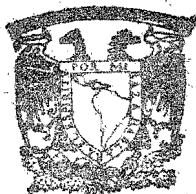


FACULTAD DE CIENCIAS

U.N.A.M.



BIBLIOTECA
CENTRO DE ECOLOGIA

ESTUDIO DE UN MODELO MATEMATICO PARA
REPRESENTAR EL CRECIMIENTO DEL MAIZ

T E S I S

Que para obtener el título de:

B I O L O G O

P r e s e n t a

Ma. DEL CARMEN SANCHEZ MORA

México, D. F.

1974

RECONOCIMIENTOS :

A Guadalupe Mora Vital, quien
dirigió este trabajo.

Al Instituto de Ingeniería de
la U.N.A.M.

Al Plan Nacional Hidráulico,
y a Polená Riemann

CONTENIDO

	Página
RECONOCIMIENTOS	II
LISTA DE TABLAS	V
LISTA DE ILUSTRACIONES	VI
RESUMEN	VIII
Capítulo	
I. INTRODUCCION	1
Relaciones suelo-agua-planta.	
Papel del agua en el funcionamiento de la raíz.	
Papel del agua en el funcionamiento del tallo.	
Papel del agua en el funcionamiento de las hojas.	
Relaciones suelo-planta.	
Factores climatológicas que influyen en la relaciones agua-planta-suelo.	
II. LA EVAPOTRANSPIRACION	15
Cantidad de agua consumida por las plantas.	
Efectos de los déficits de humedad sobre el rendimiento.	
Criterios clásicos para determinar las necesidades de agua de los cultivos.	
Comparación entre los diferentes métodos clásicos.	

III.	CRITERIOS MODERNOS DE IRRIGACION	32
	Otros criterios para incluir en los modelos de riego.	
	Necesidad de nuevos criterios.	
IV.	MODELO PROPUESTO POR J. FLINN	46
V.	ESTABLECIMIENTO DE UN EXPERIMENTO	50
VI.	MATERIAL Y METODOS	53
VII.	RESULTADOS	65
VIII.	DISCUSION	75
IX.	CONCLUSIONES	98
	APENDICE	101
	BIBLIOGRAFIA	104

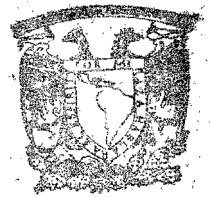
LISTA DE TABLAS

Tabla		Página
1.	Datos meteorológicos y profundidad radicular durante el desarrollo del maíz	66
2.	Cálculos diarios de evapotranspiración relativa (P) y factor de cultivo (f), para tres tratamientos de humedad	68
3.	Rendimiento promedio en peso seco y fresco - para tres tratamientos de humedad	74
4.	Índice de abreviaturas	103

LISTA DE ILUSTRACIONES

Figura		Página
1.	Tasa relativa de evapotranspiración como función del potencial de agua en el suelo, para diferentes condiciones de evapotranspiración potencial.....	14
2.	Relación entre la evapotranspiración potencial y el punto de pérdida de turgencia	36
3-A.	Resumen del método de cálculo	60
4-A.	Diagrama de flujo. Programa para el cálculo de la evapotranspiración relativa, real, potencial y factor de cultivo.....	62
5-R.	Frecuencia de riegos en tres tratamientos de humedad	80
6-R.	Crecimiento de la zona de máxima densidad radicular	82
7-R.	Distribución en el ciclo de desarrollo, del factor de cultivo calculado. Para el tratamiento de 60% de H.A.....	84
8-A.	Resumen de un modelo de simulación	101

Figura		Página
9-A.	Posible modificación en el modelo con contenidos de humedad sobre capacidad de campo...	102
10-R.	Crecimiento total promedio de las plantas bajo tres tratamientos de humedad	91
11-R.	Relación entre la tasa tallo/raíz y el tratamiento de humedad	95



RESUMEN

BIBLIOTECA
CENTRO DE ECOLOGIA

Con objeto de presentar un modelo de simulación de riego en el que intervengan las relaciones agua-planta-suelo-clima explicadas experimentalmente, se hizo una revisión bibliográfica que permitiera llegar al criterio más adecuado para simular un sistema de irrigación que pueda ser utilizado en la planeación de necesidades de agua en agricultura.

Se llegó a la conclusión de que el modelo de simulación de sistemas de irrigación de cultivos propuesto por J. Flinn en 1971 (51) es por ahora el más práctico y avanzado, principalmente por ser un intento para explicar diariamente la relación entre el crecimiento o rendimiento del cultivo ante diferentes políticas de riego a partir de información fácil de obtener, y por estar basado en datos experimentales importantes.

