

X
QC915.5
M37

EVALUACION DE UN MODELO AGROFISICO
DE LA EVAPOTRANSPIRACION

Roberto Martínez C.

www.bdigital.ula.ve

Centro Interamericano
de
Desarrollo Integral
de
Aguas y Tierras

Mérida, Julio de 1974

SERBIULA - TULIO FEBRES CORDERO



QC915.5 M37

DEDICATORIA

A Dios Todopoderoso,

A mi esposa,

www.bdigital.ula.ve

A mis padres,

A mis hijos,

A mi Patria.

A G R A D E C I M I E N T O

El autor desea expresar su agradecimiento:

Al Doctor Aldo Norero Sch., inspiración, estímulo y guía de este trabajo; más que profesor, un inolvidable amigo.

Al Honorable Señor Ministro de Economía, Industria y Comercio de Nicaragua, Lic. Juan José Martínez, por la autorización y apoyo oficial concedidos a mi participación en el - Curso de Postgrado en Suelos y Riego.

Al Señor Director del Servicio Geológico Nacional, Capitán e Ingeniero Orlando Rodríguez M., por las valiosas gestiones, sugerencias y consejos brindados en todas las etapas del Curso.

Al Señor Director a.i. del Proyecto de Investigación de Aguas Subterráneas (O. N. U.) en Nicaragua, Dr. Khizr-Ur Rahman Qureshi, por el inapreciable respaldo prestado a mi postulación como candidato al Curso.

A los Señores Directores del Centro Interamericano de Desarrollo Integral de Aguas y Tierras, Doctores Germán Uzcátegui B., y Carlos J. Grassi, por las facilidades docentes, administrativas y personales suministradas durante el Curso.

A la Organización de Estados Americanos, por el soporte económico otorgado para la realización de mis estudios.

A la Universidad de los Andes, por los recursos materiales y humanos facilitados en el transcurso de este trabajo.

A todas las personas e instituciones que en una u otra forma contribuyeron para llevar a feliz término la coronación de mis estudios de Postgrado.

S I N O P S I S

Título : Evaluación de un Modelo Agrofísico de la Evapotranspiración

Autor : Roberto Martínez C.

Grado : Magister Scientiae

Profesor Guía : Dr. Aldo Norero Sch.

Institución y año : Centro Interamericano de Desarrollo - Integral de Aguas y Tierras, 1973

Páginas : 81

Se evalúa un modelo agrofísico para la estimación de la evapotranspiración máxima de los cultivos. El modelo se fundamenta en el balance de energía y procesos de intercambios difusivos de calor y vapor de agua de las cubiertas vegetales, integrando factores meteorológicos y del cultivo. Permite estimar separadamente la evapotranspiración del suelo y de las plantas. Se comparan las predicciones hechas por el modelo con mediciones directas de ET de Lolium perenne L y Phaseolus vulgaris L en lisímetros.

Se demuestra el valor predictivo del modelo incluso a escalas reducidas de tiempo (30 minutos).

A B S T R A C T

An agrophysical model is evaluated in which maximum evapotranspiration from crops is calculated through a combination approach of estimating crop-air resistances and leaf temperatures. Soil evaporation may also be separately determined. Estimations from the model are compared with lysimeter measurements of evapotranspiration of Lolium perenne L and Phaseolus vulgaris L. Predicting value of model is shown even for short-term periods (30 minutes).

I N D I C E

	Página
I.- <u>INTRODUCCION</u>	
A.- <u>EL PROBLEMA Y SU IMPORTANCIA</u>	1
B.- <u>OBJETIVO</u>	2
II.- <u>REVISION BIBLIOGRAFICA</u>	3
III.- <u>HIPOTESIS</u>	9
IV.- <u>PROCEDIMIENTO</u>	11
A.- <u>DETALLES EXPERIMENTALES</u>	12
1. <u>Experimento A</u>	12
2. <u>Experimento B</u>	12
B. <u>SELECCION DE DATOS</u>	13
1. <u>Metereológicos</u>	13
2. <u>Cultivo</u>	13
C. <u>PROCESAMIENTO DE LOS DATOS</u>	20
V.- <u>RESULTADOS Y DISCUSION</u>	23
A. <u>RESISTENCIAS AERODINAMICAS</u>	23
B. <u>COMPLEJO FITOMETEOROLOGICO</u>	26
C. <u>EVAPOTRANSPIRACION</u>	34
1. <u>Experimento B</u>	35
2. <u>Experimento A</u>	40
VI.- <u>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</u>	43
A. <u>CONCLUSIONES</u>	43
B. <u>RECOMENDACIONES</u>	43
VII.- <u>RESUMEN</u>	45
<u>LITERATURA CITADA</u>	47
<u>APENDICE</u>	53

1.- INTRODUCCION

A.- EL PROBLEMA Y SU IMPORTANCIA

El desarrollo del riego, en gran parte de los países de Latinoamérica, se ha iniciado en forma súbita y acelerada en -- los últimos diez años. De acuerdo con las tendencias actuales, se pronostica un aumento considerable en las áreas que serán -- puestas bajo riego en las próximas décadas.. Debido a la reciente introducción de esta técnica, la experiencia y la información básica en el regadío es relativamente escasa en nuestro medio. Esta situación plantea crecientes problemas en el aprovechamiento de los recursos hidráulicos. La progresiva demanda de proyectos de riego ha obligado a tomar decisiones urgentes, muchas veces improvisadas. Para afrontar este inconveniente, se recurre con frecuencia a la extrapolación de datos o métodos. Bajo estas limitaciones, el riesgo de cometer errores de diseño depende en alto grado de la mayor o menor adaptabilidad del método a las condiciones en que se aplica. Tal es el caso, por ejemplo, de la estimación de las necesidades de agua de los cultivos.

Los métodos rutinarios para el cálculo de la evapotranspiración(ET) se basan en fórmulas empíricas, desarrolladas en determinadas condiciones ambientales. Por lo general, el empleo de estos métodos en áreas fuera de su lugar de origen, requiere una estrecha analogía ecológica para el buen funcionamiento. La adopción de estas fórmulas en medios distintos, normalmente implica calibrarlas experimentalmente antes de ser usadas, lo cual puede necesitar un largo plazo. Esto es particularmente cierto en las zonas tropicales. Además, la mayor parte de las fórmulas actualmente en boga, pronostican el consumo de agua para intervalos amplios de tiempo. Tales escalas, aunque apropiadas para los fines de planificación de proyectos de -

regadío, no se adaptan generalmente a las estrechas frecuencias exigidas en la operación del riego a nivel de parcela. De ahí la necesidad de ensayar métodos estimativos de la evapotranspiración (ET) que podrían ser más versátiles y confiables, tanto a nivel de planificación como de operación y a escala de distrito o de unidad de riego.

En el presente trabajo se evalúa un modelo agrofísico de la evapotranspiración, el cual está supuesto a proporcionar una estimación segura y puramente teórica de este proceso, en base a la integración de las variables fitometeorológicas involucradas en la transferencia de vapor de agua desde una cubierta vegetal hacia la atmósfera.

B.- OBJETIVO

El propósito de este estudio es la verificación experimental de un modelo agrofísico propuesto por Norero para el cálculo de la evapotranspiración de los cultivos.

II. REVISION BIBLIOGRAFICA

El interés por elaborar fórmulas para estimar la ET no es de origen reciente. El actual estado de conocimiento sobre los fundamentos físicos de este proceso, es el resultado de una larga secuencia de etapas y esfuerzos para interpretar y cuantificar el flujo de vapor de agua hacia la atmósfera.

Se han desarrollado muchas fórmulas empíricas que relacionan los datos climáticos con la ET (ASCE, 1966; ASAE, 1966). En las etapas iniciales, estas fórmulas se basaron en la correlación entre los factores meteorológicos y la ET. Según el principio de Dalton (1798), la evaporación está en función de la diferencia de presión de vapor en el aire y de la velocidad del viento, por encima de la superficie. La expresión de este principio ha sido y es el fundamento de todas las fórmulas de transferencia de vapor.

Por ejemplo, una de las primeras fórmulas para estimar la evaporación, publicada por Meyer (1915), se basó en el déficit de presión de vapor y la velocidad del viento. Otras fórmulas recientes introducen modificaciones más o menos complejas de la ecuación de Dalton, según se verá más adelante. Según Abbe (1905), el efecto de la luz solar y el calor como estimulantes de la transpiración, ya había sido estudiado en Inglaterra hacia 1961. Sin embargo, antes del principio del siglo XX no se habían empleado los términos "uso consuntivo" y "evapotranspiración". Cummings y Richardson (1927), consideraron que la evaporación era básicamente una función de la radiación solar. Ellos formularon la primera ecuación basada en el balance de energía. La fórmula de Rohwer (1931), incluye la presión barométrica, además de la velocidad del viento y el déficit de presión de vapor.

Más adelante, aumenta el interés por incorporar el cultivo mismo como un factor de variabilidad en la ET. A tal efecto, se adicionan coeficientes empíricos. Por ejemplo, Blaney y Morin (1942), publicaron una fórmula que incluye un factor k de cultivo, además de la temperatura, horas-luz y humedad relativa. Posteriormente, Blaney y Criddle (1948) modificaron esta fórmula, omitiendo el factor humedad. Thornthwaite (1948), propuso un método basado sólo en la temperatura y la latitud. Sus resultados son aceptables en zonas húmedas con abundante vegetación. No proporciona predicción útil en zonas áridas o semiáridas. García y López (1970), presentaron una fórmula para estimar la ET en condiciones tropicales, basada en datos de temperatura y humedad relativa.

Hargreaves (1956), estima la evaporación en tanque, con base en un estudio de relaciones de temperatura y humedad. Pruitt (1960), presentó la ET de Lolium perenne en un lisímetro, comparada con la evaporación en tanque, con un atmómetro, y con la diferencia de evaporación entre atmómetros negros y blancos. Jensen y Haise (1963), analizaron datos relativos a cultivos anuales, a fin de establecer un procedimiento para estimar la ET, usando la radiación solar y otros datos climáticos. Grassi (1964), aplica un coeficiente por cultivo.

A pesar del innegable mérito de las fórmulas empíricas en cuanto a la sencillez de su aplicación, presentan el inconveniente de poder emplearse solamente en determinadas regiones, vegetación, período de desarrollo del cultivo y temporada. Aún dejan pendiente, entonces, el ineludible obstáculo de las previas y prolongadas calibraciones experimentales para adaptarlas a situaciones diversas. Por otra parte, el éxito de su precisión está limitado, en muchos casos, a determinadas escalas de tiempo y espacio, inaplicables a reducidos niveles de operación. Tal situación ha concentrado el interés de los investigadores en una com-

presión más profunda del proceso evapotranspiratorio, desde un punto de vista físico y meteorológico.

Con el método de Penman (1948), se inicia esta nueva actitud hacia la consecución de fórmulas para predecir el consumo de agua para las plantas. Este autor demostró claramente a través de las correlaciones más precisas logradas entonces y para períodos tan breves como un día- que las necesidades de agua de las plantas son una función primordial de las demandas evaporativas de la atmósfera. Su fórmula integró el mayor número de variables climáticas alcanzado en esa época. Penman introdujo el concepto de evapotranspiración "potencial", asumiendo que la evaporación de un cultivo verde, bajo y con abundante provisión de agua, se asemeja y no puede exceder la evaporación de una superficie de agua libre. La fórmula de Penman se basó en una combinación del balance de energía y del proceso de difusión turbulenta de vapor de agua. Para este último, adoptó una expresión empírica basada en la velocidad del viento. Sin embargo, debido a las suposiciones bajo las que desarrolló su fórmula, ésta presenta la limitación de no considerar los aportes de energía adicionados por las masas de aire. Esto significa la exclusión de las características de la cubierta vegetal, las cuales juegan también un papel importante en la adición de energía de advección. Milthorpe (1960), añadió a la fórmula de Penman el factor cultivo. Su método más que predictivo pretende explicar el fenómeno. Autores posteriores han continuado haciendo uso de estos dos fenómenos básicos (balance de energía y difusión tuturbulenta) de forma cada vez más perfeccionada y tratando de incorporar las características de la cubierta vegetal.

Los métodos basados en el balance de energía (Tanner, C.B. 1960a; Vallejos, J. y Norero, A., 1972) se fundamentan en el principio de que la evaporación es un cambio de estado que demanda una cantidad de energía como calor latente de vaporización. Por

lo tanto, el problema en el cálculo del balance energético es medir todos los procesos que generan y consumen energía, dejando solamente como incógnita la evaporación.

Los métodos aerodinámicos (Deacon, E.L. y Swinbank, W. C., 1958; Sheppard, P.A., 1958) estiman la velocidad de difusión del vapor de agua, en particular la causada por el viento. Requieren por lo general un registro de la velocidad del viento a dos o más alturas, o de que se incluya un parámetro con los registros de la velocidad del viento a una altura determinada. La eficacia de estos métodos depende de expresar adecuadamente la transferencia de momentos como una función del cambio de la velocidad del viento con la altura y de un conocimiento de las relaciones entre los mecanismos de transferencia de torbellino para los momentos y para el vapor de agua (Pruitt, W.O. y Lawrence, J.F., 1963).

Más numerosos son los métodos que combinan los fundamentos del balance de energía y del proceso turbulento de intercambio de energía y materia. Penman, ya mencionado, fué el precursor de esta corriente. Importantes contribuciones posteriores se deben a Ferguson (1952), Slatyer y Mc Ilroy (1961) y Tanner (1960b). El éxito de la estimación del balance de energía depende de las mediciones de la temperatura de la superficie evaporante. Tanto la presión de vapor como la temperatura en la superficie del agua libre se pueden determinar con una aproximación razonable, midiendo la temperatura inmediatamente debajo de la superficie. Sin embargo, es difícil obtener estos datos en la superficie evaporante de un cultivo, según Brown y Rosenberg (1973).

El método aerodinámico, el de balance de energía y los métodos combinados, han sido evaluados por varios autores. Se han hallado buenas correlaciones entre la ET calculada y las -

medidas directas lisimétricas y con la radiación neta para pastos, cultivos forrajeros, suelo, heno cortado y expuesto al sol, y otras superficies similares (House et al., 1960; Tanner, 1960a; Pruitt y Lourence, 1963).

Es preciso, sin embargo, reconocer que ninguno de los diferentes métodos descritos para calcular la ET puede tener una completa preferencia. Ellos difieren en precisión a corto o largo plazo, en conveniencia, costo y disponibilidad de datos e instrumentos. En consecuencia, la selección del método depende de su aplicación. Por ejemplo, las estimaciones de ET que se usan para planes regionales de riego y desarrollo de recursos hidráulicos, usualmente sólo requieren datos de ET anual, o mensual como máximo. Por lo general, se permite un error del 15 al 20% y las fórmulas empíricas pueden usarse, siempre que estén debidamente calibradas. Estimaciones de ET en períodos más cortos -3 a 10 días- y con menor error, son necesarias para obtener datos de operación de riego, tales como frecuencia de aplicación, lámina de agua a aplicar etc., sobre todo a nivel de parcela y particularmente en suelos arenosos con baja capacidad de retención de humedad y en regiones húmedas donde las lluvias y el tiempo son muy variables. Suelos de textura fina, con alta capacidad de retención, en regiones semiáridas de clima más o menos constante, admiten estimaciones de ET para períodos de dos semanas y aún más. En el otro extremo, los métodos micro-meteorológicos para estimar la transferencia de vapor de agua en el sistema suelo-planta-atmósfera, pueden permitir períodos tan cortos como pocos minutos a tan largos como 1 ó 2 días, con errores máximos de 5%.

En la última década han surgido algunos modelos, a los que podría denominarse "agrofísicos", porque tratan de incorporar el mayor número de variables físicas integrantes del sistema suelo-planta-atmósfera. Como ejemplo de tales modelos están

los de Cowan (1965); Monteith (1965); Brown y Rosenberg (1973).

La diferencia fundamental entre las fórmulas empíricas y los modelos micrometeorológicos y agrofísicos radica en que las primeras se basan en una mera correlación entre el fenómeno y ciertas variables climáticas, y a veces también el suelo y el cultivo; en cambio, los modelos están basados en un análisis fundamentado de las causas del proceso de la ET. Por consiguiente, cabe esperar de los modelos una mayor versatilidad y aplicación general. Además, éstos ponen mayor énfasis en factores del cultivo, como expresión del concepto de que la ET máxima (no potencial) obedece a la interacción de elementos climáticos y de la cubierta vegetal, y no sólo a la influencia de factores meteorológicos. La mejor fundamentación de las fórmulas teóricas ofrece la posibilidad de incorporar los cambios inherentes al cultivo, durante su ciclo de desarrollo, y de proporcionar predicciones para períodos más cortos, sin el largo proceso para ajustar experimentalmente los parámetros de las fórmulas. Uno de los modelos más recientes, el de Norero (1973), está dirigido a proporcionar una estimación totalmente teórica de la evapotranspiración máxima. La base teórica de este modelo agrofísico consiste en tratar el fenómeno de la ET como resultado de procesos de flujo de materia (vapor de agua) y de energía (calor) directamente desde las superficies vegetales y el aire que las rodea. De este modo, el fenómeno presenta dos aspectos: uno aerodinámico y otro de balance de energía. Como el presente estudio consiste en la verificación de este modelo, se detallan en el Apéndice, Anexo 1, los fundamentos teóricos que le han servido de base.

III. HIPOTESIS

La formulación agrofísica que se evalúa en esta Tesis, lleva implícitas las siguientes hipótesis:

- a) Cuando existe abundante provisión de agua en el suelo, - las pérdidas de agua del cultivo dependen sólo de los - factores que determinan el flujo de agua al estado de va por y no al estado líquido.
- b) En este tipo de flujo influyen sólo factores del clima y la vegetación, es decir, es básicamente independiente de las características hídricas del suelo.
- c) En estas condiciones, el cultivo alcanza su máxima inten sidad de transpiración, y los principales factores que - la determinan son:
 - 1.- Los elementos climáticos y de la vegetación involu- crados en el balance de energía de la cobertura ve- getal y cuya interacción se traduce en una determi- nada temperatura foliar. Esta va implícita en la - fórmula, en el valor de q_s , la humedad específica a saturación en las hojas.
 - 2.- Los elementos climáticos y de la vegetación que fa- cilitan el movimiento de vapor desde el interior de las hojas, a través del follaje, hacia el aire exte rior. Estos factores están implícitos en la resis tencia global de la cubierta vegetal al flujo de va por.

3.- Los elementos climáticos y de la vegetación que gobiernan la magnitud del déficit hídrico entre las hojas y el aire, $q_s - q_a$.

También van implícitas las siguientes consideraciones:

- a) La evaporación máxima y la evaporación de una superficie de agua libre son fundamentalmente idénticas como fenómenos físicos y, por eso, cabe esperar una correlación estrecha, o una proporcionalidad entre ambas. No obstante, debido a la distinta naturaleza de la superficie evaporante, el balance de radiación y las condiciones aerodinámicas involucradas en el intercambio de calor y flujo de vapor no permiten establecer una proporcionalidad constante, ni mucho menos una identidad cuantitativa permanente entre las pérdidas de agua de un evaporímetro, por ejemplo, y las de un cultivo, a pesar de estar bien provisto de agua.
- b) La transpiración máxima no corresponde necesariamente al concepto de transpiración potencial y, a diferencia de ésta, puede exceder la intensidad de evaporación de una superficie de agua libre, según las propiedades del cultivo y las condiciones de advección de energía.

IV. PROCEDIMIENTO

La evaluación del modelo está basada en la comparación entre los resultados experimentales obtenidos por otros autores y las estimaciones de ET obtenidas por la aplicación de las siguientes fórmulas:

$$(1) \quad ET_{mx} = T_{mx} + ES_{mx}$$

$$(2) \quad T_{mx} = \rho \left\{ \frac{\ln \left[\frac{r_{E(o)}}{r_{E(H)}} \right]}{r_{E(o)} - r_{E(H)}} \right\} (q_s - q_a) F$$

$$(3) \quad ES_{mx} = \rho \left[\frac{q_o - q_a}{r_{E(o)}} \right]$$

En las cuales:

ET_{mx} = evapotranspiración máxima del terreno cultivado

T_{mx} = Transpiración máxima del cultivo

ES_{mx} = Evaporación máxima del suelo

ρ = Densidad del aire (1.19×10^{-3} gr/cm³)

$r_{E(o)}, r_{E(H)}$ = Resistencia total al flujo de vapor de agua desde el interior de las hojas hasta el aire a una altura de referencia (2 m) sobre el cultivo, a partir de las hojas inferiores (o) y superiores (H), respectivamente.

q_s, q_o = Humedad específica promedio de las hojas de la cubierta vegetal y de las hojas inferiores, respectivamente.

q_a = Humedad específica del aire a la altura de referencia (2 m)

F = Índice de área foliar

Con el objeto de simplificar los símbolos se han suprimido los sufijos mx, pero siempre se mantiene implícita la condición de máxima evaporación.

Se utilizaron los datos publicados por Pruitt, W.O. y Lourence, F.J. (1963) y los datos suministrados por Black, T.A. (1970). Estos datos corresponden a su vez a sendas evaluaciones de otras fórmulas, practicadas por los mencionados autores. De aquí en adelante, estos dos trabajos serán denominados "experimento A" y "experimento B", respectivamente.

A. DETALLES EXPERIMENTALES

1.- Experimento A

Las mediciones de ET para Lolium perenne, L ("ballica"), se efectuaron por medio de un lisímetro muy sensible de 6.lm de diámetro, en Davis, California. El pasto fue segado frecuentemente a una altura no menor de 10 cm. Se regaba inmediatamente después que se agotaban aproximadamente 7.6 cm. de un total de casi 15 cm. de agua disponible en los 90 cm del perfil del suelo. Esto eliminó cualquier descenso de la ET máxima ocasionado por bajas condiciones de humedad del suelo. Los datos de radiación neta fueron obtenidos con un radiómetro de ventilación forzada, instalado a 2 m sobre el pasto, llevándose un registro continuo sobre una banda marcadora. Los instrumentos usados para determinar la temperatura, humedad absoluta y viento fueron descritos en un trabajo previo de Brooks et al. (1963). Los valores tabulados corresponden a los promedios de estas mediciones en períodos de media hora.

