

CLASIFICACION DE REGIONES CLIMATICAS POR MEDIO DE LOS VECTORES PROPIOS CRONOLOGICOS DE LA VARIACION INTRA-ANUAL DE LA PRECIPITACION

*Luis Aldaz Isanta
Meteorólogo*

INTRODUCCION

La presencia, en el interior del nordeste del Brasil, de un área con rasgos semi-desérticos representa un problema climático de particular interés, ya que por su posición geográfica (entre los 2° y 14° de latitud sur y los 34° y 44° de longitud oeste) y sus características fisiográficas (topografía de bajo relieve y el hallarse la región rodeada, en sus lados norte y este, por el océano Atlántico) sería posible pensar que su clima fuera más lluvioso.

Su aridez está conformada más que por la magnitud de los totales anuales, los cuales en la región central oscilan de los 500 mm a los 800 mm, por la variabilidad cronológica, a todas las escalas, del régimen de lluvias. Contribuye a la desertización de la región la fuerte radiación solar, la cual disminuye, por evaporación, la efectividad de los períodos lluviosos.

En las regiones tropicales y con respecto a sus perturbaciones en la atmósfera la precipitación posee, por decirlo así, un poder de «amplificación» (variabilidad marcada) que otros factores como, por ejemplo, la presión, la temperatura y la humedad no tienen (variabilidad reducida). La precipitación por tanto, presenta características ventajosas para hacer estudios del clima.

En el NE del Brasil los procesos sinópticos estacionales permiten sólo una corta época de lluvias, de cuya presencia o ausencia depende el carácter climatológico del año. Esta oscilación anual de las lluvias aparece modulada por fluctuaciones de largo período (decenio o decenios). Como bien es sabido este fenómeno está entre los problemas

más significativos dentro del campo de la climatología.

Por tanto, un estudio en profundidad del régimen pluviométrico del NE brasileño debe incluir, entre otras cosas, un análisis de las distribuciones observadas a lo largo de todo el espectro de escalas tanto cronológicas como espaciales. Este programa, aunque posible en teoría, no lo es en la práctica. Así, la duración de las series de datos disponibles limita la detección de oscilaciones a aquellas con períodos máximos del orden de dos decenios. Fluctuaciones climáticas con períodos mayores, inevitablemente, el espectro no las reflejará.

Por otro lado, en el dominio espacial, la densidad de la red de estaciones pone un límite a la discriminación espectral alcanzable, siendo su frontera inferior, con buena aproximación, las dimensiones de los fenómenos de mesoescala o subsinópticos.

Un primer paso en estos estudios consiste en analizar la oscilación anual en sus múltiples aspectos. La atención del presente trabajo está centrada en la distribución geográfica de esta oscilación.

I. Descripción somera de la región nordeste del Brasil

La región nordeste del Brasil tiene una extensión de 1.600.000 Km² (tres Españas largas) aproximadamente un 20 % del área del país. Constituye una de las cinco regiones fisiográficas en las que puede dividirse el territorio brasileño. (Ver fig. 1).

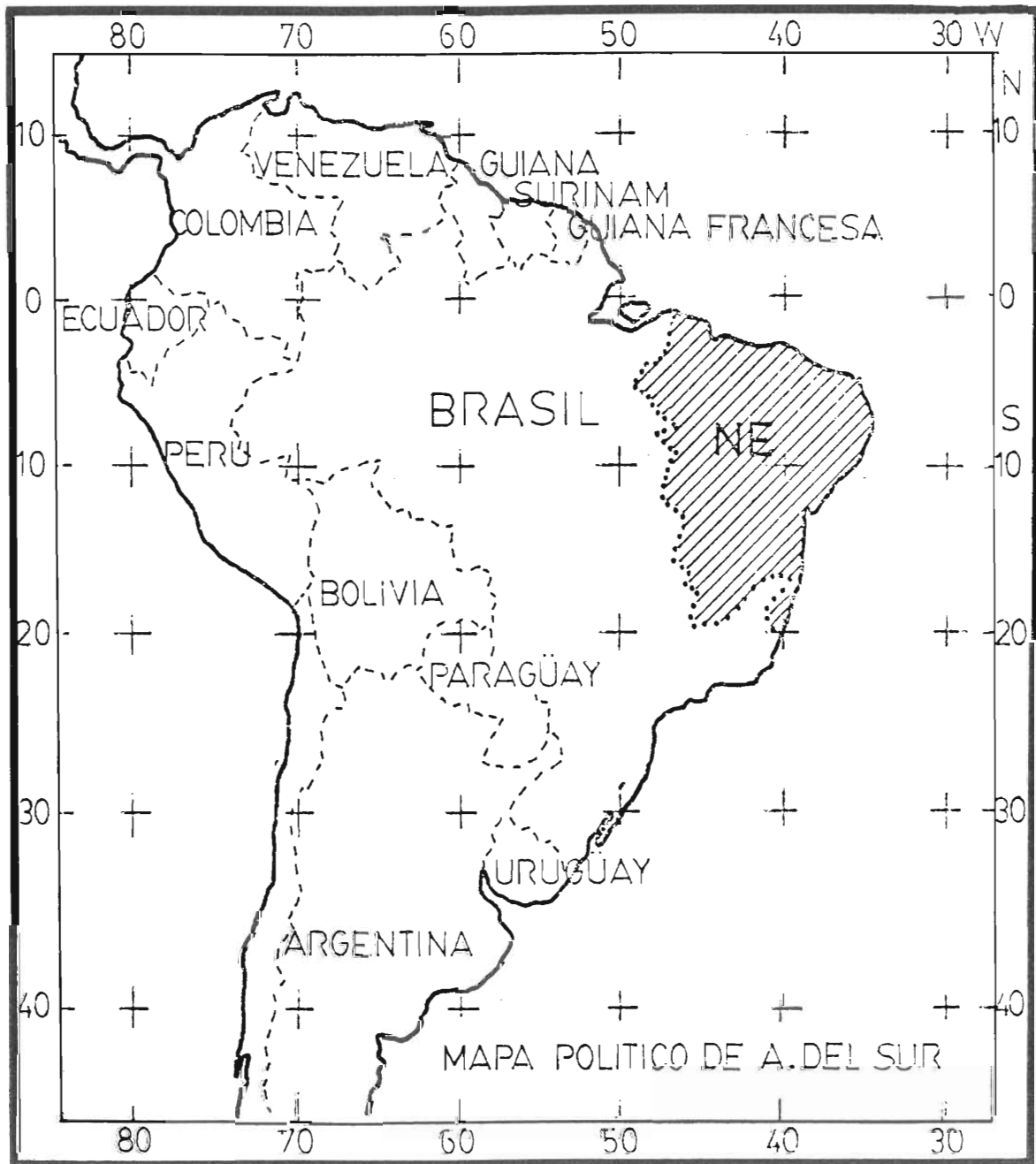


Figura 1.

El nordeste está formado por los estados (provincias) de Maranhão, Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas, Sergipe, la isla de Fernando Noronha, y una parte del estado de Minas Gerais. (Ver fig. 2).

La topografía es moderadamente accidentada. La conforman dos sistemas montañosos, uno al sur del río São Francisco, cuyo nombre es la Chapada diamantina y otro al norte del mismo formado por las sierras de os Boqueirões, Piauí, Araripe, Cariris novos, Cariris velhos y el altiplano de la Borborema. En ningún caso las cimas alcanzan los 2.000 m (Ver fig. 3).

Las divisiones naturales de la región son cuatro:

1. La zona "da mata", que incluye la costa este;
2. La zona "do agreste", que incluye el interior;
3. La zona "do sertão", que incluye la costa norte; y
4. La zona de transición hacia la región amazónica.

Aquel que partiendo de la selva amazónica se dirija hacia la costa atlántica cruzando el nordeste, notará un cambio continuo en el paisaje. La vegetación del bosque tropical va perdiendo lentamente su espléndido desarrollo y el viajero se adentra en el «cerrado», una zona con aspecto todavía tropical pero donde las lluvias han disminuido apreciablemente. Luego está la "caatinga", cuyo paisaje está dominado por arbustos espinosos que se ramifican a altura muy baja. Sus raíces son largas y delgadas y se encuentran a unos pocos centímetros debajo de la superficie del suelo. El terreno aparece como una llanura suavemente inclinada punteada con morros y colinas, las cuales, a intervalos, se agrupan formando pequeñas cordilleras. El horizonte aparece quebrado por montañas más altas hacia el suroeste y hacia el sur. La geología de la zona muestra rocas cristalinas con predominio de gneiss y esquistos micáceos. Arenisca, junto con vetas de caliza, cubren la base arqueana que constituye el substrato profundo del suelo.

La mayoría de los riachuelos, apenas un rosario de estrechas y alargadas lagunas durante los tres meses de la época de lluvias, se secan completamente durante el resto del año. Estas lagunas reciben el nombre de "vazantes" y formaban parte esencial de la vida del "sertanejo", quien acostumbraba a usarlas al máximo para obtener pequeñas cosechas de mandioca y judías ("feijão") que eran los ingredientes básicos de su dieta.