Algunos aspectos del modelo de Flinn, principalmente el biológico, requerían de comprobación, por lo cual se llevó a cabo un experimento para tratar de explicar algunas de sus postulaciones que en algunos casos son empíricas.

Finalmente, el autor propone la introducción de - - otros criterios que pueden modificar el uso de agua por los

cultivos y que no fueron considerados en el desarrollo del modelo mencionado.

CAPITULO I

INTRODUCCION

Tradicionalmente, la información sobre las necesidades de agua de los cultivos que se usa para el diseño de -- sistemas de riego, se obtiene a través de la experiencia -- agrícola en el campo, o sobre datos de evapotranspiración o uso consuntivo mediante métodos climatológicos o empíricos. Sin embargo, el agua es un recurso que debe ser utilizado -- racionalmente, tratando de suministrarla a los cultivos con las menores pérdidas posibles, en cuanto al conocimiento de las cantidades exactas que ayuden al desarrollo vegetal óptimo.

Este trabajo tiene por objeto presentar los factores que determinan el uso de agua por las plantas, los cuales -- deben ser cuantificados y utilizados en un modelo que permita predecir el rendimiento de un cultivo ante diferentes políticas de riego. Quizá uno de los puntos más importantes sea llegar a tener un criterio que explique el crecimiento o el rendimiento del cultivo ante la disponibilidad de agua en un momento dado y ante los efectos del medio como una -- forma de predecir el uso óptimo de agua en futuros sistemas de irrigación.

Claro está que no basta con el conocimiento de las cantidades óptimas de agua que se deban aplicar a nivel de parcela, sino que un modelo completo deberá incluir aspectos de la conducción del agua desde la fuente misma, la eficiencia de conducción, la presencia de varios cultivos en un área servida, etc. Sin embargo, en este trabajo solo se toman en cuenta las relaciones agua-planta-suelo que pueden ser añadidas a un modelo completo que se desarrolló en el Instituto de Ingeniería de la UNAM.

Para realizar el presente trabajo se consideró que solamente una revisión bibliográfica de los métodos existentes para determinar el uso de agua por los cultivos, podría llevar a escoger el mejor procedimiento, o bien a postular una nueva metodología con base en criterios ya establecidos. Dado que muchas teorías y fórmulas se apoyan en la investigación sobre fisiología vegetal, se creyó conveniente presentar también de manera general el camino del agua en el sistema suelo-planta-atmósfera. De esta forma, la primera parte de esta tesis es una relación de algunos aspectos biológicos básicos, referentes al funcionamiento de la planta respecto al agua; se habla entonces de la manera en que el suelo almacena agua y puede cederla a la planta, la forma en que ésta la aprovecha y la hace circular hasta las hojas, donde puede ser cedida en gran parte a la atmósfera debido a fenómenos climatológicos de diferente tipo. En seguida se explica cómo se empezaron a calcular las cantidades de agua necesarias para el desarrollo de distintos cultivos,

considerando solo al aspecto climatológico del problema -- (evapotranspiración] pero sin intervención de la planta y -- el suelo. Posteriormente se menciona la introducción a la planta en dichos cálculos como factores empíricos de cultivo, pero tomando en cuenta datos climatológicos promedio, -- de tal forma que la evaporación que se calcula es la que -- tendría el cultivo como si nunca disminuyera el contenido -- de agua del suelo bajo capacidad de campo. Por último, se citan los criterios modernos de irrigación en los que además de factores climatológicos interviene la planta determinando el uso real de agua con base también en la información -- sobre funciones de producción agua-rendimiento. Entre estos métodos se tienen algunos muy completos; sin embargo la principal limitación en su uso está en la simulación de la relación crecimiento-agua para interpretarla y predecirla ante diferentes políticas de riego.

El modelo que finalmente se propone, postulado por Flinn en 1971, tiene en cuenta aspectos clave de las relaciones agua-planta-suelo e introduce una relación entre el crecimiento, los factores climáticos y el agua del suelo como un intento nuevo para programar el riego. En la segunda -- parte de la tesis se estudian experimentalmente algunos aspectos del modelo de Flinn que requieren de comprobación y se proponen algunas mejoras. A pesar de que se trabajó solamente con maíz, existe la posibilidad de usar el modelo -- en otros cultivos, así como de mejorarlo con base en futura experimentación.

Relaciones suelo-agua-planta

Las plantas toman el agua del suelo, la hacen circular en su interior para finalmente ceder gran parte de ésta a la atmósfera, de tal forma que sólo un 1% del agua absorbida permanece en la planta y puede llevar a cabo importantes funciones.

