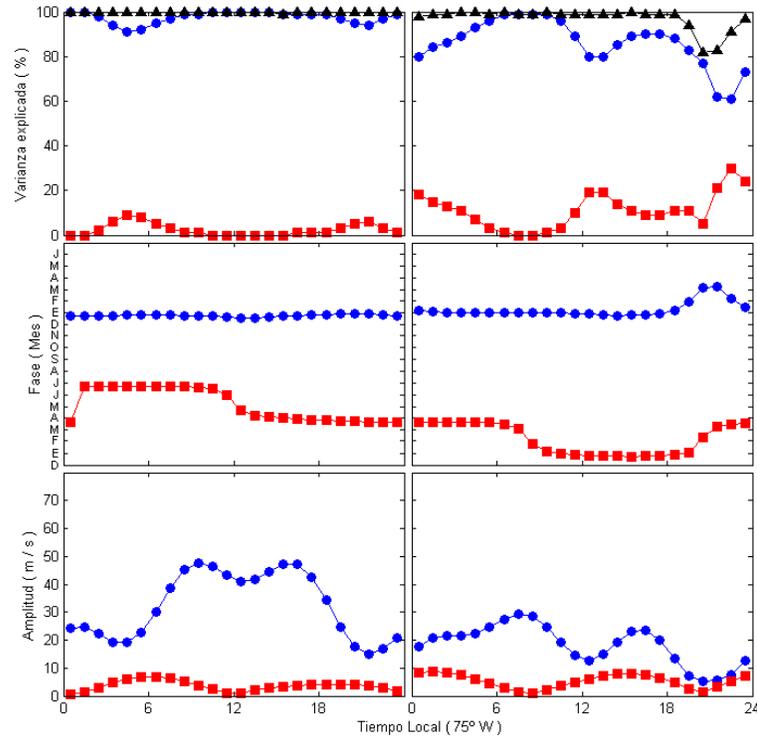


Figura 5.7: *Varianza explicada (arriba), fase (centro) y amplitud (abajo) de las componente anual y semianual del modelo de 2 componentes para la evolución anual de valores mensuales de vientos termosféricos meridionales, según Modelo HWM para Concepción (izquierda) e Islas Argentinas (derecha) en bajo nivel de actividad solar. (Se conservan la nomenclatura anterior).*

Se puede ver que la varianza explicada del modelo de dos componentes para los valores mensuales de vientos HWM es muy alta (mayores al 81 %), inclusive para Concepción resulta ser siempre mayo o igual a 99 %, lo que podría decirnos que el modelo HWM podría sólo considerar esas 2 componentes a esa latitud. La componente anual siempre es muy importante en todos los casos, mientras que la componente semianual, solo es importante para Islas Argentinas en alta actividad solar.

El máximo de la componente anual siempre es en el solsticio de verano, a excepción de unas pocas horas en Islas Argentinas en baja actividad solar (alrededor de las 20 hrs.) y en alta actividad solar (alrededor de las 10 y 20 hrs.). En estas excepciones

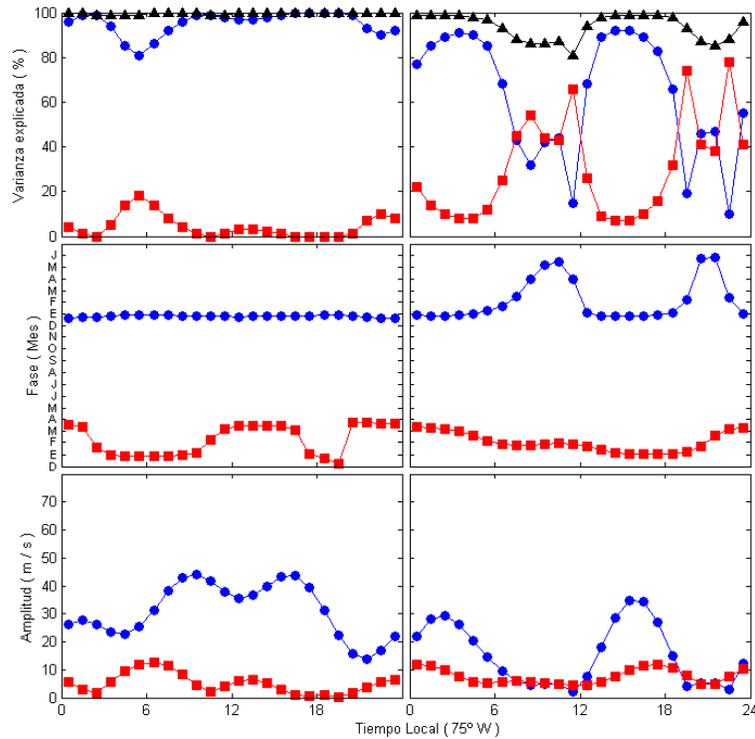


Figura 5.8: Lo mismo que en la figura 5.7 para alta actividad solar.

la determinación de la fase es muy imprecisa porque la amplitud de la componente anual es muy baja y por consiguiente, las determinaciones de fase podría ser espurias.

En el caso del máximo de la componente semianual, el comportamiento parece ser bastante sistemático con la excepción de pocas horas (alrededor de las 18 hrs.) para Concepción en alta actividad solar. Ésta última falta de regularidad se podría explicar del mismo modo que la componente anual, ya mencionado.

5.2.2. Servomecanismo

En la figura 5.9, se ven los resultados de la descomposición de Fourier de los datos de vientos termosféricos del modelo del Servomecanismo.

Se puede ver que la varianza explicada del modelo es alta en horas del día en baja actividad solar y en todas las horas para alta actividad solar. La componente anual es más importante que la semianual casi en todas las horas, no existiendo transiciones definidas entre las componentes.