Este panorama comienza a cambiar a unos pocos centenares de kilómetros de la costa. La vegetación recobra su verdor de nuevo; primero lo hace en franjas estrechas, las cuales se van haciendo, progresivamente, más anchas. La costa aparece bordeada de cocoteros y mangles. Numerosos riachuelos terminan en áreas pantanosas y en pequeñas albuferas. La media docena de ríos perennes que llegan al mar tiene sus desembocaduras obstruidas por barras de arena y pequeñas islas.

II. Aspectos teóricos de la técnica empleada

El calcular los valores propios de una matriz simétrica es un interesante tópico matemático, cuya resolución tiene consecuencias prácticas. Su planteamiento se remonta a un trabajo de Pearson (1901), quien se propuso encontrar la ecuación de la recta, con respecto a la cual la suma de los cuadrados de las distancias a ella de un conjunto de vectores correspondientes a observaciones fuera un mínimo.

Lorenz (1956) fue quien primero aplicó estas técnicas a problemas en Meteorología. A los vectores propios obtenidos los denominó "funciones ortogonales empíricas (FOE)" para destacar su naturaleza no analítica. Otros artículos importantes por miembros de su grupo en el Massachusetts Institute of Technology son: Gilman (1957) y White y otros (1958), quienes las denominan configuraciones características (C.P.), Kutzbach (1969), Sellers (1968), Craddock y Flood (1969) y Kidson (1975). Como ingeniosas destacan las aplicaciones del método realizadas por Mateer (1965) en relación a las distribuciones verticales del ozono y por Stidd (1967) quien las usa para hacer es-



Figura 2.

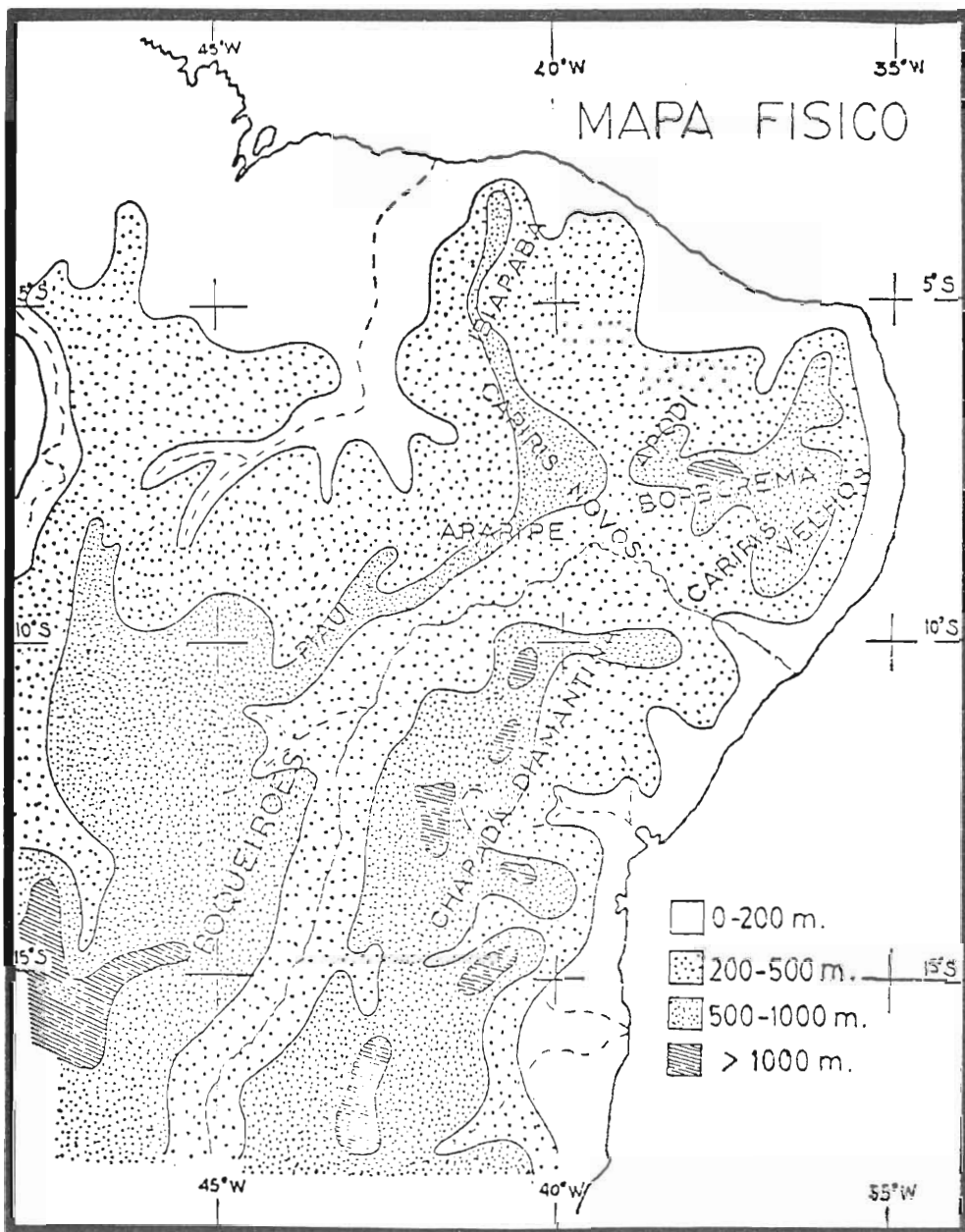


Figura 3.

timaciones de precipitación. Holmström (1970) y Wallace y Dickinson [1972, 1972 (a)] los aplican al análisis de series cronológicas.

Estudios similares han sido realizados por autores de otras nacionalidades, pero sus artículos son menos accesibles que lo de los escritos en inglés.

Aunque la técnica de los FOE es bien conocida, no obstante y por razones expositivas en lo que sigue, se incluye una visión de conjunto, desde una óptica meteorológica, respecto a su teoría, aplicaciones y limitaciones. Los nombres de componentes principales, vectores propios, configuraciones características y funciones ortogonales empíricas serán intercambiables.

Un conjunto de series cronológicas de variables atmosféricas en diferentes puntos o inversamente, sus campos espaciales para diversos instantes puede recibir una representación matricial. Cada uno de sus elementos corresponde a un valor de la variable estudiada en el tiempo y, según sea el caso, en cada uno de los nodos de una rejilla o en cada observatorio de los que forman la red y con cuyos datos se va a trabajar.

Las matrices se pueden simplificar notablemente por ortogonalización. Aquí ortogonal significa que la correlación entre dos funciones o configuraciones es cero (independencia). En el caso de dos vectores equivale a decir que su producto escalar (interno) es nulo. Esta condición implica que las configuraciones "básicas" obtenidas por ortogonalización serán independientes entre sí. El problema estadístico paralelo es el de correlación múltiple.

Un vector propio está formado por un conjunto de números. La propiedad de ortogonalidad los hace conceptualmente idénticos en operación a funciones, de aspecto más familiar, como son los polinomios de Fourier, Legendre o Tschebicheff. Los FOE difieren de ellos, sin embargo, en que mientras los primeros tienen formas fijas, los FOE, cuya estructura se obtiene directamente de las observaciones, son arbitrarios.

La utilidad máxima del ajuste por medio de los polinomios ortogonales analíticos se realiza en aquellos casos donde la variable estudiada posee una fuerte regularidad, o, mejor aún, una periodicidad. Por el contrario, los FOE se ajustan eficazmente a cualquier configuración.

La presentación compacta de la teoría de los FOE requiere el uso de la notación y el conocimiento de las propiedades de las matrices. Las dificultades que el cálculo matricial presenta son las debidas a la enorme condensación de información implicada en su simbología operativa. Esta situación obstaculiza la visualización de relaciones explícitas.

Para calcular los vectores propios se requiere tal número de operaciones que, en los casos donde aparecen matrices de orden superior a tres, no es práctico hacerlo manualmente. Por medio del ordenador electrónico se ha podido superar este obstáculo, tanto si se utiliza un proceso de obtención por ecuaciones características, como si se usan algoritmos del tipo Aitken o Jacobi (Ralston y Wilf, 1960: Capítulos 7 y 18).

Matemáticamente, el método consiste en encontrar una matriz E que satisfaga la relación.

$$E^T S E = D$$

donde E es la matriz de vectores propios asociada a la matriz simétrica S , obtenida a partir de la matriz de observaciones. La matriz traspuesta de E se indica por E^T . La matriz D es una matriz diagonal, cuyos elementos son los valores propios (ordenados por orden de magnitud si se desea).

Si ahora postulamos que se verifique $E^T E = I$ donde I es la matriz unidad, el problema queda reducido a uno ya clásico, en análisis matricial. Intuitivamente se puede decir que el resultado obtenido ha sido la descomposición de un campo en suma lineal de otros (representados por los vectores propios, FOE, o componentes principales) a los cuales se les asocian una serie de pesos (multiplicadores). Si los vectores propios representan las variaciones espaciales, los multiplicadores son

sólo función de la cronología (día a día, mes a mes, etc.) y viceversa, si los vectores propios representan variaciones en la cronología (oscilaciones) los multiplicadores serán sólo función del espacio. Por razones de economía de representación, el número de estos vectores propios “básicos” debe ser mínimo. Tal condición se satisface si los componentes retenidos “explican” la mayor parte de la varianza o “rugosidad” poseída por la distribución espacial o por la serie cronológica de la variable considerada.