El papel que juega el agua dentro de la planta está determinado por la organización de sus moléculas que se unen mediante puentes de hidrógeno, lo cual les confiere un comportamiento muy particular, Kramer 1966 (29).

El agua forma parte de más del 75% del peso húmedo de la planta, Kemper et al 1961 (en 36). Es además un reactivo importante en varios procesos como la fotosíntesis, -- solvente de gases y solutos inorgánicos, mantiene la turgencia de la planta, interviene en el metabolismo, en la termoregulación, etc., Currier 1967 (3).

El sistema líquido interno de la planta se extiende desde la raíz hasta las hojas, es continuo y se mantiene debido a las propiedades físico-químicas del agua. Esta continuidad depende de factores del suelo y de la atmósfera, -- se inicia en el suelo y será vista con más detalle a continuación.

Papel del agua en el funcionamiento de la raíz

El suelo está compuesto de partículas minerales y -

materia orgánica, que forma la parte sólida, y la solución de suelo y aire que ocupan los espacios dentro de la matriz. El agua es retenida debido a su naturaleza bipolar por las partículas de suelo y por fuerzas osmóticas desarrolladas por las sales dispersas en la solución del suelo; las plantas mediante sus raíces son capaces de aprovechar el agua retenida por las partículas de suelo. Para que ésto suceda, debe existir un gradiente decreciente de potencial de agua entre el suelo que rodea a la raíz y el xilema de este órgano.

El término potencial de agua es una expresión que indica un estado particular de energía del agua, que representa su habilidad para efectuar trabajo. Describe además el efecto neto de varios componentes del agua del suelo o la planta (presión, concentración osmótica, etc.).

Debido a que el agua tiende a moverse de regiones de alto potencial a regiones de bajo potencial, tal situación debe existir entre el suelo y la raíz, para que la planta inicie la absorción de agua, Levitt 1969 (32).

Para que se conserve este gradiente de potencial de agua, debe haber una absorción de iones que disminuyan el potencial de agua en la raíz. De esta forma, el xilema de la raíz funciona como un osmómetro hundido en la solución del suelo y la máxima presión que se desarrolle dependerá de la concentración de la sabia de los vasos y de la concentración de la solución del suelo.

Papel del agua en el funcionamiento del tallo

Una vez que el agua entró al sistema vascular de la raíz, debe ascender por el tallo, Salisbury 1969 (44) cita cómo se descubrió que los vasos del tallo están llenos de agua y que no basta con la presión radical para que el agua ascienda. Debe existir una fuerza negativa que la haga subir hasta las hojas. Esta fuerza se debe a la transpiración, fenómeno que se explicará posteriormente y que juega un papel importantísimo en el uso de agua por las plantas, a tal punto que debe ser considerado en las relaciones agua-planta-suelo. La ascensión capilar, resultante de la fuerza de adhesión entre el agua y las paredes celulares y el flujo de agua como volumen debido a la cohesión entre las moléculas de agua permiten también que ésta ascienda por el tallo, Kramer 1969 (29).

Papel del agua en el funcionamiento de las hojas

Finalmente el agua llega hasta las hojas, pero debe establecerse un balance de energía entre el agua del suelo, de la planta y la del aire y que variará en respuesta a diferentes condiciones ambientales. Gates 1966 (en 2), define a la transpiración como un proceso de difusión de agua en estado gaseoso, debido a la radiación solar neta absorbida por las hojas. Probablemente el fenómeno no se limita a las hojas aunque allí ocurra en un alto porcentaje.

La transpiración produce entonces un decremento en

el potencial de agua de las hojas, que es transmitido a la raíz y se provoca entonces la absorción de agua. Si falta agua en el suelo, la deficiencia de potencial se transmitirá de la raíz a las hojas, donde una disminución de turgencia induce el cierre de los estomas y la reducción de la transpiración. De aquí se puede ver que el fenómeno depende de la humedad del suelo (la cantidad de agua que la planta pueda tomar) y las condiciones atmosféricas.

El fenómeno de transpiración no depende solo del grado de cierre de los estomas sino también de la diferencia de presión de vapor entre la hoja y la atmósfera, y mientras mayor sea esta diferencia mayor será la tasa de transpiración.

La transpiración no solo ayuda al establecimiento de equilibrio entre el vapor de agua de las hojas y del medio; además de permitir la ascensión del agua por la planta, también ayuda a conservar la turgencia de la planta. Salisbury 1969 (44), demuestra que aunque también tiene una función de reguladora de temperatura en las hojas, la disipación de calor se debe más bien a fenómenos atmosféricos de convección.

