

**BALANCES DE RADIACION Y POTENCIALES DE PRODUCTIVIDAD
PRIMARIA EN ALGUNOS ECOSISTEMAS TERRESTRES DE LA
REPUBLICA MEXICANA**

W. RITTER ORTIZ*

M. E. de GARAY*

S. GUZMAN RUIZ*

(Recibido: 10 de febrero, 1985)

(Aceptado: 16 de enero, 1986)

RESUMEN

A partir de la información climatológica se calculan los balances de radiación y los potenciales de productividad primaria neta para trece estaciones de la República Mexicana, con diferentes tipos de vegetación: Bosque tropical caducifolio, Pastizal, Matorral xerófilo y Bosque de Coníferas y *Quercus*.

Los balances de radiación se estiman con datos de normales climatológicas de temperatura, precipitación, humedad relativa e insolación y con valores esperados de albedo, para los tipos de vegetación considerados.

La determinación del coeficiente de calentamiento como un índice de importancia ecológica, muestra que éste está más ligado a las condiciones atmosféricas que a las superficies consideradas.

Los potenciales de productividad primaria neta se obtienen aplicando los modelos climáticos de Rosenzweig, (PER₁) Lieth y Box (PER₂), Lieth (PN y PT) construidos en función de la evapotranspiración real, la precipitación y la temperatura.

Los resultados obtenidos con los modelos de Lieth y Box (PER₂) y Lieth (PN) coinciden con los observados en tipos de vegetación equivalentes.

La relación entre la productividad primaria neta estimada con el Modelo de Lieth y Box (PER₂) y Lieth (PN), y el índice de aridez, calculado con los balances de radiación y los valores de precipitación, confirman las observaciones de Budyko, teniéndose las siguientes relaciones:

$$PER_2 = 2480.7 (IA)^{-0.7958} \quad \text{y} \quad PN = 2016.0 (IA)^{-0.83139}$$

El mejor ajuste de estas curvas señala que las variaciones en la productividad responden directamente a la cantidad de agua y energía disponibles.

* Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM, MEXICO.

ABSTRACT

Radiation balances (Q^*) and net primary productivity potentials (NPP) are estimated from climatological data for thirteen locations with different vegetation patterns: Tropical deciduous forest, Pine-oak forest, grassland and "chaparral", in the Mexican Republic.

Radiation balances are determined from temperature, relative humidity, insolation and albedo expected values, for the ecosystems considered.

Net primary productivity potentials estimates are obtained applying Rosenzweig (PER_1) Lieth and Box (PER_2) and Lieth's models (PN and PT) which use actual evapotranspiration, precipitation and temperature, as environmental predictors.

When precipitation (PN) and actual evapotranspiration (PER_2) are used, productivity predictions match with observed values of equivalent vegetation types; consequently, productivity variations respond more clearly to water availability.

Determinations of the heating coefficient as an index of ecological significance prove that it has a closer relation to atmospheric conditions than to the surfaces considered.

The relationship between net primary productivity predicted from actual evapotranspiration and precipitation, and the aridity index, estimated from radiation balances and precipitation values, coincide with Budyko's conclusions, having the following expressions:

$$PER_2 = 2480.7 \quad (IA)^{-0.7958}$$

$$PN = 2016.0 \quad (IA)^{-0.83139}$$

INTRODUCCION

La riqueza de un país está constituida, en parte, por sus potenciales de productividad primaria; es decir, por la propiedad natural que posee la vegetación de captar la energía solar incidente y mediante la fotosíntesis, generar sustancias orgánicas susceptibles de ser utilizadas como materiales nutritivos.

La productividad primaria de un ecosistema se refiere a la velocidad a la que se almacena la energía como resultado de la actividad fotosintética o quimiosintética de organismos productores (principalmente las plantas verdes) en forma de sustancias orgánicas (Odum, 1971). Es una medida de acumulación de energía en un período específico y en una área determinada (Jones, 1979).

La constante conversión de energía luminosa en energía química es de gran importancia, ya que la mayor parte de los organismos no fotosintetizadores, como el hombre, dependen de los autótrofos para obtener la energía que los mantiene vivos. De

esta manera el crecimiento de la vegetación, además de tener importancia biológica, adquiere implicaciones económicas y políticas e influye en el desarrollo social.

Los potenciales de productividad primaria varían de una región a otra, encontrándose áreas de baja productividad como los desiertos o zonas de alta productividad como las selvas. Las causas de estas diferencias residen en las características genéticas, fisiológicas y bioquímicas de las plantas, así como en la relación de éstas con otros organismos y su medio ambiente, en donde las interacciones y combinaciones posibles de factores como la radiación solar, sus derivados (luz y temperatura), precipitación y tipo de suelo, ejercen una notable influencia sobre los patrones de distribución y crecimiento de la vegetación.

Los estudios de la radiación neta total en superficies naturales, es decir, sobre el suelo descubierto, los pastizales, los cultivos y los bosques, resultan importantes, ya que representan la cantidad de energía disponible para los procesos de fotosíntesis y transferencia de calor latente y sensible como componentes del balance de calor entre estas superficies y la atmósfera (Billings, 1978). Estas estimaciones se utilizan también para el cálculo de la evaporación en estudios hidrológicos y de balances de energía en estudios climatológicos.

Son muchos los factores que pueden reducir o incrementar la productividad, tanto en los ecosistemas naturales como en los cultivados; entre estos factores se consideran importantes la radiación solar, el dióxido de carbono, la temperatura, el agua, el nitrógeno, el fósforo y pequeñas cantidades de ciertos minerales, etcétera (Gates, 1971). También son importantes las fuentes externas que aportan como subsidio energía que se origina fuera del sistema, lo que incluso reduce los costos de mantenimiento. Estas fuentes externas que subsidian energía pueden estar representadas por el viento, la lluvia, la energía contenida en un combustible fósil o en el trabajo animal o humano (Margalef, 1981). Sin embargo, un mismo factor que en determinadas condiciones actúa como subsidio, reforzando la productividad, en otras puede generar pérdidas, tal como sucede en la insolación, vientos, precipitación, etcétera (Odum, 1971).

Con el propósito de evaluar la productividad primaria en los sistemas ecológicos, se han diseñado algunos métodos de medición, la mayoría basados en alguna cantidad indirecta, como por ejemplo, el método de la cosecha, en el que se recoge y pesa la cantidad de materia vegetal producida durante un determinado período (Kira *et al.*, 1967; Odum, 1971; Billings, 1978; Wielgolaski, 1975).

Otro método consiste en medir las velocidades de fotosíntesis y respiración de plantas completas o áreas con vegetación, utilizando algún instrumento que mida la absorción o liberación de dióxido de carbono u oxígeno en cierto tiempo (Egle y Schenk, 1951; Billings *et al.*, 1966).

Se pueden utilizar también métodos fundados en la circulación de átomos radiactivos o en la cantidad de clorofila por metro cuadrado (Billings, 1978).

Estos y otros procedimientos se apoyan en principios relativamente sencillos, pero su aplicación práctica es frecuentemente muy compleja para poder obtener resultados exactos, especialmente cuando se aplican a ciertos tipos de vegetación, como bosques, selvas, etcétera (Jones, 1979).

En este tipo de métodos se consideran los aspectos relativos a la estructura y características anatómicas y fisiológicas de las plantas. Algunas propiedades ambientales también se destacan por su importancia y entre ellas procede mencionar: las radiaciones solar y térmica, la temperatura del aire, la humedad relativa, la precipitación, el viento y el balance de radiación (Helms, 1965; Gates, 1965; Botkin, 1969; Miller, 1970; Vocum *et al.*, 1964; Monteith, 1965; Budyko, 1974; Sneva, 1982).

De acuerdo con un enfoque diferente, algunos investigadores se inclinan por la construcción de modelos donde se consideren tanto la contribución de algunas variables ambientales, como la influencia de las características de la vegetación, en cuanto a la productividad.

El objetivo de este trabajo es el de probar el uso de modelos climáticos y de ecuaciones de radiación, para determinar los potenciales de productividad primaria neta y los balances de radiación en diferentes regiones de la República Mexicana, donde se encuentran distintos tipos de vegetación: Bosque Tropical Caducifolio, Pastizal, Matorral Xerófilo y Bosque de Coníferas y *Quercus*.

MODELOS CLIMATICOS DE PRODUCTIVIDAD PRIMARIA

Con apoyo en la idea de que el ambiente determina en cierta forma las características de las comunidades terrestres, algunos autores sostienen que es posible establecer correlaciones entre valores de variables ambientales y cifras de productividad.

Los registros que se obtienen de las estaciones meteorológicas constituyen una im-

portante fuente de información que se puede utilizar para tratar el problema, basándose en el criterio de las posibles asociaciones entre la variación ambiental y la productividad.

Rosenzweig (1968) ha señalado que la evapotranspiración real (ER), es decir, la cantidad de agua evaporada del suelo y transpirada por la vegetación, se puede utilizar en la predicción de la productividad primaria neta. Esto deriva de que la evapotranspiración real expresa simultáneamente la disponibilidad de agua y de energía solar, ambos, elementos indispensables para la fotosíntesis. Este autor utiliza un conjunto de datos de productividad primaria neta (únicamente sobre el suelo), correspondientes a diferentes tipos de vegetación (bosque, desierto, pastizal, tundra y bosque tropical). Estos datos los relaciona con los valores de evapotranspiración real, calculados por el método de Thornthwaite y Mather (Thornthwaite y Mather, 1957), citados por Rosenzweig (1968). El modelo de Rosenzweig se apoya en análisis de regresión lineal, comprendiendo en los términos de la ecuación a los logaritmos de las variables.

$$PER_1 = \log NAAP = (1.66 \pm 0.27) \log ER - (1.66 \pm 0.07)$$

donde

ER = evapotranspiración real en mm/año

NAAP = productividad primaria neta sobre el suelo g/m²/año.