2.- Experimento B

Este experimento se llevó a cabo en la finca experimental Hancock de la Universidad de Wisconsin, del 21 de junio al 14 de septiembre de 1968. Se sembraron frijoles (Phaseolus vulgaris, L) de la variedad "Bush Blue Lake" el 15 de junio. El in-

dice de área foliar del plantío y la altura y espaciamento entre surcos fueron 1.27, 30 cm y 30 cm, respectivamente, el 25 de Julio, y 1.75, 45 cm y 45 cm el 8 de agosto. La ET se midió con un lisímetro rectangular. La radiación neta fue medida a la vez con un radiómetro Funk grande y con un radiómetro ventilado tipo Suomy. Las mediciones de temperatura se hicieron con un termómetro integrado de seis elementos. Las temperaturas de termómetro húmedo y seco se midieron a un metro sobre el cultivo, con un psicrómetro ventilado. La velocidad del viento a un metro sobre el cultivo se midió con un anemómetro de tres tazas y se registró con un contador impresor cada media hora. La resistencia estomatal de ambas caras de las hojas fue medida in situ con un porómetro de difusión (Kanemasu et al. 1969) y el potencial de agua de la hoja se midió con un psicrómetro de termopares.

B. SELECCION DE DATOS

Los datos esenciales para la aplicación de las fórmulas 1,2 y 3 son:

Meteorológicos: velocidad del viento a 2m de altura (U_2)
radiación neta (RN)
humedad específica del aire (q_a)
temperatura del aire (t_a)

Cultivo: índice de área foliar (F)
altura del cultivo (H)
anchura promedio de las hojas (L)
resistencia estomatal (r_e)
coeficiente de extinción de radiación global (K)
coeficiente de extinción del viento (λ)

A continuación se hacen algunas aclaraciones con respecto a los datos, en ambos experimentos.

1. Experimento A

Para garantizar que las estimaciones de ET máxima correspondieran a los valores mínimos de resistencia estomatal, se adoptó un valor límite inferior de $450 \text{ cal cm}^{-2}/\text{día}$ para los datos de radiación neta, lo cual implicaba una intensidad luminosa suficiente para mantener abiertos los estomas. De esta manera, los datos utilizados abarcan solamente las mediciones semihorarias comprendidas dentro del umbral establecido, lo cual arrojó un total de 81 períodos, distribuidos en los días 30 y 31 de julio, 31 de agosto y 30 de octubre de 1962, y 12 de marzo, 6 de junio, 14 y 15 de agosto de 1963. Los datos meteorológicos utilizados aparecen en el Cuadro 1. Corresponden a mediciones hechas a 2m sobre el suelo, excepto la radiación neta, medida a 2m sobre el cultivo. Pruitt y Lourence no informan sobre los valores del índice de área foliar, de la anchura de las hojas, del coeficiente de extinción de radiación, de la resistencia estomatal ni del coeficiente de extinción del viento. Los valores adoptados para estas características del cultivo fueron entonces deducidos o supuestos en base a datos de otros autores:

- a) índice de área foliar: 2.8, 3.1, 3.2, y 3.3 (Loomis y Williams, 1969)
- b) altura del cultivo : 20 cm (Pruitt y Lourence informan que el pasto se mantuvo segado entre 18 y 21 cm)
- c) anchura foliar : 1 cm
- d) resistencia estomatal: $2(10)^{-2}$ min/cm, valor mínimo promedio obtenido en determinaciones experimentales (Norero, 1973b)
- e) coeficiente de extinción de radiación : 0.36, promedio de datos de Monteith J.L., (1969) y deducidos de la fórmula (24), según Chartier, P. (1967)

Cuadro 1.- Datos Fitometeorológicos

Experimento A

(1)U2	(2)qa	(3)ta	(4)Rn	(5)ETM	(6) L	(7) H	(8) F
8.400	5.717	23.440	0.964	9.424	1.000	20.000	3.300
8.260	5.825	24.130	0.979	9.682	1.000	20.000	3.300
7.140	5.833	24.600	1.025	10.124	1.000	20.000	3.300
6.560	5.942	25.070	1.017	10.493	1.000	20.000	3.300
5.940	6.042	25.560	0.957	10.689	1.000	20.000	3.300
5.870	5.967	25.770	0.954	10.382	1.000	20.000	3.300
5.290	5.833	26.230	0.880	10.124	1.000	20.000	3.300
4.950	6.042	26.590	0.830	9.498	1.000	20.000	3.300
4.300	6.258	26.660	0.715	8.674	1.000	20.000	3.300
3.940	5.933	26.600	0.664	7.925	1.000	20.000	3.300
2.900	6.100	26.810	0.525	6.733	1.000	20.000	3.300
2.230	8.808	22.240	0.497	4.657	1.000	20.000	2.800
2.480	8.808	24.050	0.577	5.541	1.000	20.000	2.800
2.220	8.650	25.750	0.670	6.401	1.000	20.000	2.800
2.540	8.517	26.850	0.759	7.519	1.000	20.000	2.800
3.120	8.375	27.840	0.828	8.404	1.000	20.000	2.800
2.940	8.242	28.540	0.894	9.117	1.000	20.000	2.800
2.830	8.117	29.840	0.908	9.412	1.000	20.000	2.800
2.460	7.808	30.400	0.899	9.301	1.000	20.000	2.800
2.360	7.508	31.130	0.871	9.338	1.000	20.000	2.800
2.300	7.292	31.670	0.858	9.190	1.000	20.000	2.800
2.090	7.025	32.180	0.788	8.896	1.000	20.000	2.800
1.520	6.775	32.640	0.741	8.552	1.000	20.000	2.800
1.450	6.900	32.770	0.635	7.888	1.000	20.000	2.800
1.460	6.967	32.980	0.557	6.917	1.000	20.000	2.800
1.360	7.033	33.300	0.449	6.070	1.000	20.000	2.800
3.950	7.683	27.060	0.505	5.541	1.000	20.000	2.800
4.580	7.867	27.750	0.610	7.028	1.000	20.000	2.800
5.000	7.683	28.760	0.704	8.367	1.000	20.000	2.800
4.960	8.133	29.620	0.781	8.822	1.000	20.000	2.800
4.530	8.433	30.560	0.845	9.227	1.000	20.000	2.800
4.260	8.100	31.590	0.884	9.485	1.000	20.000	2.800
3.300	8.075	32.590	0.905	9.719	1.000	20.000	2.800
2.210	8.000	34.410	0.900	9.817	1.000	20.000	2.800
1.930	7.950	33.940	0.878	9.522	1.000	20.000	2.800
1.330	7.475	34.700	0.835	9.227	1.000	20.000	2.800
1.560	7.658	35.050	0.780	9.043	1.000	20.000	2.800
1.510	7.708	35.180	0.710	8.638	1.000	20.000	2.800
1.090	7.700	35.470	0.629	7.655	1.000	20.000	2.800
0.970	7.758	35.800	0.541	6.586	1.000	20.000	2.800

continúa.../

/...continuación Cuadro 1.

(1) U2	(2)qa	(3)ta	(4)Rn	(5)ETM	(6) L	(7) H	(8) F
3.350	7.658	28.680	0.873	9.264	1.000	20.000	3.100
3.970	7.692	29.140	0.811	9.571	1.000	20.000	3.100
4.590	7.425	29.350	0.725	0.031	1.000	20.000	3.100
4.740	7.225	29.220	0.633	8.158	1.000	20.000	3.100
4.800	7.625	29.070	0.527	7.065	1.000	20.000	3.100
0.900	7.900	19.910	0.661	5.136	1.000	20.000	3.100
1.050	7.942	21.270	0.733	5.848	1.000	20.000	3.100
1.350	8.275	22.510	0.806	6.242	1.000	20.000	3.100
1.860	8.483	24.060	0.874	7.470	1.000	20.000	3.100
2.000	8.517	25.160	0.911	8.072	1.000	20.000	3.100
2.320	8.508	25.870	0.944	8.552	1.000	20.000	3.100
3.180	8.433	26.890	0.957	8.883	1.000	20.000	3.100
2.960	8.433	27.550	0.951	9.485	1.000	20.000	3.100
3.800	7.833	28.280	0.926	9.522	1.000	20.000	3.100
4.470	7.833	29.110	0.872	9.485	1.000	20.000	3.100
4.230	7.492	29.800	0.808	9.338	1.000	20.000	3.100
4.780	7.183	29.840	0.731	9.227	1.000	20.000	3.100
4.600	7.717	29.960	0.640	8.257	1.000	20.000	3.100
4.600	8.217	29.600	0.533	7.065	1.000	20.000	3.100
1.100	8.783	18.250	0.476	3.059	1.000	20.000	3.200
1.050	9.167	20.500	0.573	4.091	1.000	20.000	3.200
0.870	9.100	21.150	0.664	4.866	1.000	20.000	3.200
0.960	9.308	22.760	0.742	5.541	1.000	20.000	3.200
0.910	9.392	24.960	0.809	6.131	1.000	20.000	3.200
0.840	9.433	26.720	0.840	6.844	1.000	20.000	3.200
0.940	9.683	27.860	0.872	7.261	1.000	20.000	3.200
0.850	9.158	29.300	0.874	7.741	1.000	20.000	3.200
1.020	8.942	30.280	0.856	7.814	1.000	20.000	3.200
1.070	7.850	31.220	0.823	7.605	1.000	20.000	3.200
1.000	7.542	32.300	0.765	7.507	1.000	20.000	3.200
0.920	8.042	33.050	0.694	7.028	1.000	20.000	3.200
0.780	7.450	33.160	0.605	5.959	1.000	20.000	3.200
0.990	7.633	33.850	0.503	5.468	1.000	20.000	3.200
1.960	8.858	18.060	0.481	3.453	1.000	20.000	3.200
2.420	9.442	18.530	0.526	4.018	1.000	20.000	3.200
2.010	9.242	19.320	0.549	4.313	1.000	20.000	3.200
1.550	9.392	20.050	0.554	4.472	1.000	20.000	3.200
1.380	9.408	20.490	0.538	4.435	1.000	20.000	3.200
1.660	9.325	21.290	0.507	4.386	1.000	20.000	3.200
2.040	9.392	21.510	0.466	4.091	1.000	20.000	3.200
8.580	5.667	22.960	0.909	9.154	1.000	20.000	3.300

U2, Velocidad del viento a 2 m(m/seg)
 qa, Humedad específica del aire(gr/gr) 10^3
 ta, Temperatura del aire (°C)
 Rn, Radiación neta (cal/cm²/min)
 ETM, ET medida (mm/día)
 L, Anchura foliar(cm)
 H, Altura del cultivo (cm)
 F, Índice de área foliar

y datos de Loomis, R.S. y Williams,
R.S. (1969)

- f) coeficiente de extinción del viento : 3.0, según Cuadro 5, Apéndice.

2. Experimento B

Durante el período de mediciones ocurrieron dos ciclos de marcada sequía, los cuales no se tomaron en cuenta para la presente evaluación, dado el supuesto implícito de plena humedad del suelo que conlleva la fórmula. Por lo tanto, se incluyeron solamente las mediciones efectuadas en los períodos del 19 al 29 de julio y del 17 de agosto al 14 de septiembre de 1968. Se excluyeron también los días en que no hubo registro de algunos datos: 5, 8 y 9 de septiembre. Además, es necesario hacer ciertas observaciones con respecto a algunos valores de mediciones de ET presentados por Black, que resultan muy dudosos. Por ejemplo, al cotejar los datos meteorológicos y de ET registrados los días 22 y 23 de agosto, tenemos:

Fecha	RN cal cm ⁻² min ⁻¹	q _a gr/grx10 ⁻³	t _a °C	ETM mm	U ₂ m/s
8-22	.536	13.7	29.6	2.03	3.2
8-23	.450	16.8	30.3	7.81	3.1

Puede observarse que las condiciones de viento y temperatura son prácticamente iguales. La radiación neta del día 22 excede en poco a la del día 23, pero el gradiente de humedad es mayor este día, lo suficiente para compensar la diferencia de radiación y admitir que existían similares condiciones evaporativas. No obstante, los datos de ET medida son notoriamente divergentes, pues acusan una relación de 4:1, que excede en mucho a la de los demás conjuntos de días pareados que muestran verdaderas discrepancias meteorológicas. Otra observación

similar puede hacerse a los datos de los días 26 y 30 de agosto:

Fecha	RN	q_a	U_2	t_a	ETM	observaciones
8-26	.249	9.6	1.8	19.6	6.99	lluvia 79.62 mm
8-30	.272	11.7	1.7	15.0	8.66	lluvia 48.89 mm

En efecto, se nota que todas las condiciones meteorológicas caen por debajo de los valores promedio para todo el período experimental, lo cual implica una baja demanda evaporativa de la atmósfera. Bajo tales circunstancias, cabría esperar como máximo, y en el mejor de los casos, un valor cercano al promedio de ET para dicho período. Sin embargo, el día 26 se registró el valor más alto de ETM, acompañado por la precipitación también más alta: 80 mm, suficiente para nublar gran parte del día. El día 30 se registró el tercer valor más alto de ETM, acompañado también de la tercera lluvia más alta, casi 50 mm. Dadas tan notorias irregularidades, estos datos se descartaron ipso facto, reduciendo a 33 el total de comparaciones.

Los datos meteorológicos empleados son los que aparecen en el cuadro 2. Se refieren a mediciones diurnas hechas a 1.4 m sobre el suelo. Los cálculos se referirán por consiguiente, también a la evaporación diurna. Los valores de la velocidad del viento a 2 m fueron obtenidos multiplicando los datos originales por un factor de 1.0753. Los datos de presión de vapor, que estaban expresados en milibarias, se multiplicaron por 0.628 para obtener los valores equivalentes de humedad específica. Los valores de índice foliar, altura del cultivo y ancho de la hoja, fueron deducidos extrapolando los dos únicos datos, de acuerdo a la curva típica de crecimiento para este cultivo (Gráficos 4,5 y 6, Apéndice). Dado el reducido ciclo de desarrollo de este cultivo, una ligera desviación de la curva "desarrollo versus tiempo" distorsionaría sensiblemente los valores de las características morfológicas reales, introdu-

Cuadro 2.- Datos fitometeorológicos
Experimento B

(1) U2	(2) qa	(3) ta	(4) Rn	(5) ETM	(6) L	(7) H	(8) F
2.290	11.492	22.600	0.472	5.830	1.800	18.500	0.740
2.404	10.940	23.500	0.406	3.860	2.000	19.500	0.780
4.252	12.629	25.800	0.445	6.060	2.200	21.000	0.840
2.763	7.618	22.000	0.544	4.540	2.300	22.000	0.880
2.290	10.996	18.600	0.187	2.720	2.500	23.500	0.940
2.087	13.182	23.000	0.362	3.540	2.600	25.000	1.000
1.195	10.576	23.300	0.462	4.080	2.800	26.000	1.060
2.189	11.009	24.200	0.379	5.040	3.000	27.000	1.120
3.414	10.707	23.200	0.515	6.980	3.200	29.000	1.180
3.351	6.324	19.800	0.446	4.110	3.400	30.000	1.240
2.072	7.090	19.900	0.428	4.260	3.600	31.500	1.300
2.413	9.527	19.700	0.340	4.490	7.400	46.000	2.040
2.340	9.590	18.800	0.315	3.800	7.600	46.000	2.060
3.095	16.567	26.700	0.343	1.960	7.800	46.500	2.100
1.804	13.816	27.000	0.469	3.580	8.000	47.000	2.120
2.510	17.948	29.100	0.447	4.660	8.100	47.000	2.160
3.895	8.980	21.600	0.303	3.120	8.600	48.000	2.220
3.478	6.939	16.200	0.316	3.040	8.800	48.000	2.240
1.483	6.079	17.000	0.449	4.780	9.100	48.500	2.300
1.884	6.877	19.400	0.476	4.060	9.200	48.500	2.300
2.081	8.013	20.000	0.401	3.430	9.300	49.000	2.320
1.330	9.960	18.300	0.144	2.990	9.500	49.000	2.360
2.409	8.453	16.300	0.301	2.180	9.600	49.000	2.360
1.699	7.875	17.500	0.378	3.140	9.700	49.000	2.360
2.637	11.788	25.300	0.409	4.740	9.700	49.500	2.380
3.049	11.681	20.400	0.294	3.800	9.800	49.500	2.380
3.578	5.363	13.800	0.348	3.840	9.900	49.500	2.400
3.294	7.002	13.100	0.286	1.800	9.900	49.500	2.400
3.631	6.927	15.100	0.248	3.610	10.000	50.000	2.400
1.935	7.919	18.200	0.366	3.290	10.000	50.000	2.400
1.789	8.905	21.000	0.374	3.720	10.000	50.000	2.400
2.748	8.139	21.400	0.329	3.130	10.000	50.000	2.400
2.902	9.031	22.500	0.302	2.960	10.000	50.000	2.400

U2, Velocidad del viento a 2 m (m/seg)
qa, Humedad específica del aire (gr/gr)10⁻³
ta, Temperatura del aire (°C)
Rn, Radiación neta (cal/cm/min)
ETM, ET medida (mm/día)
L, Anchura foliar (cm)
H, Altura del cultivo (cm)
F, Índice de área foliar

ciendo así una importante fuente de error en los cálculos. El valor de la resistencia estomatal, 0.006 min/cm, se calculó por la fórmula (10), empleándose información publicada por Meyer, Anderson y Böhning (1960), referente a las características estomatales de este cultivo. Se adoptó un valor de 0.8 para el coeficiente de extinción de radiación (Monteith, J.L., 1969), y de 3.0 para el coeficiente de extinción del viento (Cuadro 5, Apéndice).

C. PROCESAMIENTO DE LOS DATOS

La aplicación de las fórmulas 1, 2 y 3 requiere el cálculo previo de las resistencias totales al flujo de vapor (r_E) y de calor (r_H), y de la humedad específica a saturación de la cubierta vegetal (q_s) y de las hojas inferiores (q_o).

Las resistencias totales, r_E y r_H , se calcularon según las fórmulas 16 y 34 (Anexo 1). Estas, a su vez, requieren datos de velocidad del viento sobre el cultivo, a la altura del mismo y alrededor de las hojas inferiores.

Para el experimento A se usó un método gráfico en la estimación de la velocidad del viento a la altura del cultivo (U_H): en el gráfico 8 (Apéndice) se localizaron las velocidades del viento a 10 m de altura (U_{10}), en función de U_2 ; luego, en el gráfico 7 (Apéndice) se obtuvo U_H en función de U_{10} . Las curvas de los gráficos la. y lb. se elaboraron uniendo los puntos correspondientes a 20 valores calculados de resistencias a los flujos de vapor (r_E , r_H , $r_{E(o)}$, $r_{E(H)}$, $r_{E(o)}$ y $r_{H(H)}$), versus 20 datos de velocidad del viento a 2 m. seleccionados entre valores máximos, mínimos e intermedios. Después, por interpolación, se obtuvieron los restantes valores. Para el experimento B, todos estos cálculos -

se hicieron exclusivamente a base de fórmulas y computación. La siguiente fórmula describe las relaciones entre U_H y U_{10} :

$$(4) \quad U_H = \frac{\log(7.7 - 0.665U_{10})}{\log(7700/H - 0.665U_{10})} U_{10} \quad \text{m/seg} \quad (\text{Norero, 1973b})$$

U_{10} , velocidad del viento a 10 m de altura (m/seg)
 U_H , velocidad del viento a la altura del cultivo (m/seg)
 H , altura del cultivo (cm)

A su vez la fórmula (5) expresa U_{10} en función de U_2 :

$$(5) \quad U_2 = \frac{\log(1540/H - 0.665U_{10})}{\log(7700/H - 0.665U_{10})} U_{10} \quad (\text{Norero, 1973b})$$

La resolución de las fórmulas 4 y 5 se facilita con los gráficos 7 y 8 respectivamente.

Las humedades específicas, q_s y q_o , se calcularon mediante las fórmulas 41 y 49. Estas, a su vez, necesitan el dato de la temperatura promedio del follaje, t_h , y de las hojas inferiores, t_o , respectivamente. Con este fin se recurrió a las fórmulas 40 y 50 que incluyen los parámetros m (complejo "fitometeorológico") y λ . Estos parámetros fueron evaluados con las fórmulas 46, 47, 51 y 52.

Los datos fueron procesados en una computadora - IBM 360, según el programa anexado en el Apéndice (Cuadro 12).

La comparación estadística entre la ET calculada (ETC) y la ET medida (ETM) se hizo a través de un contraste de -

hipótesis: se estableció el grado de significación para la diferencia entre el coeficiente de regresión lineal (b) de ETC y el valor 1 (B_0), asignado a ETM. O sea:

$$H_0 : B' = B_0$$

$$H_1 : B' \neq B_0$$

En tal caso, se utilizó el estadístico " t ": $t = (b - B_0) / s_b$ donde la varianza del coeficiente de regresión es :

$$(7) \quad s_b^2 = s_Y^2 / X^2$$

siendo $X = \text{ETC}$ y $Y = \text{ETM}$

La región crítica se estableció entre los límites :

$$t_t(\alpha/2, n-2) \geq t_c \geq t_t(1-\alpha/2, n-2)$$

t_c , " t " calculada; t_t , " t " tabulada; $\alpha = 0.05$ y 0.01

El coeficiente de regresión se calculó por la fórmula:

$$(8) \quad b = \frac{n \sum XY - \sum X \sum Y}{n \sum X^2 - (\sum X)^2}$$

Parte de estos cálculos aparece en los cuadros 10 y 11, Apéndice.

