

Evaluación de la radiación solar global y luminosidad en Chile. I. Calibración de fórmulas para estimar radiación solar global diaria¹

Haydée Castillo G.²
Fernando Santibañez Q.²

INTRODUCCION

La radiación solar es la fuente de energía para el 99,97 por ciento de los procesos físicos y biológicos que ocurren sobre la superficie terrestre (Seller, 1974). La evaporación de las aguas superficiales, el viento, la lluvia, el calentamiento del aire y el suelo, los movimientos convectivos y el crecimiento de los seres vivos son, entre otros, procesos cuya energía proviene de la radiación solar.

El funcionamiento de todos los ecosistemas terrestres y marinos esta sustentado en la fijación fotosintética de la energía solar. La cadena de transformaciones biológicas de la energía, esencia de todos los procesos vitales, comienza con la captación de radiación solar

por parte de los pigmentos fotosintéticos y almacenamiento de ella en enlaces químicos. La producción de biomasa vegetal no es más que una expresión de esta forma de acumulación de energía, lo cual provee al hombre de alimentos, materias primas y combustibles. La agricultura genera $1,22 \times 10^9$ toneladas de productos vegetales y 80×10^6 toneladas de productos animales, lo que representa el 0,72 por ciento de la producción primaria de todos los ecosistemas terrestres (Lieth y Wittaker, 1975). Por otra parte, la producción de biomasa representa una fuente potencial de energía, si consideramos que los ecosistemas terrestres fijan alrededor de $6,9 \times 10^{17}$ Kcal/año (Lieth y Wittaker, 1975), lo que representa entre 10 y 15 veces el consumo mundial de energía por parte de la humanidad.

A pesar de la importancia ecológica que reviste esta variable, existe poca información solarimétrica en Chile, lo que hace necesario calibrar métodos de estimación que permitan evaluar las disponibilidades regionales de energía solar. Este trabajo es el primero de una serie, en que se discutirán y aplicarán métodos para evaluar las disponibilidades de radiación solar en Chile.

¹ Recepción de originales : 22 de enero de 1981

² Prof. de Biol. e Ing. Agr., Dr., respectivamente, Facultad de Agronomía, U. de Chile, Casilla 1004, Santiago, Chile.

MATERIALES Y METODOS

1. Historia de los sistemas de estimación del flujo diario de radiación solar.

La densidad del flujo de radiación solar que incide sobre la superficie terrestre (energía área⁻² tiempo⁻¹) es una función de la posición relativa de la tierra respecto al sol, la latitud del lugar geográfico y el estado general de la atmósfera. Los dos primeros factores determinan la densidad del flujo que incide en el borde externo de la atmósfera o radiación extraterrestre (Ra), mientras que el último gobierna la proporción de la radiación incidente extraterrestre que es reflejada y absorbida por la atmósfera, no llegando por lo tanto a la biósfera. La radiación que atraviesa la atmósfera hasta la superficie terrestre es denominada radiación solar global (Rg).

La radiación global puede ser medida instrumentalmente, o estimada a través de ecuaciones con base empírica y teórica. Existen fórmulas para estimar el flujo instantáneo de energía incidente sobre la superficie (cal cm⁻² mn⁻¹; Coulson, 1975; Satterlund y Means, 1978)¹, y ecuaciones que estiman el flujo total de energía integrado en una unidad de tiempo más extensa (cal cm⁻² día⁻¹). Este trabajo incluye una calibración de ecuaciones del segundo tipo.

Desde comienzos de siglo han existido esfuerzos por establecer fórmulas simples, que permitan estimar la radiación global que incide sobre la superficie, a partir de la radiación extraterrestre y el estado de la atmósfera. Kimbal, citado por Coulson (1975), estableció en 1919 una relación, que fue posteriormente adaptada por A.K. Angstrom (1924), y que estima la densidad del flujo diario de radiación a partir de insolación:

$$R_{ge} = (a + b n/N) R_a$$

donde R_{ge} = Radiación solar global estimada
 R_a = Radiación extraterrestre
 n = Heliofanía real (horas del sol día⁻¹)
 N = Heliofanía teórica (horas del sol día⁻¹)
 a y b = Constantes

Los coeficientes de esta regresión lineal están asociados al tipo de nubes y a las condiciones generales que determinan la turbidez de la atmósfera. Es esperable, por lo tanto, que sus valores varíen según la localidad. Esto ha conducido a muchos autores a efectuar calibraciones locales de esta fórmula. Doorenbos y Pruit (1975) listan algunos autores que han obtenido relaciones de este tipo (Cuadro 1).