Los FOE han sido empleados en problemas referentes a:

- a) la concentración de multiplicidad de observaciones (lo cual se lleva a cabo por una reducción de la matriz de datos);
- b) la indicación de relaciones causales comunes (predicción);
- c) la descripción abreviada de configuraciones;
- d) el filtraje de observaciones (eliminación, por ejemplo, de componentes de alta frecuencia);
- e) la estimación (interpolación y extrapolación de observaciones).

En este trabajo se presenta una aplicación más de la técnica de los FOE, esto es, a la clasificación de regiones climáticas.

Idealmente, las configuraciones “básicas” obtenidas deberían recibir una interpretación en términos físicos, pero en muchos casos esto no es fácil y en algunos incluso no es posible. Tampoco es fácil el asignarles un grado de significación estadística, lo que en alguna de las aplicaciones sería deseable, pues no se conoce la distribución de prueba aplicable al caso. Hay que decir asimismo, que por ventajosa que sea la ortogonalidad, desde el punto de vista matemático, implica una limitación con la cual la naturaleza no está obligada a cumplir.

Para terminar con este repaso a la teoría y algunos usos de los vectores propios, falta sólo mencionar la propiedad, conocida en las publicaciones en lengua inglesa como “flip-flop”, y la cual podría

ser traducida como propiedad “reflexiva”. Ella implica que una misma configuración representa un vector propio; puede sin embargo, tomar valores positivos o negativos debido a que los FOE son funciones pares. Físicamente esta propiedad significa que, por ejemplo, regiones con precipitación abundante (arbitrariamente con signo positivo) pueden ser igualmente interpretadas como regiones con precipitación deficiente (signo negativo). Del mismo modo, las configuraciones de presión pueden ser asociadas tanto con presiones altas como con bajas.

Desde el punto meteorológico esta propiedad no es trivial, pues la atmósfera no tiene por qué comportarse “reflexivamente”. Así se observa que la duración media de períodos con anomalías positivas (por encima de lo normal) de la precipitación es, en general, de duración más breve que las de las negativas (por debajo de lo normal). Blasing (1975) analiza este problema y sugiere el uso de una técnica complementaria, basada en un análisis de cómo se correlacionan las configuraciones observadas. Según él, de esta manera es posible soslayar esta limitación de las funciones ortogonales empíricas.

III. Resultados del análisis por funciones ortogonales empíricas (FOE), de las distribuciones anuales de precipitación en el NE del Brasil

La presente aplicación de la técnica de los FOE a la precipitación del nordeste brasileño, está basada en calcular los vectores propios de la variación cronológica de los totales mensuales y la determinación de los correspondientes multiplicadores. Los datos empleados (totales mensuales de lluvia) abarcan un período de 30 años consecutivos, desde 1931 hasta 1960. Corresponden a 101 estaciones (ver Fig. 4). La fuente fue Costa-Azevedo (1974).

El programa de ordenador utilizado fue el BMD01M del Centro de Cálculo del Departamento de Ciencias Biomédicas de la Universidad de California (UCLA). Los cálculos fueron repetidos usando el programa correspondiente de la biblio-

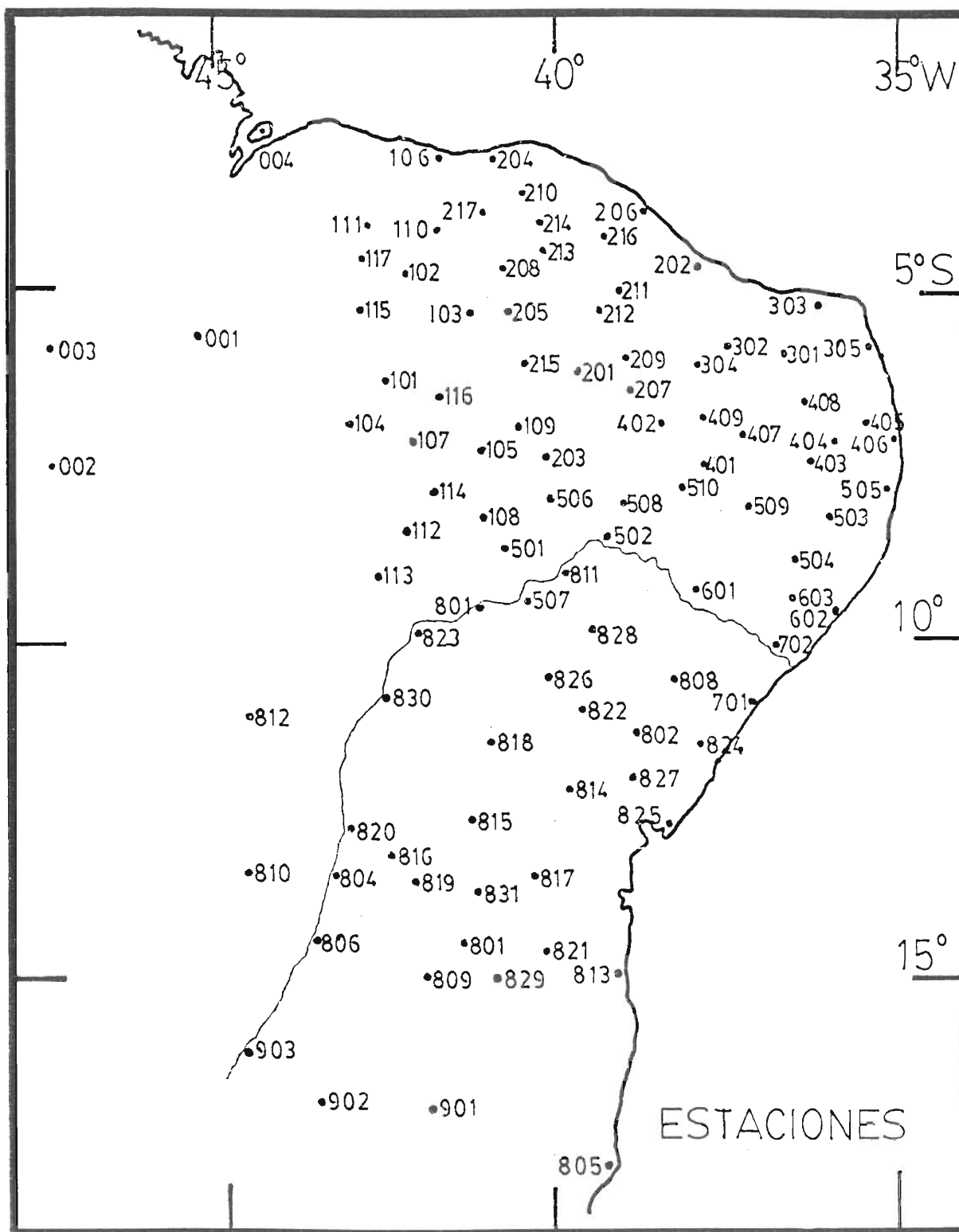


Figura 4.

teca SSP de la compañía IBM. Los resultados obtenidos difieren únicamente en el signo de algunos de los vectores propios, lo cual, como se ha dicho antes, se explica por su propiedad "reflexiva". Los FOE se calcularon tanto a partir de la matriz de correlación, como de la de covarianza, dando ambos resultados semejantes. Los multiplicadores resultaron ligeramente mayores en el último caso. Los resultados aquí representados fueron obtenidos partiendo de la matriz de correlaciones.

La matriz de datos R (12 meses \times 101 estaciones) de las anomalías de los totales mensuales medios de precipitación con respecto a la media general, se multiplicó por su inversa M^{-1} para obtener la matriz S (12 \times 12) de covarianza. Se utilizó el método de la ecuación característica para hallar los valores propios y a continuación se obtuvo la matriz E de vectores propios (FOE) y la matriz M de los multiplicadores.

Los vectores propios de matriz S (12 \times 12) junto con el porcentaje acumulado de la varianza aparecen en la tabla 1.

TABLA 1

Nº	Valor propio	Porcentaje acumulado
1	4.7939720E-00	0.39950
2	3.4458494E-00	0.68665
3	3.2567711E-00	0.95805
4	1.9867045E-01	0.97461
5	1.2416083E-01	0.98495
6	5.7513773E-02	0.98974
7	3.4643315E-02	0.99263
8	2.9080000E-02	0.99505
9	2.1223105E-02	0.99682
10	1.6843066E-02	0.99823
11	1.2211647E-03	0.99924
12	8.9537762E-03	0.99999

De acuerdo con el criterio de Kaiser (1960), por el cual se aceptan como significativos aquellos vectores propios con valores propios superiores a la unidad, sólo los tres primeros deberían ser retenidos. No obstante, en la discusión que sigue, se incluirá también el cuarto, pues su interpretación física resulta interesante.

Este reducido número de vectores propios, con los cuales se logra "explicar" un 97 % de la varianza total de las series, permite, en ciertas investigaciones climáticas, conseguir una reducción considerable en el número de datos a manipular.