El máximo de la componente anual es casi para todas las horas en el solsticio de verano para ambos niveles de actividad solar, mientras que la componente semianual no tiene un comportamiento muy definido.

La amplitud de la componentes es de la misma magnitud en ambos niveles de actividad solar.

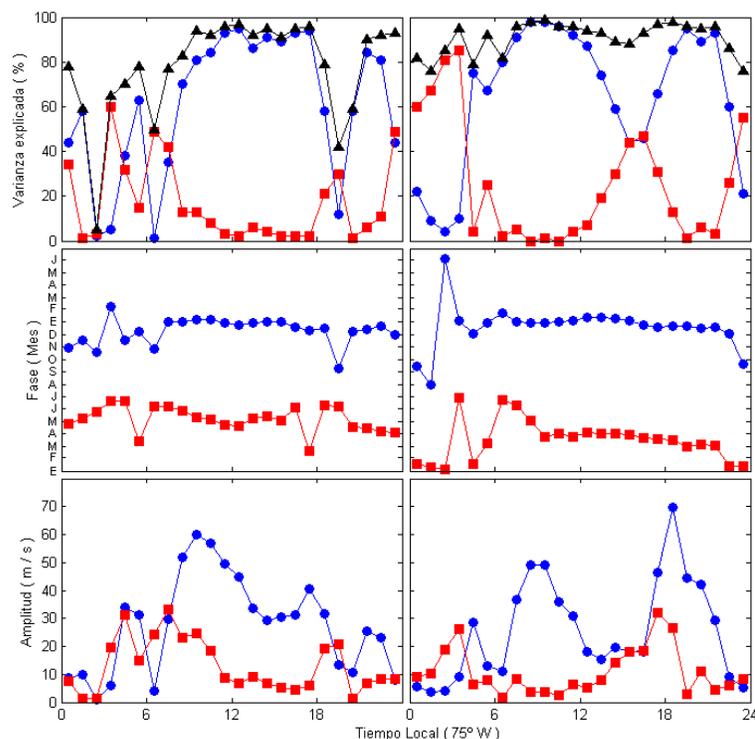


Figura 5.9: *Varianza explicada (arriba), fase (centro) y amplitud (abajo) de las componente anual y semianual del modelo de 2 componentes para la evolución anual de valores mensuales de vientos termosféricos meridionales, según el Servomecanismo para Concepción. En la izquierda, baja actividad solar, en la derecha, alta actividad solar. (Se conservan la nomenclatura anterior).*

5.3. Asociación entre vientos termosféricos y NmF2

Para intentar una asociación entre vientos termosféricos y NmF2 se hace uso de la *figuras 5.4, 5.5, 5.7 y 5.8*. Considerando sólo los aspectos más significativos de las evoluciones anuales de amplitud y fase de HWM y NmF2 se puede concluir lo indicado

en el *cuadro 5.3*.

Nivel de Actividad Solar	Concepción		Islas Argentinas	
	Baja	Alta	Baja	Alta
Componentes anuales de NmF2 y HWM	correlación todo el día	correlación todo el día	correlación todo el día	correlación todo el día
Componentes semianuales de NmF2 y HWM	correlación 00-06 anticorrelación 06-12 correlación 12-18 anticorrelación 18-00	anticorrelación 02-10 correlación 11-01	anticorrelación todo el día	anticorrelación todo el día

Cuadro 5.3: *Asociación entre componentes de NmF2 y vientos HWM.*

En primera aproximación se observa que las componentes anuales de la NmF2 y del HWM están en fase tanto para Concepción como para Islas Argentinas durante años de nivel de actividad solar baja y alta. Además, la componente anual del HWM domina la evolución anual de ambos lugares y para los dos niveles de actividad solar. Sin embargo, la componente anual de la NmF2 solo domina la evolución anual de éste durante la noche, lo hace durante mas horas para niveles de actividad solar baja. Si el HWM fuera el responsable del comportamiento de la NmF2, debería existir una relación entre fases y amplitudes muy particular para justificar este resultado.

En el caso de las componentes semianuales, los resultados mas significativos son también mas complejos de expresar. Empezando por Islas Argentinas, la fase de la componente semianual de HWM cambia durante el día de equinoccio de otoño (noche) a solsticio de verano (día) en ambas condiciones de actividad solar. Por el contrario, la componente semianual de la NmF2 lo hace a la inversa, durante la noche la fase corresponde a solsticio de invierno mientras que en el día corresponde a equinoccio de otoño. Por lo anterior se puede afirmar que las componentes semianuales están anticorrelacionadas. Estos cambios de fase de la componente semianual son coherentes con la dominancia de la componente semianual de la NmF2 durante las horas del día en Islas Argentinas. Aquí la dominancia dura mas horas durante el día para condiciones de actividad solar alta.

La situación en Concepción para las componentes semianual de HWM y NmF2 es aún mas compleja. La fase de la componente semianual de HWM cambia durante el día de solsticio de verano¹ a equinoccio de otoño. El cambio se produce aproximadamente a medio día, para ambos niveles de actividad solar (nótese la observación hecha para las fases alrededor de las 18 hrs. en la sección anterior. Por su parte la componente semianual de NmF2 cambia de fase de solsticio de invierno a equinoccio de otoño aproximadamente a la salida del sol (6-7 hrs.) y lo hace a la inversa a la

¹Como la componente es semianual, en la identificación de fase, el máximo puede ser indistintamente verano o invierno.

puesta de sol (18 hrs.), durante condiciones de nivel de actividad solar bajo. Durante alta actividad solar no hay cambios diurnos de la fase que es equinoccio de otoño. De todas maneras la componente semianual domina durante las horas del día, también durante un número mayor de horas en actividad solar alta.