Algunas evidencias experimentales, Levitt 1969 (32), sugieren que también promueve la absorción de solutos sobre todo cuando la concentración iónica es elevada en el suelo. Podría pensarse entonces que el fenómeno permite la ascensión de solutos con rapidez hacia las hojas, conservando --

así un gradiente de potencial para la absorción de los mismos.

Relaciones suelo-planta

La transpiración establece entonces un grado de turgencia en la planta que a su vez influye en su crecimiento, pero aunque la tasa de transpiración está determinada por condiciones atmosféricas, debe existir cierta cantidad de agua en el suelo para que se lleve a cabo el intercambio de agua entre planta y atmósfera. De esta forma, es necesario considerar al suelo como almacén de agua capaz de cederla a las plantas.

La humedad que el suelo es capaz de almacenar permite el crecimiento de las plantas aunque no se le suministre por lluvia o irrigación continuas. Pero la cantidad de agua que el suelo pueda almacenar depende en gran parte de su constitución física, o sea, de su densidad aparente y su área específica, Williams 1970 (61).

Así aunque el contenido de agua puede fluctuar entre suelo saturado y suelo seco, existe un rango de humedad que la planta puede aprovechar. Se define humedad aprovechable (HA) de la siguiente forma:

$$HA = \frac{(PW_{cc} - PW_{pmp}) \cdot DA \cdot h}{100} \quad (1)$$

donde

PW_{cc} = Porcentaje de humedad a capacidad de campo

PW_{pp} = Porcentaje de humedad en el punto de marchitamiento permanente

DA = Densidad aparente del suelo

h = Profundidad radicular

Las plantas pueden exhibir diferentes patrones de absorción de agua, por lo que los límites de humedad aprovechable (capacidad de campo y punto de marchitamiento permanente) no son cantidades fijas sino un tanto arbitrarias y como no representan contenidos de humedad con respecto al peso seco del suelo, tienen poco significado fisiológico, Slatyer 1957 (49).

Sin embargo, una medida que represente la retención de agua por las partículas del suelo sí puede indicar la dificultad con que la planta puede tomar el agua del suelo, tal medida es la llamada tensión del suelo. A una misma tensión, por ejemplo de 346 cm de Hg. las plantas ejercen la misma fuerza para sacar el agua del suelo para cualquier tipo de suelo, pero en esta tensión el contenido de agua de la arcilla es 7 veces mayor que el de la arena. De esta forma, al evaluar el uso de agua de un cultivo las medidas de tensión de agua pueden evitar el considerar diferentes tipos de suelos.

Dado que la planta no responde en términos de contenido de agua sino en términos de tensión, el punto de marchitamiento permanente es entonces una tensión constante para

todo suelo (15 atmósferas de tensión], Slatyer 1957 (49). - Esta tensión del suelo tiene mucho significado en términos de las funciones vitales de la planta, de la elongación, el crecimiento y la transpiración.

En la definición de humedad aprovechable se incluye la profundidad radicular; este valor nunca es constante ya que el patrón de crecimiento varía de acuerdo con la especie, factores ambientales, características físicas y químicas del suelo, competencia, aereación, drenaje, etc. Este punto es de especial interés en el estudio de las relaciones agua-planta-suelo, ya que la extensión de las raíces -- puede significar que en un determinado porcentaje de humedad del suelo, el déficit de humedad del suelo sea más o menos severo. Por otra parte, el volumen que ocupan las raíces -- influye en la resistencia que el suelo opone al movimiento del agua, Jensen 1968 (23).

En resumen, el suelo es la fuente de agua para la -- transpiración, por lo que su potencial de agua y su conductividad hidráulica tienen un efecto importante en la velocidad de transpiración de la planta. Si el potencial de agua de suelo es alto, puede dar agua a la planta a la velocidad con que ésta transpira, así en un suelo húmedo la tasa de -- transpiración estará determinada por condiciones atmosféricas, de manera que cuando la atmósfera da a la planta suficiente energía, la transpiración es alta; pero cuando el -- suelo no tiene la cantidad de agua suficiente para mantener

cierto grado de transpiración, es el suelo entonces el factor que la regulará.

Factores climatológicos que influyen en las relaciones agua
planta-suelo

La cantidad de agua que utiliza un cultivo durante su ciclo de vida está determinado por la interacción del genotipo con el medio. A su vez en el medio influyen factores climatológicos y las condiciones de humedad y nutrientes en el suelo así como el manejo del suelo y del cultivo.

Pero la energía que llega a la tierra proveniente del sol no actúa solamente en la planta, sino que también produce la evaporación del agua del suelo, Korkeit 1969 - (27). De esta forma, en el estudio de las relaciones agua-planta-suelo-clima se hace referencia al término evapotranspiración que incluye la pérdida de agua tanto de las plantas como del suelo.