V-. RESULTADOS Y DISCUSION

A. RESISTENCIAS AERODINAMICAS

Una de las principales dificultades que se presenta en las estimaciones aerodinámicas de la ET es el cálculo de las resistencias. En algunos casos, las divergencias entre la ETC y la ETM han sido atribuidas a la no consideración de una o varias de las resistencias a la difusión de vapor y calor. Black, Tanner y Gardner (1970), al evaluar el modelo de Monteith (1965), objeto del experimento B, adujeron que las sobrestimaciones proporcionadas por ese modelo pudieron ser causadas por omisión de la resistencia del aire dentro del cultivo (r_f). En otro caso, la variación de los resultados obtenidos por Brun et al. (1972), fue parcialmente debida a la dificultad para obtener una resistencia representativa en las densas cubiertas de sorgo y frijoles estudiadas. Brown y Rosenberg (1973), reconocieron la necesidad de encontrar una expresión adecuada para estimar las resistencias del aire y del cultivo, a fin de obviar las dificultades instrumentales inherentes a las determinaciones empíricas.

En el Cuadro 3, columna 3, se muestran los valores de r_a , la resistencia del aire sobre el cultivo, calculados para el experimento B. El gráfico 2 muestra las relaciones $r_f=f(U_2)$ y $r_a=g(U_2)$, dadas por las fórmulas 11 y 12, respectivamente. En esta representación logarítmica la pendiente debe ser teóricamente igual a 1. Una corroboración experimental de esa relación se encuentra en trabajos de Brown y Rosenberg (1973), quienes hallaron un valor igual a 0.96 para esa pendiente, en un cultivo de remolacha. En la columna 2, Cuadro 3, aparecen los valores de r_f , resistencia del aire dentro del cultivo. Según se aprecia en el gráfico 2, existe una relación estrecha entre r_f y r_a , lo cual es de esperar, por la semejanza funcional entre ambas resistencias con respecto de U_2 .

Cuadro 3.- Resistencias parciales a los flujos de vapor y calor. Experimento B

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
UH	r_f	r_a	$r_w(H)$	$r_w(o)$	$r_h(H)$	$r_h(o)$
0.9054	0.0114	0.0066	0.0058	0.0223	0.0071	0.0272
0.9514	0.0106	0.0061	0.0059	0.0229	0.0072	0.0280
1.3324	0.0046	0.0033	0.0053	0.0203	0.0064	0.0248
1.0830	0.0086	0.0050	0.0060	0.0230	0.0073	0.0281
0.9581	0.0107	0.0058	0.0066	0.0255	0.0081	0.0312
0.9042	0.0117	0.0061	0.0070	0.0268	0.0085	0.0327
0.5638	0.0218	0.0104	0.0091	0.0352	0.0111	0.0430
0.9579	0.0108	0.0056	0.0073	0.0280	0.0088	0.0341
1.3151	0.0059	0.0034	0.0064	0.0247	0.0078	0.0301
1.3131	0.0061	0.0034	0.0066	0.0254	0.0080	0.0310
0.9556	0.0110	0.0053	0.0080	0.0307	0.0097	0.0374
1.2001	0.0079	0.0035	0.0102	0.0393	0.0124	0.0479
1.1736	0.0082	0.0036	0.0104	0.0402	0.0127	0.0491
1.4125	0.0056	0.0027	0.0096	0.0372	0.0117	0.0453
0.9642	0.0112	0.0046	0.0118	0.0456	0.0144	0.0556
1.2424	0.0075	0.0033	0.0105	0.0404	0.0128	0.0492
1.5575	0.0038	0.0021	0.0096	0.0372	0.0117	0.0453
1.5064	0.0046	0.0023	0.0099	0.0382	0.0121	0.0466
0.8255	0.0139	0.0054	0.0136	0.0525	0.0166	0.0640
1.0095	0.0105	0.0043	0.0124	0.0477	0.0151	0.0582
1.0962	0.0093	0.0038	0.0119	0.0461	0.0146	0.0562
0.7533	0.0156	0.0060	0.0146	0.0562	0.0178	0.0685
1.2231	0.0077	0.0033	0.0115	0.0443	0.0140	0.0540
0.9303	0.0118	0.0047	0.0132	0.0511	0.0161	0.0623
1.3061	0.0068	0.0030	0.0112	0.0431	0.0136	0.0526
1.4272	0.0056	0.0026	0.0107	0.0414	0.0131	0.0505
1.5347	0.0044	0.0022	0.0104	0.0402	0.0127	0.0490
1.4841	0.0050	0.0024	0.0106	0.0408	0.0129	0.0498
1.5461	0.0042	0.0022	0.0104	0.0402	0.0127	0.0491
1.0425	0.0101	0.0040	0.0127	0.0490	0.0155	0.0597
0.9780	0.0110	0.0044	0.0131	0.0506	0.0160	0.0617
1.3461	0.0064	0.0028	0.0112	0.0431	0.0136	0.0526
1.3918	0.0060	0.0027	0.0110	0.0424	0.0134	0.0517

UH, Velocidad del viento a la altura del cultivo (m/seg)
 r_f , Resistencia del aire dentro del follaje (min/cm)
 r_a , Resistencia del aire sobre el cultivo (min/cm)
 r_w , Resistencias de la capa límite al flujo de vapor (min/cm)
 r_h , Resistencias de la capa límite al flujo de calor (min/cm)

H= 20 cm

Z/H= 0.1

$\gamma = 3.$

r min/cm x10²

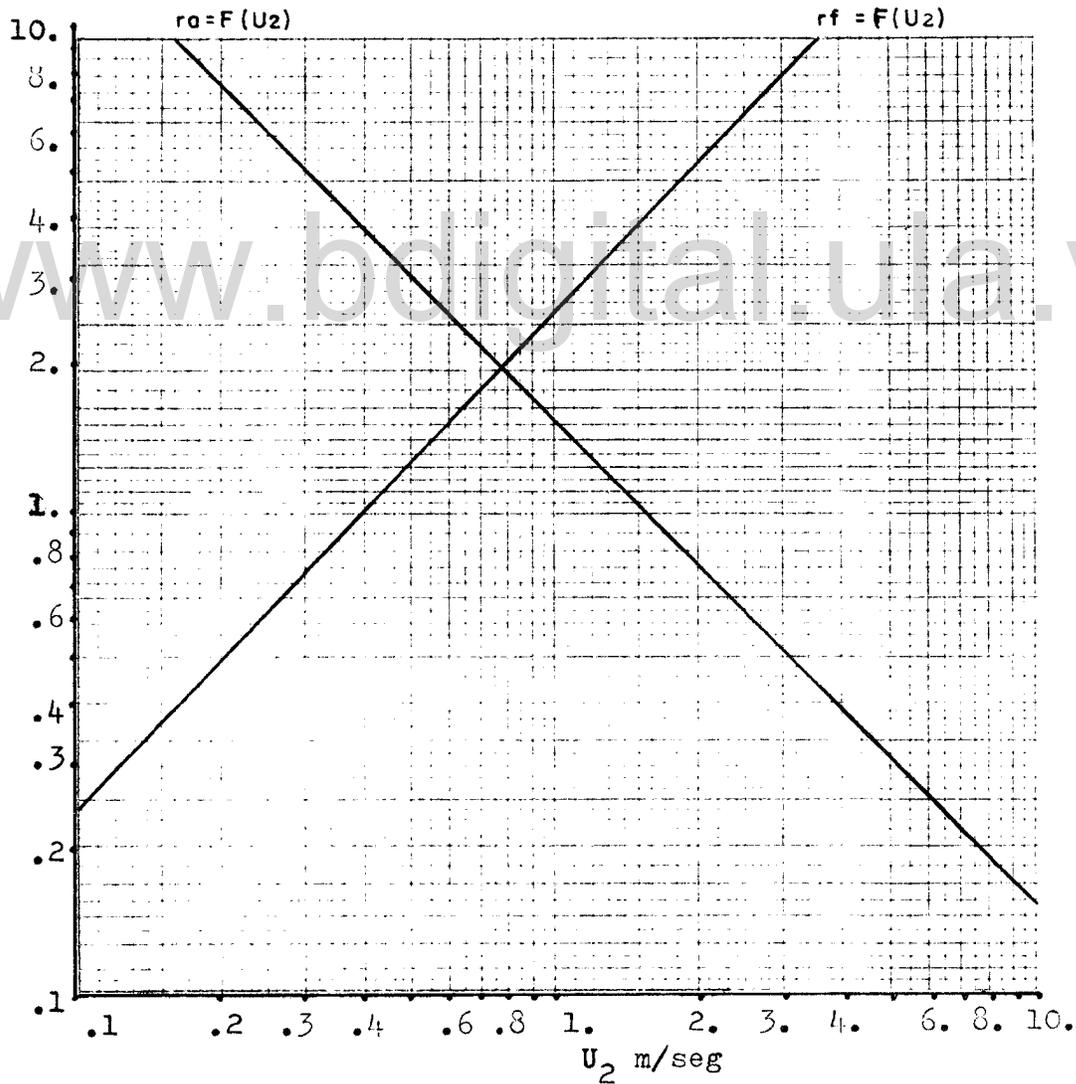


Gráfico 2.- Resistencias del aire al flujo de vapor y de calor, dentro y sobre el cultivo en función del viento a 2m. Experimento A

Los valores calculados de $r_{H(o)}$, $r_{H(H)}$, $r_{E(o)}$, $r_{E(H)}$, r_H y r_E , las resistencias totales a los flujos de vapor y de calor, tanto para los estratos foliares superiores e inferiores, como para la cubierta vegetal en promedio, se dan en el Cuadro 4. Al comparar estos valores con las respectivas velocidades del viento, se obtiene una relación como la representada en los gráficos la, y lb., de donde se derivan algunas observaciones, por ejemplo que las resistencias totales disminuyen hiperbólicamente con el aumento de la velocidad del viento sobre el cultivo, tendiendo a un valor asintótico.

En otras palabras, las mayores disminuciones en las resistencias se producen en los primeros incrementos en el movimiento del aire. Como consecuencia, la difusión de calor y vapor de agua es proporcionalmente mayor en vientos suaves o moderados. Es decir, no se necesitan grandes velocidades de viento para domantar la evaporación y ventilar eficazmente el cultivo. En los mismos gráficos se observa que las mayores resistencias al intercambio calórico y de vapor se plantean en los niveles más bajos de la vegetación, cerca del suelo-- $r_{H(o)}$ y $r_{E(o)}$ --, por la escasa turbulencia y baja velocidad del viento en esta zona del cultivo.

B. COMPLEJO FITOMETEOROLOGICO

Los resultados de M_o y M_c (complejo fitometeorológico), T_o y T_c (temperatura foliar), q_o y q_s (humedad específica), para el nivel inferior del cultivo y para la cubierta en general, se dan en los Cuadros 5 y 6. En el gráfico 10 (apéndice) se aprecia el tipo de función que liga a la temperatura con la humedad específica.

Cuadro 4.- Resistencias totales a los flujos de vapor y calor. Experimento B.

(8) $r_{E(H)}$	(9) $r_{E(o)}$	(10) r_E	(11) $r_{H(H)}$	(12) $r_{H(o)}$	(13) r_H
1.8377	4.6304	3.0220	1.3646	4.5199	2.6346
1.8053	4.5634	2.9742	1.3358	4.4668	2.5937
1.4585	3.4208	2.3019	0.9741	3.2669	1.8948
1.6945	4.2599	2.7829	1.2257	4.1658	2.4032
1.8397	4.7992	3.0865	1.3851	4.7600	2.7339
1.9063	5.0654	3.2325	1.4589	5.0541	2.8934
2.5563	7.3507	4.5391	2.1568	7.5243	4.2957
1.8815	5.0363	3.2041	1.4408	5.0506	2.8779
1.5805	3.9939	2.6034	1.1209	3.9354	2.2411
1.5997	4.0803	2.6492	1.1445	4.0389	2.2953
1.9283	5.3026	3.3357	1.5030	5.3764	3.0390
1.9652	5.6669	3.4953	1.5886	5.9289	3.2957
2.0013	5.8068	3.5725	1.6303	6.0903	3.3841
1.8317	5.1474	3.2090	1.4432	5.3631	2.9862
2.2371	6.7325	4.0801	1.8963	7.1324	3.9525
1.9748	5.7126	3.5189	1.6046	5.9990	3.3323
1.7711	4.9065	3.0771	1.3826	5.1223	2.8555
1.8235	5.1188	3.1926	1.4410	5.3579	2.9826
2.5020	7.7795	4.6522	2.2008	8.3321	4.6055
2.2633	6.8515	4.1423	1.9350	7.2995	4.0405
2.1763	6.5173	3.9577	1.8384	6.9285	3.8365
2.6536	8.3757	4.9783	2.3732	9.0085	4.9743
2.0787	6.1341	3.7476	1.7308	6.5067	3.6065
2.3918	7.3569	4.4189	2.0824	7.8778	4.3557
2.0162	5.8927	3.6145	1.6615	6.2388	3.4596
1.9328	5.5613	3.4333	1.5686	5.8709	3.2598
1.8616	5.2732	3.2766	1.4901	5.5549	3.0892
1.8982	5.4220	3.3575	1.5307	5.7187	3.1775
1.8579	5.2608	3.2694	1.4868	5.5437	3.0826
2.2736	6.9070	4.1698	1.9523	7.3822	4.0824
2.3477	7.1971	4.3289	2.0355	7.7072	4.2599
2.0018	5.8386	3.5843	1.6471	6.1848	3.4296
1.9683	5.7054	3.5115	1.6095	6.0359	3.3488

r_E , Resistencias totales al flujo de vapor (min/cm) 10^2
 r_H , Resistencias totales al flujo de calor (min/cm) 10^2

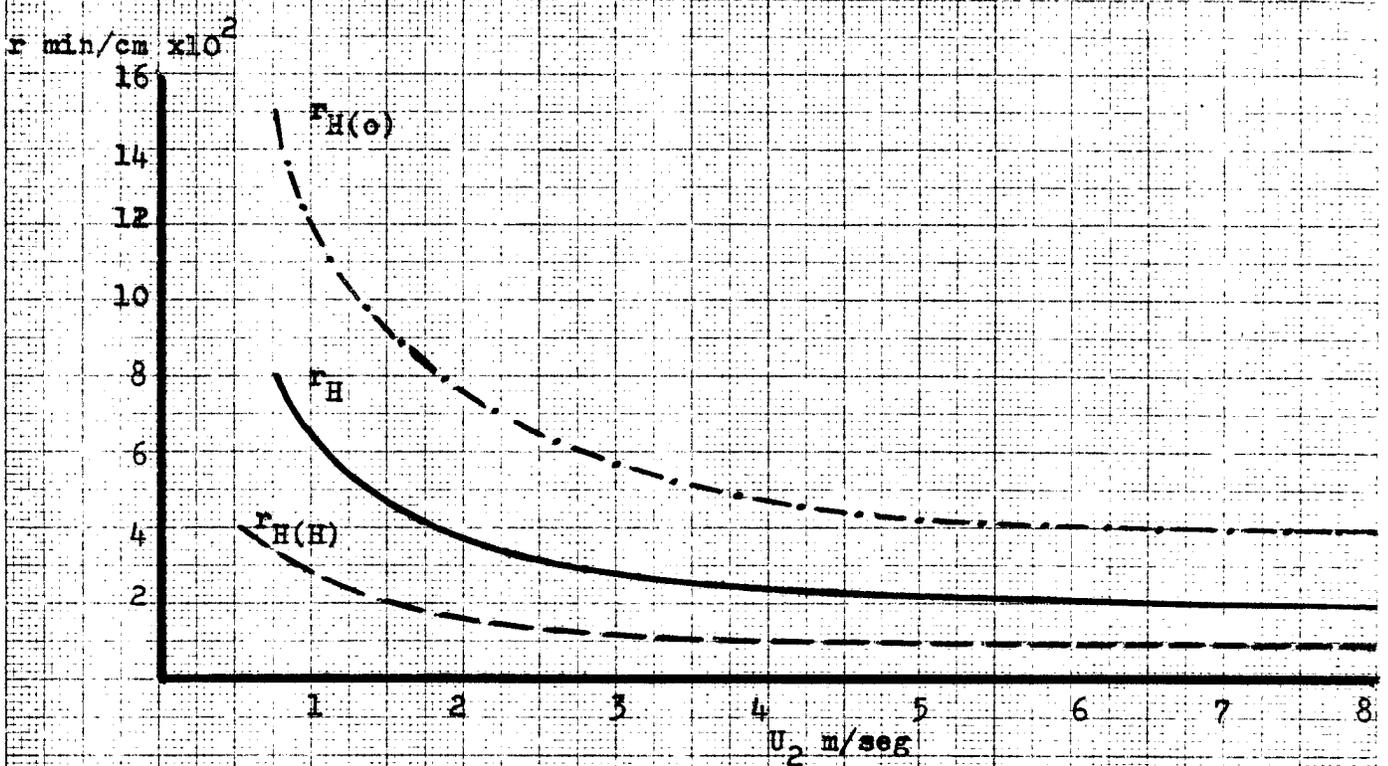


Gráfico 1a.- Resistencias totales al flujo de calor en función del viento a 2 m. Experimento A

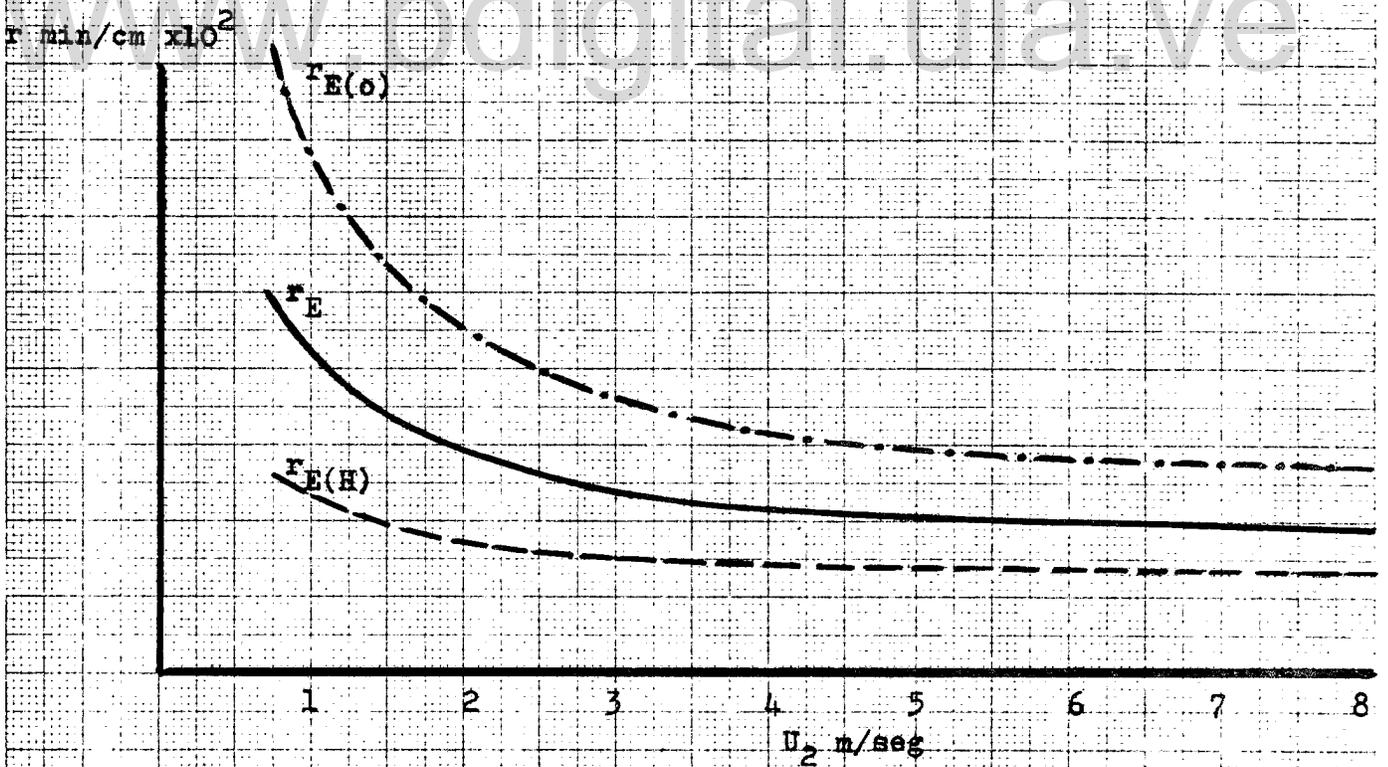


Gráfico 1b.- Resistencias totales al flujo de vapor en función del viento a 2 m. Experimento A



Quadro 5. Cálculo del complejo fitometeorológico, temperatura del follaje, transpiración del cultivo, evanoración del suelo y evapotranspiración. Experimento A.