Lo anterior es coherente con un patrón de correlación y anticorrelación entre HWM y NmF2 con una alternancia de 6 horas, fundamentalmente para condiciones de actividad solar baja. Para nivel de alta actividad solar, la alternancia parece ser cada 12 horas.

Aunque en principio pareciera que los vientos determinados del modelo del Servomecanismo pudieran asociarse más directamente con la NmF2, no se hace una discusión detallada, porque la determinación de vientos según el modelo del Servomecanismo depende de manera significativa de los valores de la foF2 observados. Esto implica que las evoluciones anuales de los vientos pudieran no ser totalmente independientes de las evoluciones anuales de la NmF2. La especificación cuantitativa de esta dependencia resultó estar más allá de la posibilidad de análisis de esta Tesis.

Se realiza un análisis de regresión entre NmF2 - HWM y NmF2 - Servo, calculando los coeficientes de correlación. Se obtienen los resultados resumidos en los cuadros 5.4 y 5.5. Cabe recordar que aquí el análisis se hace entre las evoluciones anuales de viento (no de sus componentes).

Nivel de Actividad Solar	Concepción		Islas Argentinas	
	Baja	Alta	Baja	Alta
Componente anual de NmF2 y viento HWM	correlación	correlación	correlación	correlación (excepto medio día y media noche)
Componente semianual de NmF2 y viento HWM	no significativa	no significativa	no significativa	no significativa

Cuadro 5.4: *Resumen de correlación entre NmF2 y vientos HWM.*

Se ha considerado un test de significancia, para ver que tan alto es el coeficiente de correlación. En algunos casos se encuentra una buena correlación, como es el caso de las componentes anuales, en otros casos no hay un comportamiento sistemático: hay correlación o anticorrelación sin un orden determinado, o incluso a veces los coeficientes de correlación no son significativos.

Con un análisis más detallado, se tiene que para Concepción en baja y alta actividad solar, las varianzas explicadas y amplitudes de la componente semianual del viento HWM, resultan ser muy pequeñas en comparación a la componente anual, esto podría explicar su correlación poco significativa. Para Islas Argentinas en baja

Nivel de Actividad Solar	Concepción	
	Baja	Alta
Componente anual de NmF2 y viento Servo	correlación (07-23 hrs)	correlación (04-22 hrs)
Componente semianual de NmF2 y viento Servo	no significativa	anticorrelación (23-03 hrs)

Cuadro 5.5: *Resumen de correlación entre NmF2 y viento Servo.*

actividad solar, se sigue repitiendo lo mismo. En cambio para Islas Argentinas en alta actividad solar, la componente semianual del viento HWM, suele ser más importante que la anual en periodos cercanos al medio día y la media noche, esto haría que los valores de correlación entre la componente semianual y el viento HWM sean más significativos, y considerando que el desfase entre componentes semianuales de NmF2 y HWM es de 3 meses, se explicaría muy bien el signo negativo de la correlación (anticorrelación) a estas horas.

Al comparar NmF2 con viento Servo, en el caso de nivel de actividad solar bajo, las varianzas explicadas y amplitudes de la componente semianual son importantes en horas de la noche y despreciable en las horas del día, por lo que las correlaciones de componente anual de NmF2 con el viento Servo a estas horas no son significativas. Tampoco es significativo la correlación entre la componente semianual de NmF2 con viento Servo. Para el caso de nivel de actividad solar alto, las varianzas explicadas y amplitudes de la componente semianual son importantes en horas de la noche y al atardecer. La correlación de las componentes semianuales de NmF2 con el viento Servo a las horas de la noche (22-03 hrs.) es negativa.

Cabe destacar que durante las pocas horas en los distintos casos, que se pudo obtener un coeficiente de correlación significativo entre la componente semianual y los modelos de viento, se obtuvo una correlación negativa. Lo que dice que cuando las velocidades del viento son negativas hay mayor concentración electrónica, y vice versa.

Capítulo 6

Discusión

Podemos comparar este trabajo con otros trabajos publicados a la fecha, por ejemplo, Ma et al.(2003) y Yu et al.(2004). En estos casos, se determinaron las componentes anual y semianual de NmF2 para varias estaciones del mundo, utilizando una descomposición de Fourier.

En Ma et al.(2003) se usaron medianas mensuales, promediando de 08-19 hora local para representar el día, y 20-07 hora local para representar la noche, para cada una de las 30 estaciones que utilizan. Éstas estaciones están agrupadas en 3 sectores longitudinales: sector de Este de Asia/Australia; sector de Europa/África; y sector de América/Pacífico Este, y se analizaron para niveles de actividad solar bajo y alto.

En el *cuadro 6.1* se compara las amplitudes de la componente semianual obtenida en este trabajo para Islas Argentinas y Concepción, con Islas Argentinas y Rarotonga¹ (20.8°S; 85.9°W) de Ma et al.(2003), correspondientes al sector de América/ Pacífico Este. Se puede ver que las amplitudes de las componentes semianual, difieren alrededor de solo un 10 % relativo a nuestros cálculos.

Por otro lado, en el trabajo de Yu et al.(2004) se usan sólo los valores medianos mensuales para las 14 hora local en un total de 104 estaciones del mundo, para nivel de actividad solar alto. Las comparaciones de las amplitudes de la componente anual (A_1), semianual (A_2) y amplitudes relativas (A_1/A_0 y A_2/A_0) se indican en el cuadro *6.2*. Los resultados difieren en alrededor de un 30 % respecto de nuestros cálculos. Estas diferencias pueden deberse a que en Yu et al.(2004) se promedian muchos más años de actividad solar alta, del intervalo contemplado en este trabajo.