Entonces todos aquellos factores climatológicos que confieran cierta velocidad a las moléculas de agua para vaporizarla y por lo mismo que produzcan cierta presión positiva de vapor, van a influir sobre la evapotranspiración. Tales factores son principalmente la radiación solar, la temperatura, la humedad del aire y el viento.

Denmead y Shaw 1962 (en 55) reunieron la información antes presentada en un trabajo muy interesante que permite conocer la influencia conjunta de las condiciones climatoló

gicas y de la humedad del suelo sobre la evapotranspiración de los cultivos.

Si se llama evapotranspiración potencial (E_t) a la evapotranspiración de un cultivo cuando la humedad del suelo está a capacidad de campo, y evapotranspiración real (E_a) a la que se lleva a cabo con niveles de humedad menores que la capacidad de campo, la relación entre ambas E_a/E_t es la evapotranspiración relativa (P).

En la figura 1 se muestra la importancia del potencial de agua del suelo al determinar la tasa relativa de evapotranspiración. Esta figura indica que el potencial de agua en el suelo que provoca un déficit de agua en la planta y un decremento en la evapotranspiración real depende de las condiciones de evaporación; así cuando la evaporación es baja, una planta puede seguir tomando agua del suelo a la velocidad que equilibre la demanda de evapotranspiración, en un rango de succión de agua muy grande. Pero, ante una gran demanda evaporativa, la misma tensión de agua causará un déficit de agua en la planta y una disminución en la transpiración.

Esta aportación de Denmead y Shaw ha permitido el desarrollo de nuevos criterios de irrigación en los que juega un papel importante, el medio, el suelo y un déficit de humedad en las plantas que influya sobre la producción del cultivo.

Cabe aclarar que no son únicamente las condiciones climatológicas las que modifican el uso de agua de las plantas, Fritschen 1966 (en 55) ha demostrado que el factor -- planta en cuanto a variaciones anatómicas, fisiológicas y -- genotípicas también es capaz de modificar este uso de agua.

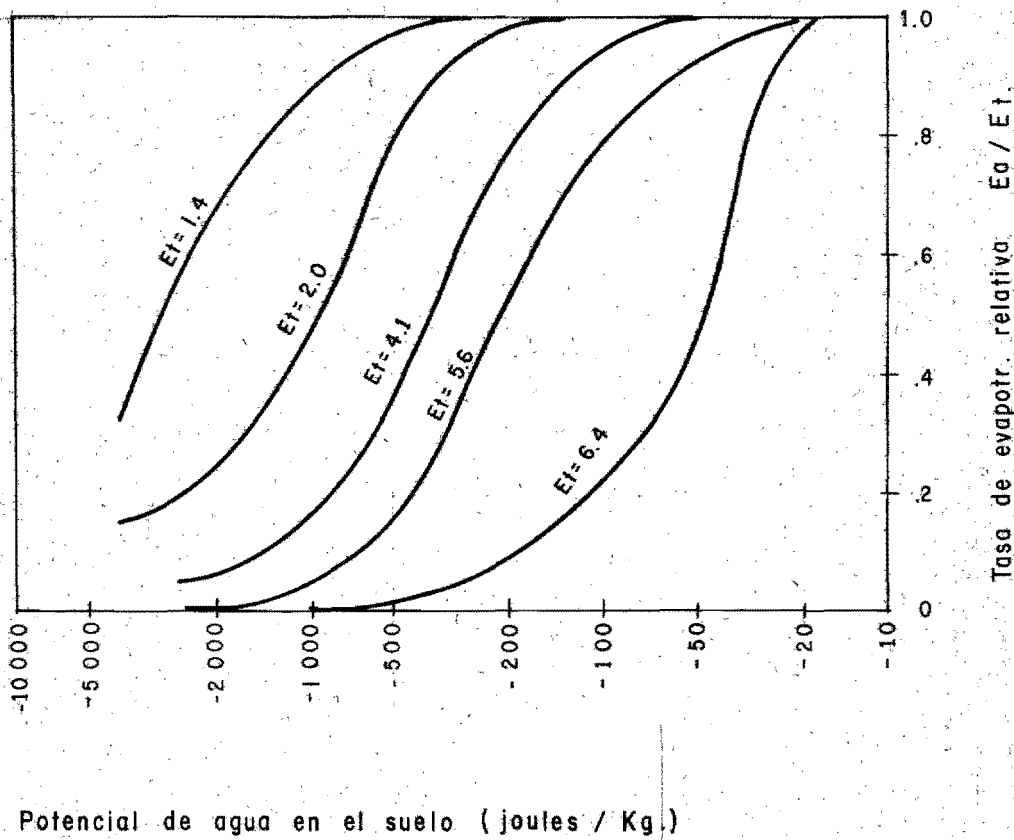


Fig.- 1 Tasa relativa de evapotranspiración como función del potencial de agua en el suelo, para diferentes condiciones de evapotranspiración potencial. (de Denmead y Shaw, 1962.)