La constante a de la fórmula representa, en todos los casos, la fracción de la radiación extraterrestre que llega a la superficie terrestre cuando la cobertura nu-

CUADRO 1. CALIBRACIONES LOCALES DE LA FORMULA DE ANGSTROM (SEGUN DOORENBOS Y PRUIT, 1975)

Autor	Constantes		Latitud
	a	b	
Penman (1948)	0,18	0,55	52 N
van Wijk (1963)	0,23	0,50	40 N
Tanner <i>et al</i> (1960)	0,18	0,55	43 N
de Vries (1958)	0,27	0,54	36 S
Prescott (1940)	0,25	0,54	35 S
Black <i>et al</i> (1954)	0,30	0,50	34 S
Page (1961)	0,20	0,59	34 S
Stanhill (1961)	0,32	0,47	31 N
Glover <i>et al</i> (1958)	0,25	0,50	30 S
Page (1961)	0,30	0,48	19 S
Fitzpatrick (1965)	0,33	0,43	16 S
Promedio	0,26	0,52	

bosa es total. Glover y Mac Culloch (1959) establecieron una relación entre el valor a y la latitud (ϕ), la cual es una expresión indirecta del efecto de la masa atmosférica. Utilizando 7 estaciones ubicadas entre las latitudes 0 y 60, estos autores proponen la expresión:

$$R_{ge} = R_a (0,29 \cos \phi + 0,52 n/N)$$

La insolación (n) en general se mide menos frecuentemente que la cobertura nubosa, por esta razón, Doorenbos y Pruit (1975) proponen una relación para estimar directamente la heliofanía relativa, n/N , a partir de la nubosidad, lo que permite hacer estimaciones de la radiación global en lugares que no cuentan con datos de insolación.

Las fórmulas de estimación en general no consideran el efecto de la altitud, parámetro que incide sobre la masa y la turbidez de la atmósfera, de modo que para valores idénticos de la heliofanía relativa, una localidad situada a mayor elevación que otra recibe más radiación. Por otra parte, no sólo es importante el grado de cobertura nubosa, sino además la altura y el tipo de nubes, lo cual puede modificar notablemente el coeficiente de absorción por parte de ellas. Norero (1976), teniendo en cuenta la corrección latitudinal de Glover y Mac Culloch, propone una fórmula que considera, además, la altitud y el tipo de nubes:

$$R_{ge} = R_a (0,5 + 0,3 \cos \phi) 0,59 A^{0,09} [\tau + (1 - \tau) n/N]$$

donde A = altitud de lugar en metros y τ es un coeficiente de las nubes frente a la radiación solar.

¹ 1 cal cm⁻² mn⁻¹ = 700 W m⁻² = 1 ly mn⁻¹

Además de esta fórmula, existen numerosas otras, algunas de las cuales citan Stanhill (1965), Durand (1974), Budyko (1974), Coulson (1975), Frère, Rijks y Rea (1975), Chang (1977), Satterlund y Means (1978) y Rietveld (1978).

2. Calibración de fórmulas en Chile.

La heliofanía relativa sólo fue posible determinarla en forma directa en las estaciones que cuentan con datos de horas de sol (n). Con el fin de ampliar la información sobre la heliofanía, se estableció una relación entre la nubosidad (C) y el valor calculado de heliofanía relativa (n/N), en 17 estaciones a lo largo del territorio chileno, obteniéndose una función continua.

Esta relación permitió establecer el valor de heliofanía relativa para 100 estaciones chilenas, que sólo contaban con información de nubosidad.