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
AC	Ao	mc	mo	tc	to	qs	qo	T	Es	ETC
1.392	1.908	54.347	62.323	25.284	24.479	20.877	19.831	7.647	1.547	9.193
1.333	1.823	52.068	58.864	24.903	23.946	20.380	19.150	7.764	1.566	9.330
1.315	1.849	49.578	55.844	24.116	22.888	19.366	17.825	7.826	1.585	9.411
1.298	1.818	47.598	53.294	23.492	22.270	18.577	17.066	7.459	1.502	8.961
1.264	1.736	46.185	51.370	23.186	22.102	18.194	16.862	6.785	1.353	8.137
1.874	2.153	64.012	71.459	25.171	25.605	20.729	21.299	3.928	0.801	4.729
1.816	2.125	64.645	72.429	25.709	26.012	21.437	21.840	4.491	0.917	5.408
1.734	2.088	63.435	71.648	25.877	26.021	21.660	21.851	5.082	1.041	6.123
1.617	2.038	60.526	69.318	25.761	25.689	21.506	21.410	5.810	1.195	7.005
1.584	2.022	61.050	70.166	26.153	26.011	22.028	21.838	6.245	1.282	7.526
1.554	2.058	59.836	69.483	25.973	25.618	21.788	21.316	6.719	1.383	8.102
1.398	1.894	55.454	63.996	25.634	25.044	21.337	20.563	7.357	1.510	8.867
1.420	1.909	57.060	65.690	26.028	25.443	21.861	21.086	7.395	1.512	8.907
1.332	1.826	53.329	60.847	25.374	24.525	20.995	19.891	7.952	1.620	9.572
1.292	1.770	52.055	58.573	25.206	24.174	20.775	19.440	8.189	1.666	9.855
1.309	1.783	51.735	58.045	24.957	23.930	20.450	19.130	8.127	1.635	9.762
1.271	1.744	49.418	55.001	24.377	23.213	19.701	18.228	8.024	1.617	9.641
1.283	1.770	49.126	54.940	24.174	23.046	19.441	18.020	7.479	1.496	8.975
1.283	1.770	47.859	53.572	23.693	22.616	18.830	17.490	6.770	1.346	8.117
1.808	2.122	51.982	57.709	21.913	22.052	16.634	16.802	2.772	0.545	3.317
1.817	2.125	59.322	65.832	24.121	24.266	19.373	19.558	3.512	0.685	4.198
1.883	2.174	67.718	75.316	26.175	26.479	22.057	22.465	4.033	0.786	4.818
2.089	2.153	77.792	78.604	27.618	27.434	24.018	23.765	4.829	0.903	5.732
1.870	2.158	77.214	85.529	28.913	29.130	25.831	26.139	5.256	1.015	6.271
1.897	2.181	82.844	92.103	30.236	30.569	27.734	28.220	5.583	1.075	6.658
1.848	2.136	82.187	90.785	30.424	30.557	28.007	28.201	5.946	1.143	7.089
1.895	2.185	86.019	95.428	31.090	31.323	28.987	29.333	6.107	1.170	7.277

continúa

Continuación Cuadro 5.

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
AC	Ao	mc	mo	tc	to	qs	qo	T	Es	ETC
1.833	2.141	80.588	88.911	30.108	30.068	27.547	27.488	6.306	1.205	7.511
1.820	2.132	77.053	84.700	29.228	29.087	26.280	26.079	6.412	1.219	7.631
1.886	2.174	80.481	88.309	29.685	29.702	26.936	26.959	6.036	1.141	7.177
1.859	2.148	77.494	84.629	29.067	28.968	26.050	25.910	5.775	1.087	6.862
1.933	2.223	76.747	84.372	28.352	28.438	25.040	25.161	5.145	0.962	6.107
1.833	2.125	68.141	73.634	26.620	26.325	22.655	22.258	5.003	0.929	5.932
2.160	3.256	52.502	69.926	20.410	20.646	14.860	15.133	2.837	0.598	3.435
1.510	1.982	43.794	50.867	20.753	20.712	15.258	15.211	3.040	0.618	3.659
1.579	2.016	47.077	54.015	21.532	21.495	16.177	16.133	3.317	0.665	3.982
1.689	2.077	52.092	58.857	22.594	22.591	17.462	17.459	3.406	0.673	4.079
1.719	2.050	53.617	59.617	22.914	22.940	17.857	17.889	3.376	0.660	4.036
1.668	2.076	50.953	57.632	22.342	22.252	17.155	17.044	3.417	0.670	4.086
1.575	2.012	47.376	53.898	21.660	21.478	16.330	16.113	3.340	0.654	3.994
1.179	1.569	40.595	43.892	21.525	20.468	16.168	14.927	7.687	1.482	9.168
1.179	1.569	41.796	45.178	22.022	20.923	16.765	15.457	8.087	1.558	9.646
1.179	1.569	42.794	46.237	22.432	21.295	17.264	15.895	8.373	1.611	9.984
1.204	1.630	44.279	48.344	22.859	21.681	17.789	16.355	8.678	1.668	10.346
1.202	1.636	44.911	49.222	23.128	21.946	18.122	16.674	8.709	1.671	10.380
1.247	1.722	45.471	50.344	23.029	21.841	17.999	16.548	8.524	1.627	10.151
1.249	1.714	45.678	50.437	23.093	21.917	18.079	16.640	8.574	1.632	10.206
1.269	1.737	45.513	50.149	22.890	21.699	17.827	16.378	8.339	1.579	9.918
1.279	1.759	45.737	50.565	22.908	21.719	17.849	16.401	8.107	1.530	9.637
1.301	1.774	45.052	49.856	22.497	21.411	17.343	16.034	7.412	1.385	8.796
1.320	1.806	44.340	49.201	22.092	21.038	16.850	15.592	7.099	1.316	8.415
1.473	1.917	45.254	49.986	21.495	20.748	16.133	15.253	6.011	1.083	7.094
1.543	2.000	47.812	55.571	21.991	22.028	16.729	16.773	3.481	0.814	4.295
1.488	1.977	49.922	58.454	23.070	22.983	18.050	17.942	4.252	0.991	5.244

continúa

Continuación Cuadro 5.

(1) AC	(2) AO	(3) mc	(4) mo	(5) tc	(6) to	(7) q _s	(8) q _o	(9) T	(10) E _s	(11) ETC
1.542	2.006	55.211	64.346	24.528	24.505	19.895	19.865	4.941	1.147	6.088
1.490	1.971	56.132	65.646	25.200	25.063	20.767	20.587	5.715	1.327	7.042
1.393	1.891	55.137	64.312	25.557	25.152	21.236	20.704	6.504	1.513	8.017
1.428	1.917	57.931	67.586	26.263	25.931	22.175	21.732	6.920	1.608	8.527
1.439	1.930	59.756	69.778	26.804	26.461	22.905	22.441	7.249	1.672	8.921
1.500	1.967	62.212	72.232	27.150	26.906	23.375	23.043	7.161	1.645	8.806
1.515	1.985	62.506	72.474	27.131	26.857	23.349	22.976	7.162	1.636	8.797
1.522	1.983	62.827	72.566	27.184	26.894	23.422	23.026	7.198	1.638	8.836
1.567	2.001	63.056	72.122	26.921	26.663	23.063	22.714	6.846	1.546	8.392
1.661	2.021	67.547	76.547	27.629	27.719	24.034	24.158	6.190	1.393	7.583
1.719	2.098	65.738	74.003	26.672	26.579	22.726	22.600	5.649	1.264	6.913
1.703	2.083	63.163	70.780	25.997	25.823	21.820	21.588	5.307	1.177	6.485
1.729	2.088	61.031	67.636	25.175	24.951	20.734	20.442	4.720	1.034	5.755
1.316	1.798	45.445	51.624	22.543	21.853	17.400	16.562	5.366	1.212	6.577
1.284	1.759	47.227	53.553	23.449	22.672	18.523	17.558	6.134	1.405	7.539
1.265	1.738	49.019	55.510	24.274	23.406	19.568	18.470	6.924	1.593	8.517
1.268	1.746	51.662	58.755	25.246	24.369	20.827	19.690	7.396	1.707	9.103
1.279	1.759	54.325	62.087	26.151	25.307	22.024	20.907	7.795	1.796	9.591
1.289	1.774	55.910	63.984	26.651	25.780	22.698	21.531	8.238	1.890	10.128
1.386	1.879	60.322	69.490	27.414	26.707	23.737	22.773	8.151	1.859	10.010
1.543	2.003	68.479	78.977	28.819	28.474	25.699	25.211	7.762	1.758	9.520
1.603	2.032	70.269	80.643	28.894	28.717	25.805	25.554	7.329	1.662	8.991
1.737	2.097	77.092	87.559	29.865	30.032	27.195	27.436	6.714	1.520	8.233
1.683	2.075	72.409	82.147	28.920	28.817	25.841	25.695	6.726	1.513	8.239
1.692	2.078	70.991	80.278	28.435	28.322	25.156	24.998	6.344	1.419	7.763
1.812	2.128	75.158	83.912	28.754	28.922	25.606	25.844	5.491	1.225	6.716
1.839	2.134	73.922	82.009	28.222	28.410	24.857	25.121	4.937	1.093	6.030

AC, AO, mc, mo = Complejo fitometeorológico
 tc, to = Temperatura del cultivo y de las hojas inferiores (°C)
 q_s, q_o = Humedad del cultivo y de las hojas inferiores x(10)³
 E_s, T = Evaporación del suelo (E_s) y del cultivo (T) (mm/día)
 ETC = Evapotranspiración calculada (mm/día)

Cuadro 6. Cálculo del complejo fitometeorológico, temperatura del follaje, transpiración del cultivo, evaporación del suelo y evapotranspiración. Experimento B

(1) Ac	(2) Ao	(3) mc	(4) mo	(5) tc	(6) to	(7) qs	(8) qe	(9) T	(10) Es	(11) ETC
2.111	2.363	71.278	82.317	25.794	27.132	21.550	23.351	2.128	2.213	4.341
2.111	2.370	66.907	76.229	24.629	25.641	20.025	21.347	2.059	1.971	4.029
1.993	2.312	66.806	75.480	25.261	25.760	20.847	21.504	2.591	2.242	4.833
2.091	2.368	62.043	70.955	23.413	24.361	18.477	19.681	2.967	2.447	5.414
2.144	2.401	51.363	56.580	20.147	20.539	14.557	15.009	0.937	0.722	1.659
2.167	2.416	69.890	77.520	25.119	25.716	20.660	21.446	1.999	1.410	3.409
2.291	2.478	81.356	90.577	27.307	28.390	23.590	25.094	2.626	1.706	4.332
2.175	2.428	66.255	72.483	24.123	24.444	19.375	19.786	2.527	1.506	4.033
2.084	2.386	64.202	70.496	24.041	24.160	19.271	19.423	3.354	1.886	5.239
2.098	2.396	49.222	53.383	19.717	19.705	14.066	14.053	3.131	1.637	4.768
2.206	2.455	55.538	59.741	21.068	21.148	15.628	15.722	2.875	1.406	4.281
2.283	2.533	54.229	54.704	20.382	19.551	14.827	13.879	2.673	0.664	3.336
2.293	2.539	52.858	53.334	19.961	19.172	14.344	13.454	2.369	0.575	2.944
2.253	2.522	75.451	77.947	26.071	25.284	21.918	20.877	3.026	0.724	3.750
2.345	2.565	79.897	79.361	26.654	25.406	22.702	21.037	3.989	0.927	4.916
2.293	2.542	86.486	87.872	28.524	27.438	25.282	23.771	3.889	0.881	4.770
2.247	2.527	51.012	51.547	19.630	18.743	13.968	12.979	3.109	0.704	3.813
2.262	2.534	41.877	41.567	16.921	15.995	11.034	10.091	2.482	0.532	3.014
2.397	2.593	52.936	49.153	19.584	17.892	13.916	12.056	3.348	0.664	4.011
2.361	2.579	55.521	52.359	20.416	18.779	14.866	13.019	3.833	0.775	4.607
2.347	2.574	54.597	52.603	20.225	18.862	14.646	13.110	3.359	0.676	4.035
2.419	2.604	49.632	49.652	18.604	17.989	12.827	12.160	1.174	0.227	1.401
2.330	2.568	46.979	46.186	18.177	17.174	12.363	11.297	2.127	0.401	2.528
2.386	2.592	52.938	50.351	19.623	18.210	13.961	12.398	2.808	0.531	3.339
2.317	2.563	66.833	66.000	23.567	22.267	18.671	17.062	3.916	0.773	4.690
2.299	2.556	56.885	57.347	21.040	20.146	15.594	14.556	2.344	0.447	2.790
2.283	2.550	36.778	35.296	15.304	14.139	9.408	8.296	2.560	0.481	3.040
2.291	2.553	38.217	37.594	15.721	14.805	9.818	8.925	1.739	0.306	2.046
2.283	2.551	38.547	38.332	15.848	15.024	9.944	9.136	1.914	0.363	2.276
2.370	2.588	51.860	49.618	19.391	18.032	13.699	12.207	2.874	0.536	3.411
2.382	2.593	58.089	55.745	21.013	19.605	15.562	13.940	3.189	0.604	3.793
2.317	2.565	51.511	50.502	19.498	18.341	13.819	12.541	3.286	0.651	3.938
2.309	2.561	53.441	53.002	20.061	19.008	14.458	13.272	3.205	0.642	3.847

Ac, Ao, mc, mo = Complejo fitometeorológico
 tc, to = Temperatura del cultivo y de las hojas inferiores (°C)
 qs, qe = Humedad del cultivo y de las hojas inferiores x(10)3
 Es, T = Evaporación del suelo y del cultivo, respectivamente (mm/día)
 ETC = Evapotranspiración calculada (mm/día)

Las estimaciones de la temperatura foliar concuerdan con las apreciaciones hechas por algunos investigadores, Leopold (1964) y Linacre (1964) entre otros:

- 1.- Las hojas expuestas directamente a la radiación suelen tener temperaturas superiores a la del aire, particularmente si no transpiran abundantemente o no son suficientemente ventiladas. En efecto, las condiciones advectivas, y por consiguiente la ET, son más bajas en el experimento B que en el A. Lo mismo cabe esperar para la difusión de calor. Esto se verifica al comparar las diferencias entre la temperatura del aire y la del cultivo: en el experimento B (menor ET y advección) la temperatura del cultivo tiende a ser mayor que la temperatura del aire. Por el contrario, en el experimento A (mayor ET y advección) t_a siempre es mayor que t_c .
- 2.- En hojas bien provistas de humedad y transpirando activamente, dos tercios o más de la radiación neta son empleados en la vaporización de agua, y en estos casos, las diferencias de temperatura entre las hojas y el aire que las rodea son pequeñas, nulas o incluso negativas (las hojas más frías que el aire). Esto se corrobora al recordar los detalles de los experimentos A y B, cuando se advirtió que una de las diferencias entre ambas investigaciones era que en A siempre hubo una abundante provisión de agua; en cambio en B, las plantas sufrieron dos severos ciclos de sequía. Aunque no se hayan tomado en cuenta los períodos secos en esta evaluación, es muy posible que la deshidratación sufrida por el cultivo en esos días haya influido sobre la capacidad termostática de las hojas, prolongando ese efecto a los días húmedos (Ashton, F.M., 1956; Slatyer, R.O. y Bierhuizen, J. F., 1964).

3.- El sombreado de las hojas, o una posición vertical con respecto a los rayos solares, reducen la intensidad de la radiación que incide en ellas y prácticamente eliminan las diferencias de temperatura con el aire.

Esto también se cumple en ambos cultivos: las hojas del frijol presentan una disposición más bien horizontal, lo contrario de la "ballica", cuyas hojas tienden a ser verticales. Por otra parte, - por ser éste un pasto denso y perenne, su índice de área foliar se mantiene alto, lo cual implica una mayor cobertura o sombreado de las hojas inferiores. Los frijoles, por su condición de cultivo temporal y en surcos, presentan variaciones considerables del índice foliar durante su crecimiento, pero sin alcanzar valores muy altos.

A pesar de todo lo anterior, las mediciones de temperatura foliar presentadas por Pruitt y Lourence en el experimento A, exceden en varios grados la temperatura del aire. Al respecto, cabe citar las dificultades instrumentales admitidas - por Brown y Rosenberg (1973) en la medición de la temperatura de las hojas. Ellos proponen como solución adoptar procedimientos más sofisticados, tales como la termometría infra-roja.

C. EVAPOTRANSPIRACION

En los cuadros 5 y 6, columna 11, se muestran los resultados de la ET calculada. La aproximación entre estos valores y los de la ET medida es diferente en ambos experimentos.

1. Experimento B

Las estimaciones deficitarias o excesivas ocurren para toda clase de condiciones atmosféricas, con una dispersión que alcanzó en un caso hasta 91% de sobrestimación y en otro hasta 53% de subestimación. La mayor parte de las predicciones se desviaron más del 15% de los datos reales. La mejores predicciones coinciden con todos los valores de velocidad del viento inferiores a 2 m/seg, excepto en dos casos, el No.22 que presenta el valor más bajo de radiación neta, y el No.15, con uno de los valores más altos de temperatura del aire:

Cuadro 7. Estimaciones de ET obtenidas por el modelo de Norero, para valores de U_2 inferiores a 2m/seg.
Experimento B

Dato No.	ETC(mm)	ETM(mm)	U_2 (m/seg)
6	3.4	3.5	1.9
7	4.3	4.1	1.1
11	4.3	4.3	1.1
19	4.0	4.8	1.4
20	4.6	4.1	1.8
21	4.0	3.4	1.9
24	3.3	3.1	1.6
30	3.4	3.3	1.8
31	3.8	3.7	1.7

De donde se desprende que, en este caso, la fórmula fue muy vulnerable a las condiciones de vientos fuertes. Es oportuno recordar que la influencia del viento en la ET está muy ligada a las características aerodinámicas del cultivo, como se ob

serva, por ejemplo, en las fórmulas (13) y (33), en que r_w y r_h , resistencias de la capa límite, son función muy directa de L , ancho de la hoja, y U_2 . También es propicio recordar que las características del cultivo fueron supuestas en base a la construcción de una curva hipotética del desarrollo, extrapolando los dos únicos datos disponibles. Se advirtió también la sensibilidad de esta curva a las más ligeras desviaciones. Por tanto, al sufrir el cultivo dos períodos de fuerte sequía, lo más seguro es que se haya alterado el patrón normal de crecimiento. Esto induce a sospechar un posible error en la estimación de los parámetros del cultivo, que afectó desfavorablemente los cálculos.

Un factor de subestimación en la fórmula lo constituye la omisión de la evaporación nocturna (EN). Una manera de obviar esta limitación consiste en asignar a la evaporación del suelo durante la noche, un valor equivalente al 20% de la evaporación diurna (ES), según experiencias realizadas por Black et al. (1969). Con base en esta suposición, se hicieron los ajustes referidos a los valores de ETC correspondientes al primer período de mediciones. Luego se compararon los valores ajustados con sendas estimaciones de ET obtenidas por Black et al. (1970), cuando evaluaron el modelo de Monteith, comparando también con los valores reales de ET. En el Cuadro 8, se resumen los resultados de esta comparación. Los valores de ET estimados por Black et al. (ETB) con los que se hace la comparación, son los únicos publicados por dichos autores para períodos en que no hubo sequía.

Como se puede observar, los resultados favorecen al modelo de Norero, a pesar de que Black et al. utilizaron el instrumental necesario para medir directamente la resistencia esto

Cuadro 8. Comparación entre estimaciones de ET obtenidas por los modelos de Monteith y de Norero, con datos de Black et al.

ES	EN	mm/día		ETB	ETM	% de error	
		ETC	ETA			1-(ETC/ETM)	1-(ETB/ETM)
2.21	.442	4.34	4.78	5.09	5.83	26.0	13.0
1.97	.394	4.03	4.42	5.09	3.86	24.4	32.0
2.24	.448	4.83	5.28	5.64	6.06	20.0	7.0
2.45	.490	5.41	5.90	5.09	4.54	19.0	12.0
0.72	.144	1.66	1.80	2.00	2.72	39.0	26.0
1.41	.282	3.41	3.69	3.50	3.54	4.0	1.0
1.71	.342	4.33	4.67	5.00	4.08	6.0	23.0
1.51	.302	4.03	4.33	3.57	5.04	20.0	29.0
1.89	.378	5.24	5.62	5.90	6.98	25.0	15.0
1.64	.328	4.77	5.10	5.14	4.11	16.0	25.0
1.41	.282	4.28	<u>4.56</u>	<u>3.57</u>	<u>4.26</u>	<u>0.0</u>	<u>16.0</u>
Promedio:		4.56	4.51	4.64		16.3 (Norero)	18.1 (Monteith)

ES, evaporación diurna del suelo, según modelo de Norero - (Cuadro 3b, columna 10)

EN, evaporación nocturna= 0.20ES

ETC, evapotranspiración calculada, según modelo de Norero

ETA, evapotranspiración diaria ajustada=ETC+EN

ETB, evapotranspiración diaria, según modelo de Monteith

ETM, evapotranspiración medida

matal y el potencial del agua en la hoja, al evaluar el modelo de Monteith. Por otra parte, las predicciones del modelo de Norero mejoraron notablemente para períodos de dos días, según se aprecia en el Cuadro 10 (Apéndice) y el gráfico 3a. En este caso, el análisis estadístico reveló que no existieron diferencias entre ETC y ETM, a un nivel de probabilidad del 5%, sin incluir ajustes por evaporación nocturna.

