

CLIMATOLOGIA DE LA RADIACION SOLAR EN ARGENTINA

Rodolfo Fernández
Ingeniería Solar S.R.L.
Virrey del Pino 2428 6° 45 - Bs.As.

Mónica V. García
Com. Nac. de Est. Geo-Heliofísicos
Av. Mitre 3100 -San Miguel- Bs.As.

Resumen

En base a mediciones existentes de radiación Solar Global, con distintos instrumentos y a estimaciones basadas en una correlación de Heliofanía Relativa, se han delimitado zonas de igual radiación solar para 2 épocas del año (inv.- ver.) y promedio anual. La elección de los coeficientes de regresión se ha hecho en base a una división en regiones fitogeográficas y climáticas del país, que permiten determinar zonas homogéneas. Se calculó el error inherente de las distintas fuentes de datos y la variación porcentual respecto a los registros.

Se presentan mapas con las zonas delimitadas para las 2 épocas y el promedio anual, como también las modificaciones producidas al considerar el error de cálculo y medición. En base a estos análisis se deduce la importancia de disponer de datos precisos, a fin de efectuar estudios para el aprovechamiento de la energía solar.

Abstract

Zones of equal solar radiation for winter, summer and the annual average, have been determined, using existing measurements of Global Solar Radiation; obtained with different instruments, and estimations based on a correlation with bright sunshine.

The choice of the regression coefficients have been based on a division of geographic & climatic regions, choosing those that are homogeneous in weather and vegetation of the country. The inherent error of the different sources of data was calculated as well as the percentage variation with respect to the record.

Maps with the delimited zones for the two periods and the annual average, while the errors are taken into account, shown together with the modification introduced.

Based on these analyses it is evidently important to have access to precise data in order to carry out studies to take advantage of solar energy.

Introducción:

Desde hace algunos años, la energía solar se ha presentado como una de las grandes posibilidades para los requerimientos de energía del mundo entero.

En gran número de países, se han intensificado las investigaciones destinadas a resolver mediante el uso apropiado de la energía solar, las carencias actuales o futuras en materia energética.

No es necesario abundar en las ventajas de la energía solar pues están ampliamente difundidas. Sólo remarcaremos que aún nos encontramos dando los primeros pasos de un largo camino de investigación, en el cual deben mejorarse y optimizarse los sistemas actuales conocidos hasta hacerlos accesibles y competitivos en costo con los convencionales actualmente en uso.

Uno de los mayores problemas que encuentran los investigadores en países como la Argentina, es el desconocimiento del recurso solar. Es evidente que para efectuar un buen diseño, de alta eficiencia y bajo costo, es necesario en primer término conocer el flujo de energía radiante que llega desde el sol. Estos datos primarios no son fáciles de lograr. En Argentina, las grandes distancias y la enorme superficie territorial impiden tener un exhaustivo conocimiento de los niveles de radiación solar.

La tarea de medición y estimación de la radiación solar global, que es aquella que más interesa para los estudios en energía solar, posee en nuestro país una antigüedad de muchos años.

Red de Mediciones de Radiación Solar Global:

Hacia 1930 fueron llevados al país los primeros pirheliómetros para medición de radiación solar directa.

Las primeras estaciones de medición de radiación solar global se instalaron en 1950 y ya en 1959, para el año Geofísico Internacional, se poseían unos 40 lugares de medición distribuidos en todo el país.

Infelizmente, los aparatos instalados, piranómetros del tipo Robitsch, basados en la expansión diferencial de elementos bimetálicos, sufren un rápido deterioro en sus elementos sensibles, con lo cual los errores en las mediciones son altos.

Dificultades en el mantenimiento de los instrumentos y no renovación en un lapso adecuado de tiempo, hicieron que la red de mediciones se fuera deteriorando paulatinamente hasta llegar a la actualidad, en que contamos con unas 20 estaciones de medición.

A partir de 1964, se instalaron 6 estaciones de medición de radiación global con instrumental de alta calidad, piranómetros basados en termopilas de Moll-Gorczyński, a los cuales se agregaron registradores potenciométricos de punto. Esta red además mide la radiación solar reflejada y componentes en el rango infrarrojo (radiación terrestre) con instrumentos del tipo Schulze.

Como parámetros de gran importancia para los estudios en energía solar, la heliofanía o número de horas de sol, es medido en todo el país con registradores de Campbell-Stokes, que como es sabido estiman el número de horas efectivas de sol quemando un papel por concentración de la radiación solar a través de un lente esférico.

En la tabla 1 puede verse la ubicación de las estaciones dotadas con solarímetros Moll-Gorczyński.

Similarmente en la Fig. 1 se pueden ver los lugares donde se poseen datos de piranómetros tipo Bobitsch, solarímetros Moll-Gorczyński y Heliofanía Relativa.

Ubicación de la Radiación Global:

Argentina, posee una superficie territorial de $2.776.000 \text{ Km}^2$ sin contar el sector antártico.

Se extiende desde los 22° S hasta los 55° S . Esta gran extensión en latitud sumada a la magnitud en longitud, hacen sumamente difícil cualquier estudio que deba contar con una razonable exactitud. El alto costo del instrumental involucrado en las estaciones coloca una valla en la planificación de una buena red de mediciones.

Ante esta alternativa, sólo quedan dos caminos, estimar la radiación solar global basándonos en los datos existentes de Heliofanía Relativa y desarrollar instrumentos de bajo costo y razonable precisión a fin de instalar una buena red de medición, a escala nacional.

En este trabajo, se trató de desarrollar el primer camino, estimar los valores de radiación global, utilizando el hecho

de que existe una evidente correlación entre las características climáticas, fitogeográficas o de vegetación natural y el número de horas de sol. (1).

Ello es debido, a que el número de horas de sol tiene directa relación con la nubosidad existente en una dada región, la cual a su vez está climatológicamente determinada. La vegetación natural a su vez nos sirve como una segunda variable que asegura la confiabilidad climatológica de una región.

En una primera fase, se dividió al país en regiones fitogeográficas, utilizando para ello la clasificación de Parodi (2). En base a ésta se determinaron regiones diferentes en cuanto a tipos de vegetación.

La segunda fase fue efectuar una clasificación climática en base a Köppen (3). Esta clasificación utiliza relaciones entre la temperatura media del aire y la precipitación, con lo cual se deja de lado valores como nubosidad, horas de sol, humedad relativa y viento. Al no contarse con un número suficiente de estaciones meteorológicas en donde se midan estos últimos parámetros es necesario efectuar la clasificación en base a los primeros solamente.

Se encontraron desajustes entre esta clasificación climática y la descripción de vegetación correspondiente a la misma, por lo cual se modificó esta división en regiones climáticas superponiendo la efectuada para vegetación.

Se obtuvo así la clasificación que se observa en la figura 2, llegándose a una subdivisión en 19 regiones, cuya descripción está en la tabla 2.

Como fue dicho, se tomaron los valores de radiación global medidos, ya sea con piranómetros Robitsch o solarímetro (4-5-6) y se calcularon las regresiones con la heliofanía relativa utilizando la fórmula planteada por Angström (7)

$$\frac{K}{Q_0} = a + b \left(\frac{n}{N} \right) \quad (1)$$

Donde:

K: radiación solar global medida
Q₀: radiación solar global teórica
n : número de horas de sol medidas
N : número de horas de sol teóricos
a, b : coeficientes de la regresión

En un trabajo anterior(9), se realizaron las correlaciones correspondientes entre la heliofanía relativa y la radiación global, tratando de encontrar el mejor polinomio que ajuste dicha regresión. Se calcularon polinomios hasta 3º grado, encontrándose que los mejores coeficientes de regresión se obtienen con un polinomio cuadrático en n/N .