A partir de la heliofanía relativa y de la radiación solar medida en 18 estaciones solarimétricas, se estableció una regresión entre ambas variables, de modo de determinar los coeficientes para la fórmula original de Angstrom. En forma análoga, se calculó la radiación solar mediante las fórmulas de Glover, Glover y McCulloch y Norero, de modo de establecer el error de estimación y el tipo de corrección para cada una de ellas. Las estaciones solarimétricas utilizadas cuentan con registros de longitud variable, entre 2 y 10 años. En todos los casos se trabajó con el promedio del período. La radiación global promedio se suavizó mediante un sistema gráfico, corrigiendo los valores promedios mensuales, que desvían de una tendencia suave de variación anual.

RESULTADOS Y DISCUSION

La relación presentada en la Figura 1 muestra una tendencia claramente inversa, definida entre el valor de la fracción n/N y la cobertura nubosa (C). Salvo algunas estaciones del extremo norte, la función queda bien representada por un polinomio de segundo grado del tipo: $y = A - BX - CX^2$. A pesar de las anomalías observadas en las estaciones del norte, la ecuación puede ser usada en todo el territorio chileno, con márgenes razonables de precisión, si se considera que el error medio es de 0,04, lo que es inferior al 10 por ciento en relación al promedio.

Las ecuaciones de regresión del tipo Angstrom, entre la fracción radiación global/radiación extraterrestre (R_g/R_a) y la heliofanía relativa (n/N), ponen de relieve que en Chile no es posible generalizar una relación única válida para todo el territorio. Debe destacarse que en general los coeficientes de determinación obtenidos son bajos (Cuadro 2). Las ecuaciones de re-

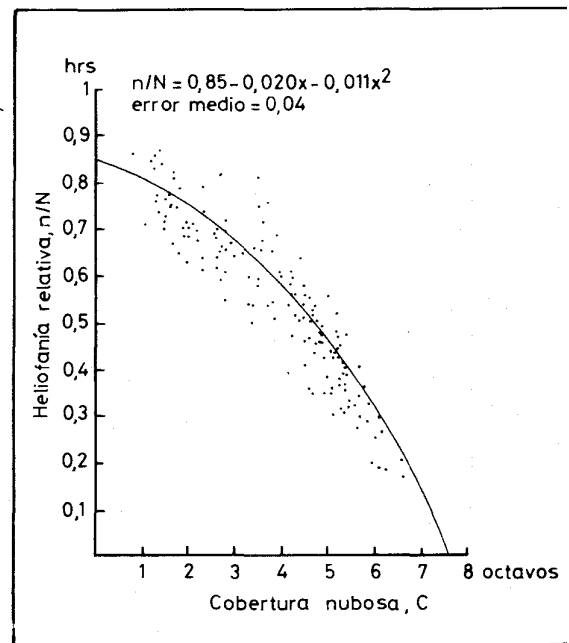


Figura 1. Relación entre la heliofanía relativa (n/N) y la cobertura nubosa (C).

gresión interceptan a la ordenada en valores que van desde 0,02 a 0,47 (coeficiente a de la fórmula). Ambas cifras, que representan la fracción de la radiación extraterrestre que llega a la superficie con cobertura nubosa total, escapan de la tendencia general observada en diferentes lugares del mundo (Cuadro 1), lo que sugiere la existencia de un error significativo en la estimación de la cobertura nubosa o en la medición de la radiación. El primero puede estar asociado a la baja representatividad de las medidas de cobertura nubosa, cuyo promedio diario se obtiene a partir de tres observaciones diarias, sistema que es especialmente impreciso en lugares con ciclos regulares de nubosidad, como es el litoral central y norte del país. Los errores en la medición de la radiación solar parecen no ser importantes. Esto se evidencia cuando se analiza el conjunto de estaciones solarimétricas a lo largo de Chile, cuyos datos mantienen un grado aceptable de consistencia.

A pesar de esta fuente de error, la calibración de las fórmulas obtenidas con los datos medidos de radiación, entrega coeficientes de determinación superiores a 0,9 en todas las estaciones solarimétricas utilizadas, lo que indica consistencia entre los datos de nubosidad y radiación. Si bien es cierto los coeficientes de determinación son altos, la calibración indica que las fórmulas presentan sobreestimación sistemática cuando la intensidad de radiación es baja (intercepción positiva en la ordenada); Figura 2a.