www.bdigital.ula.ve

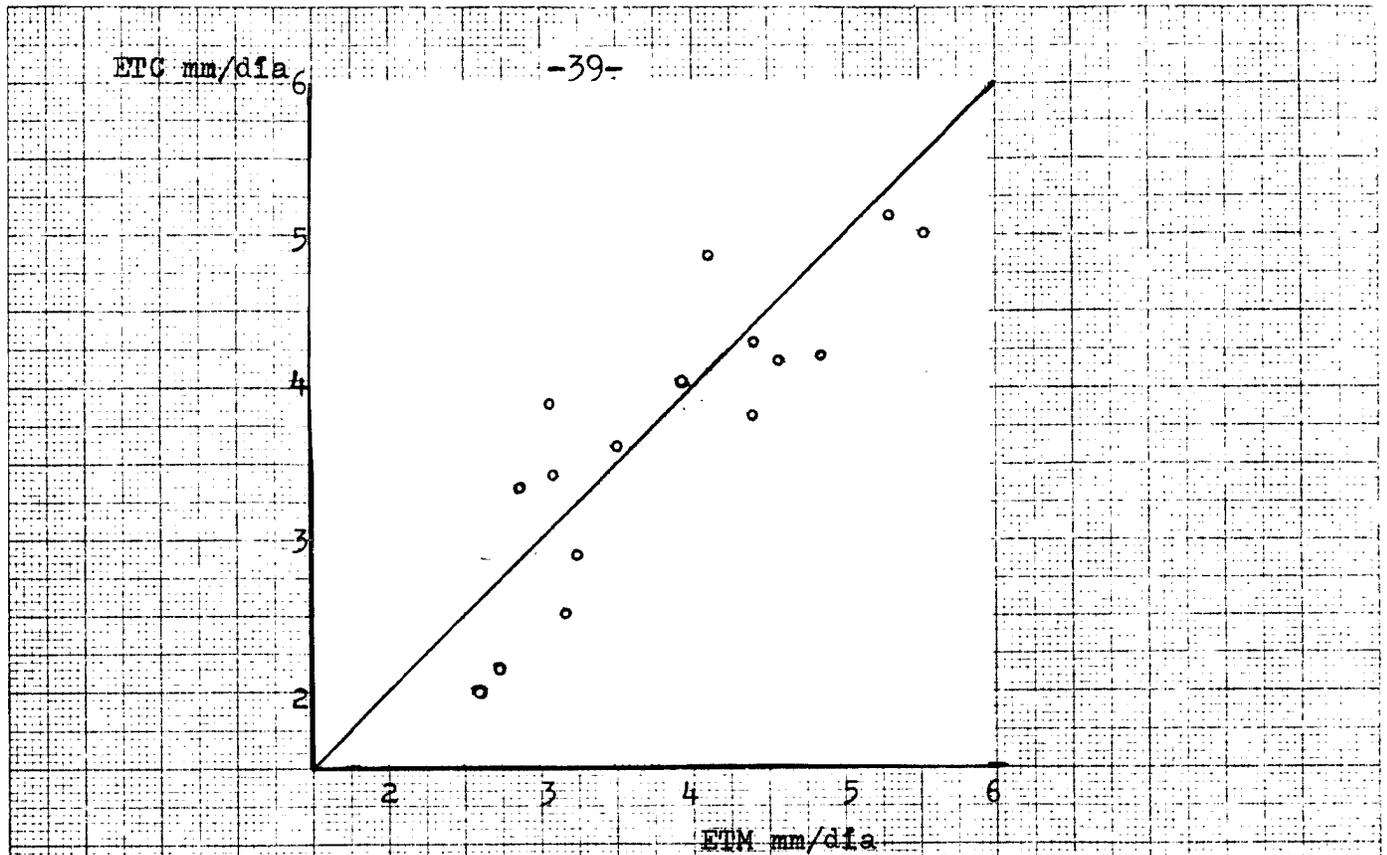


Gráfico 3a.- Relación ET calculada/ET medida, para promedios de días parados. Experimento B

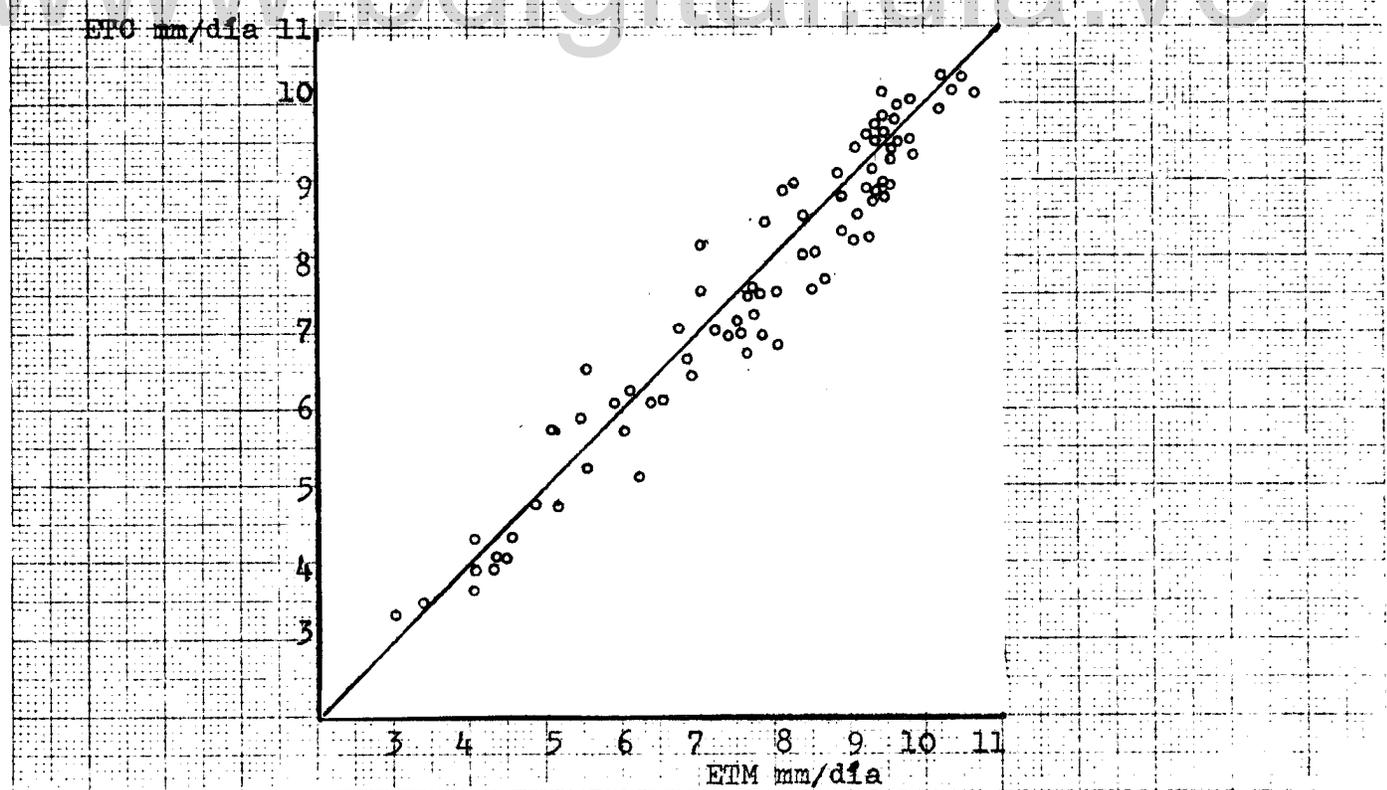


Gráfico 3b.- Relación ET calculada/ET medida Experimento A

2.- Experimento A

Los resultados de ETC se presentan en la columna 11 del Cuadro 5. En esta ocasión, la fórmula demostró una excelente predicción, ratificada por el análisis estadístico, que reveló una aproximación altamente significativa entre ETC y ETM, para un nivel de probabilidad del 1% (Cuadro 11, Apéndice). - En el gráfico 3b se aprecia esta relación.

La dispersión de los valores fue casi nula, pues sólo - en una estimación, entre 81, hubo una desviación mayor del 15% de lo predicho con respecto de lo medido. A pesar de haberse supuesto también en este caso las características del cultivo, el hecho de ser éste un pasto permanente conlleva una mínima - variación en su morfología, sobre todo si se recuerda que fue mantenido prácticamente a una misma altura. El logro de una - mejor estimación en estas circunstancias, aún bajo condiciones atmosféricas más adversas, da fuerza a la suposición de que la mayor dispersión de los resultados obtenidos en el experimento B se debió a un mayor desconocimiento de las características - de la cubierta vegetal.

Para los fines de esta evaluación, es pertinente incluir el resumen de los resultados obtenidos por Pruitt y Lourence - (1963), al someter a prueba otras fórmulas, con los datos re-- producidos en este trabajo:

"...Se compararon las mediciones de ET para Lolium perenne con las estimaciones de flujo de vapor, usando fórmulas aerodinámicas, de balance de energía y combinaciones de ambas.

La expresión propuesta por Thorntwaite y Holzman fue completamente inadecuada bajo las más calmas condiciones encontradas, dando un nivel de sobrestimación de considerable magnitud bajo las condiciones más altas de estabilidad y un grado similar de subestimación en casos altamente inestables. Con vientos de sólo 2 metros por segundo, sin embargo, los errores se redujeron por un factor de 5, y con vientos de 4 metros por segundo, se acusó una predicción razonablemente precisa de la ET...

...Un método propuesto por Deacon (1958), mostró marcadas ventajas sobre la expresión de Thorntwaite-Holzman, durante condiciones de calma, pero aún fueron comunes errores de 100% ó más. Bajo condiciones más advectivas, los resultados fueron bastantes buenos...

...El uso de una función no lineal del viento, en una modificación de la expresión de Dalton, y la suposición de que la superficie del cultivo estaba plenamente saturada, proporcionó un método altamente satisfactorio para estimar la ET en todos los días, excepto uno. Durante un día ventoso y de fuerte advección, la fórmula sobrestimó seriamente las pérdidas reales de agua. Se presumió que la vegetación controló en grado notable la transpiración en ese día...

...La relación de Bowen, utilizando el gradiente promedio de vapor de agua y temperatura entre los niveles de 50 y 100 cm, arrojó los resultados más satisfactorios, tomando en cuenta todos los ocho días. Excepto cuando B era -1.0 , la estimación del flujo de vapor se aproximó mucho a los niveles de medición en siete de los ocho días. Durante un día de fuerte advección, se notaron sobrestimaciones del 10 al 15% por 2 ó 3 horas del medio día...

... La ecuación combinada aerodinámica-balance de energía, sugerida por Mc. Ilroy, usando una expresión para la transferencia en masa determinada localmente, dió muy buenos resultados en cinco de los ocho días. En dos días, durante períodos matutinos muy calmos, se notó una sobrestimación del 10 al 15%. Se obtuvieron sobrestimaciones del 100% durante un día de fuerte advección, cuando la suposición de una superficie efectivamente mojada no era realista. Esta presunción pudo ser también el problema cerca del mediodía, durante el día ventoso, aunque los errores estaban debajo del 15%..."

www.bdigital.ula.ve

VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A. CONCLUSIONES

- 1.- El modelo agrofísico propuesto proporcionó estimaciones más acertadas de la evapotranspiración de pasto, que otras formulaciones basadas sólo en factores microclimáticos.
- 2.- Las estimaciones hechas con el modelo agrofísico de la evapotranspiración, para períodos de 30 minutos, no difirieron significativamente (1%) de las medidas experimentales en Lolium perenne.
- 3.- Las predicciones de la ET a escala diurna mediante el modelo presentado, fueron comparables a las del modelo agrofísico elaborado por Monteith, el cual requiere, sin embargo, de mediciones directas de campo, sobre la cubierta vegetal.
- 4.- Las estimaciones efectuadas por el modelo propuesto, para mediciones en períodos de dos días, no fueron significativamente diferentes (5%) a las mediciones obtenidas en lisímetros, para Phaseolus vulgaris.

B. RECOMENDACIONES

El notable éxito alcanzado a través de este modelo en la predicción puramente teórica de la ET, amerita la extensión de esta prueba hacia condiciones más variadas de clima y vegetación.

Sería conveniente, además, buscar una expresión complementaria, que permita a la fórmula predecir la transpiración en condiciones de apertura parcial de los estomas. Bajo las actuales limitaciones, la ET máxima puede ser estimada sólo dentro de determinado rango de valores de energía luminosa. Para completar las estimaciones diurnas es necesario hacer extrapolaciones.

Ya que no se pudo determinar plenamente la precisión de la fórmula con datos diurnos promedio, debido a la carencia de información directa sobre el cultivo, sería recomendable evaluar el modelo con datos obtenidos de experimentaciones ad hoc.

www.bdigital.ula.ve

VII. RESUMEN

La acelerada expansión de las áreas de riego en Latinoamérica, demanda métodos versátiles, seguros e inmediatos para estimar la evapotranspiración.

En años recientes se han incrementado los esfuerzos para encontrar una formulación teórica general del proceso evaporativo. A tal fin se han propuesto varios modelos que tratan de describir y cuantificar el flujo de vapor desde una cubierta vegetal hacia la atmósfera.

La evaluación de tales modelos, en consecuencia, reviste una importancia a la vez científica y práctica.

En el presente trabajo se evaluó un modelo de la evapotranspiración máxima. En este término están involucradas las condiciones que determinan el máximo flujo de vapor hacia la atmósfera: 1) mínimo potencial del agua en el suelo; 2) mínima resistencia del cultivo. En tales circunstancias sólo intervienen factores atmosféricos y de la vegetación para regular la ET.

La prueba del modelo se hizo con datos fitoneteorológicos obtenidos de investigaciones similares realizadas por otros autores en Phaseolus vulgaris y Lolium perenne. La evaluación consistió en comparar las estimaciones obtenidas por el modelo y los datos reales de mediciones de ET.

Los resultados indicaron una excelente predicción para el caso del pasto, en períodos de tan sólo 30 minutos. Se alcanzó una estimación menos precisa en el otro cultivo, pero aún aceptable, ya que las predicciones no difirieron significativamente de la relación teórica, para períodos de dos días. Se atribuyó la menor precisión en este caso a una posible desviación de la curva típica supuesta para el desarrollo vegetal, ocurrida durante dos períodos de sequía.

La principal limitación de la fórmula es la no adaptación a valores de energía luminosa que descienden de un determinado umbral.

Los resultados del análisis sugieren una ampliación de las pruebas, para determinar la versatilidad de la fórmula, y la búsqueda de una expresión que permita la aplicación de la misma bajo condiciones irrestrictas de energía luminosa.

LITERATURA CITADA

- ABBE, C. 1905. A first report on relation between climates and - crops. USDA Weather Bureau. Bul 26. 386 p. (original no consultado; citado por Christiansen, J. Op. cit.)
- AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS. 1966. Conference pro ceedings. Chicago, Illinois, ASAE. p 64.
- AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. 1966. Methods for estimating evapotranspiration. Las Vegas, ASCE.
- ASHTON, F.M. 1956. Effects of a series of cycles of alternating low and high soil water contents on the rate of apparent - photosynthesis in sugar cane. Plant Physiology 31:266-274.
- BLACK, T.A., GARDNER, W.R., y THURTELL, G.W. 1969. The prediction of evaporation, drainage and soil water storage for a bare soil. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 33:655-660. (Original no consultado; citado por Black, T.A., Tanner, C.B., y Gardner, W.R. Op. cit.)
- _____, TANNER, C.B., y GARDNER, W.R. 1970. Evapotranspiration from a snap bean crop. Agron. J. 62:66-69.
- BLANEY, H.F., y MORIN, K.L. 1942. Evaporation and consumptive use of water formules. Part I, Trans. Amer. Geophys. Union - 23(1):76-83. (Original no consultado; citado por Christian sen, J. Op. cit.)
- BLANEY, H., y CRIDDLE, W. 1945. A method of estimating water requi rements in irrigated areas from climatological data. Washing ton, US Soil conserv. Serv. 23 p. (original no consultado; citado por Christiansen, J. Op. cit.)
- BROOKS, F.A., PRUITT, W.O., NIELSEN, D.K., et al. 1963. Investigation of energy and mass tranfer near the ground including the - influences of the soil-plant-atmosphere system. University of California, ASUCD Book Store. 285p. (Original no consul tado; citado por Pruitt, W.O., y Lourence, J.F. Op. cit.)

- BROWN, K.W., y ROSENBERG, N.J. 1973. A resistance model to predict evapotranspiration and its application to a sugar beet field. *Agron. J* 65(3):341-347.
- BRUN, J.L., KANEMASU, E.T., y POWERS, W.L. 1972. Evapotranspiration from soybean and sorghum fields. *Agron J.* 64:145-148.
- COWAN, I.R. 1965. Transport of water in the soil-plant-atmosphere system. *J. Appl. Ecol.* 2:221-239. (Original no consultado; citado por Black, T.M., Tanner, C.B., y Gardner, W.R. Op.cit.)
- CUMMINGS, N. y RICHARDSON, B. 1927. Evaporation from lakes. *Phys. Rev.* 30(2):527-534. (Original no consultado; citado por Christian sen, J. Op.cit.)
- CHARTIER, P. 1967. Lumiere, eau et production de matiere seche du couvert vegetal. *Annales agronomiques. Inst. Nat. de la Rech. Agr.*, 18(3):301-331.
- CHRISTIANSEN, J. 1968. Estimación de la evaporación desde tanque y la evapotranspiración a partir de datos climatológicos. Traducido del inglés por Eugenio Topolansky. México, Dir. Gen de Riego. 60p.
- DALTON, J. 1798. Experimental essays on the constitution of mixed gases; on the force of steam or vapor from water and other liquids in different temperatures, both in a torricellian of gases by heat. *Mem. Manchester Lit. and Phil. Soc.* 5:536:602. (Original no consultado; citado por Christiansen, J. Op.cit.)
- DEACON, E.L., y SWINBANK, W.C. 1958. Comparison between momentum and water vapor transfer: climatology and microclimatology. *UNESCO Arid Zone research.* 11:38-41 (Original no consultado; citado Por Tanner, C.B. 1967. Op.cit.)
- FERGUSON, J. 1952. The rate of evaporation from shallow ponds. *Australian J. Sci. Res* 5:315-330. (Original no consultado; citado por Tanner, C.B. 1967. Op.cit.)
- GARCIA BENAVIDES, J., y LOPEZ DIAZ, J. 1970. Fórmula para el cálculo de la evapotranspiración potencial adaptada al trópico (15° N-15° S). *Agronomía Tropical (Venezuela).* 20:335-345.
- GRASSI, C.J. 1964. Estimation of evapotranspiration from climate formulas. Master of Science Thesis, Utah State University Library. Logan, Utah. (Original no consultado; citado por Grassi,

- . . . C.J. s.f. Op. cit.)
- _____ s.f. Estimación de los usos consuntivos de agua y requerimientos de riego con fines de formulación y diseño de proyectos. Mérida, Centro Interamericano de Desarrollo Integral de Aguas y Tierras. Doc. 53. 137 p.
- HARGREAVES, G. 1956. Irrigation requirements based on climatic data. Paper 1105, Proc. ASCE, J. Irrig. and Drain. Div. 89 - (IRI):43-50. (Original no consultado; citado por Christian- sen, J. Op. cit.)
- HOUSE, G.J., RIDER, N.E., y TUGWELL, C.P. 1960. A surface energy-balan- ce computer. Quart. J. Roy. Meteorol. Sci. 86:215-231. (Origi- nal no consultado; citado por Tanner, C.B. Op. cit.)
- INOUE, E. 1963. In Environmental control of plant growth. Nueva York, Academic Press. (Original no consultado; citado por Norero, A. 1973c. Op. cit.)
- JENSEN, M., y HAISE, H. 1963. Estimating evapotranspiration from solar radiation. Paper 3737, Proc. ASCE, J. Irrig. and Drain. Div. - 89 (IR4):15-41 (Original no consultado; citado por Christian- sen, J. Op. cit.)
- KANEMASU, E.T., THURTELL, G.W., y TANNER, C.B. 1969. The design, cali- bration and field use of a stomatal difussion porometer. - Plant Physiol. 44:(in press). (Original no consultado; cita- do por Black, T.A., Tanner, C.B., y Gardner, W.R. Op. cit.)
- LEOPOLD, C.A. 1964. Plant growth and development. New York, Mc. Graw Hill. (Original no consultado; citado por Norero, A. 1973b. Op. cit.)
- LINACRE, E.T. 1964. Relación entre la temperatura foliar y del aire bajo insolación directa. In Agricultural Meteorology. - 1:66-72. (Original no consultado; citado por Norero, A. 1973d. Op. cit.)
- LOOMIS, R.S., y WILLIAMS, R.S. 1969. Productivity and the morphology of crop stands: patterns with leaves. In Physiological aspec- ts of crop yield. Edited by Eastin, J.D., Haskins, F.A., Sulli-

- van, C.Y., and Van Bavel, C.H. Wisconsin, American Society of Agronomy.
- LOPEZ, JAVIER. 1968. Resultados comparativos de mediciones y cálculos de evaporación y uso consuntivo. Caracas, Fundación Shell.
- MEYER, B.S., ANDERSON, D.B., y BÖHNING, H.R. 1960. Introduction to plant physiology. New York, D. Van Nostrand.
- MILTHORPE, F.L. 1960. The income and loss of water in arid and semiarid zones. In Plant water relationships in arid and semiarid conditions. Reviews of research. UNESCO Arid Zone - Research XV. Paris.
- MONTEITH, J.L. 1963. In Environmental control of plant growth. New York, Academic Press.
- _____. 1965. Evaporation and environment. In The state and movement of water in living organisms. G.E. Fogg, Ed. Academic Press, New York.
- _____. 1969. Light interception and radiative exchange in crop stands. In Physiological aspects of crop yield. Op. cit.
- NORERO, ALDO. 1973a. Modelo agrofísico de la evapotranspiración de los cultivos. Centro Interamericano de Desarrollo Integral de Aguas y Tierras. Mérida, Venezuela, 78 p.
- _____. 1973b. El viento en el ambiente vegetal. CIDIAT. Mérida, Venezuela, 46 p.
- _____. 1973c. La radiación en el ambiente vegetal. CIDIAT. Mérida, Venezuela, 46 p.
- _____. 1973d. El calor en el ambiente agrícola. CIDIAT. Mérida, Venezuela, 30 p.
- PENMAN, H.L. 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. Proc. Roy. Soc. of London. 193:120-145.
- PRUITT, W.O. 1960. Relation of consumptive use of water to climate. The Geographical Review, 38(1):55-94.
- _____, y LOURENCE, J.F. 1963. Test of aerodynamic, energy balance and other evaporation equations over a grass surface. In Investigation of energy and mass transfer near the

- ground including the influences of the soil-plant-atmosphere system. Op. cit.
- ROHWER, C. 1931. Evaporation from free water surface. U.S.D.A. and Colo. Agr. Exp. Sta. Tech. Bul 271:1-96-
- ROSE, C.W. 1966. Agricultural Physics. Pergamon Press, Londres.
- SELLERS, W.D. 1965. Physical Climatology. The University of Chicago Press, Chicago.
- SHEPPARD, P. 1958. Transfer across the Earth's surface and through the air above. Quart. J. Roy. Meteorol. Soc. 84:205-224. (Original no consultado; citado por Tanner, C.B. 1967. Op. cit.).
- SLATYER, R.O., y MCILROY, I.C. 1961. Practical microclimatology. - CSIRO, Plant Ind. Div. Canberra (UNESCO sponsored). 328 p. (Original no consultado; citado por Tanner, C.B. 1967 Op. cit.)
- _____, y BIERHUIZEN, J.F. 1964. The influence of several transpiration suppressors on transpiration, photosynthesis and water use efficiency of cotton leaves. Aust. J. Biol. Sci. - 17:131-146.
- _____. 1967. Plant water relationships. Academic Press, Londres.
- TANNER, C.B. 1960a. Energy balance approach to evapotranspiration from crops. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 24:1-9.
- TANNER, C.B. 1960b. A simple aero-heat budget method for determining daily evapotranspiration. Int. Congr. Soil Sci. Proc. 7th. Madison, Wis. 1:203-209. (Original no consultado; citado por Tanner, C.B. 1967. Op. cit.)
- _____. 1967. Measurement of evapotranspiration. In Irrigation of Agricultural Lands. Editado por Hagan, R.M., Haise, and Edminster, T.W. Madison, Wisconsin, ASAE. 1180 p.
- THORNTHWAITE, C.W. 1948. An approach toward a rational classification of climate. The Geographical review. 38(1):55-94.