En la figura 5 aparecen representados los cuatro primeros vectores propios. Los tres primeros muestran una oscilación unimodal, mientras que la del cuarto es bimodal. Esta diferencia es de esperar, pues a cada vector propio adicional le corresponden frecuencias más elevadas (ruido).

IV. Metodología de la clasificación climática

Una vez calculados todos los FOE de la matriz de datos, el número de los retenidos es función de su significación la cual, a su vez, depende del total de varianza acumulada justificada o de cualquier otro criterio que se considere apropiado.

Para caracterizar el grado de asociación de las distribuciones observadas con las funciones características (FOE) calculadas se requiere una medida de semejanza de forma (no de magnitud). El coeficiente de correlación es una medida idónea para este tipo de relación.

El método de clasificación que aquí se propone consiste en calcular para cada estación el valor del coeficiente de correlación entre la distribución anual de la precipitación observada y los FOE retenidos, en el caso presente, cuatro.

A cada estación se le asigna el número cardinal (i) del FOE con el coeficiente de correlación más alto encontrado (i = 1, 2, 3, y 4 en el caso presente). El mapa resultante es analizado separando aquellas regiones con el mismo número ordinal.

En el caso particular del nordeste de Brasil se observa que los tres primeros FOE tienen características (amplitud, multiplicadores y uniformidad) semejantes, mientras que el e_4 tiene una amplitud mayor, los multiplicadores son menores y presenta una bimodalidad marcada. Todo ello permite simplificar el riguroso procedimiento anterior to-

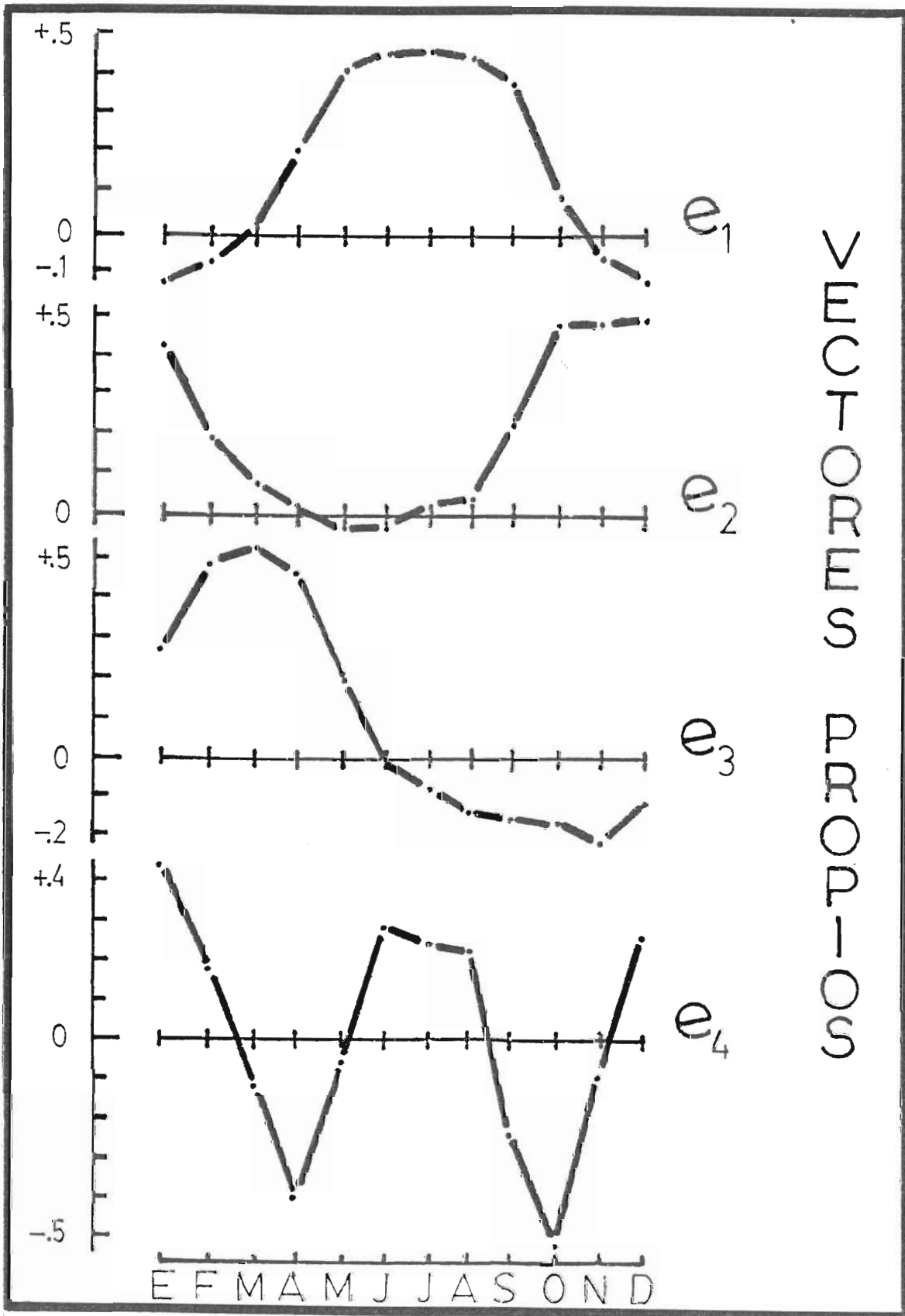


Figura 5.—Los cuatro primeros vectores propios cronológicos.

mando como criterio de clasificación simplemente el valor de los multiplicadores mismos. Así, a cada estación se le asigna el número cardinal correspondiente al FOE con mayor multiplicador.

La figura 6 muestra los resultados. En ella un 1 significa que en aquella estación m_1 es el mayor de los otros tres m_i asociados a ella. Un 2 y un 3 tienen un significado semejante para m_2 y m_3 .

Puede verse que el nordeste del Brasil resulta dividido en tres regiones climáticas homogéneas de acuerdo con el criterio utilizado, esto es, la distribución anual de la precipitación. La objetividad del método representa su mayor ventaja y su aplicación es general.

Sobre el mapa se ha superpuesto la marcha del trimestre más lluvioso, que viene indicado por las iniciales de los meses respectivos. Así NDE significa noviembre, diciembre y enero. En este mapa aparece claramente una de las anomalías climáticas que caracterizan el régimen pluviométrico del nordeste brasileño. Esto es, que en la latitud 10° S exista una zona donde el máximo de precipitación ocurra en invierno (MJJ) cuando en los trópicos la acción moduladora del sol es muy marcada y por tanto el verano (NDE) debería ser la época normal de lluvias.

Sin entrar aquí en más detalles se ve que la región con valores altos de los multiplicadores del vector propio (e_1) coincide con la región anómala.

Ratisbona (1969) obtuvo el mapa que aparece en la figura 7, utilizando métodos subjetivos. Es grato constatar su semejanza con el obtenido objetivamente. Este paralelismo puede verse incluso en detalles como es la posición del "punto triple".

V. Interpretación física de los FOE

Una interpretación física de los vectores propios (Fig. 5) no es siempre posible. En este trabajo, las amplitudes mayores, en valor absoluto, se-

rán asociadas arbitrariamente, con anomalías positivas de la precipitación.

El primer FOE (e_1) pudiera representar un régimen de lluvias invernales (H. Sur) asociado, en parte, a la llegada de frentes fríos (Kousky, 1979). También podría corresponder a perturbaciones en los alisios y en los campos de convergencia que los acompañan y que aparecen en mapas medios de esta última variable (Reiter, 1979). En niveles superiores, los mapas de líneas de corriente de vientos medios (3 meses) (Newell, 1972) indican, en esta época, la presencia de una línea de divergencia sobre la costa oriental del nordeste brasileño, lo que debe favorecer los movimientos verticales y, por ende, la ocurrencia de precipitación.

El segundo FOE (e_2) pudiera reflejar precipitaciones estivales (H. Sur) condicionadas por situaciones de divergencia en altura (vaguada atlántica) ya que las condiciones termodinámicas en la región son de inestabilidad condicional durante gran parte del año. Sistemas frontales fríos o el campo perturbado de vientos en altura que los acompañan, aun en el caso de que el contraste térmico característico haya desaparecido, pueden tener un efecto de gatillo sobre los procesos pluvio-genéticos.

El tercer FOE (e_3) pudiera representar la precipitación asociada con el desplazamiento otoñal hacia el sur de la zona de convergencia intertropical, o de las perturbaciones que se desprenden de ella y que se desplazan en dirección este.