Rosenzweig considera que la velocidad de fotosíntesis depende de las concentraciones de materia prima comprendiendo entre otras el agua y la radiación solar. En los ambientes terrestres, el CO₂ es más o menos constante (Sellers, 1965), citado por Rosenzweig (1968). Así la evapotranspiración real según el autor, es una medida de los elementos más variables. Se afirma que existen condiciones locales especiales que ningún modelo general toma en consideración, tales como la deficiencia de algún nutriente esencial como el fósforo o el nitrógeno, o condiciones locales de neblina que tienden a elevar la concentración de CO₂ y por lo tanto la productividad (Wilson, 1948), citado por Rosenzweig (1968). La medida, restringida sólo a la evapotranspiración real, no podría abarcar estas variables para la determinación de la productividad.

Lieth y Box (1972) en general, siguen la misma lógica, que sirve de fundamento a Rosenzweig; como él consideran a la productividad primaria como función de la evapotranspiración real, sin embargo, existen diferencias en cuanto al conjunto de datos, ya que para la elaboración de su modelo utilizan valores de productividad primaria neta total (incluyen datos de superficie y por debajo del suelo) en América, Eura-

sia y Africa, combinados con valores del mapa de Geiger de evapotranspiración y con apoyo en los mismos, construyen la ecuación.

$$PER_2 = 3\ 000 (1 - e^{-0.0009695(ER-20)})$$

donde

$$PER_2 = \text{Productividad primaria neta en g/m}^2/\text{año}$$

Con este modelo, llamado "Modelo Montreal 2, conmemorativo de C. W. Thornthwaite", se calcula que el valor global de la productividad primaria neta terrestre es de 118.1×10^9 ton/año.

Lieth (1973), por su parte, destaca la importancia de la temperatura media anual $T(C)$ y de la precipitación media anual, $P_p(mm)$, como factores ambientales útiles para la determinación de la productividad (PT, PN). Los parámetros considerados se combinan para la elaboración del "Modelo de Miami", que se expresa en dos ecuaciones:

$$PT = \frac{3\ 000}{1 + e^{1.315 - 0.119 T}}$$

para la temperatura, frente a la productividad ($g/m^2/año$) y

$$PN = 3\ 000 (1 - e^{-0.000664 P_p})$$

para la precipitación frente a la productividad e es la base de los logaritmos naturales.

Estas ecuaciones se basan en un conjunto de lecturas procedentes de más de mil estaciones, distribuidas sobre los continentes, que comprenden información sobre temperatura y precipitación; los datos se transforman en valores de PPN, seleccionando el valor más bajo cuando las dos ecuaciones producen resultados diferentes.

BALANCES DE RADIACION, COEFICIENTES DE CALENTAMIENTO E INDICES DE ARIDEZ

La cantidad de radiación solar que incide sobre una superficie horizontal, en el límite superior de la atmósfera, sólo depende de la época del año y la latitud geográfica, sin embargo, la que finalmente llega hasta el suelo, resulta de una atenuación producida principalmente por los gases constituyentes de la atmósfera y las nubes, ya que éstos dan lugar a fenómenos de reflexión, dispersión y absorción (Strahler y Strahler, 1978).

Debido al alto costo del instrumental pirheliométrico, pocos países han logrado

tender una vasta red de estaciones meteorológicas con este tipo de aparatos. Por lo tanto, el problema de la determinación de la radiación solar global se trata rutinariamente, con apoyo en formulaciones empíricas. Este tipo de enfoque empírico permite solucionar el problema hasta con un alto grado de aproximación, en algunos casos. Básicamente, para determinar la radiación solar global, resulta importante conocer ciertos valores de algunos parámetros relacionados con ésta. Resultan indispensables: la duración de la insolación astronómica, medida en términos de duración de la luminosidad del día, sin tomar en cuenta su intensidad, la radiación extraterrestre (Q_0) y la radiación solar máxima (Q_m) calculada para condiciones extraordinarias tales como: cielo despejado, mínimo contenido atmosférico de vapor de agua y CO_2 y mínimo coeficiente de turbiedad atmosférica (Hernández, 1976).

Para determinar el valor de la fracción de la radiación solar absorbida finalmente por la superficie, es necesario determinar el albedo (α) o sea el porcentaje o fracción de la radiación que se refleja con respecto a la radiación incidente (Budyko, 1974). Teóricamente, los valores de albedo pueden cambiar dentro del rango de 0 - 1 comprendidos desde una superficie que absorbe totalmente la radiación hasta una superficie completamente reflectiva, donde el albedo es igual a 1 (Vitkevich, 1960).

En la actualidad es posible encontrar valores medios de albedo, para varias superficies naturales y diferentes condiciones geográficas, ya registradas en numerosas publicaciones (Stanhill *et al.*, 1965; Federer, 1968; Stanhill *et al.*, 1973; Budyko, 1974).

Al multiplicar la radiación solar global para el término $(1 - \alpha)$ se obtiene la radiación neta en onda corta (K^*) disponible para ser utilizada por una superficie (Budyko, 1974).

$$K^* = K \downarrow (1 - \alpha)$$

La tierra absorbe la radiación solar y la remite en forma de onda larga (radiación terrestre) de acuerdo con las leyes de Stefan-Boltzman y Wien (Bannister, 1979).

Para propósitos prácticos es importante determinar la magnitud del intercambio de calor radiado entre la superficie terrestre y la atmósfera, es decir, la diferencia entre los flujos ascendente y descendente de radiación térmica en la superficie terrestre. La determinación de los flujos de radiación térmica en la atmósfera se puede llevar a cabo empíricamente. Las fórmulas teóricas se derivan generalmente del espectro de emisión de los gases radiantes y sólo se pueden utilizar cuando se conocen los perfiles verticales de temperatura y humedad en la atmósfera, hasta la altura de alre-

dedor de 7 kms. Las fórmulas empíricas son generalmente representaciones estadísticas de las correlaciones entre la radiación observada y algunos valores correspondientes a parámetros de superficie como la temperatura y la humedad del aire a una altura de 1.5 a 2 m (Chávez, 1980).

La cantidad de radiación neta en onda larga (L^*) queda entonces determinada por la diferencia entre la radiación térmica atmosférica o emisión atmosférica ($L\downarrow$) y la radiación terrestre ($L\uparrow$):

$$L^* = L\downarrow - L\uparrow$$

$$L^* = -\epsilon\sigma T^4 (0.56 - 0.079\sqrt{e}) (0.1 + 0.9 S/S_0)$$

de acuerdo con la ecuación de Brunt (1932) modificada para condiciones variables de nubosidad, donde al coeficiente de emisividad de la superficie (ϵ) se le da un valor unitario (Budyko, 1974) y

donde L^* = radiación neta en onda larga

σ = constante de Stefan-Boltzmann

e = presión de vapor a 2 m sobre el suelo, mb

S = insolación observada en horas

S_0 = insolación esperada en horas.

El balance de radiación en la superficie de la Tierra (Q^*) equivalente a la radiación neta total, queda definido como la diferencia entre los flujos de radiación ascendente y descendente (Gates, 1960).

Es decir:

$$Q^* = K\downarrow(1 - \alpha) + L\downarrow - L\uparrow$$

Con el fin de probar estos modelos y ecuaciones para estimar los valores de los potenciales de productividad primaria y los balances de radiación en localidades mexicanas a las que corresponden diferentes tipos de vegetación, se procedió a emplear la información conveniente en la forma que se describe en seguida:

Se seleccionaron trece localidades donde existe la información climatológica que se requiere. Asimismo, en la primera parte se determinó el tipo de vegetación co-

respondiente a cada lugar, utilizando el Mapa de Tipos de Vegetación de México elaborado por Rzedowski (1978).

A continuación, se examinaron los componentes del balance de radiación y se efectuó la estimación para cada sitio. El dato de la radiación solar global se tomó directamente de las cartas mensuales elaboradas por Galindo y Chávez (1977), basadas en el método de Angström. Los valores de albedo, para los distintos tipos de vegetación, se seleccionaron de la tabla de valores de albedo para diferentes regiones geográficas y distintos tipos de superficie construida por Budyko (1974). Con la información anterior fue posible calcular la radiación neta en onda corta, a partir de la ecuación $K^* = K\downarrow (1 - \alpha)$.

Para el cálculo de la radiación neta en onda larga, se utilizó la ecuación de Brunt, modificada para condiciones variables de nubosidad:

$$L^* = -\epsilon\sigma T^4 (0.56 - 0.079\sqrt{e}) (0.1 + 0.9 S/S_0)$$

la temperatura, la humedad relativa (HR) y las horas de insolación observadas, se obtuvieron de la información proporcionada en los registros consignados en estaciones meteorológicas de la Dirección General de Geografía y Meteorología de la Secretaría de Agricultura y Ganadería, correspondiente al periodo general de datos, comprendido en algunos casos en los intervalos de 1941 a 1965 y en otros de 1941 a 1970, para cada localidad estudiada.

La presión de vapor (e) no consta en los registros, pero se puede calcular a partir de la humedad relativa (HR) y la presión de vapor de saturación (E_1), con la fórmula:

$$e = \frac{HR \times E_1}{100}$$

La insolación esperada se tomó de la tabla proporcionada por Torres Ruiz (1983) donde se presenta el fotoperiodo medio en horas para cada mes y latitud, de los 15°N a los 33°N.