- VALLEJOS, J., y NORERO, A. 1972. Fórmula para estimar los requisitos de agua de los cultivos. Tesis Ing. Agr. Depto. Edafología, Universidad Católica de Chile.
- WAGGONER, P. E., y REIFSNYDER, W. E. 1968. Simulation of the temperature, humidity and evaporation profiles in a leaf canopy. J Appl. Meteorol. 7:400-409.

www.bdigital.ula.ve

EVALUACION DE UN MODELO AGROFISICO
DE LA EVAPOTRANSPIRACION

www.bdigital.ula.ve

A P E N D I C E

A N E X O 1

FUNDAMENTOS TEORICOS DEL MODELO AGROFISICO
EVALUADO EN ESTE ESTUDIO

Características aerodinámicas

La intensidad del proceso de flujo de vapor puede describirse en términos de: a) un gradiente de concentración de vapor de agua entre las hojas y la atmósfera que las circunda y b) de un coeficiente de transmisión del medio en que se verifica el intercambio, es decir, del aire:

$$(9) \quad E = k_E (dq/dZ) \quad \text{gr H}_2\text{O/cm}^2/\text{min}$$

E, evaporación de agua, desde las hojas hacia la atmósfera
 k_E , coeficiente de transmisión de vapor de agua del aire que rodea las hojas

dq , diferencia de concentración de vapor de agua, entre las hojas y el aire exterior

dZ , espacio por el que discurre el flujo de vapor. El flujo de vapor de agua en la transpiración se extiende desde las paredes celulares del mesófilo hasta el aire que rodea la cubierta vegetal. Este recorrido involucra el paso a través de distintos medios: a) las cavidades subestomáticas; b) una capa estacionaria de aire, de pocos milímetros a fracciones de milímetro de espesor, en contacto inmediato con la superficie de la hoja, denominada "capa límite" o "capa estática"; c) el aire que circula dentro del cultivo y d) el aire exterior que circunda la cubierta. Así considerada, la transpiración estaría afectada por las siguientes clases de transferencias: a) flujo de tipo laminar, a través de los estomas y capa límite; b) tipo convectivo "libre", en la cual el flujo es

una función primaria del gradiente de densidad del aire, y éste a su vez está en función del gradiente de temperatura; c) convección "forzada", es decir, cuando el flujo es impulsado por el movimiento mismo de las masas de aire. Estas dos últimas clases de transferencia operan en el aire libre, entre y sobre el follaje, siendo la convección forzada la predominante. En cada una de estas etapas se presentan sucesivos obstáculos o "resistencias" a la transferencia de vapor, que afectan el valor del coeficiente de transmisión. Estas resistencias son de distinta naturaleza: - a) la resistencia que ofrecen los poros estomáticos; b) una resistencia al paso a través de la capa estática, en donde el flujo se produce por difusión molecular y c) resistencias aerodinámicas, - de acuerdo al régimen de turbulencia sobre y dentro del cultivo.

Dada la preponderante función que desempeñan las resistencias en el control del flujo transpiratorio, resulta conveniente, tanto conceptual como operacionalmente, adoptar la noción de resistencias aerodinámicas como un recíproco del coeficiente de transmisión. Con esta expresión, la transferencia de vapor de agua - puede cuantificarse y describirse de manera análoga al flujo eléctrico. Según tal analogía, el trayecto del flujo de vapor presenta una disposición de resistencias en "serie", que puede ser descrita por una ecuación de difusión:

$$(10) E = \frac{\rho (q_s - q_a)}{r_e + r_w + r_f + r_a} \text{ gr/cm}^2/\text{min} \quad (\text{Monteith, J.L., 1963})$$

E, transpiración cm/min)

ρ , densidad del aire (1.19×10^{-3} gr/cm³)

q_s , humedad específica a saturación en las hojas (gr vapor/gr aire)

q_a , humedad específica del aire (gr vapor/gr aire)

r_e , resistencia de los estomas (min/cm)

- r_w , resistencia de la capa límite (min/cm)
 r_f , resistencia del aire entre las plantas (min/cm)
 r_a , resistencia del aire sobre el cultivo (min/cm)

A excepción de la resistencia de los estomas, el viento de termina el valor de las demás resistencias, según se describe en las fórmulas siguientes, las cuales ponen de manifiesto, además, la influencia de algunas características de la vegetación:

$$(11) \quad r_f = 1.66 \times 10^{-4} \left\{ \frac{\ln\left(\frac{Z_r - D}{Z_0}\right)}{k U_r} \right\}^2 U_H (1 - e^{-\gamma}) \ln\left(\frac{e^{\gamma} - 1}{e^{\gamma(z/H)} - 1}\right) \text{min/cm} \quad (\text{Norero, 1973b})$$

- U_r , velocidad del viento a una altura de referencia (m/seg)
 U_H , velocidad del viento a la altura del cultivo (m/seg). Se pue de estimar por la fórmula 4 o por el gráfico 7, (Apéndice)
 γ , coeficiente de extinción del viento, de la cubierta vegetal (adimensional). Depende fundamentalmente de la densidad y morfología del follaje. En el Cuadro 5 (Apéndice) se presen tan algunos valores de este coeficiente
 e , base de logaritmos naturales
 Z , altura de las hojas sobre el suelo, cuyo intercambio se de sea calcular (cm)
 H , altura del cultivo (cm)
 Z_r , altura sobre el suelo y por encima del cultivo, que se toma como plano de referencia para el intercambio entre la cubierta vegetal y la atmósfera (normalmente la altura convencio--nal de medición de la temperatura del aire: 200 cm)
 k , constante de von Karman (0.42, adimensional)
 Z_0 , coeficiente de aspereza o rugosidad. Depende en gran medida de las dimensiones del cultivo. Para fines de cálculos estimativos y a falta de información experimental directa, puede asu

mirse un valor de $Z_0 \approx 0.13H$ (cm)
 D, plano de desplazamiento. Es la altura hipotética a la cual se extinguiría el viento según el perfil logarítmico de la distribución de la velocidad del viento sobre el cultivo. Es un parámetro mucho más variable que Z_0 , pero puede aproximarse con una de las relaciones siguientes:
 $D \approx 0.0865xHx U_{10}$, para velocidades de viento mayores de 4 m/s a la altura de 2 m. Para velocidades menores $D \approx .77H$

$$(12) \quad r_a = \frac{\ln\left(\frac{Z_r - D}{Z_0}\right) \ln\left(\frac{Z_r - D}{H - D}\right)}{k^2 U_r} \text{ min/cm (Norero, 1973b)}$$

El significado de los términos y sus unidades son los mismos que en la fórmula anterior.

$$(13) \quad r_w = (4.1)10^{-3} (L/U)^{1/2} \text{ min/cm (Monteith, J.L., 1963)}$$

L, diámetro de la hoja (cm)
 U, velocidad del viento que rodea la hoja en cuestión (m/s)

$$(14) \quad r_e = \frac{1}{1/r_s + 1/r_i} \text{ min/cm (Rose, C.W., 1966)}$$

$$(15) \quad r_s \text{ ó } r_i = (\lambda + \pi a / 2) / (\pi a^2 D_w)$$

r_s y r_i , son las resistencias estomáticas en la epidermis superior e inferior, respectivamente

λ , profundidad del tubo estomático. Puede considerarse semejante en casi todos los cultivos e igual a $1.1(10)^{-3}$ cm

a, diámetro equivalente del estoma; igual al promedio geomé

trico del largo y ancho del poro: $a = (l \times \Delta)^{1/2}$
n, número de estomas por cm^2 de epidermis (cm^{-2})
 D_w , difusividad del vapor de agua a través del aire estático
($14.4 \text{ cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$)

Comúnmente, en especies anfiestomáticas la densidad de estomas (n), e incluso las dimensiones de ellos, son distintas en las dos caras de la hoja. Con frecuencia los valores mínimos de resistencia estomática varían entre $(1)10^{-2}$ y $(3)10^{-2}$ min/cm , cuando los estomas están completamente abiertos. Es decir, su magnitud es aproximadamente del mismo orden o incluso mayor que los de las resistencias de la capa límite y aerodinámica. Cuando por insuficiencia de agua o de luz los estomas están sólo parcialmente abiertos, su magnitud puede exceder bastante el de las otras resistencias. Entonces asume un papel preponderante en la transpiración.

Las resistencias descritas pueden agruparse en un solo término:

$$(16) \quad r_E = r_e + r_f + r_a + r_w$$

en donde r_E engloba el conjunto de resistencias a la difusión del vapor de agua, desde el interior de la hoja la altura dada de referencia sobre el cultivo. Así, la transpiración, por unidad de superficie foliar y tiempo, se expresa:

$$(17) \quad E = (dq/r_E) \text{ gr/cm}^2/\text{min}$$

Para representar la transpiración global de una cubierta vegetal, es necesario introducir otro término, el índice

de área foliar, F :

$$F = (n A_h) / A$$

- F , índice de área foliar, área foliar total por unidad de superficie de terreno
 A_h , área promedio de una hoja
 n , número total de hojas
 A , área de terreno que sustenta una planta

Cada hoja del follaje es un paso alternativo a la salida del vapor, desde el cultivo al aire exterior. De donde, usando la analogía eléctrica, las resistencias de las hojas actúan en "paralelo" al determinar la resistencia total. Es decir, si existen $1, 2, 3, 4, \dots, n$, hojas:

$$(18) r_{Ec} = \frac{1}{\frac{1}{r_{E_1}} + \frac{1}{r_{E_2}} + \dots + \frac{1}{r_{E_n}}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{r_{E_i}}} \approx \frac{1}{\frac{1}{\bar{r}_E} F} = \frac{1}{F/\bar{r}_E} = \bar{r}_E / F$$

Por lo tanto, la resistencia global de la cubierta vegetal, r_{Ec} , es:

$$(19) r_{Ec} = \bar{r}_E / F, \text{ donde } \bar{r}_E \text{ es la resistencia promedio ponderado de las diferentes hojas.}$$

Además, puede demostrarse que la resistencia promedio ponderada de las hojas, \bar{r}_E , (o r_E , simplemente) es:

$$(20) r_E = \frac{r_{E(o)} - r_{E(H)}}{\ln \left\{ \frac{r_{E(o)}}{r_{E(H)}} \right\}} \quad (\text{Norero, 1973a.})$$

donde $r_{E(H)}$ y $r_{E(o)}$ son, respectivamente, las resistencias al flujo de vapor de las hojas más expuestas del cultivo, a la altura H del mismo, y de las hojas en el extremo inferior de las

plantas, cerca del suelo. Finalmente, en el caso de abundante - provisión de agua y una apertura total de los estomas, o sea que la transpiración de la cubierta, E_c , alcanza su máxima intensidad, E_{mx} , puede escribirse:

$$(21) \quad E_c = E_{mx} = \rho \frac{(q_s - q_a)}{r_{Ec}} = \rho \left\{ \frac{\ln r_{E(o)}/r_{E(H)}}{r_{E(o)} - r_{E(H)}} \right\} (q_s - q_a) F$$

Hasta aquí, el análisis se ha limitado al aspecto aerodinámico del proceso transpiratorio, en el cual se ha destacado - la influencia de las características morfológicas del cultivo y un solo factor climático: el viento. A continuación se analiza la influencia de otros factores climáticos, no menos importantes, englobados en el término $(q_s - q_a)$, la diferencia de concentración de vapor de agua entre el interior de la hoja q_s , y el aire exterior, q_a .

2. Balance de energía

Para los fines de este análisis, es preciso aceptar que la humedad específica en el interior de las hojas corresponde a su valor en condiciones de saturación (Slatyer, 1967). En este caso, el cálculo se reduce a la estimación de la temperatura de las hojas pues aquella depende de ésta por una función bien establecida (fórmula 37, gráfico 10 Apéndice).

En un instante dado, a la altura Z dentro de una cubierta vegetal, el balance de radiación de una superficie horizontal será:

$$(22) \quad R_{N(z)} = R_s + \overset{at}{R_{L\downarrow}} + \overset{s}{R_{L\downarrow}} - R_{L(z)} \left(\frac{\text{cal}}{\text{cm}^2 \text{ min}} \right) \quad (\text{Sellers, W.D., 1965})$$

$R_{N(z)}$, radiación neta a la altura Z dentro del cultivo
 R_s , radiación solar
 $R_{L\downarrow}$, radiación de onda larga proveniente de la atmósfera (at) y del suelo (s), hacia el plano en Z
 $R_{L\uparrow}$, radiación de onda larga emitida por la cubierta vegetal en Z hacia la atmósfera y hacia el suelo

La radiación solar y la radiación de onda larga de la atmósfera a la altura Z, serán iguales a una fracción de la radiación solar y atmosférica a la altura H del cultivo, de acuerdo con las propiedades de extinción a medida que penetran el follaje. La extinción sigue la Ley de Beer y se describe así:

$$(23) \quad R_{s(z)} + {}^{at}R_{L\downarrow}(z) = \left[(1-\alpha)R_s(H) + {}^{at}R_{L\downarrow} \right] e^{-KF} \quad (\text{Inoue, E., 1963})$$

e, es la base de logaritmos naturales
 α , coeficiente de reflexión de la radiación solar
K, coeficiente de extinción de radiación global, característico del cultivo.

El coeficiente K está determinado en gran parte por la disposición e inclinación de las hojas y algo por las propiedades ópticas de las mismas (transmisividad, por ejemplo). En cultivos herbáceos, el coeficiente K suele tener valores de .3 a .5 en cubiertas de hojas erectas, y .7 a 1. en cubiertas de hojas más bien horizontales (Monteith, J.L. 1969). Se le puede estimar según la fórmula siguiente:

$$(24) \quad K = (1-t)\cos i \quad (\text{Chartier, P., 1967})$$

t, transmisividad de las hojas
i, inclinación de las hojas

Por diferir en sus valores de K, los cultivos varían notablemente en su capacidad de interceptar la luz solar. Además, la proporción de radiación solar interceptada por el cultivo varía con el desarrollo, como resultado de cambios en densidad fo- liar y disposición del follaje. Por otra parte, la emisión de onda larga que se recibe del suelo será igual a una fracción de la que se produce en la superficie misma del suelo, $s_{R_L(0)}$, fracción que también depende de la magnitud de la obstrucción del follaje entre $Z=0$ y la altura dada, Z :

$$(25) \quad s_{R_L(z)}^{\downarrow} = s_{R_L(0)} e^{-K(F-F_z)} = (a+bt_s) e^{-K(F-F_z)}$$

El paréntesis $(F-F_z)$ corresponde a la densidad foliar entre la superficie del suelo, sobre la que se encuentra acumulado todo el follaje (F) y el plano a la altura Z, donde la densidad foliar acumulada es F_z , desde H. t_s es la temperatura de la superficie del suelo bajo el cultivo; a y b son constantes (.4 y .0075 respectivamente).

La emisión de onda larga del follaje a la altura Z hacia la atmósfera o hacia el suelo $R_L(z)$ se verá obstruída en la misma magnitud que la de éstas hacia el interior del follaje, o sea:

(a) hacia la atmósfera será:

$$(26) \quad R_L^{\uparrow} = (a+bt_h) e^{-KF(z)}$$

(b) hacia el suelo será:

$$(27) \quad R_L^{\downarrow} = (a+bt_h) e^{-K(F-F_z)}$$

t_h es la temperatura de las hojas a la altura Z.

El balance de radiación a la altura Z, puede expresarse entonces más explícitamente que en (22), como sigue:

$$(28) R_{N(z)} = \left[(1-\alpha)R_{s(H)} + at_{R_L \downarrow} \right] e^{-KF} + (a+bt_s)e^{-K(F-F_z)} - (a+bt_h)e^{-KF} \dots$$

$$\dots - (a+bt_h)e^{-K(F-F_z)}$$

La ecuación (28) se refiere a la radiación neta de un plano horizontal a la altura Z. Por cierto, las hojas tienen una inclinación característica, frecuentemente distinta de la horizontal. Además, es preciso referirse a los intercambios de energía y materia por unidad de área foliar y no por unidad de área de terreno. Para lograr esto se debe derivar la ecuación (28) respecto del índice de área foliar y obtener:

$$(29) \frac{dR_{N(z)}}{dF} = R'_{N(z)} \text{ cal/cm}^2 \text{ hoja/min}$$

por lo tanto, (28) se transforma en:

$$(30) R'_{N(z)} = \left[(1-\alpha)R_s + \frac{at}{R_L \downarrow} \right] Ke^{-KF_z} + (a+bt)Ke^{-K(F-F_z)} - (a+bt)Ke^{-KF_z} \dots$$

$$\dots - (a+bt_h)Ke^{-K(F-F_z)}$$

Ahora bien, de acuerdo con el balance de energía:

$$(31) R'_{N(z)} = LE(z) + Q(z)$$

LE, calor latente de transpiración por unidad de área foliar y tiempo, en Z

Q, difusión de calor, por unidad de área foliar y tiempo, en Z.

La difusión de calor es un proceso semejante al de transferencia de vapor, según se expresa en la siguiente ecuación:

$$(32) \quad Q = \rho C \frac{(t_h - t_a)}{r_h + r_f + r_a} \text{ cal/cm}^2/\text{min} \quad (\text{Slatyer, R.O., 1967})$$

t_h , temperatura foliar ($^{\circ}\text{C}$)

t_a , temperatura del aire ($^{\circ}\text{C}$)

C , calor específico del aire (.242 cal/gr grado)

r_h , resistencia aerodinámica de la capa límite al flujo calórico (min/cm)

r_a y r_f son las mismas resistencias ya descritas para el flujo de vapor.

r_h se describe por la fórmula (33), que pone de manifiesto, nuevamente, la influencia del viento y del cultivo:

$$(33) \quad r_h = (5)10^{-3} (L/U)^{1/2} \text{ min/cm} \quad (\text{Slatyer, R.O., 1967})$$

L y U ya identificados al tratarse del flujo de vapor. La suma de las resistencias al flujo calórico puede reunirse en un solo término:

$$(34) \quad r_H = r_h + r_f + r_a$$

Una vez aclarado lo anterior, LE y H pueden expresarse así:

$$(35) \quad LE = L \rho \frac{q_h - q_a}{r_E} = (L \rho / r_E) q_h - (L \rho / r_E) q_a$$

$$(36) \quad Q = C \rho \left(\frac{t_h - t_a}{r_H} \right) = (C \rho / r_H) t_h - (C \rho / r_H) t_a$$

Las ecuaciones (30), (31), (35) y (36) pueden combinarse y manipularse algebraicamente para expresar la temperatura en Z - en función de las variables meteorológicas y del cultivo, produciendo una expresión como la que sigue:

$$(37) \quad m = A \cdot q_h(\text{sat}) + t_h = A \cdot f(t_h) + t_h \quad (\text{Norero, 1973a})$$

El término "m" es igual a:

$$(38) \quad m = \frac{r_H (1-\alpha) R_s + \alpha t_{R_L} \downarrow - a K e^{-K F_z} + r_H b K e^{-K(F-F_z)} t_s + C_f t_a + (r_H/r_E) L f q_a}{\left\{ C_f + \left[e^{-K F_z} + e^{-K(F-F_z)} \right] K b r_H \right\}} \quad (\text{Norero, 1973})$$

y el término "A" es igual a:

$$(39) \quad A = \frac{r_H/r_E}{I} \times \frac{L f}{\left\{ C_f + \left[e^{-K F_z} + e^{-K(F-F_z)} \right] K b r_H \right\}} \quad (\text{Norero, 1973})$$

El término "m", ecuación (37), reúne todas las variables - meteorológicas y del cultivo que afectan la temperatura en las hojas. Por eso puede definirsele como "Complejo fitometeorológico". Por su parte, la fracción que afecta a $f(t_h)$ en el lado derecho - de la ecuación (37) expresa una relación de parámetros involucrados en los intercambios de energía radiante, calórica y de vapor de agua. La función de t_h en (37), o sea la humedad específica a saturación, es una función exponencial:

$$(40) \quad m = A \cdot 0.1237 t_h^{1.5877} + t_h \quad (\text{Norero, 1973a.})$$

La fórmula (40) es una ecuación sin solución matemática directa, pero puede converger rápidamente a través del método iterativo de Newton Raphson. Resuelto t_h , se obtendrá el valor de q_s :

$$(41) \quad q_s = 0.1237t^{1.5877}$$

La ecuación (38) puede simplificarse si es aceptable suponer que el intercambio neto de radiación de onda larga entre el suelo y la cubierta vegetal es casi cero. Entonces:

$$(42) \quad m = \frac{r_H \left[(1-\alpha)R_s + \rho_L R_L - a \right] K_e^{-KFz} + C \rho t_a + (r_H/r_E) L \rho q_a}{(C \rho + K_e)^{-KFz} r_H}$$

$$(43) \quad A = \frac{(r_H/r_E)}{1} \times \frac{L \rho}{(C \rho + K_e)^{-KFz} r_H}$$

Las ecuaciones (38) y (42) requieren datos obtenidos directamente en estaciones meteorológicas convencionales (temperatura, viento, humedad relativa, radiación solar global) o susceptibles de estimarse (radiación solar y atmosférica); también necesitan información referente al cultivo. Más precisos resultarían los cálculos si se contara con la medida directa de la radiación neta sobre el cultivo, en vez de deducirla. En cuyo caso, la ecuación (38) se reduciría a:

$$(44) \quad m = r_H/C \rho R_N + (r_H/r_E)(L/C)q_a + t_a$$

$$(45) \quad A = (r_H/r_E)(L/C)$$

Aplicando todo lo anterior al caso de la transpiración global de la cubierta vegetal, la ecuación (38) se convierte en:

$$(46) \quad m_c = \frac{r_{H(H)} K R_N \left\{ \left(\frac{r_{H(O)}}{r_{H(H)}} \right) e^{-KF} - 1 \right\}}{C \rho \left\{ \ln \left(\frac{r_{H(O)}}{r_{H(H)}} \right) - KF \right\}} + (r_H/r_E)(L/C) q_a + t_a$$

$$(47) \quad A_c = (r_H/r_E)(L/C)$$

3. Evaporación máxima del suelo bajo un cultivo

La energía disponible para evaporar agua desde el suelo - bajo las plantas es igual a la diferencia entre la radiación neta del terreno cultivado y aquélla utilizada por las plantas en evaporar agua (transpirar) y disipar calor.

