

VARIACIONES DE LA FRECUENCIA CRITICA DE LA REGION E EN LOS REGISTROS DE LA RED SUDAMERICANA DE SONDAJOS

M.M. de Gonzalez, C. Moyano

Centro de Investigaciones Regionales de San Juan

y

S. Duhau

Departamento de Física, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales

Universidad de Buenos Aires

RESUMEN

Se estudia el comportamiento estacional (Anomalia de Appleton) en siete estaciones ionosféricas de la red sudamericana, analizando la variación de los coeficientes A y p en la expresión: $(foE)^h = A \cos^p \chi$ para un año de datos. Se utilizan todos los valores horarios de foE, correspondiéndolos a su respectivo ángulo cenital solar, y eliminando los valores extremos mediante un criterio estadístico, calculando luego los coeficientes para cada mes a los que se normaliza con el valor medio durante ese mes de $F_{10,7}$. Se encuentra que con esta nueva metodología con el estudio de un solo año de datos se hallan resultados en coincidencia, para las estaciones ionosféricas en común, con los obtenidos por otros autores estudiando 11 años de datos. Seleccionando el intervalo de ángulos cenitales mediante un criterio que disminuye el error numérico del método se consigue aumentar considerablemente el coeficiente de correlación en la expresión para foE, lo que permite mostrar que el coeficiente p varía con la latitud, teniendo un mínimo a aproximadamente los -45° . Se muestra además que ambos coeficientes dependen del estado de perturbación magnética de la ionósfera.

ABSTRACT

The seasonal behaviour (Appleton anomaly) is studied for seven ionospheric stations belonging to the South American ionosonde network, analysing the variation of the coefficients A and p in the expression: $(foE)^h = A \cos^p \chi$ for a year of data. To this end, all the hourly values of foE are used, matching them with their respective solar zenith angles, and eliminating the extreme values by means of a statistical criterium, whereafter the coefficients for each month are calculated and normalized with the corresponding monthly mean value of $F_{10,7}$. With this new methodology, it is found that with the study of a single year of data, results are obtained which coincide with those of other authors for 11 years of data, for the same ionospheric stations. By selecting the interval of zenith angles with a criterium that reduces the numerical error of the method, the correlation coefficient of the expression for foE is considerably increased, making it possible to show that the coefficient p varies with latitude, with a minimum at approximately -45° . It is also shown that the two coefficients depend on the degree of magnetic perturbation of the ionosphere.

1. INTRODUCCION

El valor medio mensual de foE como función de la actividad solar, la posición geográfica, el mes y el tiempo local puede expresarse como (Muggleton, 1975):

$$(foE)^h = S B \cos^m \chi_{med} \cos^p \chi, \quad (1)$$

donde χ es el ángulo cenital solar, χ_{med} su valor al mediodía, S y B son funciones que dependen exclusivamente de la actividad solar y de la posición geográfica respectivamente, m varía con la latitud, θ , y p no varía sustancialmente para latitudes no ecuatoriales (Maeda y Fukao, 1972; Kouris y Muggleton, 1973a).

La dependencia de S con el número de manchas solares, R, es (Maeda y Fukao, 1972):

$$S = 1 + 0,01 R, \quad (2a)$$

para latitudes medias y altas, y:

$$S = 1 + 0,082 R, \quad (2b)$$

para bajas latitudes, y su dependencia con el flujo de radiación observado a la longitud de onda de 10,7 cm, $F_{10,7}$, es (Kouris, 1971):

$$S = 1 + 0,0094 (F_{10,7} - 66). \quad (3)$$

Utilizando una de las expresiones (2) o (3) se puede eliminar la dependencia de foE con la actividad solar. La elección de (3) tiene la ventaja de incluir implícitamente la variación de ese parámetro con la distancia entre la tierra y el sol, d; de lo contrario, si se quiere eliminar esa dependencia es necesario multiplicar (1) por $d^{-2,4}$ (Muggleton, 1971).