CAPITULO II

LA EVAPOTRANSPIRACION

El consumo de agua por los cultivos, al que en muchos casos se hace referencia en la bibliografía, viene siendo en realidad la cantidad de agua transpirada por la planta y evaporada de la superficie del suelo, más la que es retenida en los tejidos vegetales. Sin embargo, esta última cantidad es menos de 1% del total evaporado durante un ciclo normal de crecimiento, Kozlowski 1958 (en 61). Igualmente se ha comprobado, que las plantas transpiran en promedio -- 225 kg de agua por cada kilo de materia seca que producen, Turk 1972 (57).

Como podrá suponerse, la evapotranspiración variará según las condiciones climatológicas existentes en un determinado lugar, de tal forma que el uso consuntivo por ciclo puede variar desde una lámina de 45 cm con un cultivo rápido en una región húmeda, hasta de 1 m con un cultivo largo en un clima árido, Turk 1972 (57).

La meta de los proyectos de irrigación ha sido por mucho tiempo proveer de agua suficiente a los cultivos para evitar déficits de agua que pudieran reducir la producción. Para quienes diseñaron tales proyectos fué de suma importan

cia conocer la forma óptima en la que los sistemas de irrigación pudieran cubrir las necesidades de agua del cultivo expresadas por tasas de evapotranspiración. Sin embargo en la última década ha surgido la preocupación de conocer los efectos de los déficits de agua sobre la producción esperada, así Taylor 1965 (en 61), expresó que la irrigación se debe llevar a cabo cuando el potencial de agua del suelo sea suficientemente alto para que el suelo pueda dar agua a la planta a una velocidad tal que satisfaga las demandas atmosféricas de humedad sin provocar tensiones de agua en las plantas, que reduzcan la productividad o calidad del cultivo.

En cuanto a la cantidad de agua aplicada, los criterios para programar irrigación varían de una situación a otra; donde el agua es escasa o cara, los riegos se programan de tal manera que se maximice la producción por unidad de agua aplicada, en cambio, donde el suelo es pobre, los riegos se programan para obtener el máximo de producción por unidad de área sembrada. Turk y Foth 1972 (57), Jensen 1968 (23), Hagan y Stewart 1972 (20), Lembke y Jones 1972 (31), Santiago 1970 (45), Korkeitt 1969 (27), Delivatov y Christov 1969 (8), etc.

Como ya se mencionó antes, la componente principal de agua que necesita un cultivo está representada por la cantidad de agua perdida por evapotranspiración, tal estimación es sobre todo útil para predecir la frecuencia y la se

veridad de la sequía en áreas húmedas y subhúmedas, Van Babel y Verlinden 1956 (en 55).

Los métodos para calcular la evapotranspiración son muy numerosos, se suelen basar en investigación meteorológica, en registros tomados en evaporímetros y lisímetros o en métodos empíricos que calculan la evapotranspiración por períodos largos, Sellers 1965 (46).

La abundancia de métodos parece indicar que no se tiene una forma precisa de medir el fenómeno. En otro inciso se presentarán los diferentes métodos, pero por ahora se puede decir que la evapotranspiración es un fenómeno que deberá medirse con toda exactitud y continuamente si sobre ella se pretenden basar sistemas de irrigación. Aunque en regiones con clima constante (con poco cambio diario) se le llega a estimar cada 2 semanas, la investigación detallada y continua sobre la reacción de las plantas a déficits de agua requiere medidas de evapotranspiración por períodos no mayores de un día.

La evapotranspiración no representa en sí la relación que puede haber entre la facilidad con la que el suelo cede agua a la planta, con la demanda atmosférica de humedad, ni con las diferentes necesidades de agua en distintas etapas de desarrollo del cultivo, es solamente un valor indicativo de las pérdidas de agua frente a condiciones climáticas.

Cantidad de agua consumida por las plantas

En regiones donde la precipitación es escasa y la cantidad de agua disponible para riego es limitada, en ocasiones puede resultar preferible desde un punto de vista -- económico, reducir el suministro de agua recomendado en los estudios de uso consuntivo, sacrificando una parte de la -- producción pero ahorrando agua. Es evidente entonces la necesidad de desarrollar criterios que permitan conocer la relación entre el agua aplicada al terreno y el rendimiento -- del cultivo; así el desarrollo de funciones de producción -- respecto al agua pueden ser una ayuda a evitar el uso indiscriminado de agua que es inútil y antieconómico.