Puesto que la radiación se extingue exponencialmente a través de los distintos estratos foliares, cabe esperar en determinado momento una extinción total de la radiación solar en los estratos inferiores, aún cuando en los estratos superiores exista la suficiente energía para mantener la transpiración. Consecuentemente, la evaporación del suelo está afectada prácticamente por las mismas restricciones a que están sometidas las hojas más próximas al suelo, en lo referente a las disponibilidades de energía.

Por otra parte, el trayecto recorrido por una molécula de vapor, desde que se desprende de la superficie del suelo hasta - llegar al aire exterior sobre el cultivo, es aproximadamente el mismo que el de una molécula de vapor que emerge de la superficie de una hoja en contacto con el suelo, o muy cerca de él. Las resistencias aerodinámicas serán entonces las mismas para uno u otro caso, lo cual permite adoptar una formulación común para ambas situaciones. La ecuación (21) quedaría modificada así:

$$(48) \quad E_s = \rho \left\{ \frac{q_{(o)} - q_a}{r_{E(o)}} \right\}$$

E_s , evaporación máxima del suelo bajo el cultivo
 q_o , humedad específica a saturación, en las hojas inferiores
 $r_{E(o)}$, suma de las resistencias al flujo de vapor, desde las hojas inferiores.

En igual forma que para toda la cubierta vegetal, la humedad específica de las hojas al nivel del suelo es una función de la temperatura:

$$(49) \quad q_{(o)} = 0.1237 t_{(o)}^{1.5877}$$

$t_{(o)}$, es la temperatura de las hojas al nivel del suelo, que es a su vez función de $m_{(o)}$ y $A_{(o)}$:

$$(50) \quad t_{(o)} = m_{(o)} - A_{(o)}^{0.1237 t_{(o)}^{1.5877}}$$

$$(51) \quad m_{(o)} = \frac{r_{H(o)} K R_N e^{-KF}}{C \rho} + \frac{r_{H(o)} L}{r_{E(o)} C} q_a + t_a$$

$$(52) \quad A_{(o)} = \frac{r_{H(o)} L}{r_{E(o)} C}$$

cuyos términos ya fueron descritos. Finalmente, la evapotranspiración máxima de un terreno cultivado es la suma de las respectivas evaporaciones máximas del cultivo y del suelo:

$$(53) \quad ET_{mx} = E_{Smx} + E_{Cmx}$$

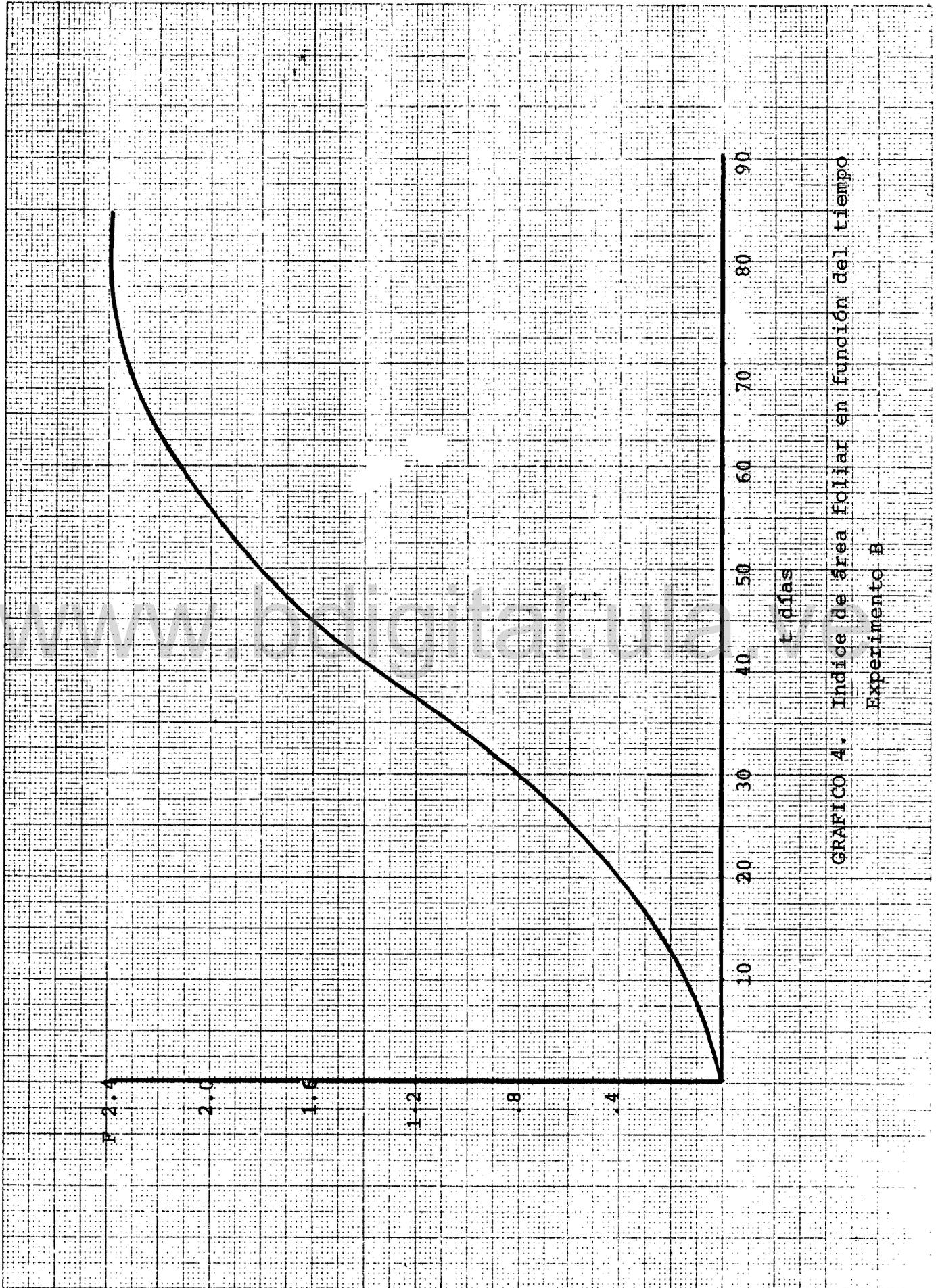


GRAFICO 4. Índice de área foliar en función del tiempo Experimento B

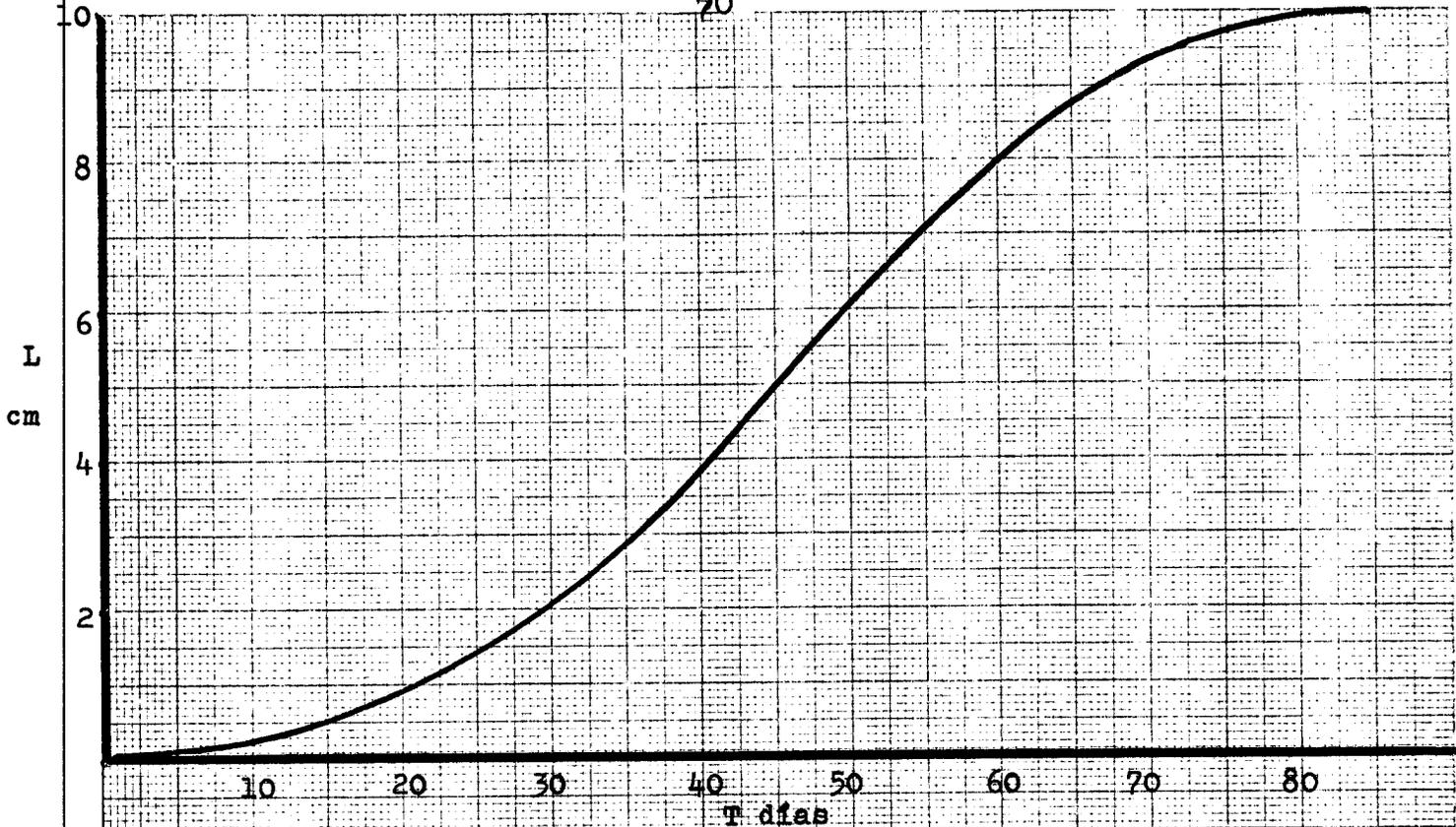


Gráfico 5.- Anchura foliar en función del tiempo Experimento B

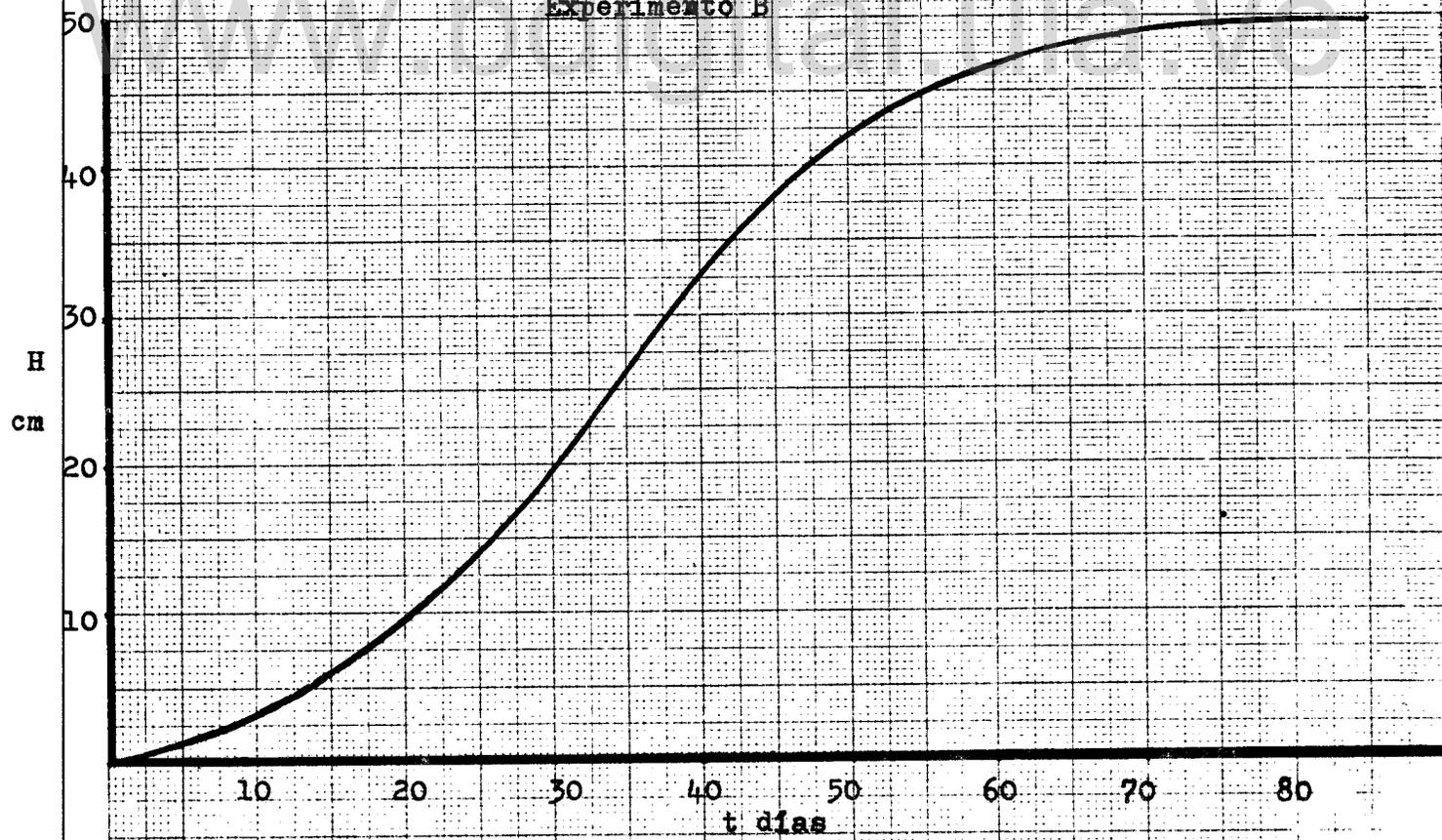


Gráfico 6.- Altura del cultivo en función del tiempo Experimento B

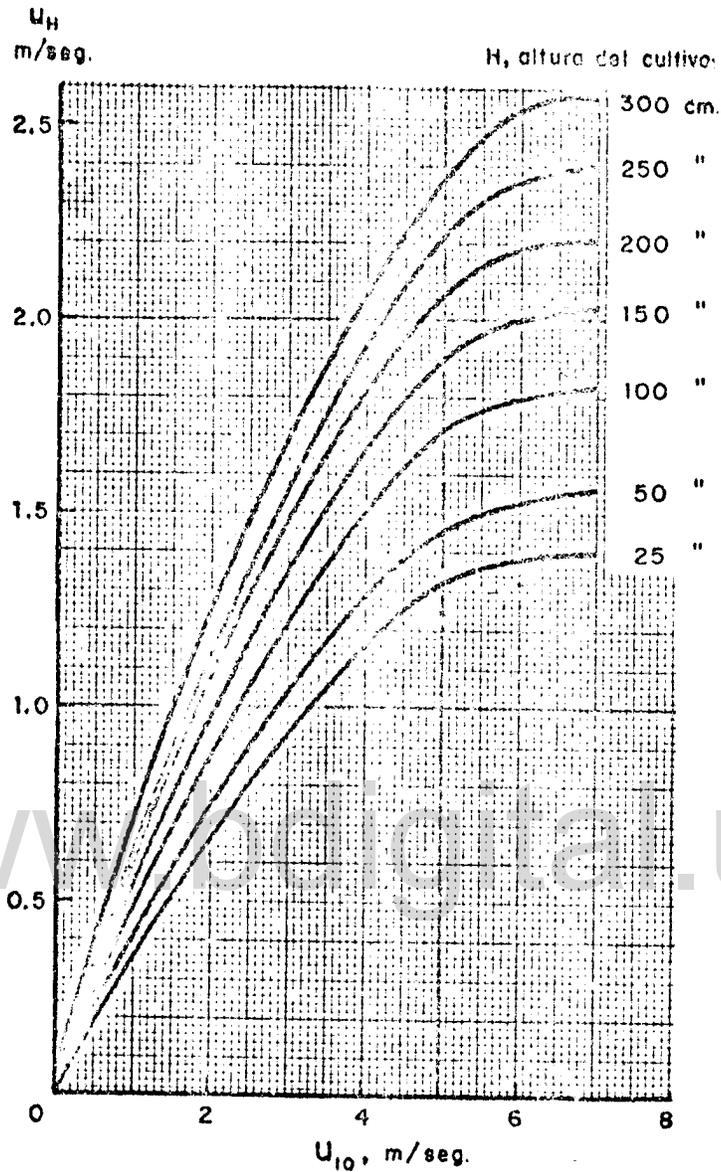


Gráfico 7 Velocidad del viento estimada a nivel de cultivo en función del viento a 10 m y de la altura de las plantas, según Fórmula 4 (Nórrero, A., 1973b)

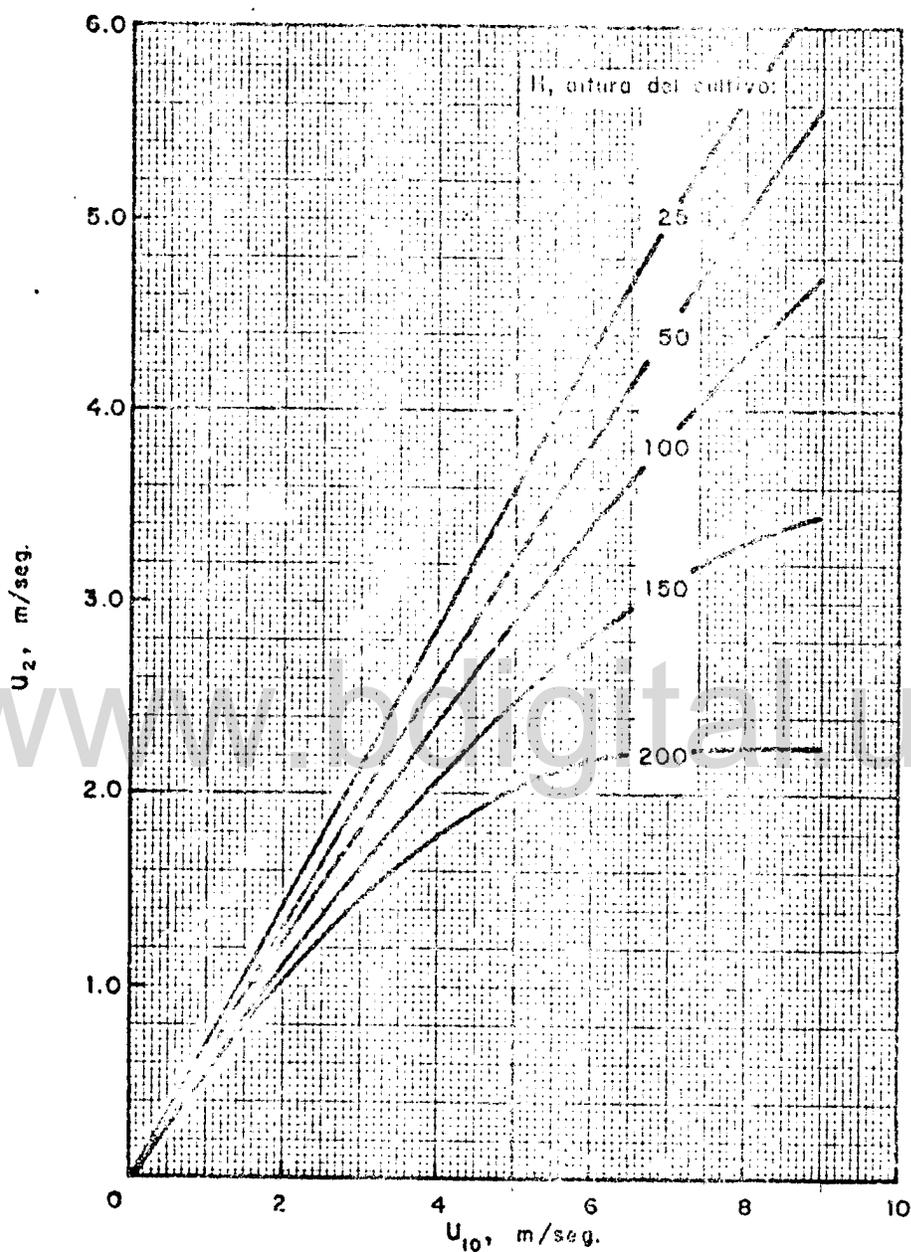


Gráfico 8. Velocidad del viento estimada a 2 metros de altura sobre el suelo, en función de la altura del cultivo y del viento a 10 metros, según Fórmula 5. (Norero, A., 1973b)

Cuadro 5

Estimación del valor del coeficiente de
extinción del viento a los fines de
cálculos agrofísicos⁺

Densidad ⁺⁺ de siembra	H A B I T O		F O L I A R
	Vertical	Semivertical	Horizontal
Densa	3.0	3.5	4.0
Moderadamente densa	2.5	3.0	3.5
Poco densa	2.0	2.5	2.5

⁺Tomado de Norero, A. (1973b)

⁺⁺Para los efectos de definir la densidad se ha seguido el siguiente criterio simplificador:

Denso: El follaje de plantas contiguas se topan o yuxtaponen

Moderadamente denso: la distancia entre las hojas de plantas contiguas oscila entre un décimo y una tercera parte de la distancia entre plantas.