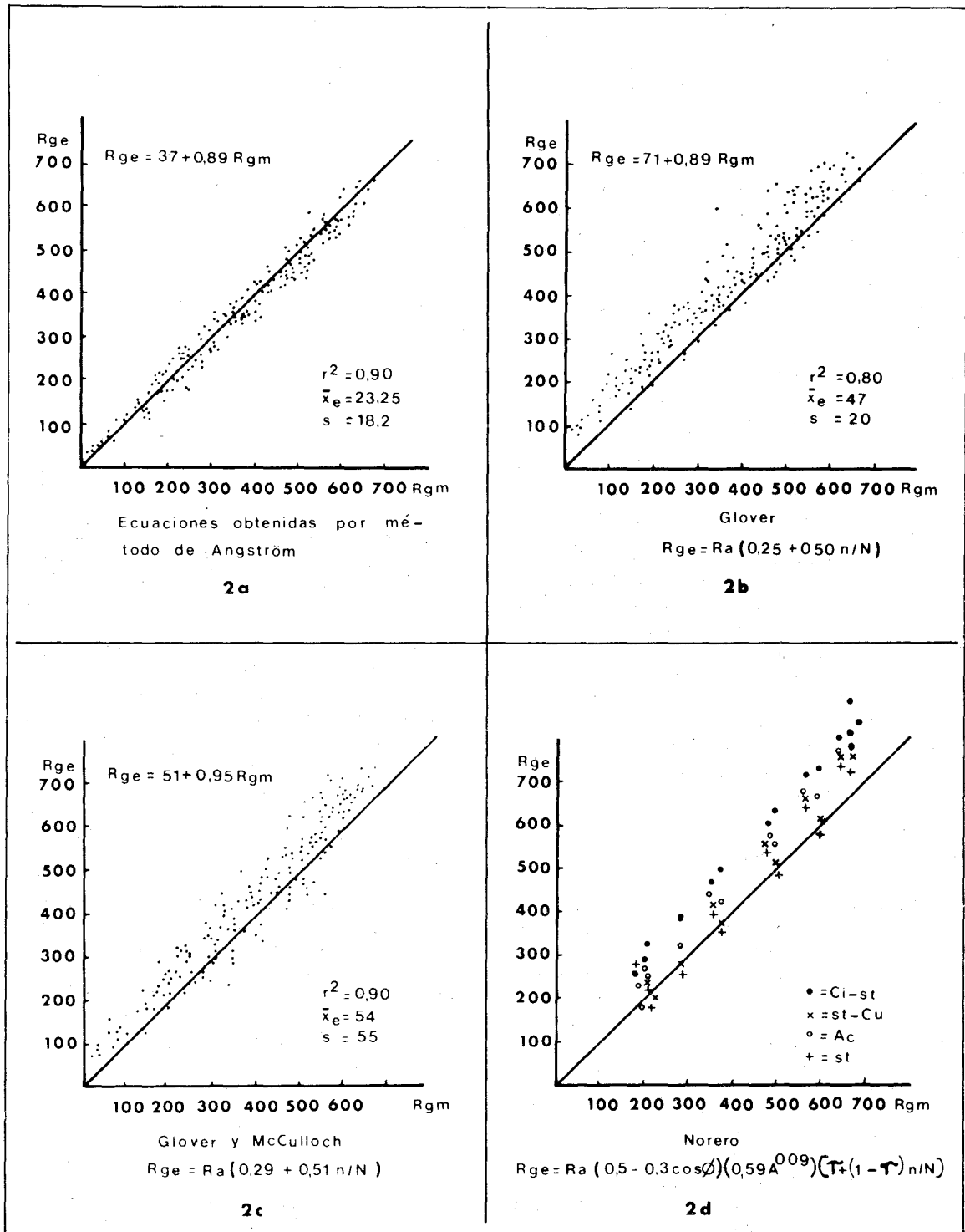


Figura 2. Calibración de métodos de estimación de la radiación solar (R_e = Radiación estimada, R_m = Radiación medida, ambas medidas en $\text{cal cm}^{-2} \text{ día}^{-1}$; \bar{x}_e y s corresponden al promedio y desviación estándar del error respectivamente, Ci - st = cirroestratos; st - Cu = estratocúmulos; Ac = altocúmulos; st = estratos).