Eliminada la dependencia con la actividad solar, la ecuación (1) se puede escribir como (Kouris y Muggleton, 1973b):

$$(foE)^h = A \cos^p \chi, \quad (4)$$

con:

$$A = B \cos^m \chi_{med}. \quad (5)$$

Muchos son los trabajos que se han hecho para determinar A y p en la expresión (4), desde que Appleton (1963) descubriera la anomalía que lleva actualmente su nombre y que consiste en una variación estacional de A, parámetro que resulta ser menor en el verano que en el invierno local. Los trabajos más completos por el número de estaciones ionosféricas utilizadas, 45, son los de Kouris y Muggleton (1973a y b) (K y M, 1973a y b); por ello en lo que sigue nos referiremos con más detalle a estos trabajos, analizando las innovaciones que es necesario hacer a su metodología cuando se quieren obtener resultados confiables utilizando un solo año de datos en lugar de once.

2. ESTUDIO DE LA ANOMALIA DE APPLETON

2.1. Metodología para el análisis de un solo año de datos

Los sondadores ionosféricos producen valores horarios de foE. La metodología de K y M en el análisis de la expresión (4) es tomar para cada estación ionosférica los datos de un mes y, con el objeto de eliminar valores extremos, calcular con los mismos las medianas de cada hora, correspondiéndolas luego al ángulo cenital del día medio de ese mes a esa hora. De esta forma obtienen alrededor de una decena de pares de datos a partir de los cuales calculan los parámetros A y p por cuadrados mínimos. Para eliminar la variación con la actividad solar toman un ciclo solar completo y calculan el promedio de valores medios mensuales y normalizan el resultado utilizando el promedio del flujo solar $F_{10.7}$ de los once años para cada mes en la expresión (3).

En un trabajo anterior (González y otros, 1978) se analizaron los datos de dos estaciones ionosféricas (San Juan y Buenos Aires) recurriéndose a un método alternativo. Se consideraron todos los valores horarios, correspondiéndolos uno a uno con su respectivo ángulo cenital solar exacto o con uno distante no más de dos días, esto es particularmente importante en los meses equinocciales, donde, por ejemplo, la variación del ángulo cenital para una misma hora en San Juan llega a ser de 11° entre el primero y el último día del mes. Al calcular los coeficientes de la curva de ajuste (4) por cuadrados mínimos, se eliminaron los valores extremos de la variable por medio de un proceso iterativo que excluye del análisis aquellos datos que están por fuera de dos veces la desviación estándar de los mismos, σ . Con los puntos restantes se calcularon nuevamente los coeficientes A y p hasta que no quedaron datos fuera de 2σ ; el proceso converge rápidamente siendo el número de puntos que quedan fuera del análisis bajo en comparación con el total. Para eliminar la dependencia de $(foE)^4$ con la actividad solar se dividieron estos valores de A por un único valor de S calculado utilizando el promedio anual de R en la expresión (2a). Finalmente, con los valores de A así obtenidos se calcularon los valores de B y de m en la expresión (5).

El método iterativo empleado para eliminar datos extremos fue utilizado como una forma alternativa de eliminar las variaciones al azar de foE, dado que son estas variaciones las que llevaron a K y M (1973a) a utilizar 11 años de datos aún luego de conocer la dependencia y, por lo tanto, poder eliminar la variación con la actividad solar (ecuación 3).

La misma metodología para eliminar datos extremos se emplea en el presente trabajo, pero, se cambia el método de eliminación de la dependencia de (foE) con la actividad solar puesto que, con el antes descrito, la variación de A con X_{med} no resulta simétrica alrededor de X_{med} mínimo, como debe ser para que esa variación pueda ajustarse por una curva de la familia dada por la expresión (5). Si en cambio, para cada estación se divide el valor de A correspondiente a cada mes por el de S

calculado con el promedio de la actividad solar durante ese mes, los valores así obtenidos se simetrizan respecto al valor mínimo de χ_{med} . Para hacer esto se utilizó la ecuación (3) que, como ya se mencionó, tiene la ventaja de incluir la dependencia de foE en la elipticidad de la órbita de translación de la tierra alrededor del sol.