Poco denso: la distancia media entre las hojas de plantas vecinas oscila entre un tercio y tres cuartos de la distancia entre plantas.

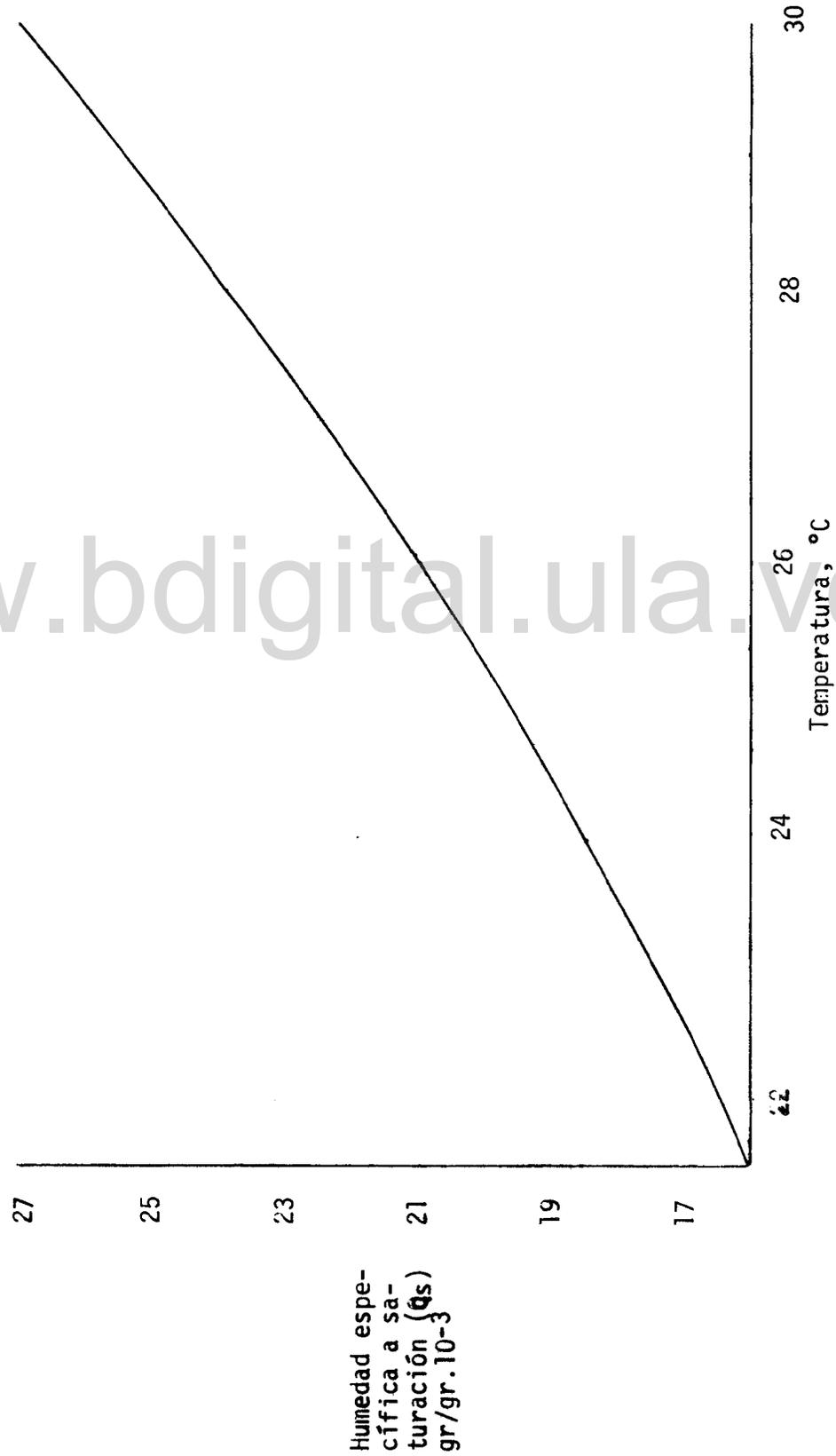


Gráfico 10. Relación entre la temperatura y la humedad específica, según Fórmula (37)

Cuadro 10.- Análisis estadístico
Experimento B

ANALISIS ESTADISTICO

ET CALC	ET MEDIDA	ETC.ETM	(ETM)2
4.19000	4.85000	20.32149	23.52249
5.12000	5.30000	27.13599	28.08998
2.54000	3.13000	7.95020	9.79689
4.18000	4.56000	19.06079	20.79359
5.00000	5.55000	27.74998	30.80249
3.81000	4.38000	16.68779	19.18439
3.35000	2.88000	9.64799	8.29439
4.85000	4.12000	19.98199	16.97440
3.43000	3.08000	10.56440	9.48640
4.31000	4.42000	19.05019	19.53639
1.97000	2.59000	5.10230	6.70810
4.02000	3.94000	15.83880	15.52360
2.92000	3.82000	11.15440	14.59240
2.17000	2.71000	5.88070	7.34409
3.60000	3.51000	12.63599	12.32009
3.90000	3.05000	11.89500	9.30250
SUMA=	59.35992	61.88989	240.65794
			252.27213

DESV ST(ETC)= 1.5213

Cuadro 11-
ANALISIS ESTADISTICO
Experimento A

ET CALC	ET MEDIDA	ETC.ETM	(ETM)2
9.19347	9.26417	85.16989	85.82483
9.33045	9.57134	89.30490	91.61050
9.41084	9.03072	84.98663	81.55394
8.96087	8.15837	73.10606	66.55894
8.13746	7.06485	57.48993	49.91212
4.72874	5.13584	24.28604	26.37685
5.40756	5.84847	31.62596	34.20457
6.12257	6.24164	38.21486	38.95808
7.00485	7.47031	52.32841	55.80556
7.52629	8.07236	60.75488	65.16299
8.10218	8.55154	69.28616	73.12886
8.86730	8.88328	78.77071	78.91270
8.90695	9.48533	84.48538	89.97148
9.57204	9.52219	91.14677	90.67212
9.85502	9.48533	93.47807	89.97148
9.76167	9.33789	91.15337	87.19620
9.64098	9.22731	88.96028	85.14325
8.97527	8.25666	74.10579	68.17245
8.11659	7.06485	57.34248	49.91212
3.31686	3.05939	10.14757	9.35985
4.19775	4.09147	17.17496	16.74011
4.81837	4.86553	23.44391	23.67339
5.73215	5.54130	31.76357	30.70601
6.27133	6.13106	38.44992	37.58990
6.65785	6.84369	45.56424	46.83609
7.08872	7.26144	51.47432	52.72849
7.27700	7.74062	56.32851	59.91719
7.51051	7.81434	58.68965	61.06390
7.63138	7.60547	58.04022	57.84311
7.17745	7.50717	53.88234	56.35762
6.86171	7.02799	48.22403	49.39265
6.10746	5.95905	36.39464	35.51025
5.93170	5.46758	32.43205	29.89444
3.43463	3.45256	11.85828	11.92018
3.65855	4.01775	14.69913	16.14230
3.98151	4.31263	17.17078	18.59877
4.07915	4.47236	18.24344	20.00198
4.03591	4.43550	17.90125	19.67363
4.08615	4.38635	17.92329	19.24007
3.99365	4.09147	16.33989	16.74011

continúa.../

/...continuación Cuadro 11.-

ETC	ETM	ETC.ETM	(ETM) ²
9.16827	9.15359	83.92253	83.78821
9.64555	9.42390	90.89868	88.80984
9.98411	9.68192	96.66536	93.73953
10.34601	10.12424	104.74551	102.50021
10.37960	10.49284	108.91148	110.09970
10.15087	10.68943	108.50702	114.26385
10.20639	10.38226	105.96535	107.79132
9.91764	10.12424	100.40854	102.50021
9.63692	9.49762	91.52782	90.20473
8.79623	8.67441	76.30208	75.24536
8.41517	7.92492	66.68951	62.80435
7.09378	6.73311	47.76321	45.33476
4.29505	4.65666	20.00056	21.68446
5.24367	5.54130	29.05675	30.70601
6.08810	6.40137	38.97218	40.97752
7.04156	7.51946	52.94875	56.54227
8.01717	8.40410	67.37711	70.62891
8.52734	9.11673	77.74147	83.11475
8.92133	9.41161	83.96410	88.57840
8.80611	9.30103	81.90590	86.50916
8.79745	9.33789	82.14964	87.19620
8.83592	9.19045	81.20602	84.46436
8.39188	8.89557	74.65051	79.13115
7.58320	8.55154	64.84807	73.12886
6.91347	7.88806	54.53386	62.22148
6.48470	6.91741	44.85730	47.85057
5.75460	6.06963	34.92825	36.84038
6.57749	5.54130	36.44781	30.70601
7.53919	7.02799	52.98535	49.39265
8.51740	8.36724	71.26714	70.01073
9.10259	8.82185	80.30167	77.82503
9.59081	9.22731	88.49733	85.14325
10.12836	9.48533	96.07082	89.97148
10.01008	9.71878	97.28572	94.45464
9.52001	9.81707	93.45859	96.37489
8.99148	9.52219	85.61856	90.67212
8.23341	9.22731	75.97221	85.14325
8.23877	9.04301	74.50331	81.77602
7.76287	8.63755	67.05217	74.60724
6.71593	7.65461	51.40787	58.59308
6.02969	6.58567	39.70955	43.37103

SUMA= 611.86499 620.53467 4984.14063 5053.64063

DESV ST(ETC)= 1.9596

CUADRO 12. Programa de Computación para el cálculo de la evapotranspiración de un cultivo, según el modelo agrofísico de Norero.

```

DIMENSION RHO(100),RHH(100),REH(100),REO(100),T(100),Q(100),RN(100
6),F(100),UD(100),H(100),STL(100),QS(100),REP(100),TC(100),CM(100),
6AC(100),ESL(100),QO(100),TO(100),OM(100),AO(100),TL(100),ETC(100),
6ETM(100),RHP(100),X(100),Y(100),XY(100),Y2(100),          VD(100)
6,D(100),U2D(100),RF(100),HH(100),UH(100),HO(100),A(100),WH(100)
6,WO(100)
J=100
M=1
N=33
DO 19 I=M,N
  READ(1,11) UD(I),U,V,V1,          S,Z,ETM(I),F(I),D(I),H(I),VD(I)
6,RN(I),T(I)
11 FORMAT(F5.3,F6.3,F6.2,2F5.2,F4.0,2F5.2,2F5.1,F6.2,F5.3,F5.1)
  Q(I)=VD(I)*.628
19 U2D(I)=UD(I)/.93
75 WRITE(3,41)
41 FORMAT(1H1,50X,'DATOS FITOMETEOROLOGICOS',///,'GAMMA=',/,'K=',/,
6'R. ESTOMAS=',///,29X,'(1) U2',3X,'(2) QA',3X,'(3) TA',3X,'(4) RN'
6,2X,'(5) ETM',4X,'(6) L',4X,'(7) H',4X,'(8) F',//)
DO 21 I=M,N
21 WRITE(3,42)U2D(I),Q(I),T(I),RN(I),ETM(I),D(I),H(I),F(I)
42 FORMAT(26X,8F9.3)
  WRITE(3,43)
43 FORMAT(///,'U2=VELOCIDAD DEL VIENTO A 2M (M/SEG)',/,'QA=HUMEDAD ESP
6ECIFICA DEL AIRE (G/G)X10-3',/,'TA=TEMPERATURA DEL AIRE (GRADOS C)
6',/,'RN=RADIACION NETA (CAL CM-2 MIN-1)',/,'ETM=ET MEDIDA (MM/DIA)
6',/,'L=ANCHURA FOLIAR (CM)',/,'H=ALTURA DEL CULTIVO (CM)',/,'F=IND
6ICE DE AREA FOLIAR',/,'GAMMA=COEFICIENTE DE EXTINCION DEL VIENTO',
6/, 'K=COEFICIENTE DE EXTINCION DE RADIACION',/,'R. EST=RESISTENCIA
6ESTOMATAL (MIN/CM)',///)
  CALL RESIST(U2D,REO,REH,REP,N,J,
6F,H,D,M,RHH,RHO,RHP,RF,HH,UH,HO,A,WH,WO)
  WRITE(3,44)
44 FORMAT(///,49X,'RESISTENCIAS (MIN/CM)',//,3X,'(1) UH',3X,'(2) RF',
63X,'(3) RA',2X,'(4) RWH',2X,'(5) RWO',3X,'(6) HH',3X,'(7) HO',2X,
6'(8) REH',2X,'(9) REO',2X,'(10) RE',2X,'(11)RHH',2X,'(12) RHO',2X,
6'(13) RH',//)
DO 22 I=M,N
22 WRITE(3,45)UH(I),RF(I),A(I),WH(I),WO(I),HH(I),HO(I),REH(I),REO(I)
6,REP(I),RHH(I),RHO(I),RHP(I)
45 FORMAT(13F9.4)
  WRITE(3,46)
46 FORMAT(///,'UH=VELOCIDAD DEL VIENTO A LA ALTURA DEL CULTIVO (M/S)',
6/, 'RF,RA=RESISTENCIA DEL AIRE DENTRO Y SOBRE EL CULTIVO',
6/, 'RWH,RWO=RESISTENCIA DE LA CAPA LIMITE AL FLUJO DE VAPOR EN LAS
6HOJAS SUPERIORES E INFERIORES',
6/, 'HH,HO=RESISTENCIA DE LA CAPA LIMITE AL FLUJO DE CALOR EN LAS HO
6JAS SUPERIORES E INFERIORES',
6/, 'REH,REO=RESISTENCIA TOTAL AL FLUJO DE VAPOR EN LAS HOJAS SUPERI
6ORES E INFERIORES',
6/, 'RHH,RHO=RESISTENCIA TOTAL AL FLUJO DE CALOR EN LAS HOJAS SUPERI
6ORES E INFERIORES',
6/, 'RE,RH=RESISTENCIA PROMEDIO AL FLUJO DE VAPOR Y DE CALOR',///)
777 AK=.8

```

```

RTRAN IV 360N-FO-479 3-5          MAINPGM          DATE 21/06/74          TIME
14 DO 99 I=M,N
   X(I)=RHO(I)/RHH(I)
   CM(I)=((RHH(I)*34.4828*AK*RN(I))*((RHO(I)/RHH(I))/EXP(AK*F(I))-1.)
6/(ALOG(X(I))-AK*F(I)))+(RHP(I)/REP(I))*2.421*Q(I)+T(I)
   AC(I)=(RHP(I)/REP(I))*2.421
99 CONTINUE
   CALL TEMP(AC,CM,TC,N,T,J,M)
   DO 199 I=M,N
3   QS(I)=.1237*TC(I)**1.5877
   TL(I)=(.7032*F(I)*(QS(I)-Q(I)))/REP(I)*.1*12.2867
   OM(I)=RHO(I)*34.4828*AK*RN(I)/EXP(AK*F(I))+(RHO(I)/REP(I))*2.421*
6(I)+T(I)
   AO(I)=(RHO(I)/REP(I))*2.421
199 CONTINUE
   CALL TEMP(AO,OM,TO,N,T,J,M)
   DO 299 I=M,N
2   QO(I)=.1237*TO(I)**1.5877
   ESL(I)=(.7032*(QO(I)-Q(I)))/REP(I)*.1*12.2867
   ETC(I)=ESL(I)+TL(I)
299 CONTINUE
51 WRITE(3,47)
47 FORMAT(///,49X,'COMPLEJO FITOMETEOROLOGICO',///,21X,'(1) AC',2X,
6'(2) AD',2X,'(3) MC',2X,'(4) MO',2X,'(5) TC',2X,'(6) TO',2X,
6'(7) QS',2X,'(8) QO',2X,'(9) LT',1X,'(10)LES',1X,'(11)ETC',//)
   DO 23 I=M,N
23 WRITE(3,48)AC(I),AO(I),CM(I),OM(I),TC(I),TO(I),QS(I),QO(I),TL(I),
6ESL(I),ETC(I)
48 FURMAT(19X,11F8.3)
   WRITE(3,49)
49 FORMAT(///,'AC,AD,MC,MO=COMPLEJO FITOMETEOROLOGICO',
6/,'TC,TO=TEMPERATURA DEL CULTIVO Y DE LAS HOJAS INFERIORES (C)',
6/,'QS,QO=HUMEDAD DEL CULTIVO Y DE LAS HOJAS INFERIORES X(10)3',
6/,'LT,LES=EVAPORACION DEL SUELO Y DEL CULTIVO (CAL CM-2 MIN-1)',
6/,'ETC=EVAPOTRANSPIRACION CALCULADA (MM/DIA)',///)
   M=34
   N=49
   READ(1,10,END=200)(ETC(I),ETM(I),I=M,N)
10 FORMAT(16F5.2)
200 CALL TEST(ETC,ETM,DETC,T3,SUMX,SUMY,SUMXY,SUMY2,N,M,J,XY,Y2)
   WRITE(3,32)
32 FORMAT(1H1,52X,'ANALISIS ESTADISTICO',///,43X,'ET CALC',3X,'ET ME
6IDA',5X,'ETC.ETM',5X,'(ETM)2',///)
15 DO 69 I=M,N
69 WRITE(3,33) ETC(I),ETM(I),XY(I),Y2(I)
33 FORMAT(39X,4F12.5)
   WRITE(3,34) SUMX,SUMY,SUMXY,SUMY2,DETC,T3
34 FORMAT(///,34X,'SUMA=',4F12.5,///,39X,'DESV ST(ETC)=' ,F7.4,///,40X,
6'T CALCULADA=',F10.7)
501 STOP
   END

```

TRAN IV 360N-FO-479 3-5 RESIST DATE 21/06/74 TIME

```

SUBROUTINE RESIST(U2,EO,EH,EP,N,J,F,H,D,M,
6RHH,RHO,RHP,RF,HH,UH,HU,A,WH,W0)
DIMENSION U2(J), RF(J),UH(J),A(J),WH(J),W0(J),EO(J),EH(J),
6EP(J), F(J),H(J),D(J),HH(J),HO(J),RHH(J),RHO(J),RHP(J)
E=.006
G=3.
AK=.8
DO 29 I=M,N
U10=U2(I)*((ALOG(7700./H(I)-5.92))/ALOG(1540./H(I)-5.92))
UH(I)=U10*((ALOG(7.7-.665*U10))/(ALOG(7700./H(I)-.665*U10)))
F1=U2(I)/ALOG(1540./H(I)-5.92)
F2=.00092/F1
RF(I)=F2/F1*UH(I)*(1.-1./EXP(G))*ALOG((EXP(G)-1.)/(EXP(G*.1)-1.))
A(I)=F2*ALOG(870./H(I)-3.35)
WH(I)=.0041*SQRT(D(I)/UH(I))
W0(I)=WH(I)*EXP(.45*G)
EO(I)=(E+W0(I)+RF(I)+A(I))*100.
EH(I)=(E+WH(I)+A(I))*100.
HH(I)=1.2195*WH(I)
HO(I)=1.2195*W0(I)
RHH(I)=(A(I)+HH(I))*100.
RHO(I)=(A(I)+HO(I)+RF(I))*100.
RHP(I)=(RHO(I)-RHH(I))/ALOG(RHO(I)/RHH(I))
29 EP(I)=(EO(I)-EH(I))/ALOG(EO(I)/EH(I))
RETURN
END

```

RTRAN IV 360N-FO-479 3-5 TEMP DATE 21/06/74 TIME

```

SUBROUTINE TEMP(AX,XM,TX,N,T,J,M)
DIMENSION AX(J),XM(J),TX(J),T(J)
DO 88 I=M,N
T1=T(I)
10 F=AX(I)*.1237*T1**1.5877+T1-XM(I)
FP=AX(I)*.1964*T1**0.5877+1.
TX(I)=T1-F/FP
IF(ABS(T1-TX(I)).LT.0.1) GO TO 11
T1=TX(I)
IF(TX(I).LT.0.01) T1=T(I)+4.5-TX(I)/10.
GO TO 10
11 IF(TX(I).GT.0.0)GO TO 88
TX(I)=-TX(I)
88 CONTINUE
RETURN
END

```

TRAN V 360N-FO-479 3-5

TEST

DATE 21/06/74 TIME

13.50

```

SUBROUTINE TEST(X,Y,DES,T3,SUMX,SUMY,SUMXY,SUMY2,N,M,J,XY,Y2)
DIMENSION X(J),Y(J),XY(J),Y2(J)
SUMX=0.
SUMY=0.
SUMY2=0.
SUMXY=0.
DO 20 I=M,N
XY(I)=X(I)*Y(I)
Y2(I)=Y(I)**2
SUMX=SUMX+X(I)
SUMY=SUMY+Y(I)
SUMXY=SUMXY+X(I)*Y(I)
20 SUMY2=SUMY2+Y(I)**2
AN=N
PRGM=SUMX/AN
SUM=0.
DO 21 I=M,N
T=(PRGM-X(I))**2
21 SUM=SUM+T
22 DES=SQRT(SUM/AN)
SB2=DES**2/SUMY2
B=(AN*SUMXY-SUMX*SUMY)/(AN*SUMY2-SUMY**2)
SB=SQRT(SB2)
TC=(B-1.)/SB
RETURN
END

```