El cuarto FOE (e_4) es bimodal, como es de esperar, ya que los sucesivos vectores propios reflejan efectos a escalas (frecuencias) cada vez más pequeñas (altas). Su estructura puede ser interpretada como el resultado del paso del sol sobre la región, que ocurre entre el 15 de febrero y el 15 de marzo en dirección norte, y entre el 1.º de octubre y el 1.º de noviembre en dirección sur. Aparentemente esta respuesta no es simétrica, ya que en ambos períodos el aumento de la precipitación ocurre durante el período de aproximación del sol, pero en el caso del máximo otoñal continúa por otro mes (tal vez por inercia térmica) mien-

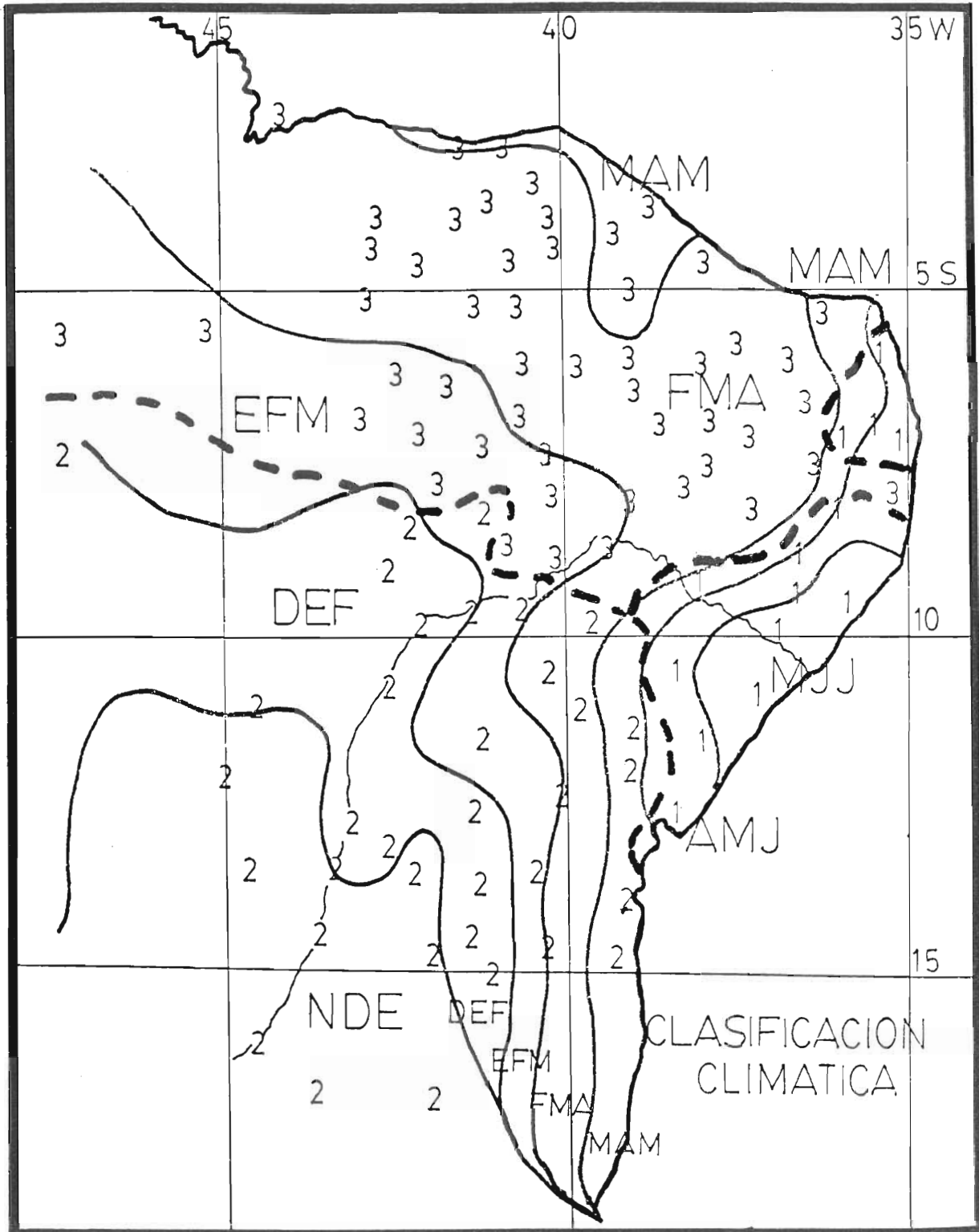


Figura 6.—Clasificación pluvioclimática objetiva para el nordeste (ver texto).
Línea de trazos: límites de las regiones.
Líneas continuas: límites de los totales trimestrales máximos y meses de ocurrencia (iniciales).



Figura 7.—Clasificación pluvioclimatológica subjetiva para el nordeste (según Ratisbona).

tras que en el caso del máximo primaveral las precipitaciones disminuyen durante el período cenital del paso del sol.

También podría pensarse que la estructura del (e_4) no tiene una interpretación física y que viene condicionada la ortogonalidad matemática impuesta en su derivación.

El análisis armónico y espectral (no se presentan) de las series pluviométricas de los observatorios de la zona señalan la presencia de una oscilación semianual con mínimos durante el invierno (julio y agosto) y durante el verano (diciembre y enero).

La distribución geográfica de los multiplicadores m_1 , m_2 , m_3 y m_4 , correspondientes a cada vector propio se muestran en las figuras 8, 9, 10 y 11.

El mapa de los m_1 , indica que (e_1) tiene su máxima "influencia" en las costas este y norte. En gran parte del centro y del cuadrante suroeste los multiplicadores son negativos, lo que indica que las distribuciones respectivas tienen una fuerte componente en antifase.

El mapa de los m_2 muestra el mismo signo en toda la región con sus valores máximos en los sectores oeste y sur.

El mapa de los m_3 también tiene un solo signo por todas partes, pero los valores máximos corresponden a la mitad noroeste de la región.

El mapa de los m_4 muestra valores generalmente inferiores a los de m_1 , m_2 y m_3 y una distribución con valores negativos en una franja a lo largo de la costa norte y positivos en el resto de la región. Esta estructura es un tanto inesperada, y de nuevo quizá sea tan sólo consecuencia de la condición matemática de ortogonalidad de los multiplicadores, sin que corresponda a ningún proceso físico.

De una manera descriptiva resumida podríamos decir que los FOE (e_1) y (e_3) están asociados a

influencias "marítimas", mientras que los (e_2) y (e_4) están asociados a influencias "continentales".

Si se acepta que tanto el valor de los vectores propios como los multiplicadores son estables cronológicamente hablando, entonces es posible construir una serie sintética de totales mensuales y medios (y anuales por simple suma de los mensuales) para cualquier punto del nordeste del Brasil (estimación de totales). Basta conocer (por interpolación) el valor de los cuatro primeros multiplicadores. Después cada uno de los doce números (uno por mes) que definen los vectores propios se multiplican por el correspondiente multiplicador m_i ($i = 1, 2, 3$ y 4). Las doce sumas independientes nos dan los totales mensuales medios buscados.

Es razonable suponer que los multiplicadores estén relacionados con la elevación de la estación. La línea de regresión entre estas dos variables puede utilizarse para reducir a un nivel común todas las estaciones y facilitar, si se desea, su comparación. (Stidd, 1967).

En este trabajo se utiliza, en cambio, para reforzar la interpretación física atribuida a los vectores propios.

Los coeficientes de correlación y las ecuaciones de las líneas de regresión de los multiplicadores (m_i) con respecto a la altura, fueron determinadas utilizando el programa BMDP6D y empleando la fórmula:

$$r_i = \left(\sum_{j=1}^{101} m_{ij} h_j - 101 \bar{m}_i \bar{h} \right) / \left[\left(\sum_{j=1}^{101} m_{ij}^2 - 101 \bar{m}_i^2 \right) \left(\sum_{j=1}^{101} h_j^2 - 101 \bar{h}^2 \right) \right]^{1/2}$$

donde CC_i es el coeficiente de correlación, m_i el multiplicador, h_j la altura de una estación, \bar{m}_i el valor medio del multiplicador y \bar{h} la altura promedio que resultó ser 335 m.

A continuación, en la tabla 2, se indican los resultados de estos cálculos.