2.2. Datos

Se emplearon los valores horarios individuales de foE del año 1971 de las estaciones ionosféricas de Huancayo, Tucumán, San Juan, Buenos Aires, Concepción, Puerto Stanley e Islas Argentinas, tres de las cuales: Huancayo, Concepción y Puerto Stanley fueron ya estudiadas por K y M.

En particular, los datos de San Juan y Buenos Aires han sido provistos por un trabajo anterior (González y otros, 1978) habiendo sido obtenidos de acuerdo a las más recientes normas de interpretación (URSI, Versión Castellana. Los datos de Tucumán fueron gentilmente puestos a disposición por el LIIF (Laboratorio Ionosférico del Instituto de Física de la UNT) y los restantes fueron obtenidos del Centro Mundial de Datos.

2.3. Resultados

Según K y M (1973a) las variaciones de p no son estadísticamente significativas por lo que estos autores utilizaron su valor promedio de 1,20. A efectos de comparar nuestros resultados con los de estos autores, para calcular los valores de A se ha utilizado aquí ese promedio que no se aparte significativamente del promedio hallado por nosotros que es de 1,23.

En la Figura 1 se muestra el resultado para las siete estaciones ionosféricas consideradas junto con el correspondiente de K y M (1973b) para las estaciones en común. Se observa un buen acuerdo, salvo en Huancayo.

En la Figura 2 se grafican los valores de B (Figura 2a) y los de m (Figura 2b) obtenidos aquí junto con los dados por K y M para sus 45 estaciones ionosféricas. Salvo en Huancayo, se observa una muy buena coincidencia en los resultados.

Por otra parte los puntos correspondientes a las estaciones agregadas en el presente trabajo confirman la forma general de la curva dada por K y M. Obsérvese que el valor de m en Huancayo si bien cae dentro de la forma general de la curva discrepa numéricamente. Dada la coincidencia de los otros resultados esto indica la necesidad de un ulterior análisis de esta estación.

3. LA VARIACION DE p CON LA LATITUD Y LA ESTACION DEL AÑO

Si bien en varios de los primeros trabajos se concluye que p varía estacional y latitudinalmente (ver p. ej. Appleton y Lyon, 1957), los diversos trabajos sobre el tema dan resultados contradictorios (K y M, 1973a). En particular, el resultado de los dos trabajos más recientes lo es también; para Fukao y Maeda (1972), quienes analizaron 25 estaciones ionosféricas, p vale: 1,2 , 1,04 y

1,08 para verano, invierno y equinoccios, respectivamente, a latitudes medias, 1,10 a altas latitudes y 1,30 a bajas. Para Muggleton (1975), que resume un resultado anterior de K y M (1973a), p vale 1,2 para $|\theta| > 12^\circ$ y 1.31 para $|\theta| \leq 12^\circ$; según este autor p , por lo tanto, no presentaría variaciones estacionales.

Estos resultados contradictorios nos llevaron a analizar las causas posibles de error en este parámetro.

La influencia del exponente en la variación relativa de la expresión (4) es:

$$\Delta(\text{foE})^4 / \text{foE} = 4 \Delta(\text{foE})/\text{foE} = (\ln \cos \chi) \Delta p \quad (6)$$

donde ΔfoE es el error experimental en la determinación de foE y Δp es, por lo tanto, la mínima variación detectable en p . Considerando los valores típicos de: 0,05 MHz y 3,3 MHz para ΔfoE y foE respectivamente, resulta:

$$4 \Delta(\text{foE})/\text{foE} = 0,06 \quad (7)$$

En la Figura 3 se ha graficado $(\ln \cos \chi) \Delta p$ para distintos valores de Δp . Se observa que si se quiere detectar una variación de p de 0,2, que es la magnitud de la obtenida, deben eliminarse del análisis por lo menos aquellos datos cu yo ángulo cenital es menor que 40° , puesto que, como se ve, para ángulos menores esa variación produce una variación en foE que está por debajo del error experimental.