Con respecto a las conclusiones en Yu et al.(2004), las amplitudes anuales de Islas Argentinas (más cercano a los polos) debiera ser mayor que en Concepción (lejano a los polos) a las 14 hrs, en cambio en este trabajo las amplitudes anuales son mayores en Islas Argentinas que en Concepción en horas de la noche (18-07 hrs). En cuanto a

¹En ausencia de resultados para Concepción, se compara con una estación de similares coordenadas geomagnéticas, en este caso Rarotonga.

Año	Este trabajo		Ma et al.(2003)	
	Islas Argentinas	Concepción	Islas Argentinas	Rarotonga
1974	9.69	16.5	9.75	16.5
1975	7.62	9.10	8.00	4.25
1976	6.24	10.2	7.00	6.50
1979	38.9	57.7	40.5	51.0
1980	38.6	46.9	41.0	–
1981	51.5	69.5	53.0	–

Cuadro 6.1: Comparación entre amplitudes de componentes semianual de NmF2 [10^4cm^{-3}] de este trabajo y Ma et al.(2003). Las amplitudes fueron leídas de la figura 5.

las amplitudes semianuales, resultan ser similares para ambos lugares.

Estación	Este trabajo					Yu et al.(2004)	
	A_0	A_1	A_2	A_1/A_0	A_2/A_0	A_1/A_0	A_1/A_0
Concepción	202	28.2	62.4	0.140	0.309	0.10	0.26
Islas Argentinas	87.5	12.5	44.7	0.144	0.513	0.10	0.65

Cuadro 6.2: Comparación entre las amplitudes relativas de componentes anual (A_1/A_0) y semianual (A_2/A_0) de NmF2 [10^4cm^{-3}] de este trabajo y Yu et al.(2004). Las amplitudes fueron leídas de las figuras 2 y 5.

Los 2 trabajos anteriores nos muestran mas sobre la estadística de las componentes alrededor del mundo. En Zou et al.(2000) y Rishbeth et al.(2000) se trata de identificar el origen de la componente semianual, específicamente, mostrando que al mediodía la NmF2 está estrechamente relacionado con la razón de concentraciones atómico/molecular ($[O]/[N_2]$), lo cual sugiere que las variaciones de NmF2 con la longitud geográfica y magnética son grandes debido a la geometría de los óvalos aurorales.

Considerando las coordenadas magnéticas de las estaciones utilizadas en este trabajo, Concepción estaría en el límite de sector ecuatorial, mientras que Islas Argentinas corresponde a un sector de latitudes medias. Según Rishbeth et al.(2000), en latitudes geomagnéticas medias no deberían importar los efectos del campo eléctrico, a diferencias de latitudes geomagnéticas bajas. En su trabajo Rishbeth también propone 6 de las posibles explicaciones de las variaciones anual y semianual de NmF2, detalladas en el *apéndice A*.

Estudios recientes como Azpilicueta (2010) sugiere la posibilidad de que la variable geomagnética sea el responsable de la periodicidad semianual de muchos parámetros atmosféricos. Con respecto a esto, en un principio se estaban utilizando para Con-

cepción, los valores representativos de condiciones de actividad geomagnética quieta (Arriagada y Foppiano, 1999). Las figuras de este análisis se encuentra en el *Apéndice B*.

Uno de los puntos importantes a recalcar es que las diferencias entre valores representativos de condiciones geomagnéticamente quieta y los utilizados en este trabajo, es su disminución considerable de la amplitud de la variación semianual. Esto se visualiza claramente si comparamos la figura izquierda de las *figuras 5.4* y *5.5* con las *figuras B.1* y *B.2*.

Capítulo 7

Conclusiones

El modelo de dos componentes es muy bueno para explicar la evolución anual de la NmF2, lo cual muestra que en una primera aproximación, deben considerarse solo 2 procesos físicos. Estos procesos tendrían características similares en años de un mismo nivel de actividad solar. Es probable que uno de estos mecanismos, el responsable de la componente semianual, podría ser menos efectivo durante intervalos de actividad geomagnética baja.

La tasa de cambio de las varianzas explicadas en las transiciones noche-mañana y tarde-noche, nos da una idea de los umbrales y constantes de tiempo de los posibles mecanismos.

La componente semianual de la NmF2 pareciera estar relacionada con el modelo de viento del Servomecanismo. Sin embargo, como el viento termosférico calculado con el método del Servomecanismo depende de los valores de la foF2, las evoluciones anuales del viento termosférico y de la NmF2 pudieran no ser totalmente independientes.

Con respecto a los vientos termosféricos meridionales del modelo empírico HWM, existe una clara asociación entre las componentes anual de NmF2 y HWM en ambos lugares y niveles de actividad solar. Sin embargo, no es posible, sobre la base de los resultados de esta tesis, especificar una relación causal entre HWM y NmF2.

Probablemente el desarrollo del modelo semiempírico de la NmF2 (Arriagada y Foppiano, 1992; y Burgos, 2002), incluyendo un término analítico para la componente de transporte, pudiera permitir una asociación mas precisa entre la NmF2 y los vientos termosféricos. Alternativamente el uso de un modelo de vientos termosféricos como el propuesto por Drob et al. (2008) pudiera conducir al esclarecimiento del origen de la componente semianual de la NmF2.

Agradecimientos

- LOS VALORES MEDIANOS MENSUALES DE f_oF_2 PROPORCIONADO POR EL UK SOLAR SYSTEM DATA CENTRE.
- EL MODELO HWM90 PROPORCIONADO POR EL NATIONAL SPACE SCIENCE CENTER, GREENBELT, USA.
- UNA PRIMERA VERSIÓN RESUMIDA DE ESTE TRABAJO FUÉ COMENTADA POR HENRY RISHBETH (22 de Febrero 2010) ANTES DE QUE FALLECIERA (24 de Mayo 2010).