Con los valores de radiación neta en onda corta y en onda larga, se procedió a calcular el balance de radiación como:

$$Q^* = K^* + L^*$$

Se determinaron los coeficientes de correlación (r) para cada localidad, con el ob-

jeto de evaluar si el albedo seleccionado correspondía en realidad al tipo de vegetación señalado; cuando el coeficiente de correlación resultó menor de 0.79, se seleccionó otro albedo, cuyo valor queda comprendido dentro del rango consignado en Budyko (1974).

En la segunda parte de la investigación se determinaron los valores de evapotranspiración potencial (EP) media mensual y anual, la evapotranspiración real (ER) anual, y el déficit de agua en términos anuales, correspondientes a las mismas regiones.

La evapotranspiración potencial se determinó con la fórmula empírica establecida por Thornthwaite (1948); ésta es aplicable a un lugar determinado cuando se conocen su latitud y temperatura. La fórmula que se emplea es:

$$EP = 1.6 (10 t/I)^A$$

donde: EP = evapotranspiración potencial sin ajustar

t = temperatura media mensual

$$A = 0.000000675 I^3 - 0.0000771 I^2 + 0.017922 I + 0.49239$$

$$I = \text{índice calórico anual} = i \times 12 \text{ meses}; \quad i = (t/5)^{1.514}$$

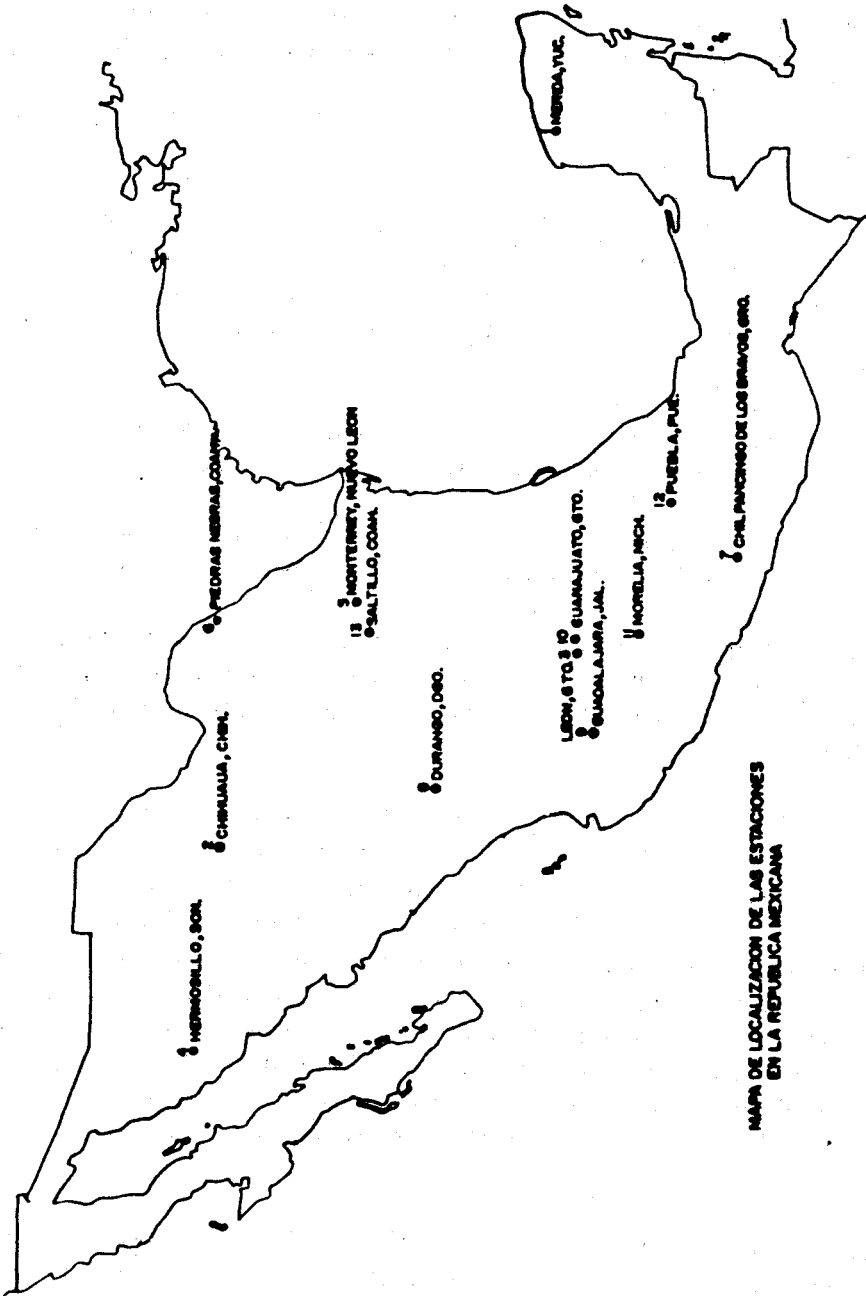
Al restar el déficit de agua de la evapotranspiración potencial, se determinó la evapotranspiración real de acuerdo con el método de Thornthwaite (1951).

Monteith y Szeicz (1961) introducen el concepto de coeficiente de calentamiento (β) para una superficie, como un índice de significancia ecológica que implica la pérdida de radiación neta total. Este coeficiente se calcula con la pendiente (a), de la línea de regresión trazada entre el balance de radiación y la radiación neta en onda corta: $Q^* = a (1 - \alpha) K \downarrow + b$, así $\beta = \frac{1 - a}{a}$.

Estos autores consideran a β como un parámetro descriptivo de las propiedades radiativas de las superficies. Por otra parte Stanhill *et al.* (1973) concluyen que este coeficiente de calentamiento está más ligado a las condiciones atmosféricas que a las superficies consideradas.

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

De trece localidades seleccionadas en la República Mexicana, Mapa 1 (por tener información de horas de insolación) y clasificadas en cuatro diferentes ecosistemas



Mapa 1. Mapa de la República Mexicana, con la localización de las estaciones utilizadas.

(Bosque tropical caducifolio, Bosque de coníferas y *Quercus*, Matorral xerófilo y Pastizal) los máximos balances netos de radiación en onda corta (Figs. 1 - 13), se localizan en los Pastizales de Chihuahua ($500 \text{ cal cm}^{-2} \text{ día}^{-1}$) en los meses de mayo y junio, y el mínimo valor ($187 \text{ cal cm}^{-2} \text{ día}^{-1}$) ocurre en Monterrey, considerado como Matorral xerófilo en el mes de diciembre.

Los máximos valores netos de pérdida en los balances de radiación en onda larga ocurren en Guanajuato, Gto. ($-236 \text{ cal cm}^{-2} \text{ día}^{-1}$) considerado como Bosque de coníferas y *Quercus* en el mes de marzo. La menor pérdida neta en onda larga ($-69 \text{ cal cm}^{-2} \text{ día}^{-1}$) ocurre en Chilpancingo, Gro. (Bosque de coníferas y *Quercus*) en el mes de septiembre.

El valor más alto de balance total de radiación ocurre en Saltillo, Coah. ($367 \text{ cal cm}^{-2} \text{ día}^{-1}$) considerado como Bosque de coníferas y *Quercus* en el mes de junio.

El mínimo valor en el balance total de radiación ocurre en Hermosillo, Son. ($49 \text{ cal cm}^{-2} \text{ día}^{-1}$) considerado como Matorral xerófilo en el mes de diciembre.

Podemos concluir que en condiciones atmosféricas y de radiación solar semejantes se pueden observar diferencias en la radiación neta si las superficies son distintas. Estas diferencias dependen básicamente del albedo o de la temperatura de la superficie, o de ambos (Federer, 1968).

Los coeficientes de calentamiento calculados de la pendiente (a) de la regresión de la radiación neta total y neta en onda corta ($\beta = \frac{1-a}{a}$) concuerdan con los resultados de Stanhill *et al.* (1965) quienes consideraron que los coeficientes deben de asociarse, sobre todo, a las condiciones atmosféricas en contraposición a Monteith y Szeicz (1961), quienes introdujeron este concepto como un índice de importancia ecológica superficial y que implica la pérdida de radiación neta en onda larga en términos de la ganancia de radiación neta total. En este trabajo se hace esta deducción por los datos contradictorios deducidos para un mismo tipo de vegetación; así por ejemplo, para el Bosque de coníferas y *Quercus* se obtuvieron cifras que fluctúan entre -0.03 y 0.01 , o también se observaron valores semejantes para distintos tipos de vegetación.