Aunque dichas funciones de producción no han sido -- determinadas para todo tipo de cultivo, suelo, o clima, la demanda constante de información que prediga respuestas de los cultivos a determinadas cantidades de agua, ha provocado el desarrollo de experimentos importantes, entre ellos -- se puede mencionar el de Hagan 1971 (20), quien recopiló información sobre tipos de cultivos, suelos, climas y la mínima humedad permitida en el suelo. Este esfuerzo y el de muchos otros autores permitirán el desarrollo de funciones de producción cuantitativas para situaciones particulares y -- que pueden servir como base para un análisis económico con miras a una irrigación con el máximo provecho. Esto significa que la irrigación se puede basar en dar déficits de -- agua perfectamente planeados, y no necesariamente conservan

do durante todo el ciclo un nivel constante de humedad en el suelo.

Pero antes será necesario conocer el efecto de los déficits de humedad en diferentes cultivos, en varios estados de crecimiento, incluyendo factores del suelo, del clima, y del manejo del cultivo, los cuales no sólo permitirán conocer las cantidades óptimas de agua en irrigación sino también el tiempo óptimo de aplicación, que es un aspecto que no ha sido resuelto satisfactoriamente, Windsor y Ventecow 1971 (62).

El problema que se tiene con los datos de funciones de producción es que generalmente no se cuantifica el grado de tensión que se produce dentro de la planta con diferentes déficits de humedad, ni la susceptibilidad de las diferentes etapas del cultivo a los déficits de humedad. Esto último se podría solucionar especificando funciones de respuesta del cultivo que relacionen la producción contra diferentes cantidades de agua en el tiempo. Taylor 1971 (en 15) sugiere así el uso de un índice de tensión en la planta que refleje el grado de agua disponible en el suelo para la planta; demuestra además que la producción disminuye linealmente con la incidencia de déficits de agua.

De la información disponible se llega a la conclusión de que un método práctico de irrigación deberá incluir las demandas probables de agua en función de la manera como se ve afectada la producción por efecto de déficits de hume

dad y su variación en el tiempo, según las condiciones ambientales y del suelo; pero en última instancia, aunque el rendimiento de los cultivos depende de muchos factores, deberá definirse en primer lugar una relación producción-agua tomando en cuenta que la tensión de humedad se produce cuando la evapotranspiración real (E_a) es menor que la potencial (E_t). Darley et al 1972 (7).

En el inciso siguiente se hablará del efecto que estos déficits pueden tener sobre la producción desde el punto de vista fisiológico y económico.

Efectos de los déficits de humedad sobre el rendimiento

Aunque se sabe que el exceso o la falta de agua (tensión de humedad) influye sobre el rendimiento de los cultivos, es interesante considerar también el efecto que las alteraciones en el uso de agua puedan tener sobre procesos fisiológicos.

Esencialmente, la absorción de agua puede considerarse como consistente de 2 procesos: el movimiento del agua a través de la planta y el movimiento de agua hacia los tejidos, Salisbury y Ross 1969 (44).

Dentro de las células la diferencia entre la presión osmótica que promueve la entrada de agua y la presión de turgencia de las paredes que se opone a ella, constituyen el déficit de presión de difusión (DPD). En un tejido turgente, el DPD es igual a cero, pero conforme se pierde agua --

por transpiración, el DPD aumenta. De esta forma, para que el flujo de agua del suelo hacia la raíz se mantenga, el DPD debe estar por arriba de la tensión de humedad TSM del suelo, entonces:

$$\text{Flujo de agua} = \frac{\text{DPD} - \text{TSM}}{\text{RS} + \text{RP}} \quad (2)$$

RS = Resistencia del suelo

RP = Resistencia de la planta

Como puede verse, la definición del estado de humedad de una planta en un momento dado es compleja, ya que las resistencias al flujo de agua en la planta varían con la transpiración y así el DPD no es igual en todos los tejidos de la planta, Kramer 1969 (53). Y como la respuesta al déficit de humedad en las hojas no se transmite instantáneamente a las raíces, pueden presentarse períodos de marchitamiento momentáneo, aún cuando la humedad del suelo sea adecuada. De esta manera la evaluación del grado en que la falta de agua influye sobre la fisiología de la planta a partir del balance interno de agua resulta muy impreciso a la vez que complicado de obtener experimentalmente.

Realmente es difícil evaluar por separado los efectos de la tensión de agua sobre diferentes procesos fisiológicos ya que probablemente éstos estén muy relacionados entre sí y sobre todo con la productividad total del cultivo, por ejemplo, si al bajar la tasa de transpiración baja también la fotosíntesis y a su vez la producción de materia se

ca depende de la fotosíntesis, la alteración en cualquier punto tendrá efectos negativos en la productividad.