Bibliografía

- [1] Aikio, A. y Nigrén, T. (2008) *Ionospheric Physics*, Apuntes del Departamento de Ciencias Físicas de la Universidad de Oulu.
- [2] Arriagada, M.A. (1988) *Modelo Semiempírico de la Concentración Electrónica máxima de la Ionosfera sobre Concepción*, Tesis de Magíster en Física, Universidad Austral de Chile.
- [3] Arriagada, M.A. y Foppiano A.J. (1992). *Semiempirical model of the ionospheric maximum electron concentration for South American middle latitudes*. Geofísica Internacional, 31, pp. 125-129.
- [4] Arriagada, M.A. y Foppiano A.J. (1999). *Algoritmo para completar series de valores de la frecuencia crítica de la región F de la ionosfera sobre Concepción*. revista Brasileirade Geofísica, 17, pp. 13-20.
- [5] Azpilicueta, F. (2010) *Ionospheric Anomalies*, Presentación en Pan-American Advanced Studies Institute School and Workshop on the Dynamics and Chemistry of the Upper Atmosphere. 4-9 Octubre, San Juan, Argentina.
- [6] Buonsanto, M.J (1991) *Neutral Winds in the Thermosphere at Mid-latitudes Over a Full Solar Cycle: A Tidal Decomposition*, Journal of Geophysical Research, 96, 3711-3724.
- [7] Bravo, M.A (2008a) *Formación de una Región Ionosférica*, Informe de Tópicos en Física I, 1er semestre.
- [8] Bravo, M.A (2008b) *Componente anual y semi-anual de la concentración electrónica máxima sobre Concepción e Islas Argentinas, Antártica: Evolución diurna*, Informe de Tópicos en Física II, 2do semestre.
- [9] Bravo, M.A.; Abarca del Río, R. y Foppiano, A.J. (2008) *Componente Anual y Semianual de la Concentración Electrónica Máxima de la Ionósfera sobre Islas Argentinas, Antártica, y Concepción, Chile*, presentación en el IV Simposio Latinoamericano sobre Investigaciones Antárticas y VII Reunión Chilena de Investigación Antártica, Valparaíso, 3-5 Septiembre.
- [10] Bravo, M.A.(2009) *Asociación entre vientos termosféricos y concentración electrónica máxima de la ionosfera sobre Concepción e Islas Argentinas*, Informe de Proyecto de Tesis, 2do semestre.

- [11] Bravo, M.A.; Foppiano, A. y Abarca del Río, R. (2010a) *Annual and Semi-Annual Components of Observed NmF2 and HWM90 Winds at Argentine Islands*, presentación en el SCAR2010 Open Science Conference. 3-6 Agosto, Buenos Aires, Argentina.
- [12] Bravo, M.A.; Foppiano A.J. y Abarca del Río R. (2010b) *Long-term dependencies of annual and semi-annual components of the NmF2 over Concepción?*, artículo aceptado y enviado en The Open Atmospheric Science Journal, Special Issue Long-Term Changes in the Atmosphere.
- [13] Burgos, R. (2002) *Modelo Simple de la Concentración Electrónica Máxima de la Ionósfera: Concepción, Grahamstown e Isla Rey Jorge*, Tesis de Licenciatura en Física.
- [14] Drob, D.P. et al. (2008) *An empirical model of the Earth's Horizontal Wind Fields*, T. Geophys. Res., 113.
- [15] Emmert, J.T.; Drob, D.P.; Shepherd, G.G.; Hernandez, G.; Jarvis, M.J.; Meriwether, J.W.; Niciejewski, R. J.; Sipler, D.P. y Tepley, C.A. (2008) *DWM07 Global Empirical Model of Upper Thermospheric Storm-induced Disturbance Winds*, J. Geophys. Res., 113.
- [16] Flores, P. (2000) *Vientos Termosféricos Neutros derivados de observaciones ionosféricas sobre Concepción entre 1979 y 1989*, Tesis de Magíster en Física, Universidad Austral de Chile.
- [17] Foppiano A.J. (1981) *Apuntes Curso Introducción a la Aeronomía*, Facultad de Ciencias, Depto. de Física, Universidad de Concepción.
- [18] Foppiano A.J. (1993) *Frecuencia crítica de la región F de la ionosfera sobre la isla Rey Jorge, Antártica*, Ser. Cient. INACH 43, pp. 67-72.
- [19] Giraud y M. Petit (1978) *Ionospheric Techniques and Phenomena*, D Reidel Publishing Company.
- [20] Hedin, A.E.; Spencer, N.W. y Killeen, T.L. (1988) *Empirical Global Model of Upper Thermosphere Winds based on Atmosphere and Dynamics Explorer Satellite Data*, Journal of Geophysical Research, 93, pp. 9959-9978.
- [21] Ivanov-Kholodnyi, G.S. (1975) *Semiannual Variations in Aeronomy and Geomagnetism*, Sov. Phys.-Usp., 17, pp. 805-807.
- [22] Kelley, M. (2009) *The Earth's Ionosphere Plasma Physics and Electrodinamics*, Elsevier, 2da edición.
- [23] Lindzen, R. S. (1974) *Tides and Internal Gravity Waves in the Atmosphere*, Developments in Atmospheric Science, 1: Structure and Dynamics of the Upper Atmosphere, Elsevier Scientific Publishing Company, pp. 21.