Este mismo comportamiento mostró la calibración de las fórmulas de Glover, Glover y Mc Culloch (Figuras 2b y 2c).

La fórmula de Norero se muestra relativamente sensible al tipo de nubes, de modo que es difícil hacer una evaluación de ella, si se considera que pocas estaciones en Chile cuentan con observaciones sobre tipos de nubes. En la Figura 2d se presenta una calibración de esta fórmula para Santiago, suponiendo varios tipos de nubes (cirrostratos, estratos, estratocúmulos, alto-cúmulos). Puede observarse que exceptuando la cobertura con estratos, hubo una sobreestimación sistemática, cuando se supuso otros tipos de nubes. Si bien es cierto que la estimación fue aceptable con nubes de tipo estratos, debe destacarse que las formaciones de este tipo no son muy frecuentes en Santiago.

Para mejorar la estimación de la radiación solar, se calibró localmente la fórmula de Glover, la cual es universalmente utilizada. Esta calibración, a través de la cual se corrigió la pendiente y se introdujo un coeficiente de corrección en las relaciones propuestas en la Figura 2b, condujo a la formulación de una ecuación para cada una de las 18 localidades (Cuadro 3).

La calibración de estas ecuaciones, mostradas en la Figura 3, indica que el error promedio de la estimación es 18 calorías $\text{cm}^{-2} \text{ día}^{-1}$. Este error equivale a un 4,7 por ciento, si se considera que la radiación diaria promedio anual para las estaciones analizadas es de 382 calorías $\text{cm}^{-2} \text{ día}^{-1}$.

Cada una de las 18 fórmulas locales se extrapolaron espacialmente, suponiéndola representativa de un área extensa. Esta extrapolación fue hecha con criterios geográficos, tales como influencia marina, altitud, continentalidad y latitud. Las áreas de extrapolación, para cada fórmula dentro de Chile continental, se pre-

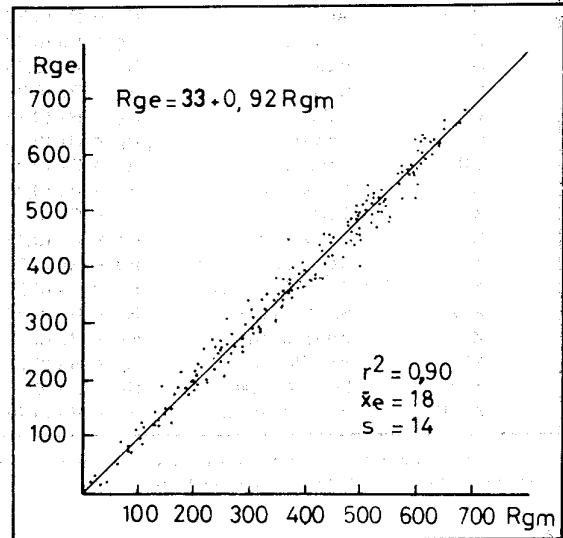


Figura 3. Relación entre Radiación global medida y Radiación global estimada por calibración de la fórmula de Glover ($R_{ge} = \text{Radiación global estimada}$, $R_{gm} = \text{Radiación global medida}$, ambas en $\text{cal cm}^{-2} \text{ día}^{-1}$; X_e y s corresponde al promedio y desviación estándar del error respectivamente).

CUADRO 2. CONSTANTES Y COEFICIENTES DE DETERMINACION PARA LA FORMULA DE ANGSTROM EN LOCALIDADES CHILENAS SELECCIONADAS

Estación solarimétrica	Latitud	Longitud	Altitud	a	b	r^2
Parinacota	18°12' S	60°16' W	4392	0,32	0,40	0,93
Arica	18°29' S	70°19' W	35	0,23	0,43	0,73
Iquique	20°13' S	70°04' W	8	0,28	0,42	0,90
Pica	20°30' S	60°21' W	1280	0,13	0,47	0,57
Calama	22°28' S	68°55' W	2270	0,46	0,23	0,39
Caldera	27°03' S	70°51' W	14	0,41	0,08	0,81
Copiapó	27°21' S	70°20' W	283	0,27	0,38	0,40
Vallenar	28°35' S	70°46' W	469	0,02	0,63	0,69
La Serena	29°54' S	71°15' W	32	0,13	0,72	0,39
Ovalle	30°34' S	71°11' W	335	0,05	0,68	0,67
Valparaíso	33°01' S	70°38' W	41	0,19	0,41	0,51
Santiago	33°27' S	70°42' W	520	0,29	0,38	0,91
San José de Maipo	33°39' S	70°22' W	1060	0,03	0,66	0,86
San Fernando	34°35' S	71°00' W	350	0,08	0,65	0,72
Concepción	36°47' S	73°07' W	9	0,45	0,23	0,91
Alto Palena	43°37' S	71°47' W	266	0,18	0,65	0,50
Puerto Williams	54°56' S	67°29' W	8	0,47	0,62	0,61