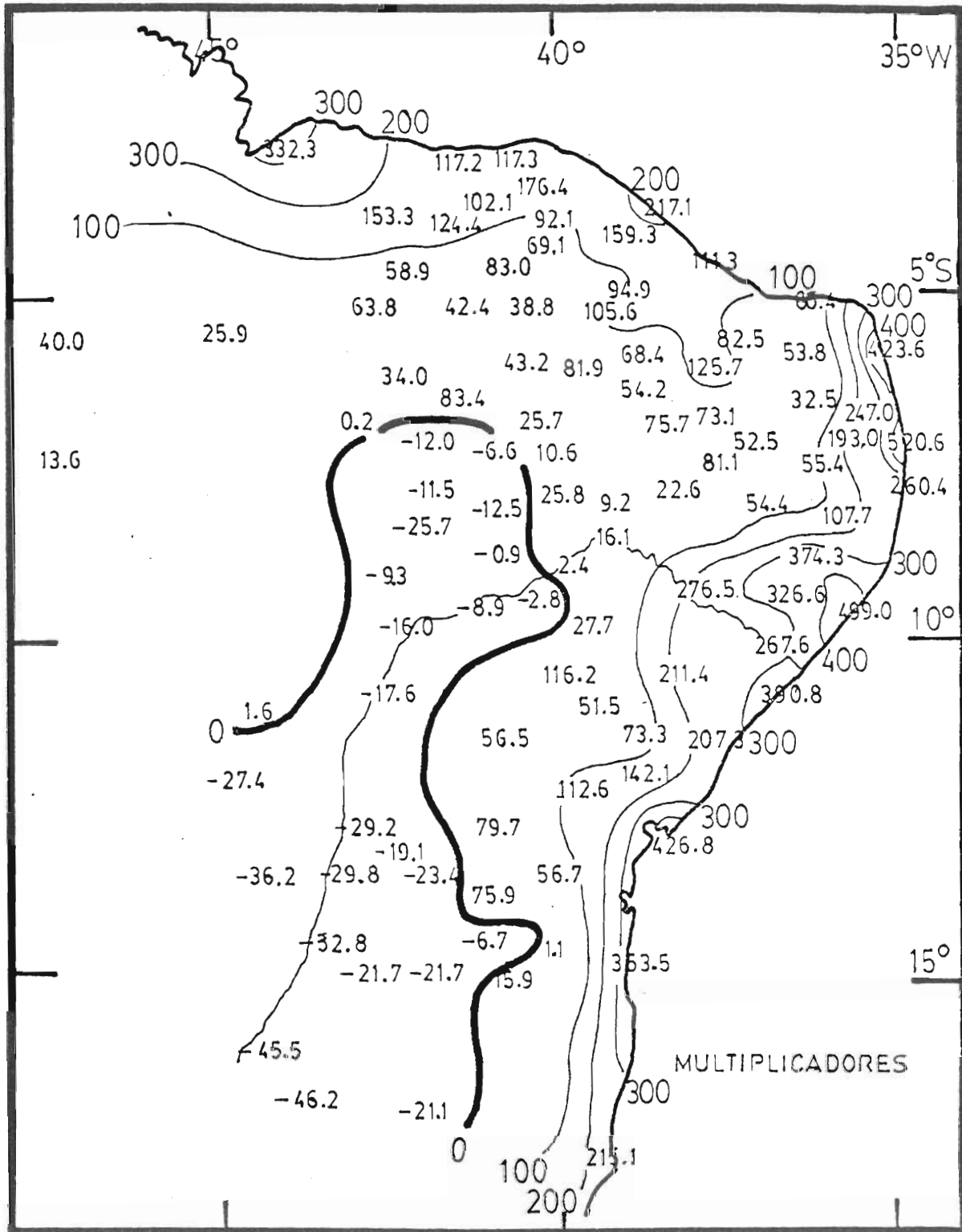


Figura 8.—Distribución geográfica de los multiplicadores del primer vector propio cronológico.

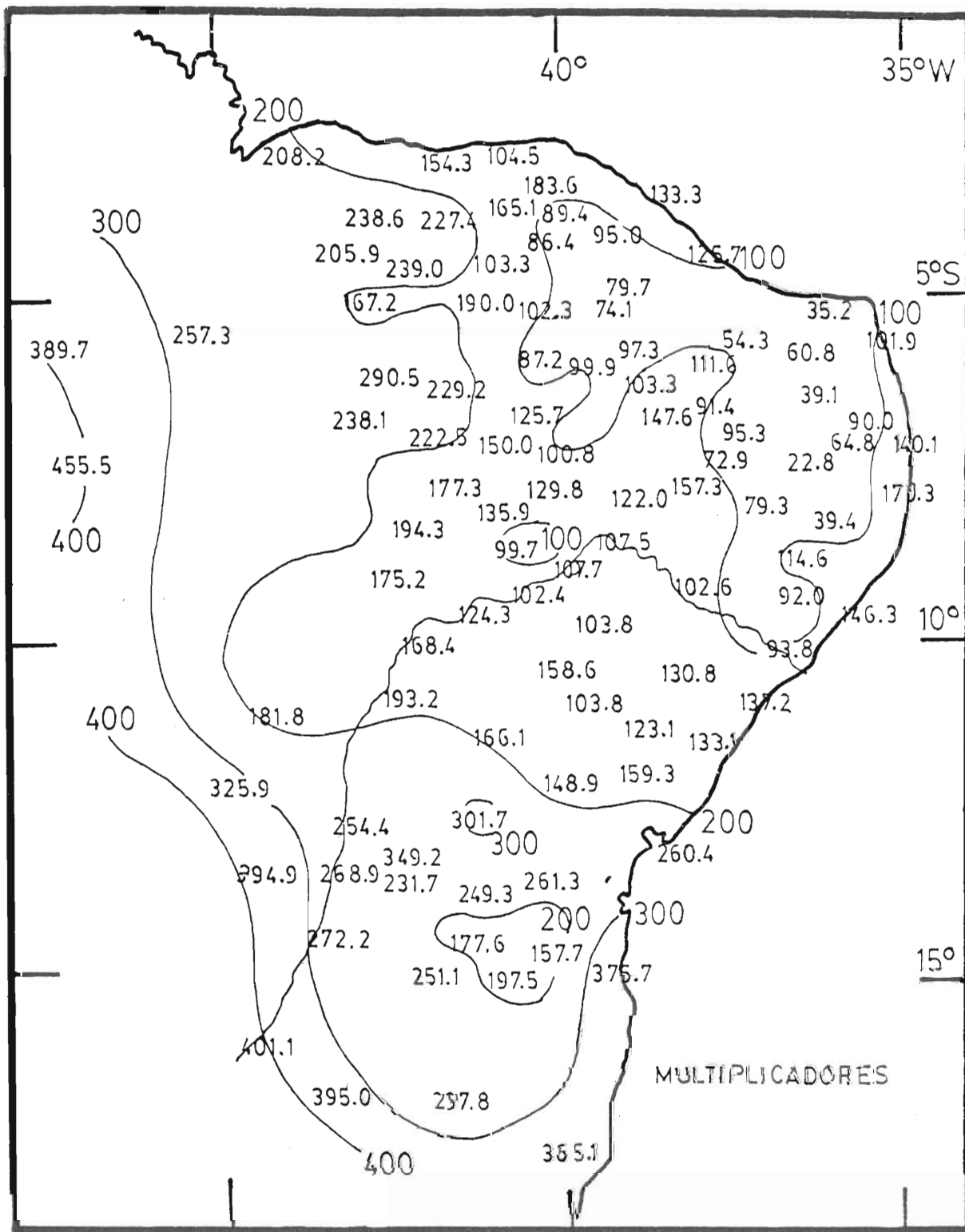


Figura 9.—Distribución geográfica de los multiplicadores del segundo vector propio cronológico.

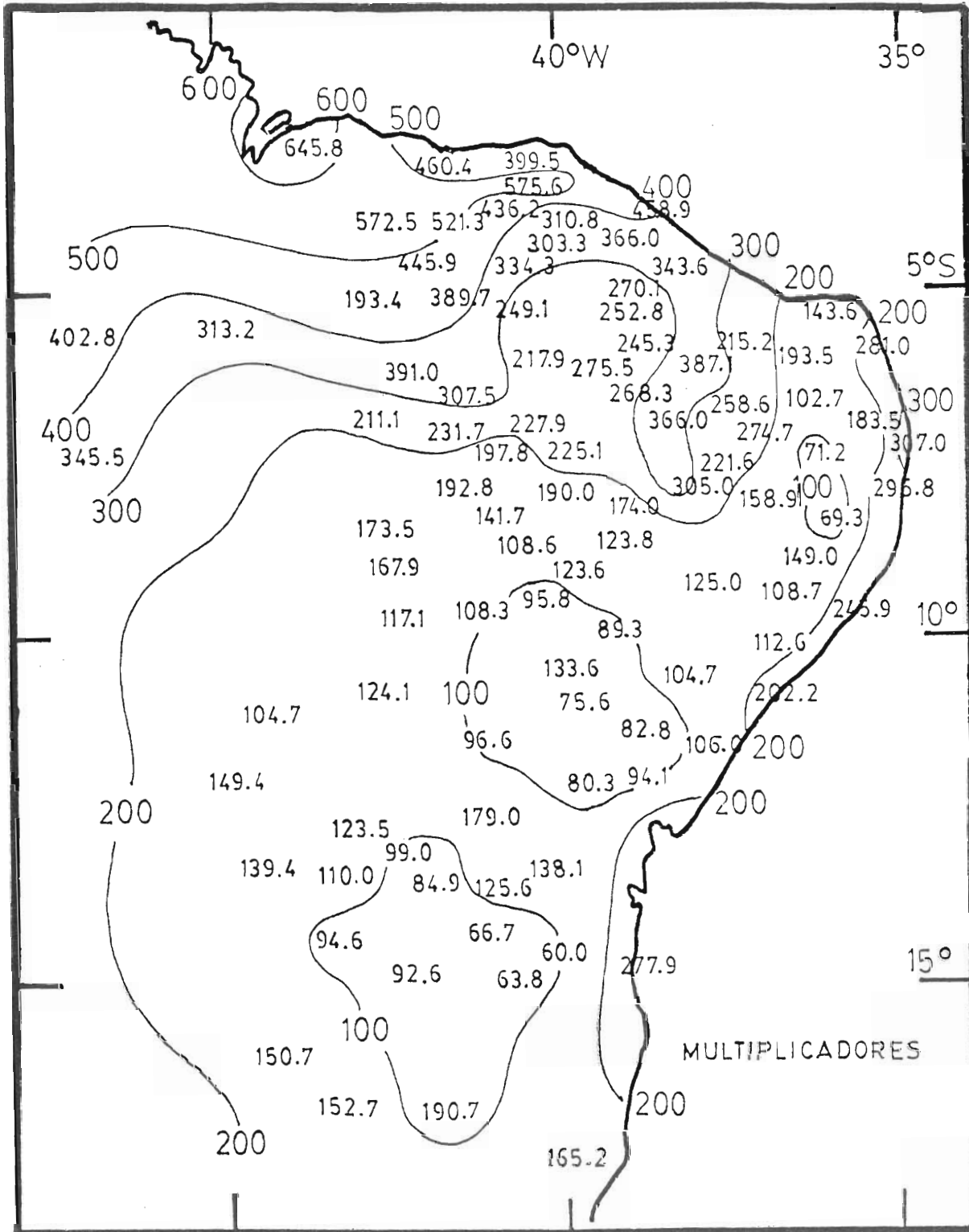


Figura 10.—Distribución geográfica de los multiplicadores del tercer vector propio cronológico.