Los errores cometidos tomando un polinomio cuadrático o una relación lineal son poco apreciables, prefiriéndose en consecuencia usar una relación lineal, por la simplicidad de cálculo.

A modo de ejemplo se reproducen los valores obtenidos para los coeficientes de correlación anual en Buenos Aires con diferentes tipos de polinomios. (Tabla 3).

Para la fórmula (1) los valores de Q_0 fueron obtenidos por computadora, usando las clásicas fórmulas astronómicas; similarmente se hizo para tener las horas de insolación teóricas. Estos resultados se obtuvieron con espaciamiento de 1º de la latitud.

Los coeficientes de la regresión lineal a y b , se calcularon en aquellas estaciones donde se contaba simultáneamente con datos de radiación global y horas de sol, extendiéndose luego la validez de estos coeficientes a todos los lugares que pertenezcan a la misma región, según la clasificación de la Tabla 2.

En algunos casos fue necesario discriminar las correlaciones para distintas épocas del año, pues es necesario para la utilización de la energía solar. El mejor mes (diciembre), el peor (junio) y el promedio anual, fueron los casos elegidos. Efectuadas las correlaciones antes mencionadas y hallados los coeficientes, es directo mediante aplicación de la fórmula (1) encontrar los valores de radiación global en esas épocas del año y el promedio anual. Los resultados se pueden ver en la Tabla 4.

Errores de Cálculo :

Antes de efectuar una clasificación, es necesario acotar los errores con que se ha trabajado.

Los datos utilizados provienen de tres fuentes diferentes:

- a) Solarímetro Moll-Gorczyński
- b) Piranómetro Robitech

c) Estimadas por regresión desde heliofanía relativa. Diferentes autores (9) coinciden en que los errores de medición en un solarímetro son del 5%. Por supuesto se considera una situación óptima.

El piranómetro es un instrumento cuyo error inherente es alto aun cuando se encuentre en perfecto estado de funcionamiento. Robinson (10) estima que debido a los cambios de temperatura y nivel de radiación el factor de calibración varía en un 15%. Respecto a las estimaciones por regresión, los coeficientes a y b se los puede tomar con un error del 10%. Se aplicó el error correspondiente aumentando y disminuyendo cada dato y se obtuvieron nuevos valores que se plotearon en distintos mapas, obteniéndose así una zonificación distinta a la original.

Valores de Radiación Solar Global en Argentina:

Con los datos de radiación solar global que figuran en la tabla 4 se confeccionaron mapas, donde se zonifica en niveles de radiación por intervalos de $100 \text{ cal/cm}^2 \text{ día}$, como puede verse en las figuras 3, 4 y 5.

También se confeccionaron mapas teniendo en cuenta el error de medición para cada dato y se obtuvieron las zonas que se observan en las figuras 6, 7 y 8, donde se sumó el error y 9, 10 y 11 donde se restó el error.

Las conclusiones que se pueden extraer del análisis de los distintos mapas para cada época y del anual son:

JUNIO: En este mes se registran los valores más bajos de radiación. La variación entre los valores obtenidos a lo largo del país es de $400-500 \text{ cal/cm}^2 \text{ día}$ en el NW, hasta valores de $0-100 \text{ cal/cm}^2 \text{ día}$ en la Patagonia.

Las zonas donde se mantienen los niveles, aun incluyendo el error son:

Zona E: Incluye la zona patagónica, al sur de Río Negro, con una radiación entre $0-100 \text{ cal/cm}^2 \text{ día}$.

Zona D: Incluye Neuquén, Río Negro, La Pampa, sur de Mendoza y sur de San Luis, centro sur de Córdoba, Santa Fé, Corrientes, Entre Ríos y la prov. de Buenos Aires; con valores de $100-200 \text{ cal/cm}^2 \text{ día}$.

Zona C: Los valores son de 200-300 cal/cm²día en el centro norte de Mendoza, SW de San Juan, NW de San Luis, W de La Rioja, Catamarca y Tucumán, Santiago del Estero, W de Chaco y Formosa.

En una zona que abarca el norte de Santa Pé, NW de Corrientes y Misiones y el este de Chaco y Formosa, la radiación varía entre 200-300 cal/cm²día, observándose una franja de indeter-

minada. En el caso sucede en la franja del N.O.A. que comprende el centro de Catamarca, La Rioja, centro de Salta y sur de Jujuy; estos valores oscilan entre 200-400 cal/cm²día, con grandes variaciones en poca distancia.

Zona A: 400-500 cal/cm²día que se localizan en el W de Salta y centro norte de Jujuy, la variación es de casi 100 cal/cm²día, cuando se suma el error.

CONCLUSIÓN: En este mes se registran los valores más altos de radiación y por lo tanto una variación del 10% al incluir el error, modifica los valores de tal forma que se originan regiones totalmente distintas a la original.

Zona A: cuyos valores son de 700-800 cal/cm²día, al sumar el error abarca prácticamente el W del país, a partir de una línea Norte-Sur que pasa por el centro.

Esto provoca que se produzca un corrimiento hacia el este donde la Zona B ocupa el resto del país y la Zona D es reemplazada en parte por la C en la Patagonia, desapareciendo la zona B, ubicada en la Patagonia y vuelve a aparecer nuevamente en la región mesopotámica y norte de Santa Pé, Chaco y Formosa indeterminada.

Esto era de suponer, al restar el error, el corrimiento se produce hacia el oeste de la zona C quedando la B como una franja de 8-1 en el oeste del país.

En general se puede decir que diciembre prácticamente desde el centro de Río Negro hasta Formosa y desde la Mesopotamia hasta una línea que pasa por el centro de Mendoza, San Juan, La Rioja, Catamarca, Tucumán y Salta, recibe radiación que oscila entre 500-700 cal/cm²día.

PERIODO ANUAL: Del análisis de los valores anuales se deduce que el límite entre la zona de 400-500 cal/cm²día y la de 200-300 cal/cm²día, está situado en una línea W-E desde el sur de Tucumán al centro de Formosa; se modifica sustancialmente al se toma el error aditivamente, prácticamente la región D

queda reducida a la mitad de la prov. de Bs.As. y Patagonia. Si en cambio se resta el error, la región D ocupa todo el país y se produce un corrimiento hacia el N-W, donde desaparece la zona A y la C y B quedan reducidas a pequeñas franjas. Obviamente, después de observar estas variaciones antes señaladas se pueden considerar a las regiones de las figuras 3,4,5; como una aproximación gruesa de la verdadera distribución de la radiación solar global en el país. De todo lo anterior se deduce que es imprescindible contar con valores de gran precisión en las mediciones de radiación solar, si es que se desean efectuar estudios confiables para a provechamiento de la energía solar.

oooooooooooooooooooo

REFERENCIAS:

- 1- Kondratyev K. - "Radiation in the Atmosphere". International Geophysics Series. Vol.12. Academic Press. 1969
- 2- Parodi L. - "Enciclopedia de Agricultura y Jardinería" - 1:1-14. Bs.As. 1964
- 3- Geografía de República Argentina. Soc. Arg. Est. Geog. T.VI.
- 4- Crivelli E.; Kurlat M.; Fernández R. "Medidas de Radiación en la Argentina". Acta Científica N°30 - O.N.F.C. 1970
- 5- Fernández R.; Kurlat M. "Radiación Solar Global en Argentina". Acta Científica N°19 - O.N.F.C. 1970
- 6- Alanís; Fabris; Gaspar; Saravia; Souto. "Procesamiento y Análisis de Datos de Radiación en la Prov. de Salta". Actas Segunda Reunión de ASADES. - 1976.
- 7- Angström A.: Quart. J. R. Met. Soc. 50 -1924- 121
- 8- Abeledo J.; Kurlat M.; Fernández R. "Relación entre la duración relativa de la insolación y la radiación global" Meteorológica Vol.4 -Centro Arg. de Met. Bs.As. 1973
- 9- I.G.Y. "Radiation Instruments and Measurements" Vol 5 - Part. VI - Pergamon Press. 1958
- 10- Robinson N. "Solar Radiation". Elsevier Publishing Co. 1966

oooooooooooooooooooo

Tabla 1

Lugar	Latitud	Longitud
Ducumán	26° 28' S	65° 12' W
Mendoza	32° 53' S	68° 51' W
San Martín (Mza)	33° 05' S	68° 25' W
Pilar (Cba)	31° 40' S	63° 51' W
Buenos Aires .	34° 35' S	58° 29' W
Neuquén	38° 57' S	68° 08' W

oooooooooooooooooooo

Tabla 2

Región	Descripción
1	Clima: tropical de bosque. Veg. : Exhuberante. Especies leñosas mayores de 40 mts, arbustos e hierbas.
2	Clima: mesotermal de bosque. Lluvias durante todo el año. Veg. : herbácea y bosque bajo.
3	Clima: templado-cálido. Veg. : pradera, bosque higrófilo abierto y bajo.
4	Clima: templado-cálido. Veg. : mixta. árboles de hojas anchas perennes y caducas y hojas aciculares.
5	Clima: mesotermal. Estación seca en invierno. Veg. : herbácea y arbustiva.

Región	Descripción
6	Clima: subtropical. Lluvias 400-1000 mm al año. Veg. : Bosque de especies latifolias forestales y abras de pastizales.
7	Clima: semiárido Veg. : bosque xerófilo que alterna con sabanas de gramíneas y especies de cactáceas.
8	Clima: tropical de bosque. Veg. : selva serrana. Lianas, arbustos epífitas.
9	Clima: subtropical. Estación seca en invierno. Veg. : selva serrana.
10	Clima: semiárido Veg. : pobre, arbustiva, xerófila.
11	Clima: semiárido Veg. : arbustiva achaparrada.
12	Clima: semiárido Veg. : arbustiva xerófila
13	Clima: árido Veg. : arbustos xerófilos de 1-3 mts.
14	Clima: semiárido Veg. : herbácea y árboles de porte bajo muy separados entre sí.
15	Clima: mesotermal. Estación seca en invierno. Veg. : arbustiva, espinosos y tapiz gramíneo muy xerófilo.

Región	Descripción
16	Clima: mesotermal Veg. : herbácea y arbustiva
17	Clima: templado-cálido Veg. : herbácea
18	Clima: semiárido Veg. : herbácea xerófila y arbustos bajos.
19	Clima: templado-frío Veg. : bosque de latifoliadas y coníferas.