CUADRO 3. RESULTADOS DE LA CALIBRACION LOCAL DE LA FORMULA DE GLOVER EN LOCALIDADES CHILENAS SELECCIONADAS

Area	Estación solarimétrica	Fórmula propuesta	r ²	Error medio cal cm ⁻² día ⁻¹
I	Parinacota	$R_g = R_a (0,23 + 0,47 n/N) + 41$	0,90	22
II	Arica	$R_g = R_a (0,28 + 0,57 n/N) - 86$	0,93	4
III	Iquique	$R_g = R_a (0,23 + 0,47 n/N) + 20$	0,97	19
IV	Pica	$R_g = R_a (0,28 + 0,56 n/N) - 75$	0,95	18
V	Calama	$R_g = R_a (0,26 + 0,52 n/N) - 30$	0,98	13
VI	Caldera	$R_g = R_a (0,29 + 0,58 n/N) - 85$	0,95	23
VII	Copiapó	$R_g = R_a (0,26 + 0,51 n/N) - 59$	0,99	13
VIII	Vallenar	$R_g = R_a (0,22 + 0,46 n/N) - 63$	0,99	8
IX	La Serena	$R_g = R_a (0,29 + 0,57 n/N) - 60$	0,98	19
X	Ovalle	$R_g = R_a (0,25 + 0,49 n/N) - 39$	0,97	21
XI	Valparaíso	$R_g = R_a (0,22 + 0,45 n/N) - 28$	0,99	13
XII	Santiago	$R_g = R_a (0,22 + 0,44 n/N) + 35$	0,98	19
XIII	San José de Maipo	$R_g = R_a (0,22 + 0,44 n/N) - 60$	0,95	31
XIV	San Fernando	$R_g = R_a (0,23 + 0,47 n/N) - 9$	0,97	22
XV	Concepción	$R_g = R_a (0,26 + 0,51 n/N) - 59$	0,97	23
XVI	Alto Palena	$R_g = R_a (0,29 + 0,57 n/N) - 44$	0,98	21
XVII	Punta Arenas	$R_g = R_a (0,26 + 0,52 n/N) - 70$	0,98	22
XVIII	Puerto Williams	$R_g = R_a (0,26 + 0,52 n/N) - 73$	0,98	11

El coeficiente de determinación corresponde a la regresión entre la radiación estimada por la ecuación propuesta y la radiación medida en la estación representativa del área.

sentan en la Figura 4. En cada una de estas áreas se procederá a estimar, en un trabajo posterior, la disponibilidad de energía solar, mediante la aplicación de la fórmula correspondiente.

CONCLUSIONES

1. Considerando las singularidades climáticas y la gran extensión latitudinal existente en Chile, no es posible generalizar una fórmula única que garantice precisión para todo el territorio. La fórmula de Glover: $R_g = R_a (0,25 + 0,50 n/N)$, produce un error medio de ± 50 calorías cm⁻² día⁻¹ (12 por

ciento de la radiación promedio de las estaciones utilizadas).

2. La ecuación de Glover, corregida localmente, permite estimaciones de la radiación solar global con errores medios de 18 calorías cm⁻² días⁻¹, lo que equivale a un 4 por ciento sobre la radiación promedio de las estaciones utilizadas.

3. La heliofanía relativa (n/N) puede estimarse, con precisión aceptable ($\pm 0,04$ unidades), a partir de una función de la cobertura nubosa, siendo de poca relevancia el tipo de nubes.