Para la evapotranspiración potencial (EP) media anual, y determinada por la fórmula empírica de Thornthwaite (1948, 1951), los valores calculados quedan conteni-

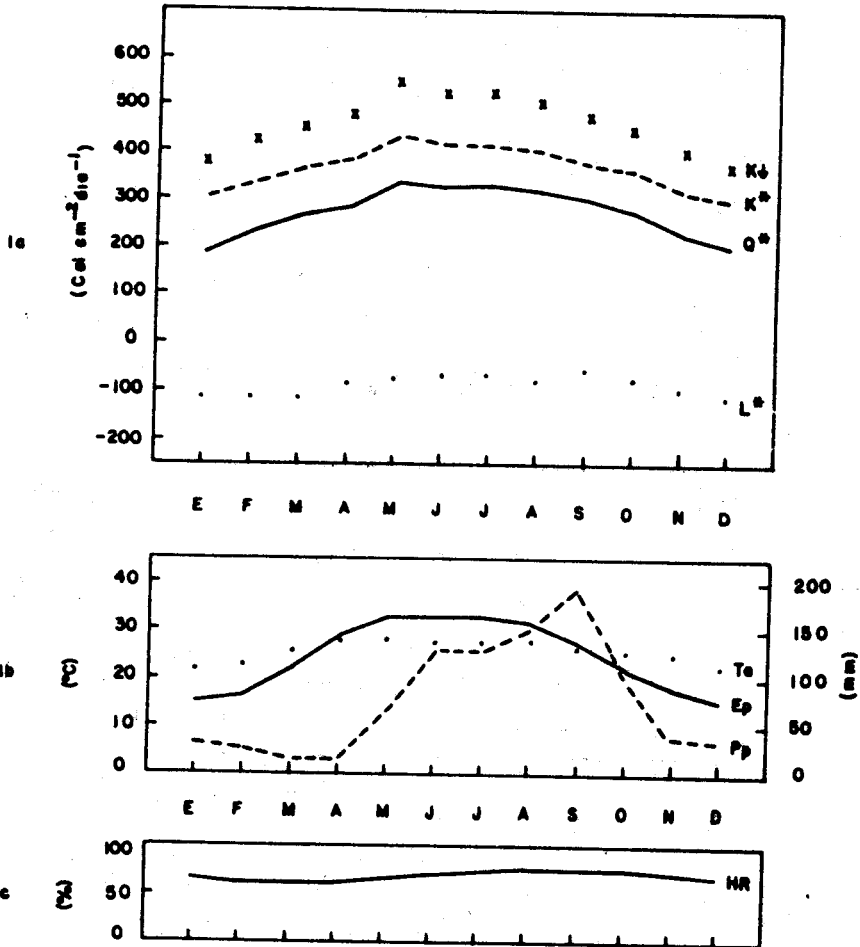
dos dentro de ciertos intervalos para cada tipo de vegetación considerado (excepto Chilpancingo, Gro.); así el máximo valor calculado de 1506.4 mm corresponde al Bosque tropical caducifolio en Mérida, para el Matorral xerófilo los valores varían de

Figs. 1 - 13. Valores mensuales por estación de radiación incidente ($K\downarrow$), neta en onda corta (K^*), neta en onda larga (L^*), y balance total de radiación (Q^*). Valores mensuales observados de temperatura del aire (T_a), precipitación (P_p), humedad relativa (HR) y calculados de evapotranspiración potencial (EP). Valores anuales calculados de productividad de valores observados de temperatura (PT), precipitación (PN) y de evapotranspiración (PER_1 , PER_2), así como valores de evapotranspiración real anual calculada (ER).

MÉRIDA, YUC. Est. I

LAT. 20° 59' N, LONG. 089° 39'
 ALTITUD 9 m snm
 BOSQUE TROPICAL CADUCIFOLIO

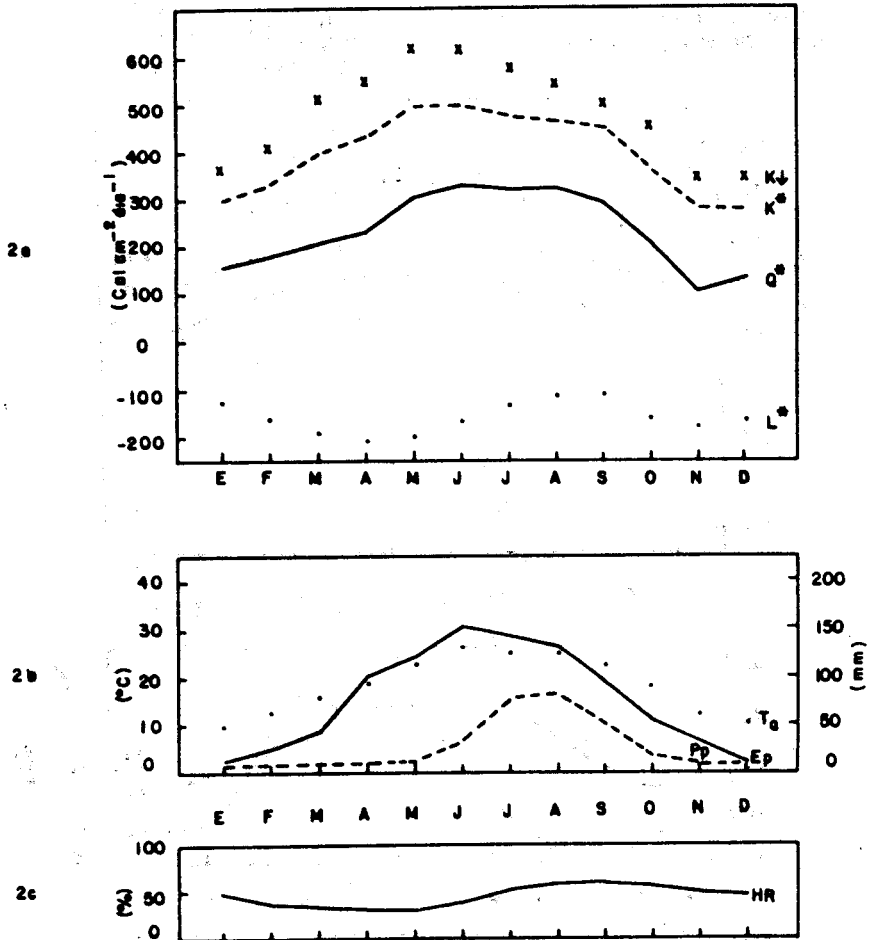
PT = 2553.4 g/m²/año
 PN = 1410.6 " " "
 PER_1 = 1943.6 " " "
 PER_2 = 1790.3 " " "
 ER = 956.6 mm



CHIHUAHUA, CHIH. Est. 2

LAT 28°38'N, LONG 106°05'W
 ALTITUD 1423 m snm
 PASTIZAL

PT = 21245 g/m² año
 PN = 8727 " " "
 PER = 2842 " " "
 PER = 7143 " " "
 ER = 3005 mm

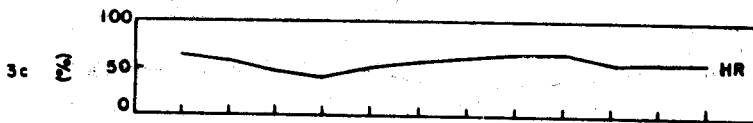
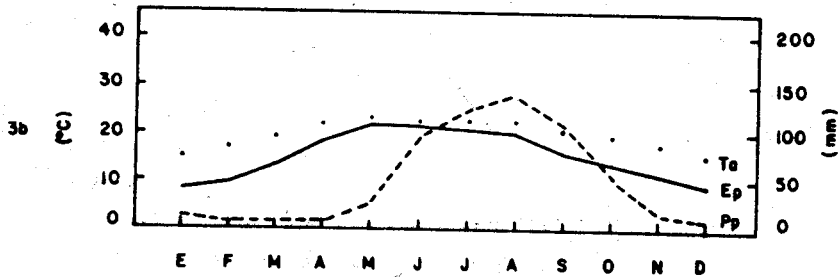
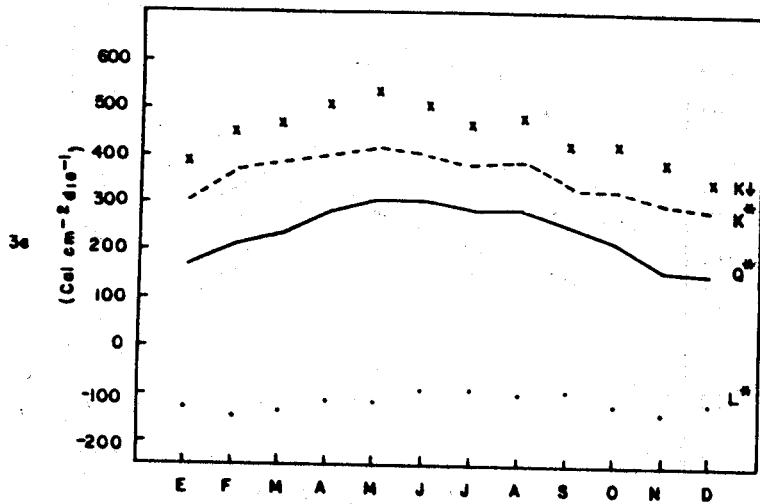


1174 a 1355 mm, y en el caso de los Pastizales el intervalo va de 902 a 942 mm, las cifras más bajas correspondieron a los Bosque de coníferas y *Quercus*.