oooooooooooooooooooo

Tabla 2

1er Grado		2do Grado		
a	b	a	b	c
0.21	0.57	0.18	0.91	-0.39

3er Grado			
a	b	c	d
0.18	0.85	-0.22	-0.13

oooooooooooooooooooo

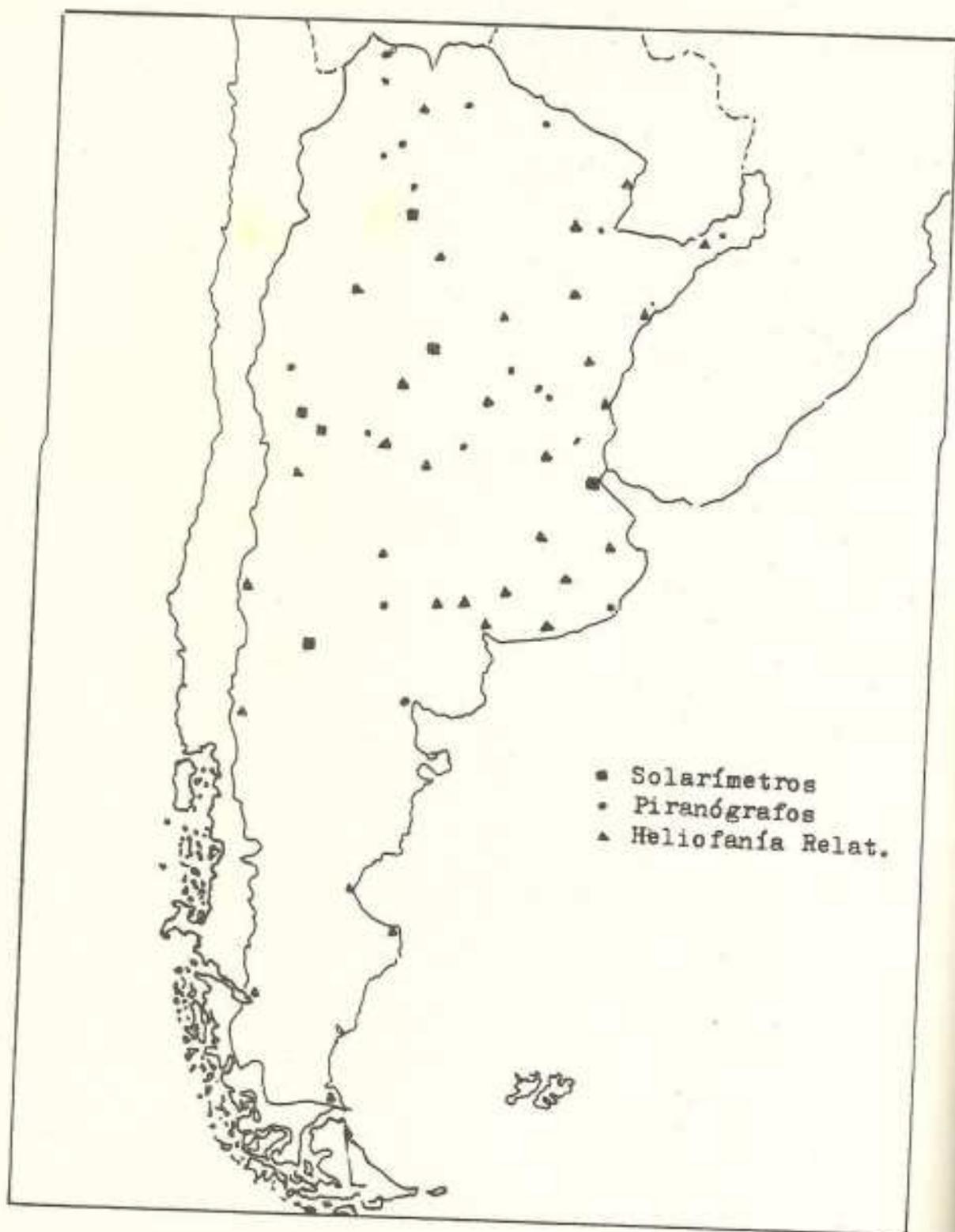
TABLA 4

Región	Ciudad	Radiación Global (cal/cm ²)		
		Anu.	Dic.	Jun.
1	Loreto	316	568	195
	Paso de los Libres	366	558	181
2	Posadas	370	502	219
3	La Paz	370	573	192
	Gualedguaychú	391	597	200
	Salto Grande	318	505	175
	Paraná	407	633	199
4	Mazaruca	399	649	147
5	Rafaela	299	411	136
6	Resistencia	369	591	183
	Formosa	334	527	191
	Reconquista	413	637	213
7	Sáenz Peña	347	534	182
	Las Lomitas	433	626	237
	Ceres	304	546	149
8	Colonia Sta Rosa	448	629	-
	Ros. de la Frontera	404	697	261
9	Tucumán	380	504	262
	Rivadavia	455	647	255
10	Jujuy	474	630	318
11	Salta	415	547	286
	Cachi	577	788	399
	La Quiaca	630	780	467
	Tres Cruces	610	737	480
	San Luig	396	766	173
12	Cnel. Pringles	411	650	181
	Córdoba	419	570	241
	Villa Dolores	427	574	240
	La Rioja	456	618	272
13	San Juan	451	632	238
	San Rafael	423	674	194
	San Martín	433	682	221
	Mendoza	459	684	240
	Chos Malal	426	745	174
	Trelew	330	543	87
	Neuquén	414	690	170
	San Antonio Oeste	394	650	141

Región	Ciudad	Radiación Global (cal/cm ²)		
		Anu.	Dis.	Jun.
14	Guatraché	369	708	168
	Puelches	383	694	104
16	Laboulaye	402	673	157
	M. Juárez	393	651	156
	Bahía Blanca	320	554	131
17	Pigüe	385	696	170
	Buenos Aires	361	601	173
	Azul	357	598	150
	Barrow	373	678	151
	Dolores	357	616	163
	Cnel. Suárez	377	629	169
	Pergamino	369	572	180
	Mar del Plata	374	618	148
	Comodoro Rivadavia	417	636	84
	18	Camarones	314	540
19	Río Gallegos	263	466	61
	Faro Cabo Blanco	315	526	102
	Gob. Gregores	299	498	87
	Bariloche	362	743	102
	Perito Moreno	338	700	74