- [24] Ma, R.; Xu, J.; y Liao, H. (2003) *The features and a possible mechanism of semiannual variation in the peak electron density of the low latitude F2 layer*, Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 65, pp. 47-57.
- [25] Ratcliffe, J.A. (1970) *Sol, Tierra y Radio, Una introducción a la ionósfera y magnetósfera*, Traducción de Elías Ovalle.
- [26] Ratcliffe, J.A. (1972) *An introduction to the ionosphere and magnetosphere*, Cambridge University Press.
- [27] Rishbeth, H. (1988) *Basic physics of the ionosphere: a Tutorial review*, Journal of the Institution of Electronic and Radio Engineers, 58, pp. S207-S223.
- [28] Rishbeth, H.; Müller-Wodarg, I.C.F.; Zou, L.; Fuller-Rowell, T.J.; Millward, G.H.; Moffet, R.J.; Idenden, D.W. y Aylward, A.D. (2000) *Annual and semi-annual variations in the ionospheric F2-layer: II. Physical discussion*, Annales Geophysicae, 18, pp. 945-956.
- [29] Yu, T.; Wan, W.; Liu, L. y Zhao, B. (2004) *Global scale annual and semi-annual variations of daytime NmF2 in the high solar activity years*, Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 66, pp. 1691-1701.
- [30] Zou, L.; Rishbeth, H.; Müller-Wodarg, I.C.F.; Aylward, A.D.; Millward, G.H.; Fuller-Rowell, T.J.; Idenden, D.W. y Moffet, R.J. (2000) *Annual and semiannual variations in the ionospheric F2-layer: I. Modelling*, Annales Geophysicae, 18, pp. 927-944.

Apéndice A

Seis posibles explicaciones de las variaciones anual y semianual de NmF2.

Tal como cita Rishbeth et al.(2000), las seis posibles explicaciones de las variaciones anual y semianual de la NmF2 son:

1. Cambios en la composición debido a efectos dinámicos de gran escala en la termosfera. Mecanismo estudiado por Millward et al. (1996a) y en Rishbeth et al.(2000).
2. Variación en la actividad geomagnética.
3. Energía del viento solar (Lal, 1992, 1998).
4. Efectos asociados a ondas y mareas atmosféricas.
5. Cambios en la turbulencia atmosférica.
6. Anisotropía de la emisión de EUV en latitud solar (Burkard, 1951).

Apéndice B

Modelo de 2 componentes con valores medianos mensuales de foF2 representativos de condiciones geomagnética quietas

En un principio, se comenzó a trabajar con los valores medianos mensuales de frecuencia crítica de la capa F2, foF2, representativos de condiciones geomagnética quietas para Concepción, es decir, valores sólo para días con un índice $A_p \leq 20$.

Considerando los mismos intervalos de años mencionados en la *sección 4.1* para los niveles de actividad solar bajo y alto, se procedió a la descomposición por Fourier, para después reconstruir la evolución anual con 2 componentes. La información de la varianza explicada, fase y amplitud se muestran en las *figuras B.1* y *B.2* para bajo y alto nivel de actividad solar, respectivamente.

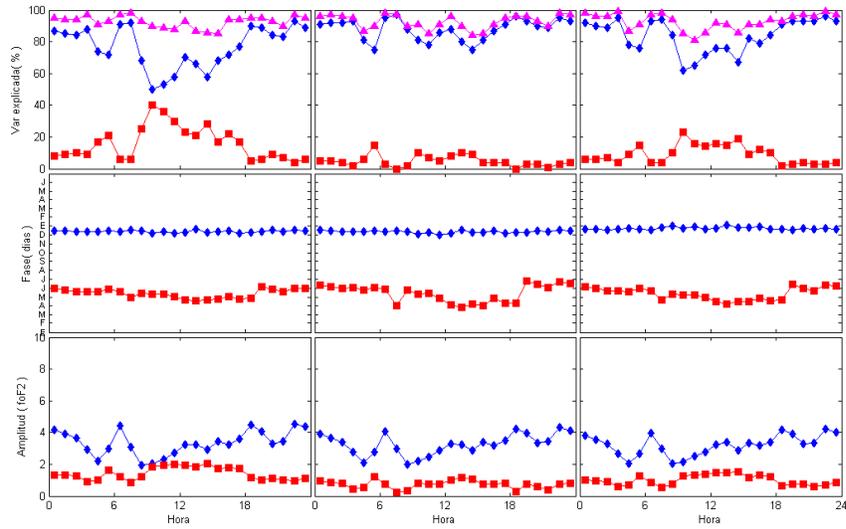


Figura B.1: Varianza explicada, fase y amplitud para valores de foF2 representativos de actividad geomagnética quieta $A_p \leq 20$, para Concepción en años 1974-75-76 (de izquierda a derecha). Varianza explicada (arriba), fase (centro) y amplitud (abajo) de las componentes anual y semianual del modelo de 2 componentes para la evolución anual de valores medianos mensuales de foF2. Los triángulos magenta es la suma de la componente anual y semianual, los círculos azules la componente anual, y los cuadrados la componente semianual

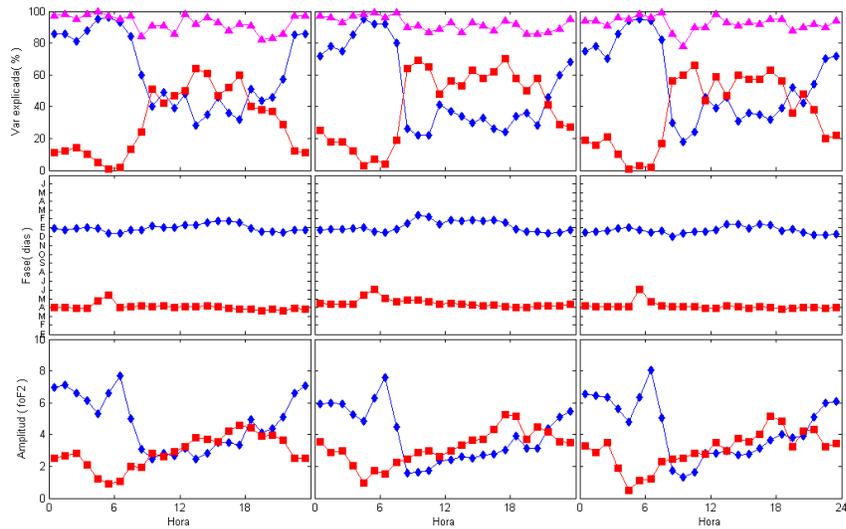


Figura B.2: Lo mismo que la figura anterior pero para años 1979-80-81.