LEON, GTO. Est. 3

LAT. 21°07'N, LONG. 101°41'W
 ALTITUD 1885 m snm
 PASTIZAL

PT = 2196.4 g/m²/día
 PN = 1005.7 " " "
 PER₁ = 933.2 " " "
 PER₂ = 1318.0 " " "
 ER = 615.0 mm

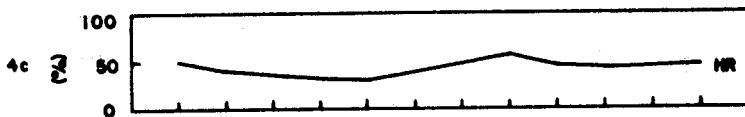
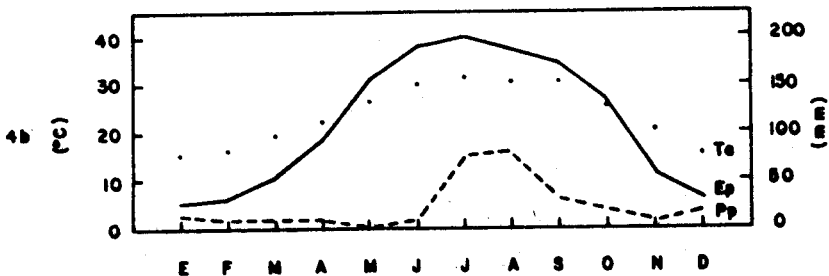
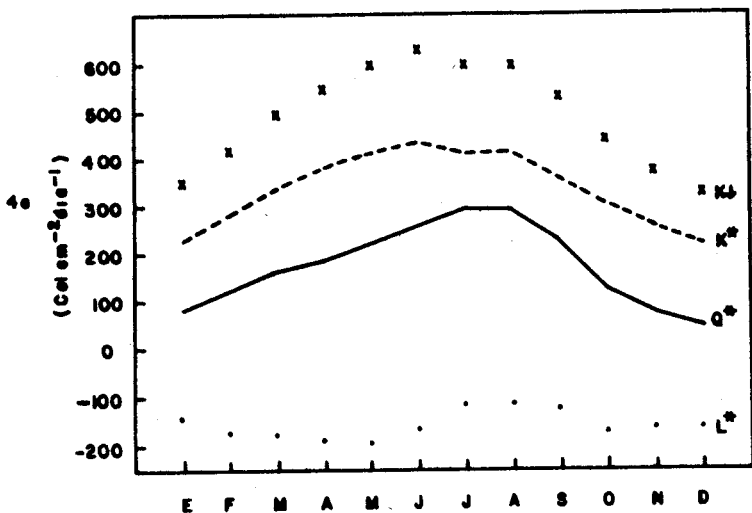


Sin consideraciones de almacenamiento ni escurrimiento, para cada ecosistema considerado, se observa un déficit de agua.

HERMOSILLO, SON. Est. 4

LAT. 29°04', LONG 110°58' W
 ALTITUD 237 m snm
 MATORRAL XEROFILO

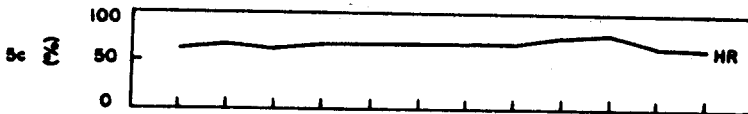
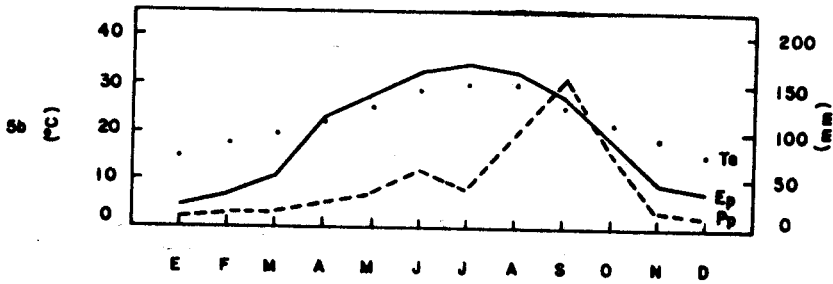
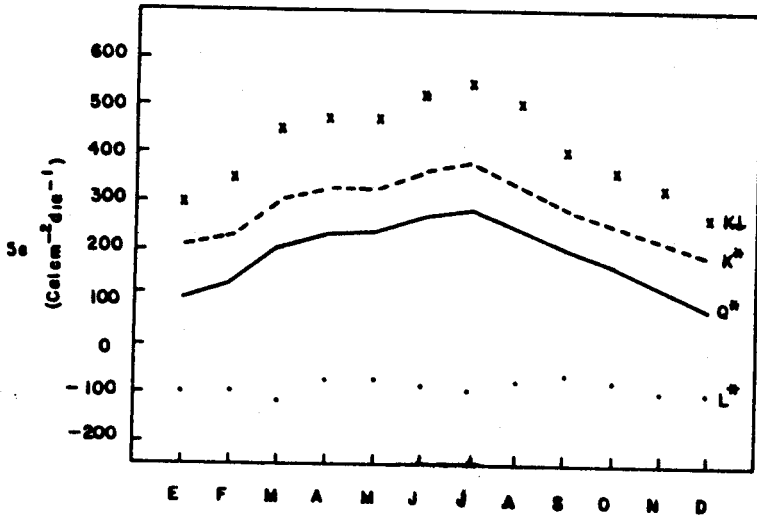
PT = 2486.1 g/m²/Eso
 PN = 453.4 " " "
 PER₁ = 208.5 " " "
 PER₂ = 504.6 " " "
 ER = 2479 mm



MONTERREY, N. L. Est. 5

LAT. 25° 40' N, LONG. 100° 18' W
 ALTITUD 538 m ssm
 MATORRAL XEROFILO

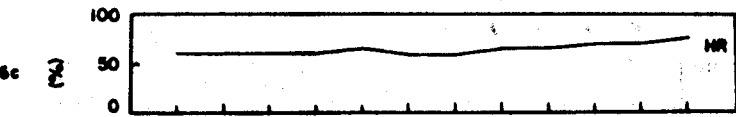
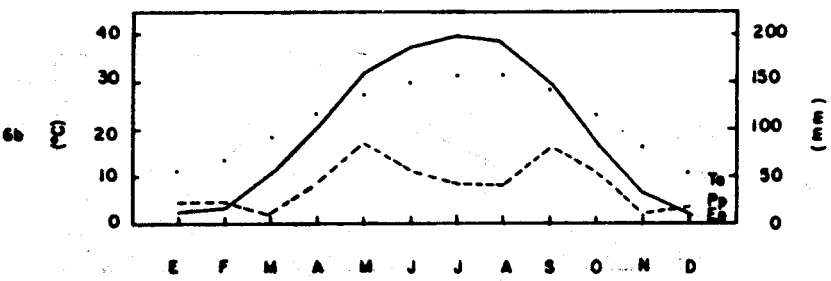
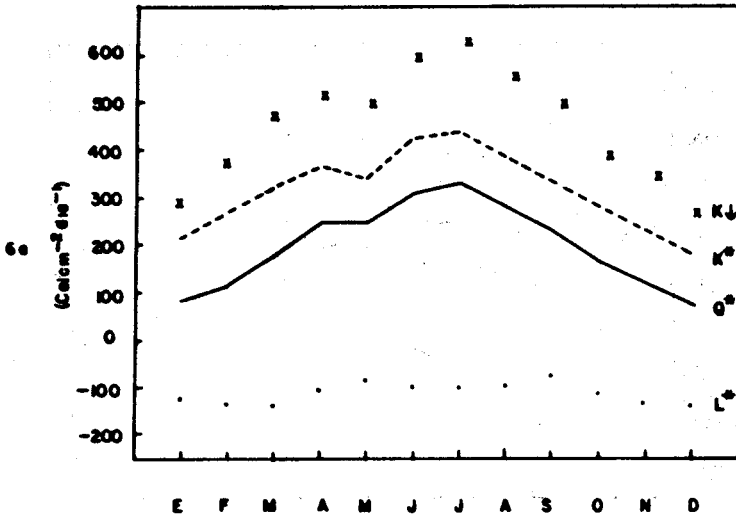
PT = 2365.9 g/m²/eflo
 PN = 969.6 " " "
 PER₁ = 667.0 " " "
 PER₂ = 1270.9 " " "
 ER = 588.3 mm



PIEDRAS NEBRAS, COAH. Est. 6

LAT. 28° 42' N, LONG. 100° 31' W
 ALTITUD 220 m smm
 MATORRAL XEROFILO

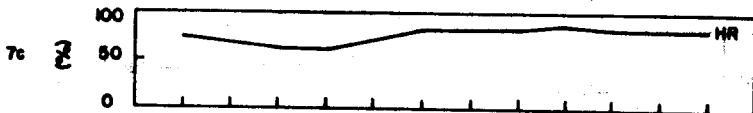
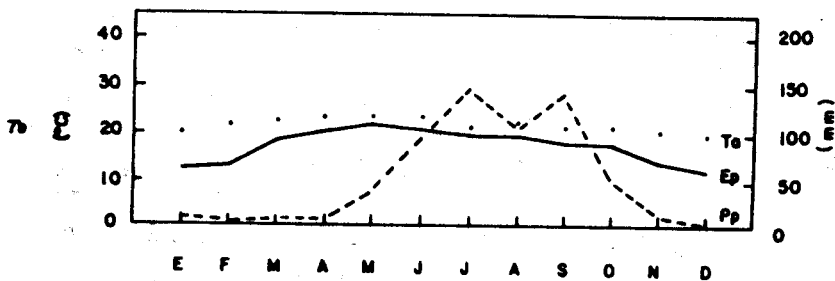
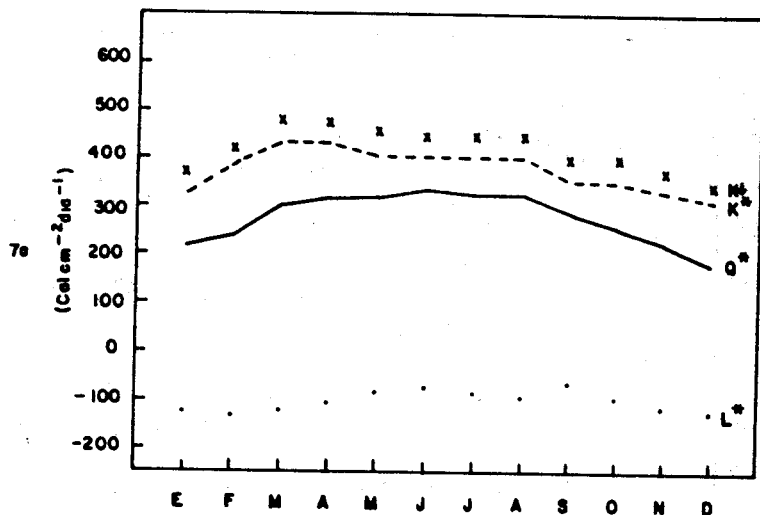
PT = 2365.9 g/m²/año
 PN = 888.0 " " "
 PER₁ = 727.8 " " "
 PER₂ = 149.4 " " "
 ER = 529.5 mm