oooooooooooooooooooooooooooo

Figura 1



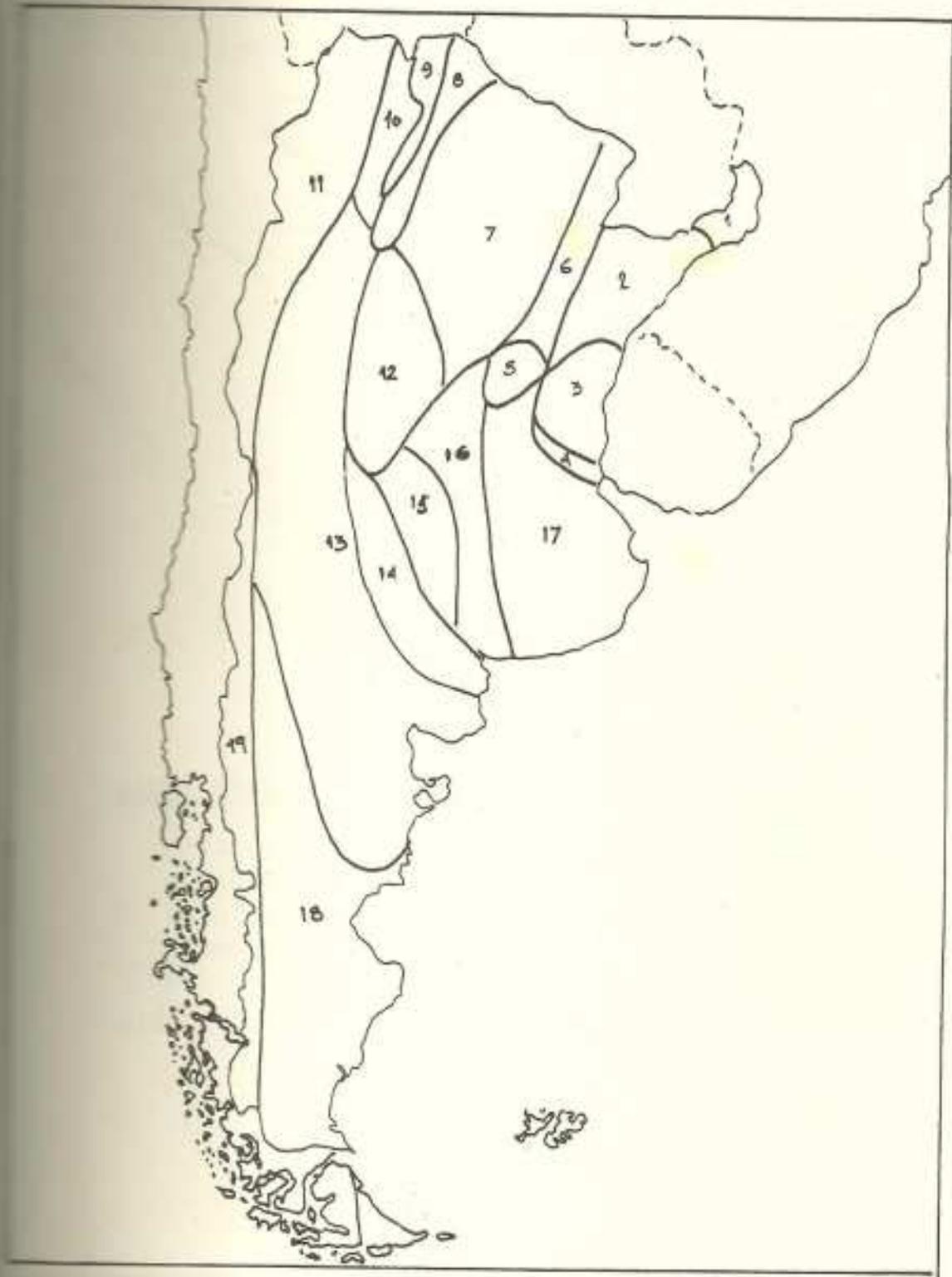


Figura 3

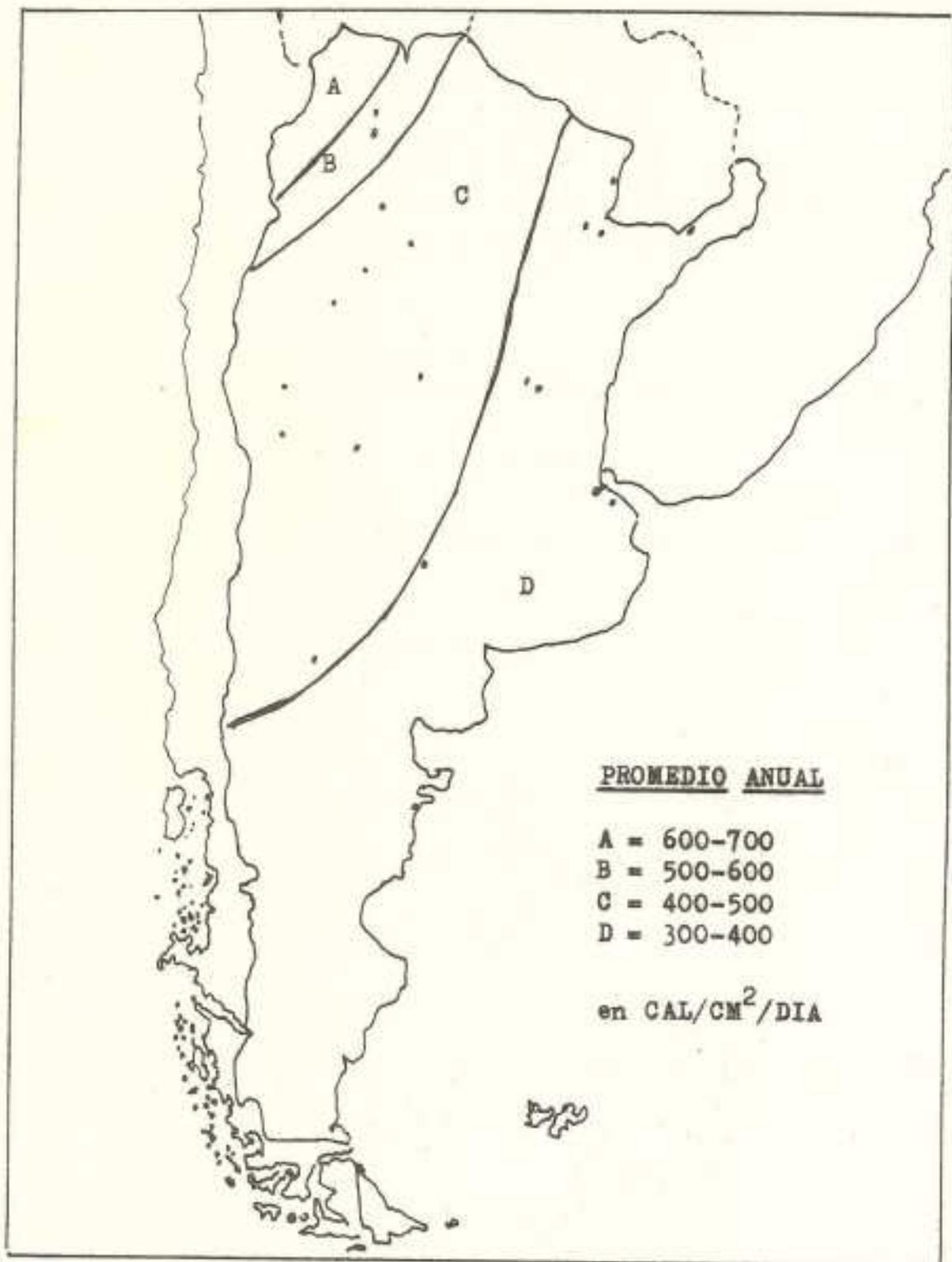