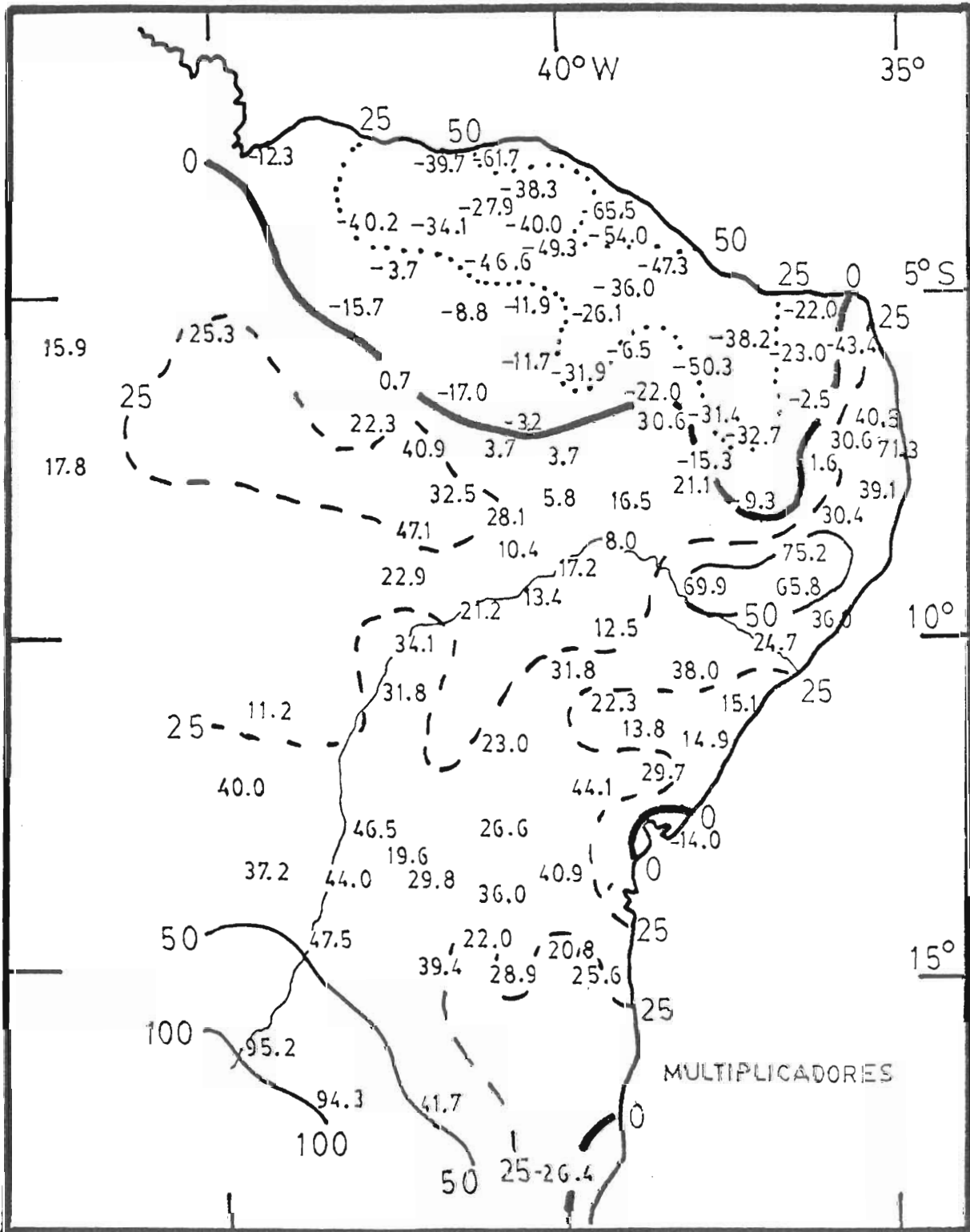


Figura 11.—Distribución geográfica de los multiplicadores del cuarto vector propio cronológico.

TABLA 2

Multiplicador (m_i)	Coefficiente de correlación CC_i
1	-0,31
2	0,04
3	-0,45
4	0,37

Los CC_i ($i = 1, 2, 3$ y 4), los considerados en este trabajo, son los que corresponden a los cuatro primeros vectores propios con los cuales se reproduce un 97 % de la varianza de las distribuciones.

La ecuación de regresión, junto con su representación gráfica y otros parámetros estadísticos, aparecen dibujados (salida de ordenador) en las figuras 12 (para e_1 y e_2) y 13 (para e_3 y e_4).

En ellos vemos que existe una relación inversa entre elevación y magnitud del multiplicador para e_1 y e_3 , lo que puede indicar que ambos responden a mecanismos ondulados por el océano, como ya se había deducido por otras consideraciones.

El e_2 es prácticamente independiente de la elevación del suelo, y ello pudiera interpretarse como consecuencia de un mecanismo dinámico en altura (campo de divergencia) que modula la actividad de los sistemas a niveles bajos, y por tanto, la precipitación caída.

Por el contrario e_4 muestra una dependencia positiva, lo que hace creer que el proceso modulador está asociado al suelo y su naturaleza puede ser térmica.

Estas dos últimas deducciones coinciden, la primera menos pero la segunda, razonablemente, con lo expuesto anteriormente.

Bibliografía

BLASING, T. J.: "A comparison of map-pattern correlation and principal components eigenvectors methods for analyzing anomaly patterns". En: XIV

Conf. sobre: Probability and Statistics in Atmospheric Sciences. Tallahassee, Fla (EUA), pp. 96-101. 1975.

COSTA-AZEVEDO, D. DE: "Chuvas no Brasil". Min. da Agri. Dept. Nac. de Meteorol. Brasilia (Brasil). 146 pp. 1974.

CRADDOCK, J. M., y FLOOD, C. R.: "Eigenvectors for representing the 500 mbar. geopotential surface over the Northern Hemisphere". Quart. J. R. Meteorol. Soc., vol. 95, pp. 576-593. 1969.

GILMAN, D. H.: "Empirical orthogonal functions applied to 30-day forecasts". Sci. Rep. Nr. 1. Contract Af 19 (604)-1283. Dept. of Meteorol. MIT. Cambridge, Mass (EUA). 129 pp. 1957.

GRIMMER, M.: "The space-filtering of monthly surface temperature anomaly data in terms of pattern, using empirical orthogonal functions". Quart. J. R. Meteorol. Soc., vol. 89, pp. 395-408. 1963.

HOLMSTROM, I.: Analysis of time series by means of empirical orthogonal functions". Tellus, vol. 22, pp. 638-647. 1970.

KIDSON, J. W.: "Tropical eigenvector analysis and the Southern Oscillation". Mon. Wea. Rev., vol. 103, pp. 187-196. 1975.

KOUSKY, V. E.: "Frontal influences on Northeast Brazil". Mon. Wea. Rev., vol. 107, pp. 1140-1153. 1979.

KUTZBACH, J. E.: "Empirical eigenvectors of sea-level pressure, surface temperature and precipitation complexes over North America". J. Appl. Meteorol., vol. 6, pp. 791-802. 1967.

LORENZ, E. N.: "Empirical orthogonal functions and statistical weather prediction". Sci. Rep. Nr. 1. Statistical Forecasting Project. Dept. of Meteorol. MIT. Cambridge, Mass (EUA). 49 pp. 1956.

MATEER, C. L.: "On the information content of Umkehr observations". J. Atmos. Sci., vol. 22, pp. 370-381. 1965.

NEWELL, R. E., et al.: "The general circulation of the tropical atmosphere and interactions with extratropical latitudes". Vol. I. M. I. T. Press. Cambridge, Mass (EUA). 258 pp. 1972.

PEARSON, K.: "On lines and planes of closest fit to systems of points in space". Phil. Mag., vol. 2, pp. 559-572. 1901.

RALSTON, A., y WILF, H. S. (editores): "Mathematical methods for digital computers". J. Wiley and Sons. New York, N. Y. (EUA). 315 pp. 1960.

RATISBONA, L. R.: "Contribuição ao estudo da climatologia do Nordeste". Min. da Agr. Convênio Escritório de Meteorol./SUDENE. Pub. Técnica número 1. Rio de Janeiro (Brasil). 15 pp. 1969.