TABLA I

ESTACION	CASO	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
HUANCAYO	1	0,62	0,62	0,61	0,73	0,79	0,81	0,80	0,77	0,74	0,76	0,80	0,64
	2	0,85	0,88	0,86	0,93	0,88	0,89	0,89	0,90	0,90	0,87	0,86	0,84
TUCUMAN	1	0,73	0,76	0,75	0,81	0,90	0,91	0,90	0,86	0,80	0,81	0,75	0,82
	2	0,87	0,93	0,89	0,86	0,90	0,91	0,90	0,87	0,87	0,88	0,87	0,90
SAN JUAN	1	0,73	0,74	0,76	0,87	0,92	0,92	0,92	0,90	0,81	0,78	0,79	0,72
	2	0,87	0,88	0,87	0,89	0,92	0,92	0,92	0,90	0,85	0,90	0,88	0,88
BUENOS AIRES	1	0,84	0,75	0,81	0,89	0,95	0,95	0,95	0,91	0,82	0,78	0,71	0,65
	2	0,90	0,89	0,90	0,89	0,95	0,95	0,95	0,91	0,85	0,89	0,88	0,87
CONCEPCION	1	0,70	0,71	0,80	0,89	0,96	0,96	0,96	0,93	0,87	0,77	0,68	0,66
	2	0,89	0,87	0,87	0,89	0,96	0,96	0,96	0,93	0,88	0,88	0,87	0,87
PUERTO STANLEY	1	0,79	0,89	0,93	0,97	0,99	0,99	0,99	0,98	0,95	0,88	0,81	0,80
	2	0,87	0,90	0,93	0,97	0,99	0,99	0,99	0,98	0,95	0,89	0,87	0,81
ISLAS ARGENTINAS	1	0,89	0,92	0,98	0,99	-	-	-	-	0,98	0,94	0,94	0,88
	2	0,90	0,92	0,98	0,99	-	-	-	-	0,98	0,94	0,94	0,88

Coefficientes de correlación. 1: Cálculo con todos los valores de χ , exceptuando $\chi \geq 75^\circ$. 2: Cálculo con los valores de χ entre 40° y 75° .

En la Tabla 1 se muestran los coeficientes de correlación para las siete estaciones ionosféricas estudiadas, para los siguientes casos, (1): $\chi \leq 75^\circ$, (2): $75 \geq \chi \geq 40^\circ$. Se observa un aumento sistemático del coeficiente de correlación del caso (2) respecto del caso (1), más notorio a medida que la estación ionosférica se halla más cerca del ecuador, es decir, a medida que son más abundantes los datos con $\chi \leq 40^\circ$. Esto muestra, sin lugar a dudas, la necesidad de eliminar estos datos del análisis.

Las fluctuaciones de p son ahora significativas. En la Figura 4 se ha graficado la variación del promedio anual de p con la latitud. De la observación de este gráfico resulta evidente que ésta es significativa, puesto que los puntos presentan un comportamiento sistemático.

En la Figura 5 se ha graficado la variación estacional de p para las siete estaciones ionosféricas consideradas. Aparentemente no se observa en este caso un comportamiento sistemático lo cual, en vez de estar mostrando que las fluctuaciones de p son al azar, podría implicar que la variación estacional de este parámetro es más compleja de lo esperado; decidir sobre este punto requiere un estudio más completo.

4; COMPARACION ENTRE LOS DIAS QUIETOS Y LOS PERTURBADOS

El método del punto 2 se aplicó a valores horarios de f_oE para los cinco días más quietos y los cinco días más perturbados de cada mes.

En la Figura 6 se observa que el comportamiento del parámetro A para días muy quietos es notoriamente similar al comportamiento de ese parámetro obtenido utilizando todos los días del mes; mientras que el comportamiento durante los días perturbados es diferente.

Este resultado parece indicar la utilidad de estudiar separadamente los días quietos y los perturbados.