Figura 4

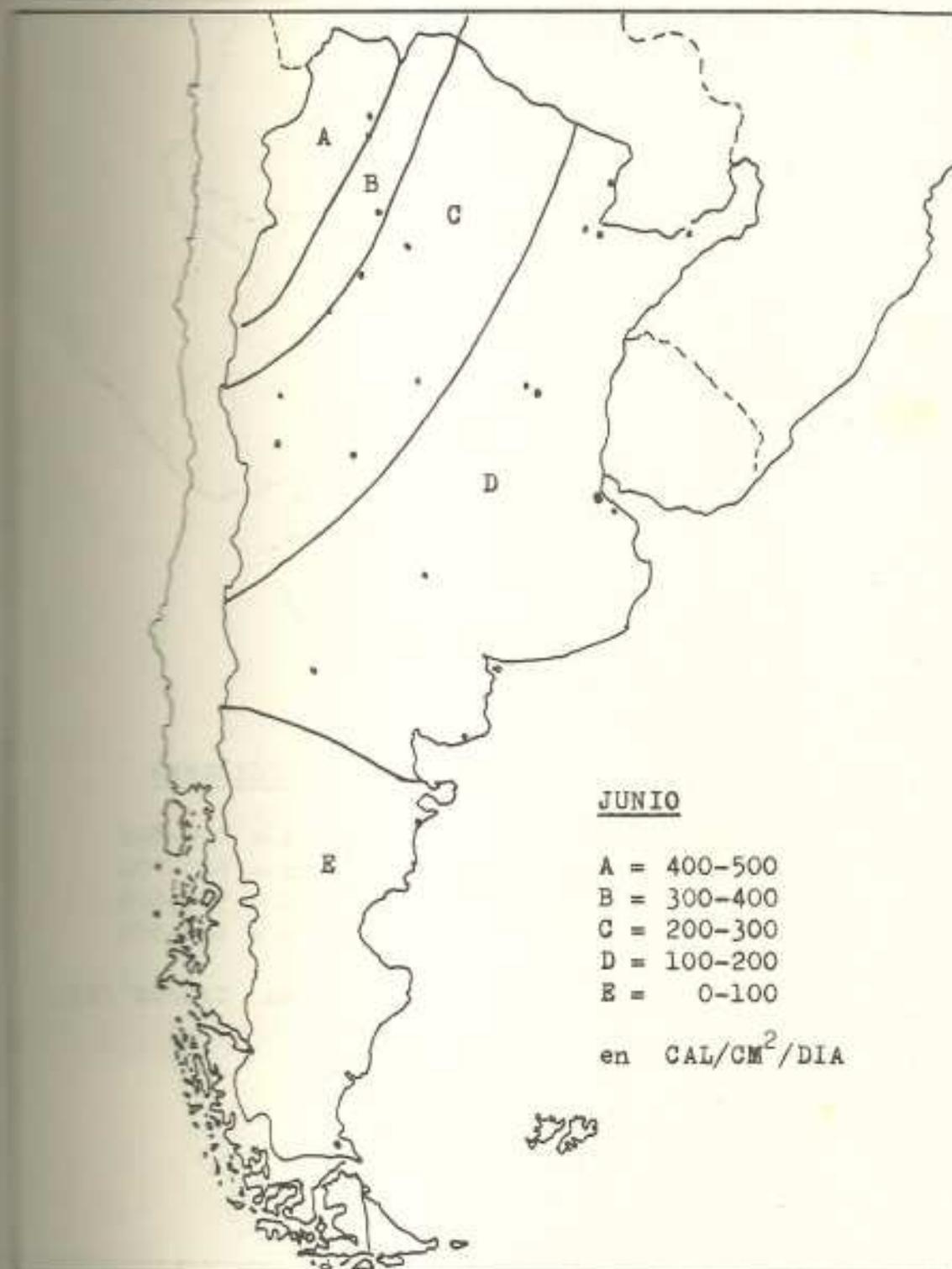
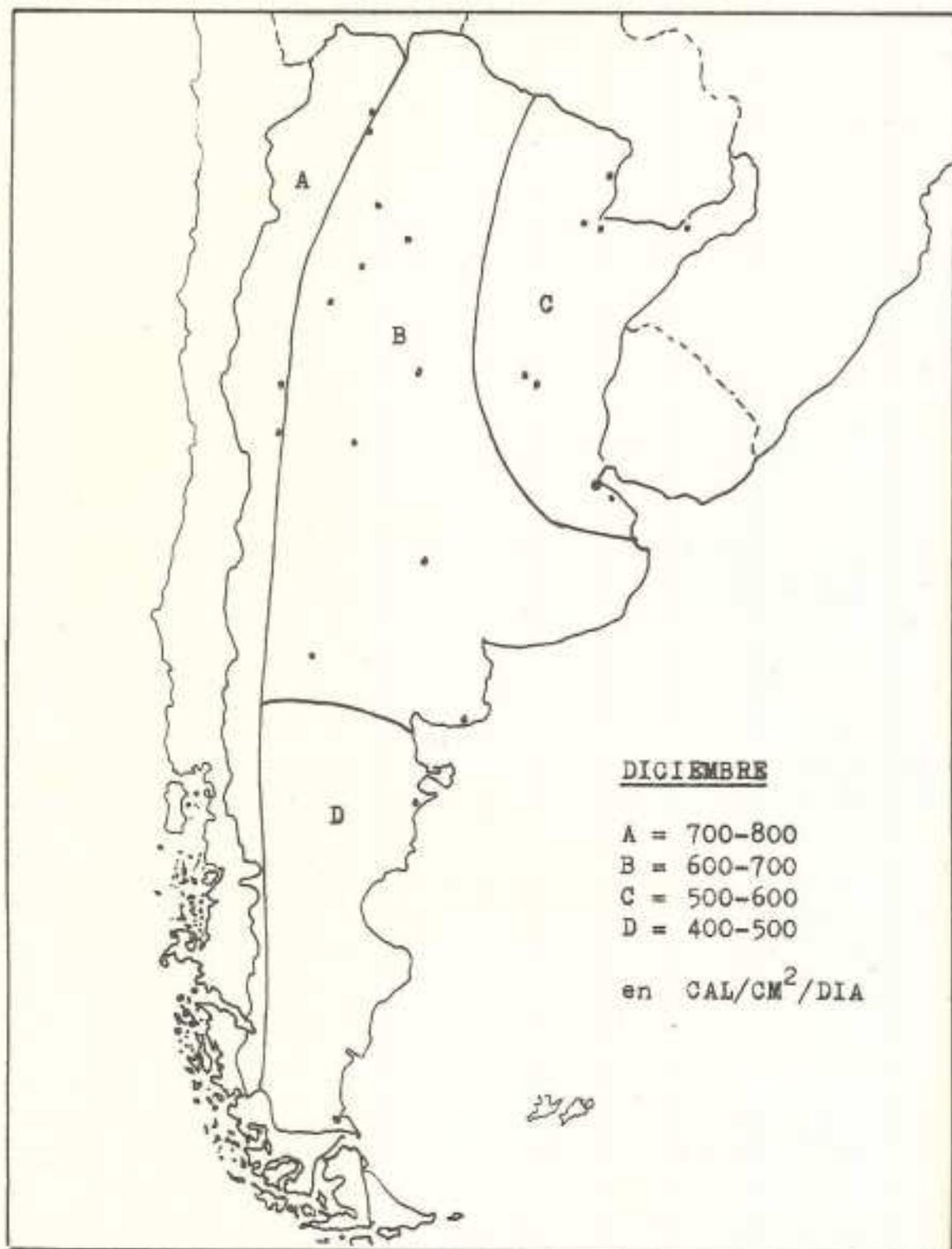