CHILPANGO DE LOS BRAVOS, GRO. Est. 7

LAT. 17° 33' N, LONG. 099° 30' W
 ALTITUD 1360 m snm
 BOSQUE DE CONIFERAS Y QUERCUS

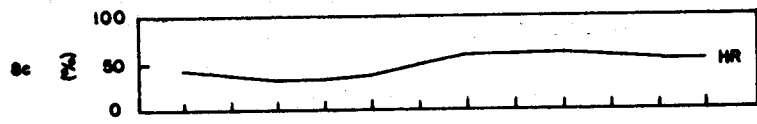
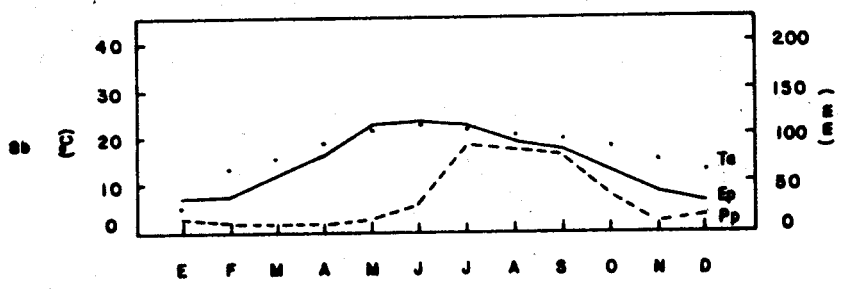
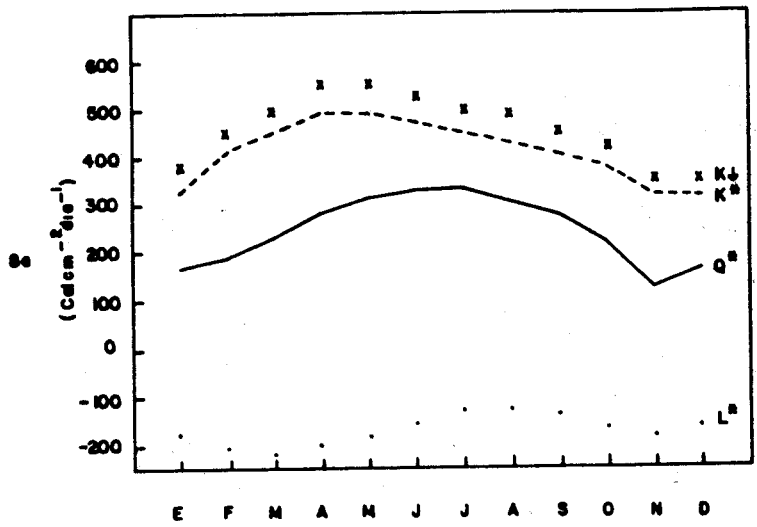
PT = 2370.9 g/m²/año
 PN = 1050.6 " " "
 PER = 1021.8 " " "
 PER₂ = 1370.1 " " "
 ER = 649.3 mm



DURANGO, DGO. Est. 8

LAT. 24°02' N , LONG. 104°40' W
 ALTITUD 1889 m snm
 BOSQUE DE CONIFERAS Y QUERCUS

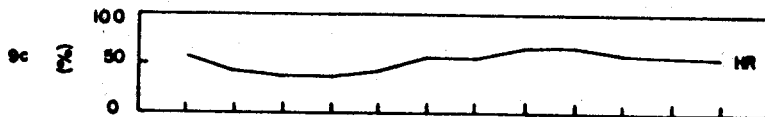
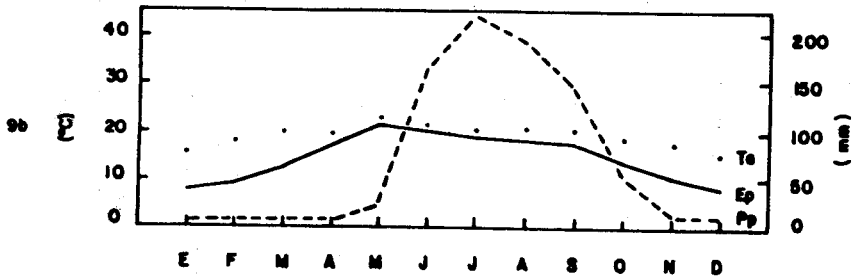
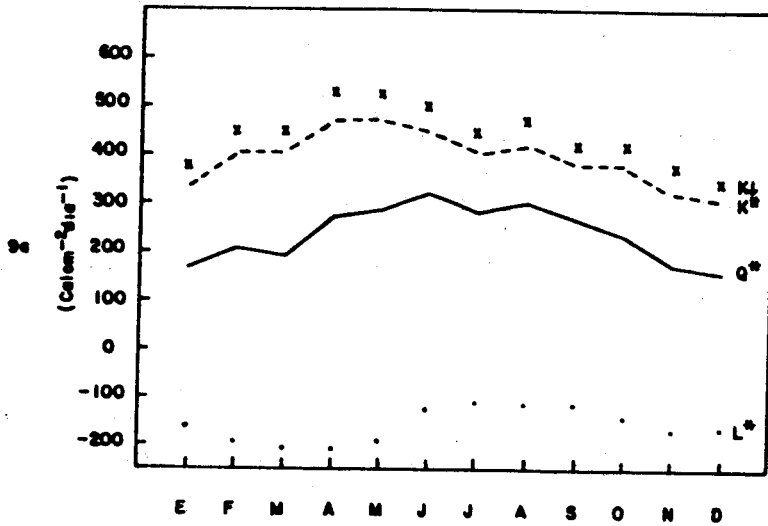
PT = 2048.9 g / m² / día
 PN = 717.3 " " "
 PER₁ = 478.8 " " "
 PER₂ = 947.4 " " "
 ER = 411.5 mm



GUADALAJARA, JAL. Est. 9

LAT. 20° 40' N , LONG. 103° 23' W
 ALTITUD 1589 m snm
 BOSQUE DE CONIFERAS Y QUERCUS

PT = 2196.4	g/m ² /año
PN = 1351.6	" " "
PER ₁ = 1240.9	" " "
PER ₂ = 1493.1	" " "
ER = 730.2	mm

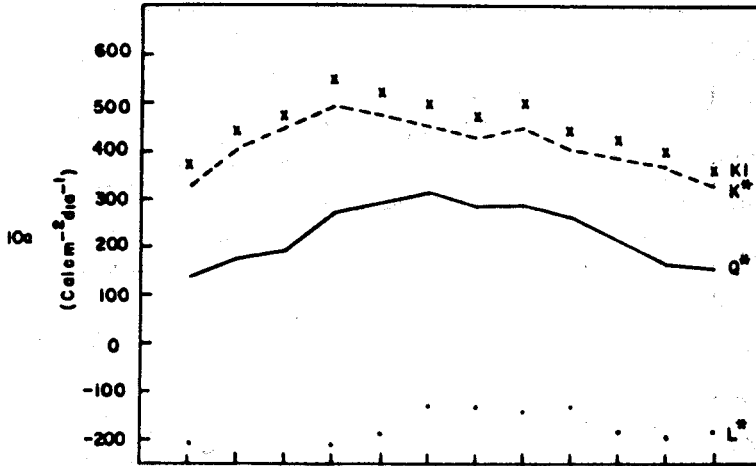


GUANAJATO, GTO. Est. 10

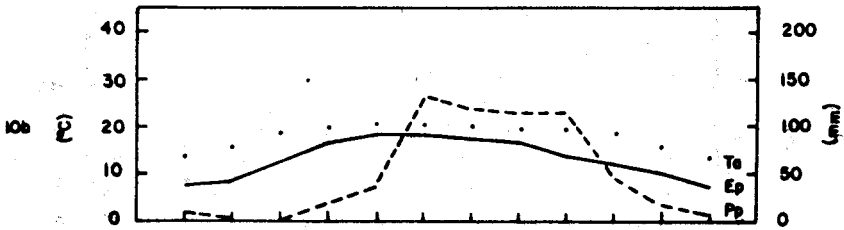
LAT. 21°04' N, LONG. 101°15' W
 ALTITUD 2050 m snm
 BOSQUE DE CONIFERAS Y QUERCUS