REITER, E.: "On the dynamic forcing of short-term cli-

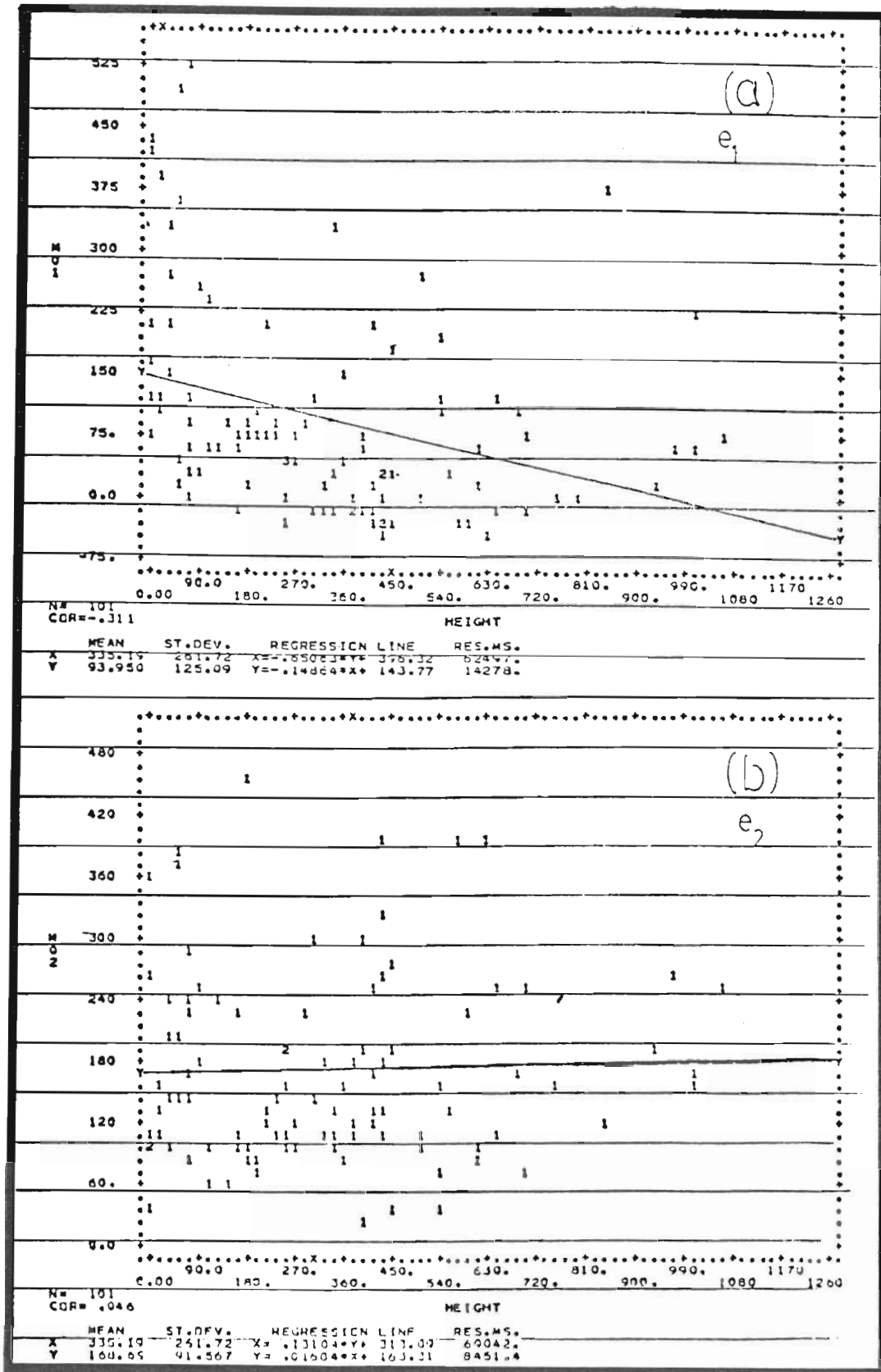


Figura 12.—Gráfico de regresión lineal entre la elevación (m) y el coeficiente de eigenvector cronológico (a): e_1 y (b): e_2 para cada puesto.

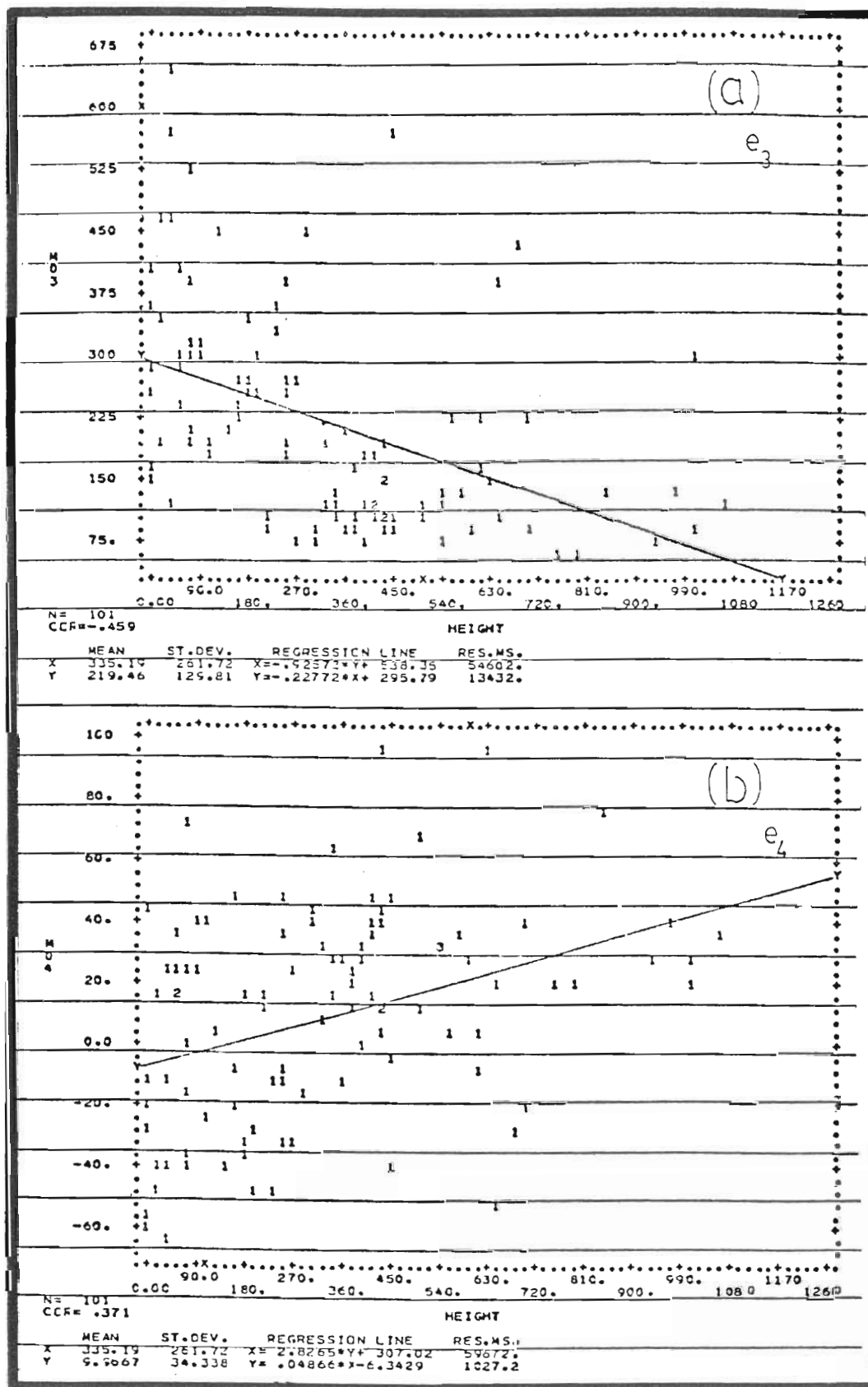


Figura 13.—Gráfico de regresión lineal entre la elevación (m) y el coeficiente del eigenvector cronológico (a): e_3 y (b): e_4 para cada puesto.

- mate fluctuation by feedback mechanisms". *Env. Research Papers. Fort Collins Colorado (EE. UU.)*, 1979.
- SELLERS, W. D.: "Climatology of monthly precipitation patterns in eastern United States, 1931-1966". *Mon. Wea. Rev.*, vol. 96, pp. 585-595. 1968.
- STIDD, C. K.: "The use of eigenvectors for climatic estimates". *J. Appl. Meteorol.*, vol. 6, pp. 255-264. 1967.
- WALLACE, J. M., DICKINSON, R. E.: "Empirical orthogonal representation of time series in the frequency domain. Part I: Theoretical considerations". *J. Appl. Meteorol.*, vol. 11, pp. 887-892. 1972.
- WALLACE, J. M., y DICKINSON, R. E.: "Empirical orthogonal representation of time series in the frequency domain. Part II: Application to the study of tropical wave disturbances". *J. Appl. Meteorol.*, vol. 11, pp. 893-900. 1972 (a).
- WHITE, R. M.: "The development of efficient linear statistical operators for the prediction of sea-level pressure". *J. Meteorol.*, vol. 15, pp. 426-434. 1958.