BIBLIOGRAFIA

- Appleton, E.V., 1963: A seasonal anomaly in the ionospheric E-layer; J. Atmos. Terr. Phys., 25, 577.
- Appleton, E.V. y Lyon, A.J., 1961: Study of the E-layer of the ionosphere - 1. Some relevant theoretical relationships; J. Atmos. Terr. Phys., 10, 1.
- González, M.M. de, Kurban, L., Moyano, C. y Radicella, S.M., 1978: Variaciones de la frecuencia crítica de la región E normal en San Juan y Buenos Aires; Rev. Geofis. IPGH, 8, 65.
- Kouris, S.S., 1971: Variation of the E-layer critical frequency with solar activity; Ph. D. Thesis, Edinburgh Univ.

- Kouris, S.S. y Muggleton, L.M., 1973a: Diurnal variation in the E-layer ionization; J. Atmos. Terr. Phys., 35, 133.
- Kouris, S.S. y Muggleton, L.M., 1973b: World morphology of the Appleton E-layer seasonal anomaly; J. Atmos. Terr. Phys., 35, 141.
- Maeda, K. y Fukao, S., 1972: Study of the solar activity dependence of the E-region peak electron density and some atmospheric parameters; J. Geomagn. Geoelectr. 24, 289.
- Muggleton, S.S., 1975: A method of predicting foE at any time and place; Telecomm. J., 42, 413.

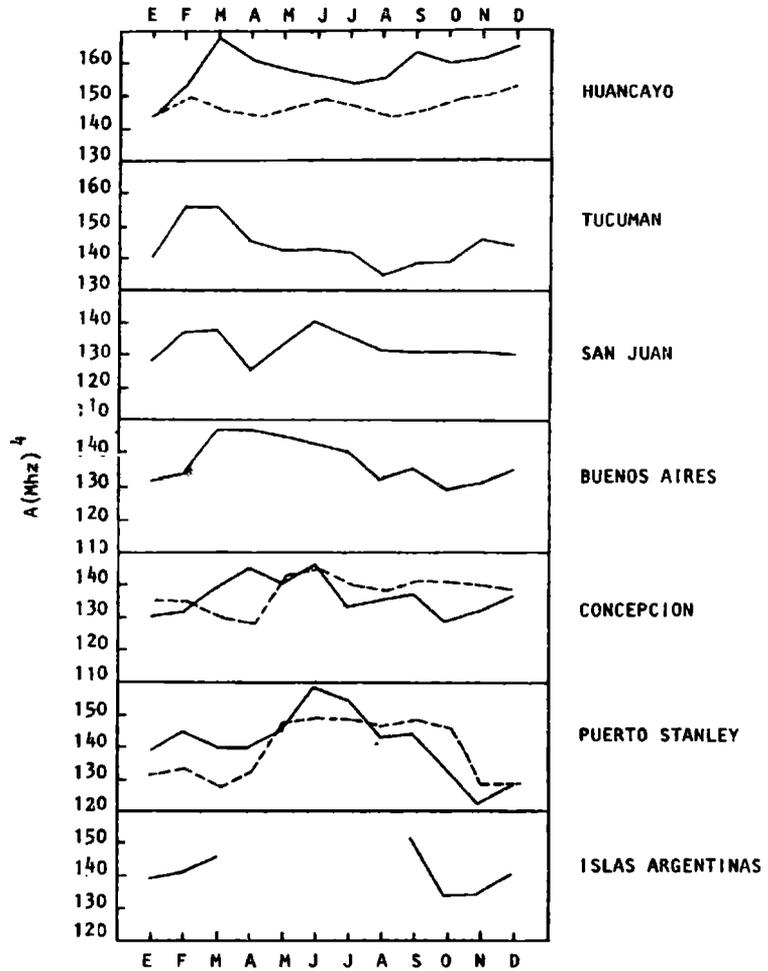


FIGURA 1
 La dependencia estacional de la amplitud de la variación diaria de $(foE)^4$, A: el resultado del presente trabajo, línea entera y el de Kouris y Muggleton (1973b), línea de trazos.