PT = 2079.6
 PN = 1027.5
 PER₁ = 974.9
 PER₂ = 1341.6
 ER = 631.4

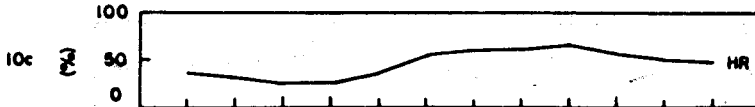
g / m² / día
 " " "
 " " "
 " " "
 mm



E F M A M J J A S O N D



E F M A M J J A S O N D



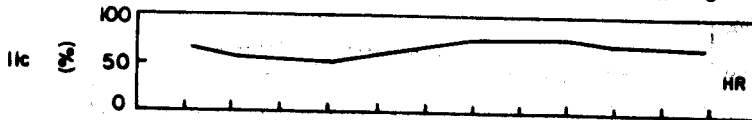
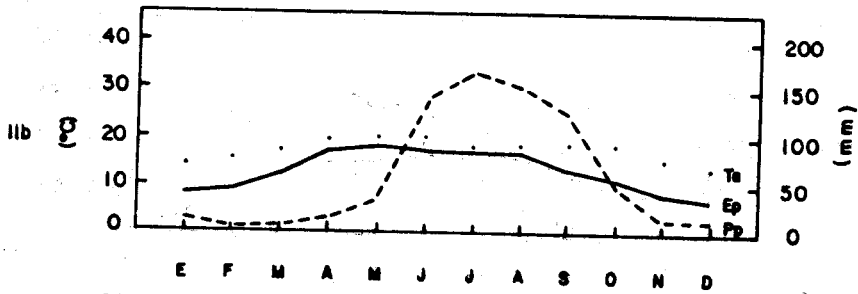
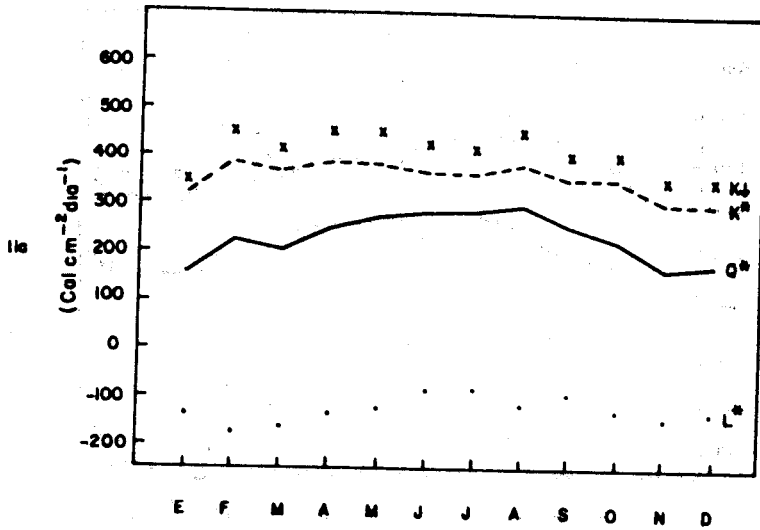
10c

HR

MORELIA, MICH. Est. II

LAT. 19° 42' N, LONG. 101° 11' W
 ALTITUD 1941 m snm
 BOSQUE DE CONIFERAS Y QUERCUS

PT = 2048.9 g/m²/día
 PN = 1207.9 " " "
 PER₁ = 1372.8 " " "
 PER₂ = 1558.5 " " "
 ER = 778.0 mm



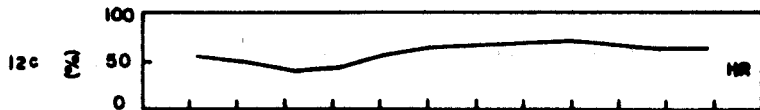
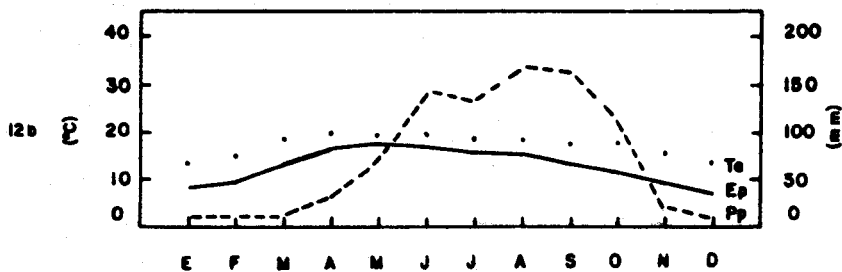
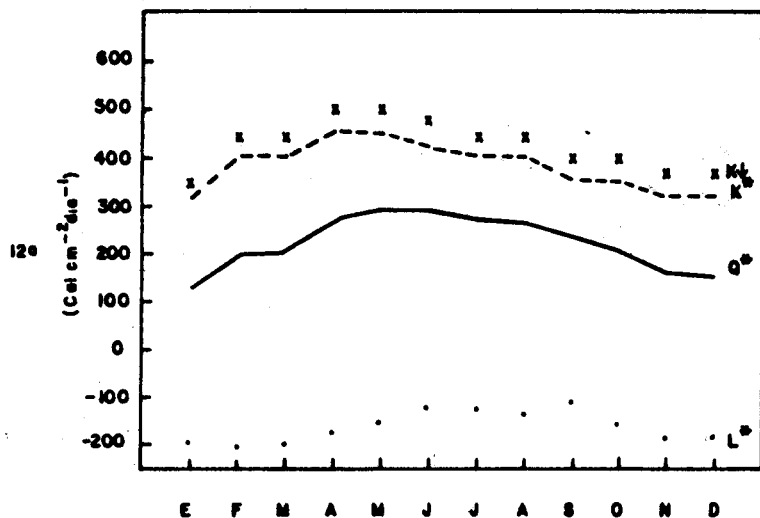
PUEBLA, PUE. Est. 12

LAT. 19°02'N, LONG. 098°12'W

ALTITUD 2182 m snm

BOSQUE DE CONIFERAS Y QUERCUS

PT = 2002.0	g / m ² / año
PN = 1253.1	" " "
PER ₁ = 1393.9	" " "
PER ₂ = 1568.1	" " "
ER = 782.9	mm

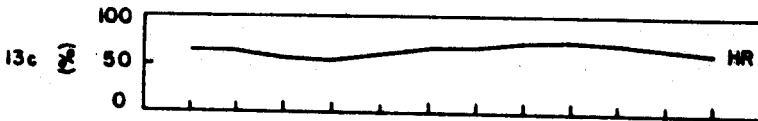
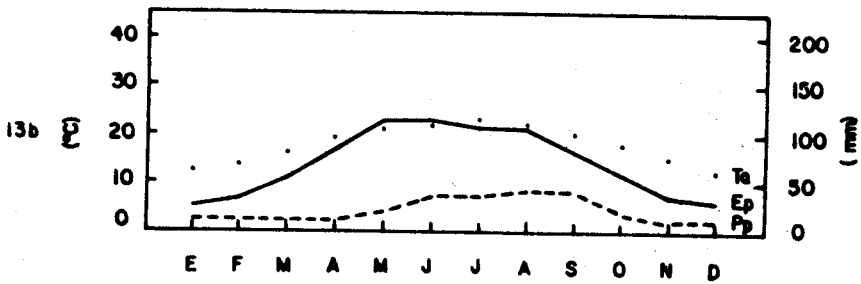
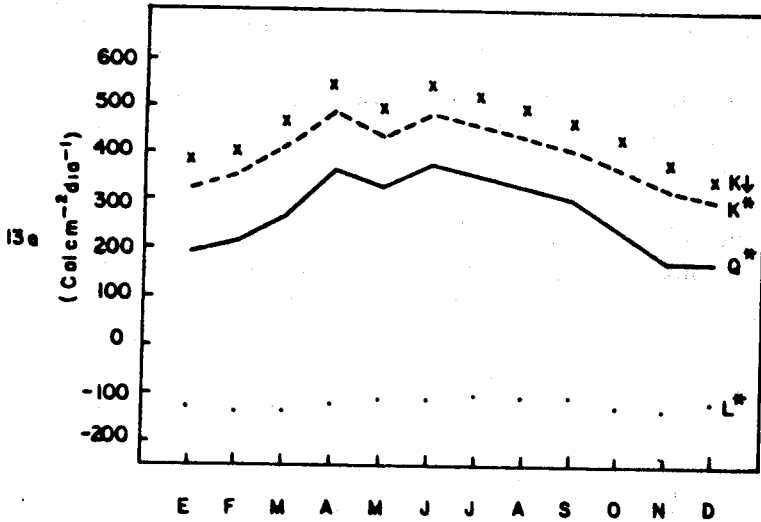


SALTILLO, COAH. Est. 13

LAT. 25° 27' N, LONG. 100° 59' W
 ALTITUD 1609 m snm

BOSQUE DE CONIFERAS Y QUERCUS

PT = 2079.6 g/m²/año
 PN = 491.4 " " "
 PER₁ = 237.1 " " "
 PER₂ = 644.3 " " "
 ER = 288.4 mm



El examen y análisis de los distintos modelos que se proponen para estimar potenciales de productividad con apoyo en las variables climatológicas (temperatura, evapotranspiración y lluvia) aportados por Rosenzweig (PER), Lieth y Box (PER₂) y Lieth (PN y PT), señalan que el empleo de la ecuación que considera a la temperatura media anual en el cálculo de la productividad primaria neta (PPN), reproduce valores muy altos que van de 2 002 a 2 553 gm⁻² año⁻¹ en todos los tipos de vegetación considerados. Los valores tan altos y la ausencia de contrastes invalidan la posibilidad de usar esta variable climática como indicador de la productividad.

Es notorio que para el territorio nacional, esta variable no presenta la misma utilidad que en latitudes más altas, donde las diferencias se asocian a las observaciones de productividad aun empíricamente.

Cuando se aplican los modelos basados en evapotranspiración real y precipitación, los resultados son consistentes dentro de los intervalos observados con los valores potenciales de productividad, para los tipos de vegetación considerados.