RESUMEN

Se probaron fórmulas empíricas del tipo Angstrom como estimadores de la radiación solar global en 18 localidades chilenas. Ninguna de las fórmulas observó comportamiento homogéneo a través de todo el territorio, por lo que se proponen fórmulas locales que incluyen coeficientes de corrección. Las regresiones directas entre heliofanía relativa (n/N) y atenuación de

la radiación solar (radiación global incidente/radiación extraterrestre) producen ecuaciones lineales no generalizables a todo el territorio. La calibración local de la fórmula de Glover ($R_g = R_a (0,25 + 0,50 n/N)$) permite una estimación sujeta a un error medio de 18 cm⁻² día⁻¹, sobre un promedio de 382 cal cm⁻² día⁻¹ para las localidades utilizadas.

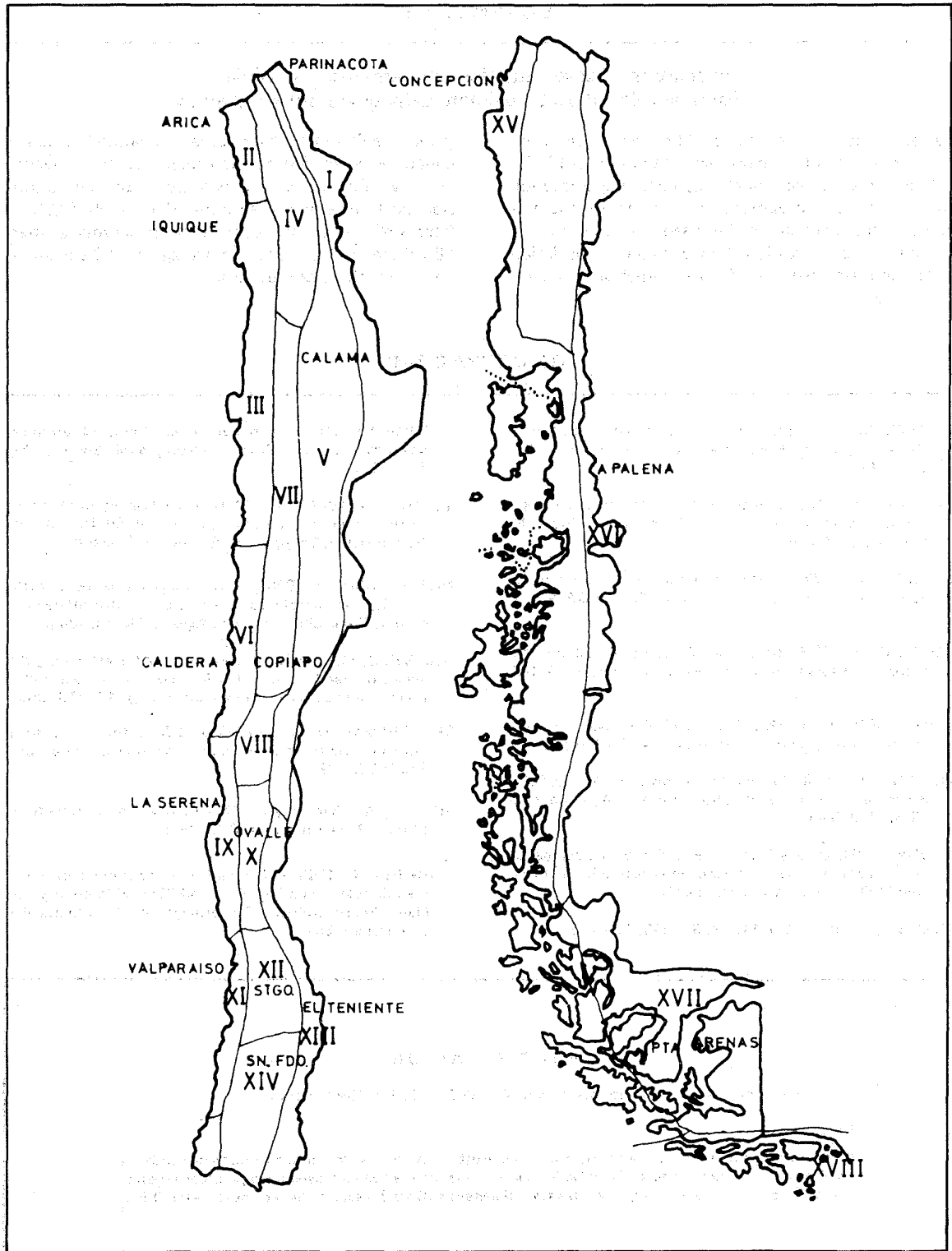


Figura 4. Croquis de Chile Continental, con indicación de las áreas definidas, para cada una de las fórmulas propuestas