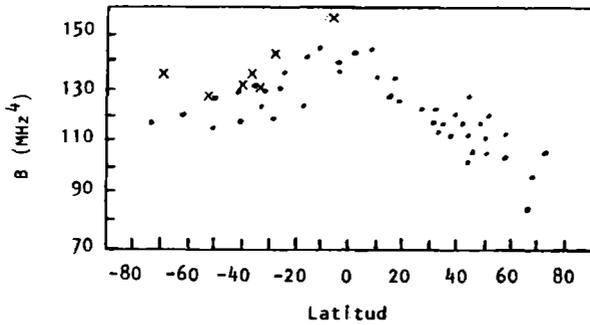


FIGURA 2a

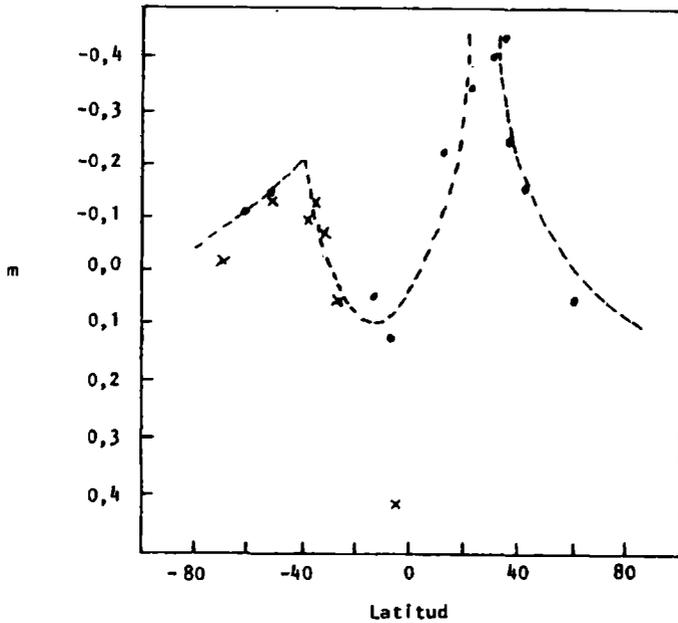


FIGURA 2b

FIGURA 2: Dependencia latitudinal de: a) la amplitud de la variación estacional de (foE), B ; y b) el exponente, m , de la expresión (5) (ver texto). Los puntos en la Figura 2a indican el resultado de Kouris y Muggleton (1973b) para 45 estaciones de todo el mundo y en la Figura 2b las correspondientes al paralelo de 75°O. Las cruces indican el resultado para las siete estaciones ionosféricas de la red sudamericana.

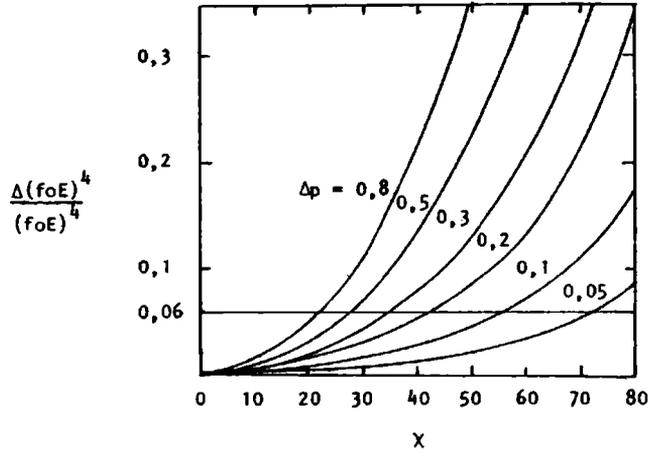


FIGURA 3

La variación relativa de $(foE)^4$ para distintas variaciones, Δp , en el exponente p de la expresión (4) (ver texto). La línea entera indica el error relativo experimental de $(foE)^4$.