Apéndice C

Componentes anual y semianual para Concepción entre los años 1958-94.

Al aplicar la descomposición de Fourier en 6 componentes a toda la serie de tiempo de NmF2 que se dispone para Concepción, es decir, para las evoluciones anuales de 37 años (1958-94), y posteriormente reconstruir estas evoluciones anuales a partir de su valor medio mas las 2 primeras componentes, se obtiene como resultado, un modelo también muy bueno. En el peor de los casos (aislado) se obtiene un 44% de varianza explicada (10 LT, 1985), pero en general la varianza explicada media es de 91.4% y la mediana de 93.0%, siendo significativamente mejor para las horas de noche y alto nivel de actividad solar (Bravo et al., 2010).

En la *figura C.1* se muestran las variaciones de las amplitudes y fases de las componentes anual y semianual, y se comparan con el flujo solar F10.7 cm. Se consideran promedios de grupos de horas debido a sus características similares, específicamente de 10-15 horas para el día, y 22-03 horas para la noche.

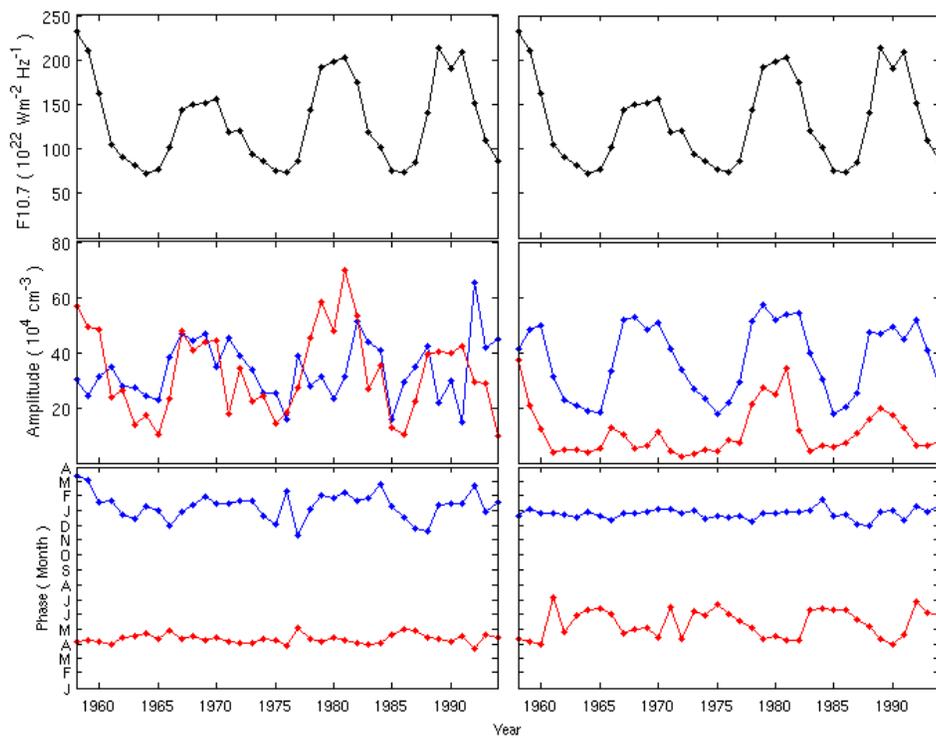


Figura C.1: Valores anuales de flujo solar $F_{10.7}$ cm. (arriba) y valores medios de la amplitudes (centro) y fases (abajo) de las componentes anual (azul) y semianual (roja). (izquierda) Para horas del día, 10-15 hrs. (derecha) Para horas de la noche, 22-03 hrs. en Concepción (Bravo et al., 2010).

Apéndice D

Clasificación de espectros de wavelets según cuadro 5.1.

Las *figuras D.1 a la D.4* muestran espectros representativos de cada uno de los intervalos de clasificación que se hizo en el *cuadro 5.1*, obtenidas de la presentación Bravo et al. (2008).

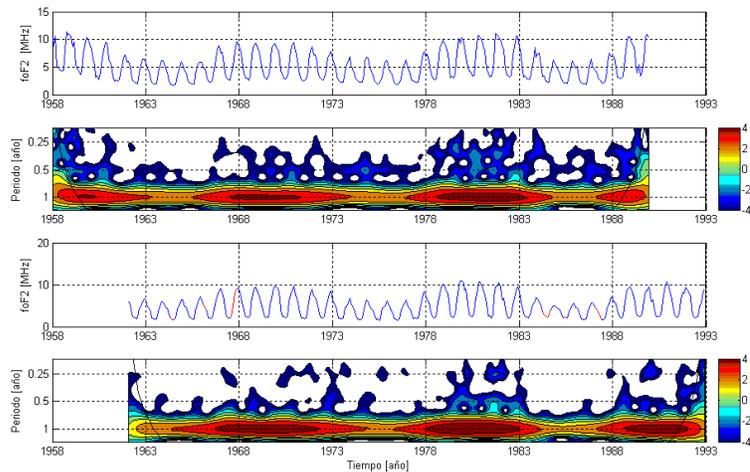


Figura D.1: *Series de tiempo y espectrogramas respectivos de la concentración electrónica máxima de la ionosfera, en unidades de frecuencia de plasma, foF2 para Concepción (arriba) e Islas Argentinas (abajo), para el INTERVALO I, ambos lugares a las 06 hrs. LT (75° W). En rojo indica valores interpolados de la serie de tiempo por falta de observaciones. La barra de colores muestra la potencia espectral, y la línea negra el cono de significancia.*