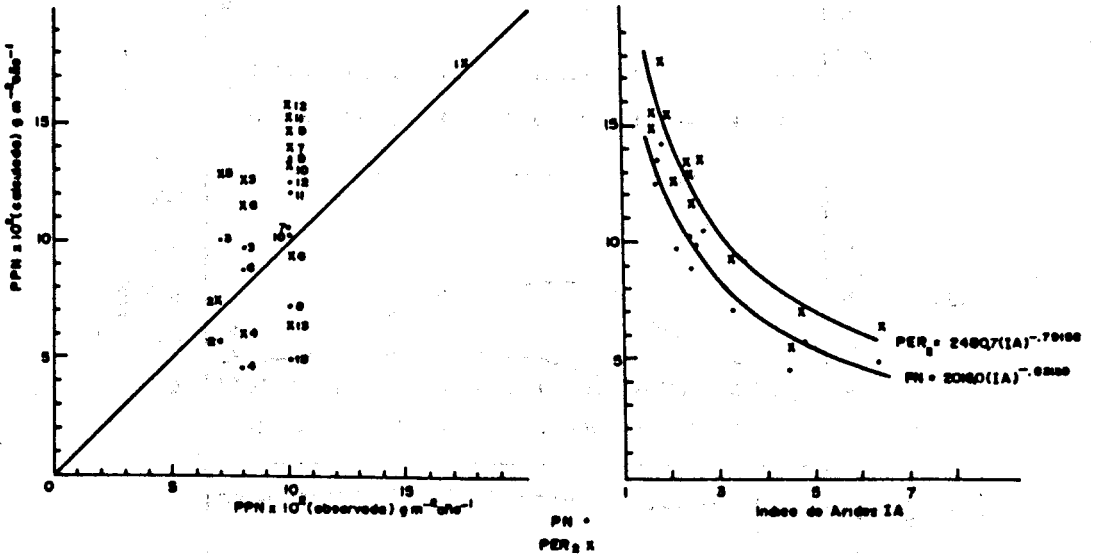


Fig. 14. Valores promedio observados de productividad primaria neta (gm⁻²año⁻¹) y calculados de precipitación (PN(·)) y evapotranspiración (PER₂ (x)) para las diferentes estaciones utilizadas, y curvas de valores de producción calculadas de índices de aridez (IA).

La relación que existe entre la productividad primaria neta (PPN) y los índices de aridez (TA) determinados del cociente de valores energéticos de balance total de radiación y valores de precipitación se obtiene por procedimientos de ajuste por mínimos cuadrados para la evapotranspiración; $PER_2 = 2480.7 IA^{-0.7958}$ y para la precipitación: $PN = 2016.0 IA^{-0.83139}$, coincidiendo con el tipo de curvas calculadas por Budyko (1974) (Fig. 14). Este tipo de curvas presenta un mejor ajuste a los valores de productividad que las mismas relaciones calculadas de la evapotranspiración y la precipitación, por lo que podemos decir que las variaciones en la productividad de la República Mexicana, deducida de las trece estaciones utilizadas, responde a las cantidades de agua y energía disponibles.

Los resultados de este trabajo confirman la posibilidad de uso de los parámetros climatológicos como indicadores de la productividad. Su aplicación facilita una aproximación a esta medida; sin embargo, no debe pasarse por alto el hecho de que su exactitud podría incrementarse con un perfeccionamiento en el registro de la información y con el uso de modelos más completos.

Es posible concluir que los resultados obtenidos prueban la validez del uso de modelos climáticos en la determinación de la PPN, pero que éstos no excluyen otros métodos convencionales sino que, por el contrario, los complementan.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos la colaboración de J. Manuel Muñoz S. de la DGO de la Secretaría de Marina por la ayuda prestada en la elaboración de este trabajo, así como a la Sra. Guadalupe Camacho B., por su colaboración en el mecanografiado del texto.

BIBLIOGRAFIA

- BANNISTER, P., 1979. Introduction to Physiological Plant Ecology. John Wiley and Sons, Great Britain, 273 p.
- BILLINGS, W. P., E. C. CLEBSCH y H. A. MOONEY, 1966. Photosynthesis and Respiration Rates of Rocky Mountain Alpine Plants under Field Conditions. *Am. Midl. Nat.* 75 (1), 34-44.
- BILLINGS, W. D., 1978. Plants and the ecosystem. Wadsworth Publishing Company, U. S. A., 177 p.
- BOTKIN, D. F., 1969. Prediction of net photosynthesis of trees from light intensity and temperature. *Ecology* 50 (5), 854-858.

- BRUNT, D., 1932. Notes on radiation in the atmosphere. *Quart. J. Roy. Met. Soc.* 58, 389-418.
- BUDYKO, M. I., 1974. *Climate and Life*. Academic Press, U. S. A., 508 p.
- CHAVEZ, A., 1980. La radiación térmica atmosférica y la radiación neta en la superficie terrestre. Tesis (Maestría) Fac. Ciencias, UNAM, 66 p.
- Dir. Gral. de Geogr. y Meteor (1941-1960; 1941-1970) Normales Climatológicas. Servicio Meteorológico Mexicano, S. A. G.
- EGLE, K. and W. SCHENK, 1951. The application of the infrared gas analyzer in photosynthesis research. *En: Patterns of Primary Production in the Biosphere*. HFH, Lieth, ed. Benchmark Papers in Ecology 8. U.S.A., 106-120.
- FEDERER, C. A., 1968. Spatial variation of net radiation, albedo and surface temperature of forests. *J. Appl. Met.* (7), 789-795.
- GALINDO, I., y A. CHAVEZ, 1977. Estudio del clima solar en la República Mexicana. Servicio Meteorológico Nacional, México, D. F.
- GATES, D. M., 1960. *Energy Exchange in the Biosphere*. Harper and Row. U.S.A. 151 p.
- GATES, D. M., 1965. Energy, Plants and Ecology. *Ecology*, 46. (1, 2), 1-13.
- GATES, D. M., 1971. The flow of energy in the biosphere *en: Energy and Power*. Scientific American, Inc. U.S.A., 43-52.
- HELMS, J. A., 1965. Diurnal and seasonal patterns of net assimilation in Douglas Fir, *Pseudotsuga Menziessi (MIRB)* Franco, as influenced by environment. *Ecology*, 46, 698-708.
- HERNANDEZ, E. A., 1976. La distribución de la radiación global en México evaluada mediante la fotointerpretación de la nubosidad observada por satélites meteorológicos. Tesis (Maestría) Fac. Ciencias, UNAM, México, 32 p.
- JONES, G., 1979. *Vegetation Productivity*, Longman Inc., U.S.A., 100 p.
- KIRA, T., H. OGAWA, K. YODA y K. OGINO, 1967. Comparative ecological studies on three main types of forest vegetation in Thailand - IV. Dry matter production, with special reference to the Fhao Chong Rain Forest, *en: Patterns of Primary Production in the Biosphere*. H. F. G. Lieth, ed., Benchmark Papers in Ecology, 8. U.S.A., 125-153.
- MARGALEF, R., 1981. *Ecología*. Planeta, España, 2a. ed., 252 p.
- MILLER, P. C., 1970. Sampling to estimate mean leaf temperatures and transpiration rates in vegetation canopies. *Ecology*, 52 (5), 885-889.
- MONTEITH, J. L. and G. SZEICZ, 1961. The radiation balance of bare soil and vegetation. *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, 87, 159-170.
- MONTEITH, J. L., 1965. Light distribution and photosynthesis in field crops. *Ann. Bot.* 29 (113), 17-37.

- ODUM, P. E., 1971. *Ecología* Ed. Interamericana, México, 3a. ed., 639 p.
- ROSENZWEIG, M. L., 1968. Net primary productivity of terrestrial communities: Prediction from climatological data. *Am. Nat.*, 102 (923), 67-74.
- RZEDOWSKI, J., 1978. *Vegetación de México*. Ed. Limusa, México, 432 p.
- SNEVA, F. A., 1982. Relation of precipitation and temperature with yield of herbaceous plants in Eastern Oregon. *Int. J. Biometeor.*, 26 (4), 263-276.
- STANHILL, G., G. J. HOFSTEDE y J. P. KALMA, 1965. Radiation balance of natural and agricultural vegetation, *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, 92, 128-140.
- STANHILL, G., M. ISRAELI y P. ROSENZWEIG, 1973. The solar radiation of scrub forest and pasture on the Carmel Mountain, Israel: A comparative study. *Ecology*, 54 (4), 819-828.
- STRAHLER, A. N. and A. H. STRAHLER, 1978. *Modern Physical Geography*. John Wiley and Sons, U.S.A., 45-64.
- THORNTHWAITE, C.W., 1948. An approach toward a rational classification of climate. *Geogr. Rev.*, 38, 55-94.
- THORNTHWAITE, C. W., 1951. The water balance in tropical climates. *Bull. Am. Meteor. Soc.*, 32 (5), 166-173.
- TORRES RUIZ, E., 1983. *Agrometeorología*, Ed. Diana, México, 150 p.
- VITKEVICH, 1960. *Agricultural Meteorology*. National Science Foundation, Jerusalem, 320 p.
- WIELGOLASKI, F. W., 1975. Productivity of tundra ecosystems. *En: Patterns of Primary Production in the Biosphere*. H.F.H. Lieth, ed., Benchmark Papers in Ecology - 8. U. S. A.
- VOCUM, C. S., L. H. ALLEN y E. R. LEMON, 1964. Photosynthesis under field conditions. VI. Solar radiation balance and photosynthesis efficiency. *Agronomy Journal*, 56 (3), 249-253.