SUMMARY

**Evaluation of solar radiation and luminosity in Chile.
I. Formula calibration to estimate daily global solar radiation**

Various empirical equations (Angstrom type) were tested as estimators of global solar radiation in 18 Chilean localities. Local equations, including correction coefficients, are proposed, since none of them is homogeneous enough to be used through all the regions. Direct regressions between relative insolation (n/N) and attenuations of solar radiation (incident

global radiation/extraterrestrial radiation) produce equations which can not be generalized to the whole country. Equations obtained by local calibration, starting from a unique formula, $R_{ge} = R_a (0,25 + 0,50 n/N)$, allow estimations with errors smaller than $18 \text{ cal cm}^{-2} \text{ day}^{-1}$, for an average of $382 \text{ cal cm}^{-2} \text{ day}^{-1}$ for the localities tested.

LITERATURA CITADA

- ANGSTROM, A.K. 1924. Solar and terrestrial radiation. *Quarterly Journal, Royal Meteorological Society*, 50: 121-126.
- BUDYKO, M. 1974. Climate and life. International Geophysics Series 18. Ed. David H. Miller. Ac. Press. N. York, U.S.A. 508 p.
- CHANG, J. H. 1977. Climate and Agriculture. An Ecological Survey. Aldine Publishing Company. Chicago U.S.A. 304 p.
- COULSON, K. 1975. Solar and Terrestrial Radiation. Methods and Measurements. Ac. Press. N. York, U.S.A. 322 p.
- DOORENBOS, J. and PRUIT, W. 1975. Crop water requirements, Irrigation and drainage paper, 24. FAO. Roma.
- DURAND, R. 1974. Estimation du rayonnement global a partir de la durée d'insolation. *Annales Agronomiques* 25(6): 779-795.
- FRERE, M., RIJKS, J. y REA, J. 1975. Estudio agroclimático de la zona andina. Proyecto interinstitucional FAO/UNESCO/OMM en Agroclimatología.
- GLOVER, J. and Mc CULLOCH, S. 1959. The empirical relation between solar radiation and hours of sunshine. *Quarterly Journal, Royal Meteorological Society*, 84: 172-175.
- LIETH, H. and WHITTAKER, R. 1975. Primary productivity of the biosphere. *Ecological Studies*, 14. Ed. H. Lieth and R., Whittaker. Springer Verlag. New York. U.S.A.
- NORERO SCHI, A. 1976. La evapotranspiración de los cultivos. *Aspectos agrofísicos. Venezuela, Centro Interamericano de Desarrollo Integral de Aguas y Tierras*. 134 p.
- RIETVELD, M.R. 1978. A new method for estimating the regression coefficients in the formula relating solar radiation to sunshine. *Agriculture Meteorology*, 19: 243-252.
- SATTERLUND, D. and MEANS, J. 1978. Estimation of solar radiation under variable cloud conditions. *Forest Sci.* 24(3): 363-373.
- SELLER, W. 1974. Physical Climatology. The University of Chicago Press. Chicago. U.S.A. 304 p.
- STANHILL, G. 1965. A Comparison of four methods of estimating solar radiation. En: UNESCO, Methodology of Plant Ecophysiology. *Proceedings of the Montpellier Symposium*: 55-61.

RECTIFICACION

Por error del texto original, se suprime, en Vol. 41, Nº 2, p. 105, el último párrafo.

Se aclara que:

Phytoseiulus chilensis no corresponde a ninguna especie descrita, razón por la cual no tiene validez taxonómica. Por lo tanto *Neoseiulus fallacis* (Garman) mantiene su validez sistemática, por corresponder a otra especie, distinta a su vez, de *Amblyseius chilensis* (Dosse), especie benéfica descrita de Chile.