Figura 5



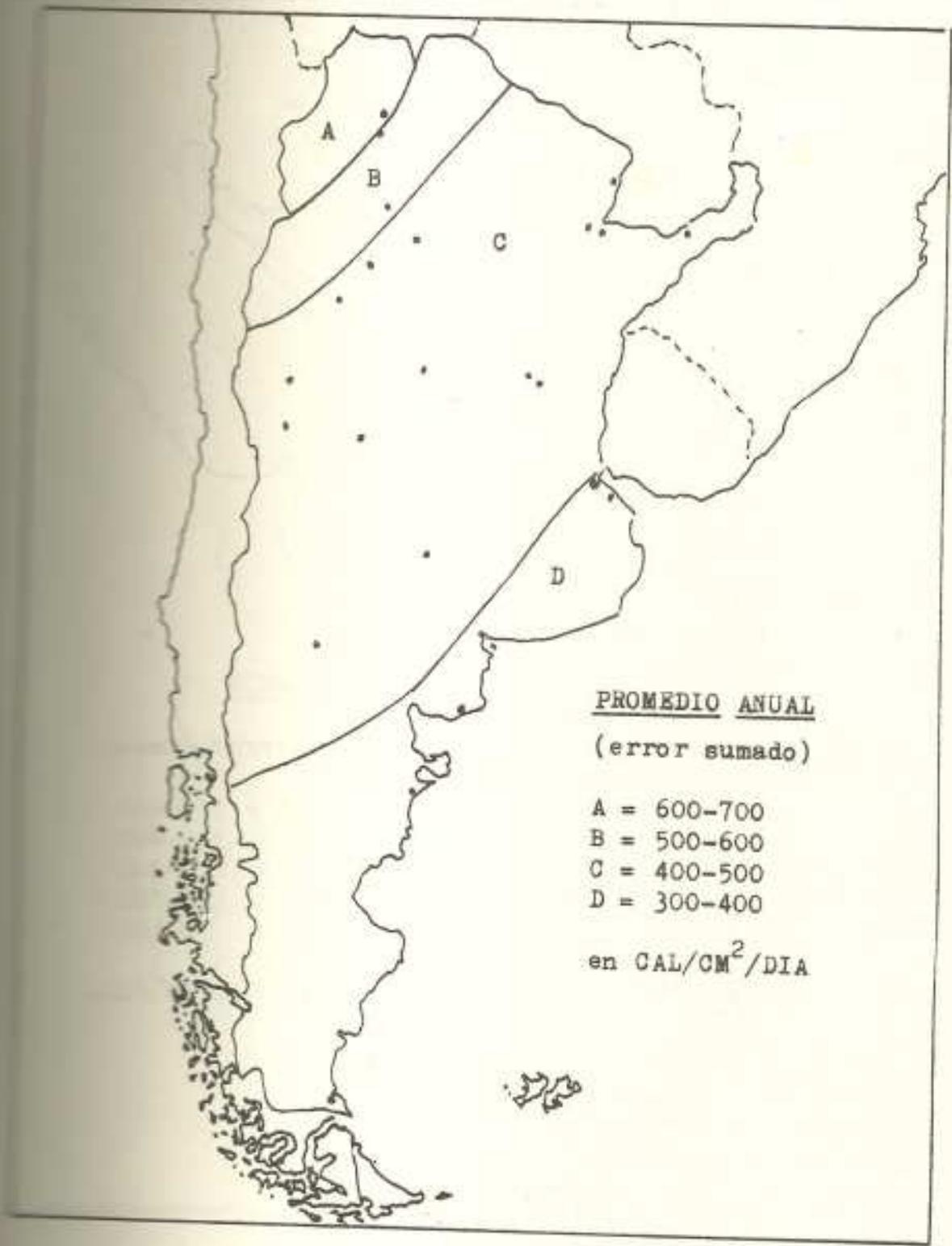
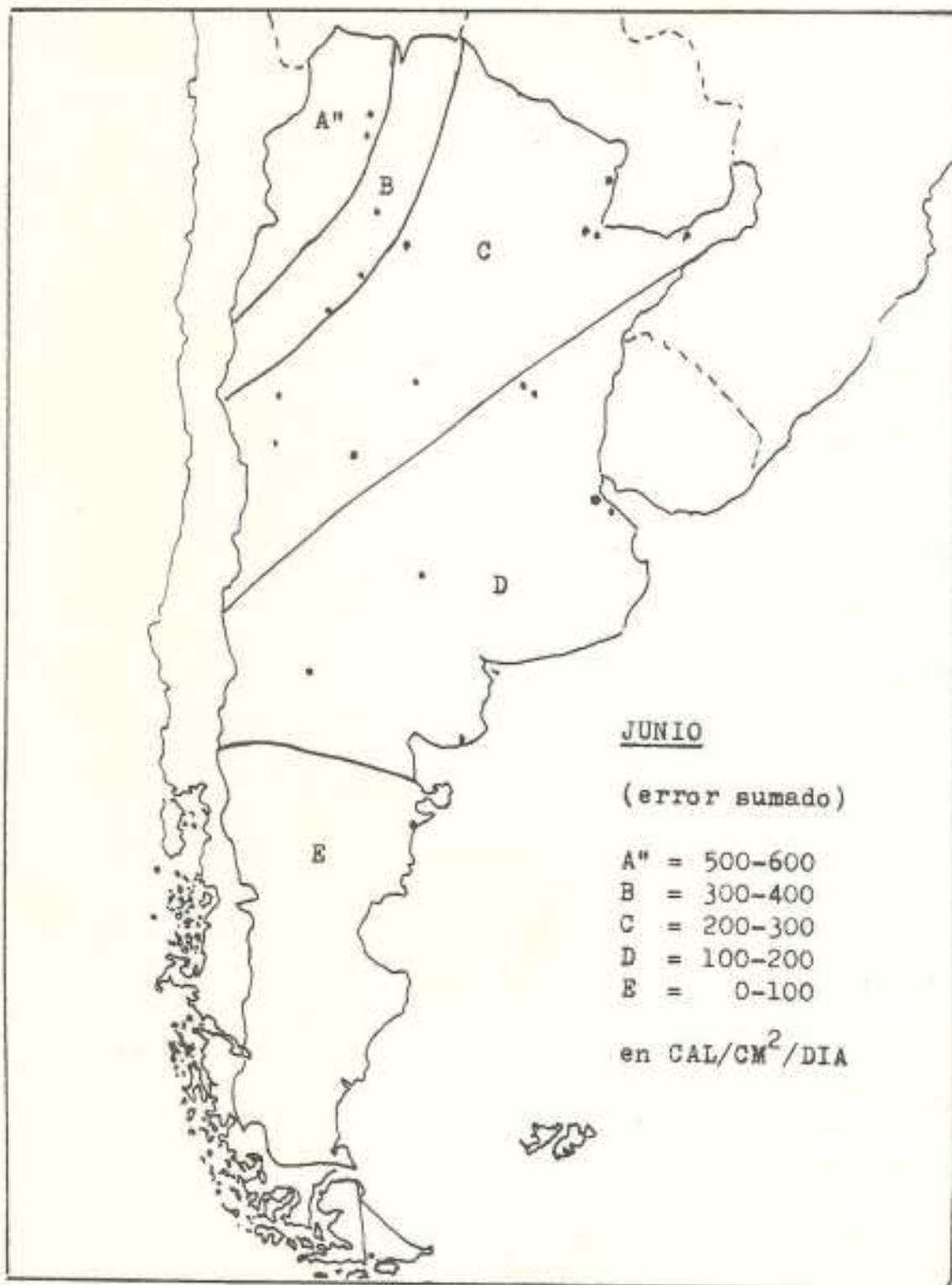