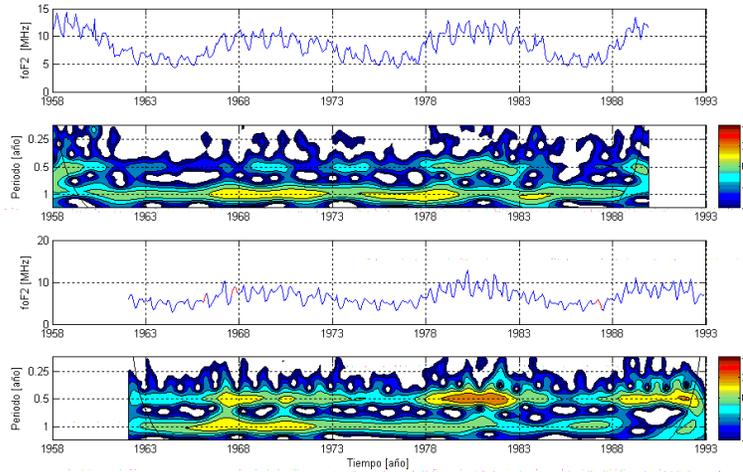


Figura D.2: Lo mismo que la figura D.1 pero para el INTERVALO II, Concepción, 09 hrs. e Islas Argentinas, 09 hrs. LT (75° W).

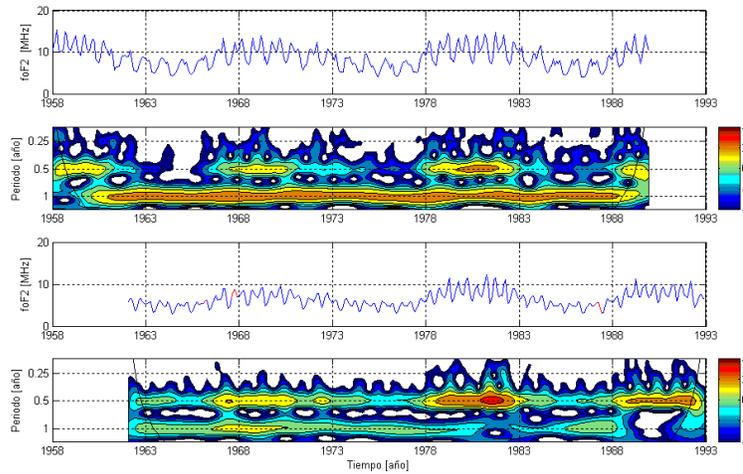


Figura D.3: Lo mismo que la figura D.1 pero para el INTERVALO III, Concepción, 17 hrs. e Islas Argentinas, 14 hrs. LT (75° W).

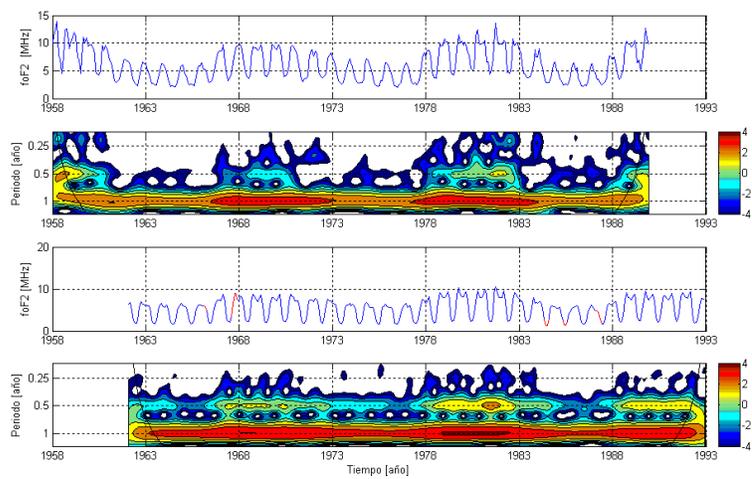


Figura D.4: Lo mismo que la figura D.1 pero para el INTERVALO IV, Concepción, 22 hrs. e Islas Argentinas, 18 hrs. LT (75° W).

Referencias

Bravo, M.A (2008) *Componente anual y semi-anual de la concentración electrónica máxima sobre Concepción e Islas Argentinas, Antártica: Evolución diurna*, Informe de Tópicos en Física II, 2do semestre.

Bravo, M.A.; Abarca del Río, R. y Foppiano, A.J. (2008) *Componente Anual y Semi-anual de la Concentración Electrónica Máxima de la Ionósfera sobre Islas Argentinas, Antártica, y Concepción, Chile*, presentación en el IV Simposio Latinoamericano sobre Investigaciones Antárticas y VII Reunión Chilena de Investigación Antártica, Valparaíso, 3-5 Septiembre.

Bravo, M.A.; Foppiano A.J. y Abarca del Río R. (2010) *Long-term dependencies of annual and semi-annual components of the NmF₂ over Concepción?*, artículo aceptado y enviado en The Open Atmospheric Science Journal, Special Issue Long-Term Changes in the Atmosphere.

Rishbeth, H.; Müller-Wodarg, I.C.F.; Zou, L.; Fuller-Rowell, T.J.; Millward, G.H.; Moffet, R.J.; Idenden, D.W. y Aylward, A.D. (2000) *Annual and semiannual variations in the ionospheric F₂-layer: II. Physical discussion*, Annales Geophysicae, 18, pp. 945-956.