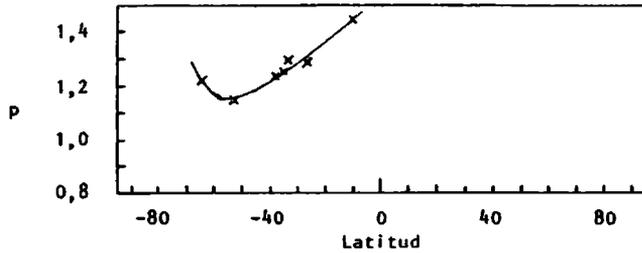


FIGURA 4

Variación con la latitud del exponente p en la expresión (4) (ver texto) obtenida eliminando todos los datos fuera del intervalo $40^\circ \leq \chi \leq 75^\circ$ (Caso 2 de la Tabla I).

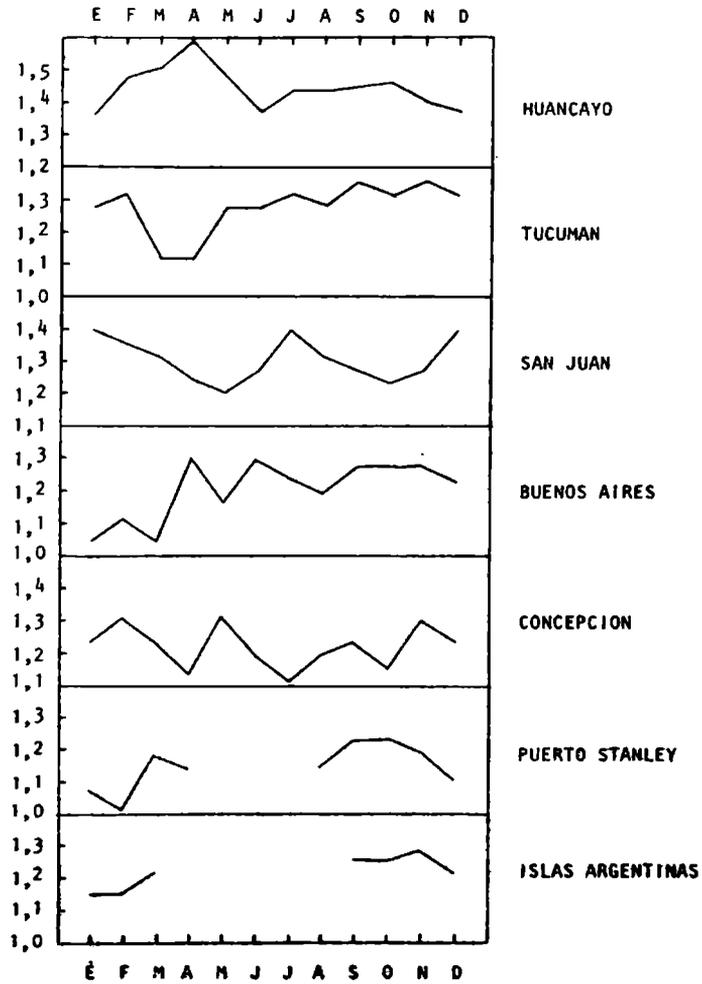


FIGURA 5

La dependencia estacional del exponente p en la expresión (4) (ver texto).

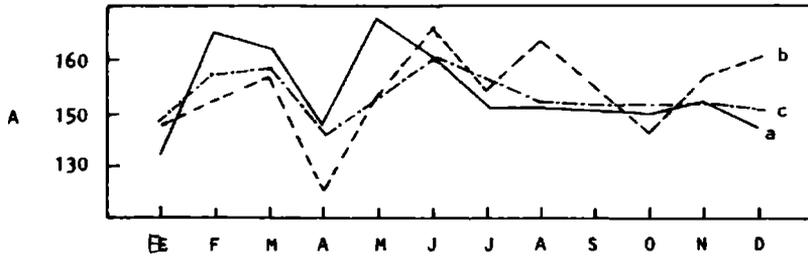


FIGURA 6

La dependencia estacional de la amplitud de variación diaria, A, en San Juan: para los cinco días más quietos de cada mes, a, para los cinco más perturbados, b, y para todos los días del mes, c.