Figura 7



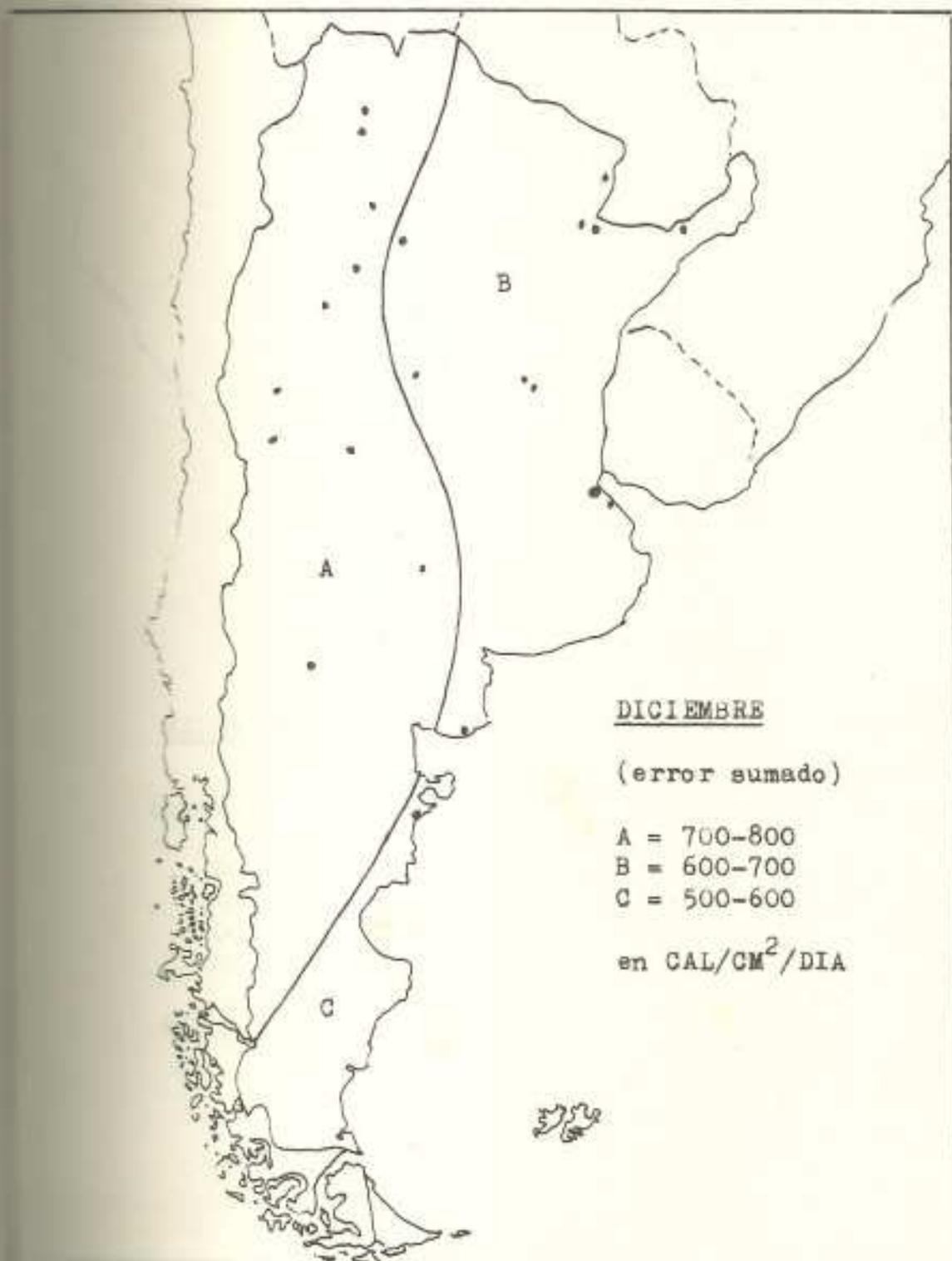


Figura 9

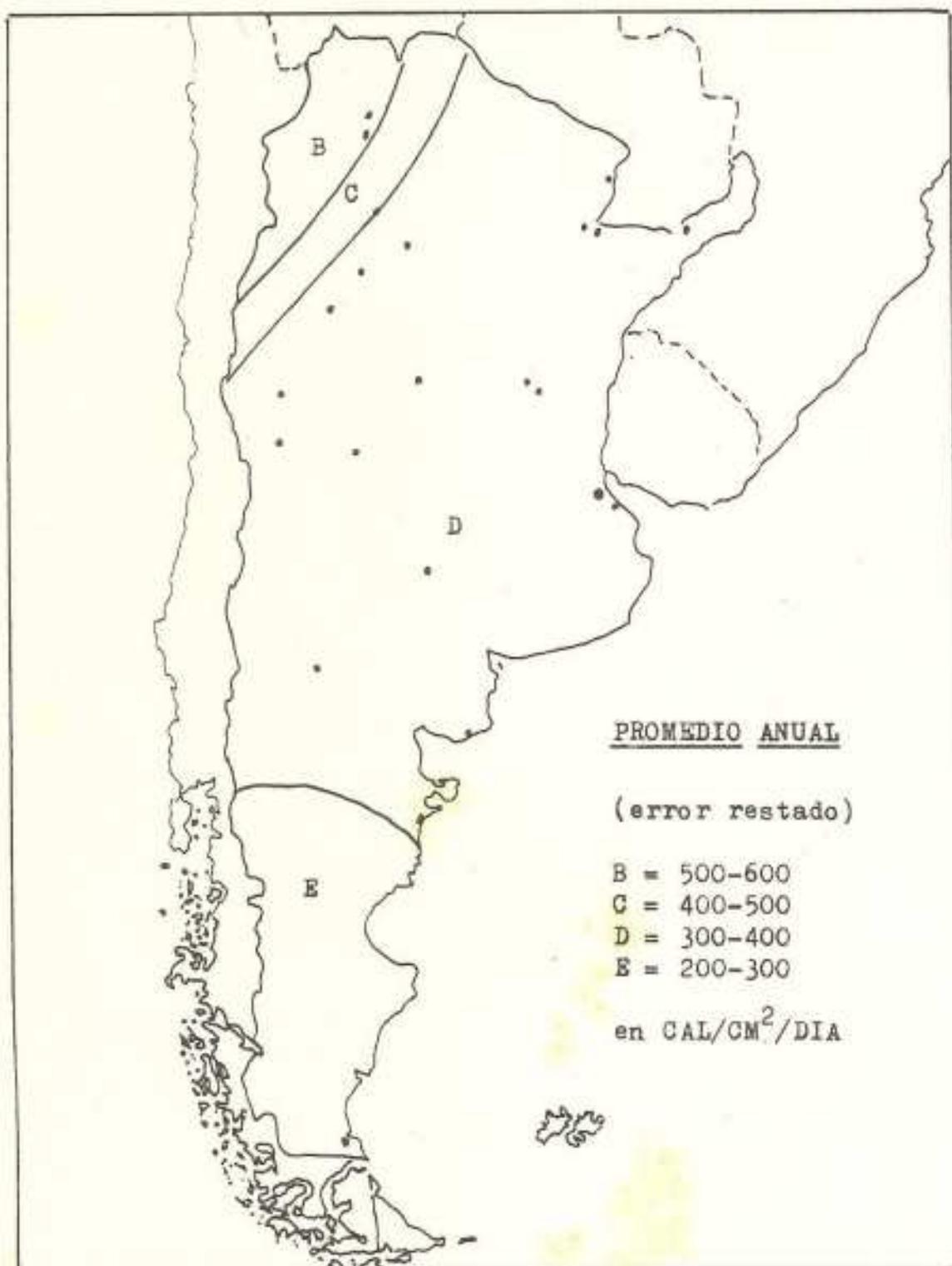


Figura 10

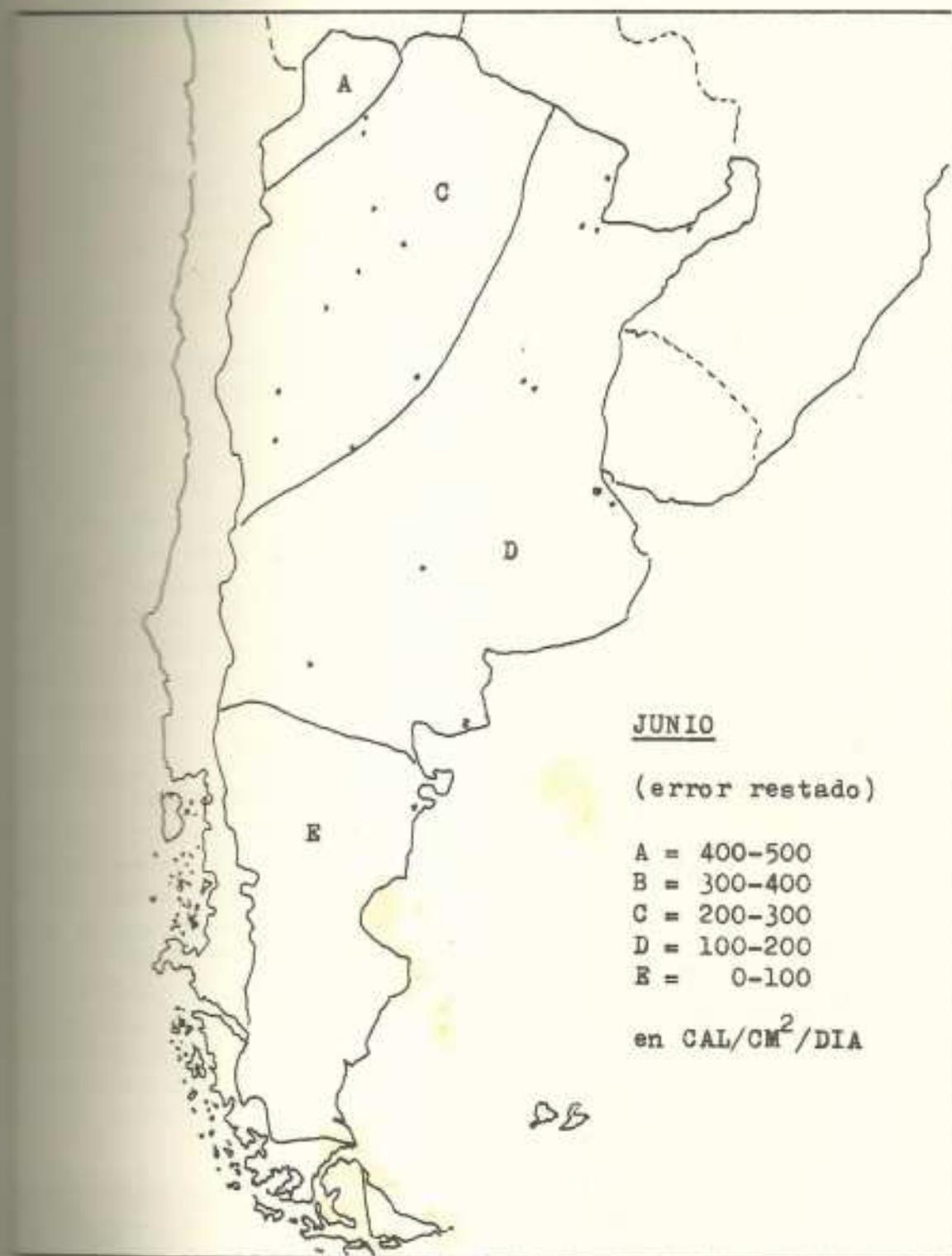


Figura 11