Para Flinn 1971 (15), el o los déficits de humedad influyen en los procesos fisiológicos en el siguiente orden de importancia: Fotosíntesis, acumulación de materia seca, división celular y transpiración, sin embargo esto está por comprobarse, dado que posiblemente el efecto de los déficits de humedad sea simultáneo sobre todos estos procesos.

Respecto a la fotosíntesis, algunos autores han reportado poca influencia de la tensión de agua hasta antes del punto de marchitamiento, Salisbury 1969 (44), pero otros encuentran que la fotosíntesis se reduce al tener agua disponible bajo la capacidad de campo.

Claro está que se deben esperar diferencias por especie y aún por variedad ya que se sabe que muchos cultivos de las zonas tropicales se ven muy afectados en la fotosíntesis por déficits de agua como sucede con el cacao, café, té, plátano, caña, piña, coco y palma de aceite, Williams y Joseph 1970 (61).

Pero parece ser que la cantidad disponible de CO_2 es el factor limitante de la fotosíntesis y no los déficits de agua, Salisbury y Ross 1969 (44). Si se sabe que la tasa de fotosíntesis es proporcional al grado de abertura de los estomas lo cual depende de la transpiración, posiblemente la influencia del agua sea mucho más importante de lo --

que se ha pensado. La fotosíntesis depende también del - -
área foliar que se ve reducida con las tensiones de humedad;
Williams 1970 (61), Downey 1972 (11), Shaw y Lang 1966 (47),
Vaadia y Waisel 1967 (58).

Se ha encontrado que durante los períodos de sequía
se aceleran las reacciones de degradación, Vaadia y Waisel
1967 (58); por lo que aumenta la velocidad respiratoria, de
tal forma que la planta emplea activamente sus reservas de
carbohidratos en el metabolismo, hecho que impide el creci-
miento normal de las plantas, Shaw y Lang 1966 (47).

Dado que la presión de turgencia es responsable de
la elongación celular, el efecto más notorio de la tensión
sobre el crecimiento es la reducción en el tamaño de las ho-
jas, Shaw y Lang 1966 (47). Sin embargo los cambios en tur-
gencia no son la única forma de explicar la alteración del
crecimiento, debe existir un patrón metabólico cuantifica-
ble bajo efectos de tensión. No se ha puesto atención a las
transformaciones de energía en la planta bajo tensión, aun-
que se miden la respiración y la fotosíntesis no se conoce
la eficiencia termodinámica de la planta y por otra parte -
debe existir un aspecto hormonal importante relacionado con
los déficits de agua dado que varias hormonas de crecimiento
provienen de la raíz y ascienden al resto de la planta gra-
cias a la absorción de agua.

La hidratación protoplásmica se cita a menudo en --
cambios en la actividad fisiológica bajo déficits de agua.

Van Overbeck 1959 (en 58) postula que la hidratación de las proteínas actúa sobre las auxinas y Levitt 1969 (32) encontró que los déficits de agua alteran la diferenciación celular.

Otra consideración importante sobre los déficits de agua es la época en que éste se produzca, ya que se dan casos en que la tensión continua no afecta la producción como lo demostraron Heam y Wood 1964 (13) en experimentos sobre maíz en época de sequía leve, en Africa.

En general se suele reportar a la etapa de reproducción como la más susceptible a la falta de agua, aunque las respuestas varían mucho con el tipo de floración (determinada o indeterminada), Shaw y Lang 1966 (47).

Ya en 1929, Maximov hace notar la diferencia en sensibilidad entre la etapa vegetativa y la reproductora. Phyllis en 1956 y Alvin en 1960 sugieren que tanto la iniciación de la floración como el desarrollo de las estructuras florales son muy sensibles a la sequía. Denmead y Shaw 1960 (9) y Robins y Domingo 1953 (42), demuestran que en el maíz cuya floración es determinada, la etapa más sensible es la del espigamiento. Van der Paaw 1949 (en 41) encuentra en la avena un período crítico durante la formación de la panícula y que el reducido rendimiento se debe a esterilidad floral. Maximov 1929, Domanskie 1961 y otros (en 29) coinciden en que la reducción del rendimiento de varios cereales ocurre durante la última elongación posterior al es-

pigamiento.

Para cultivos de floración indeterminada los períodos críticos no son tan evidentes. Además, el déficit de humedad no solo afectará según el tipo de cultivo, sino también según la naturaleza de su sistema radicular; y la parte de la planta afectada será más importante según su valor económico. De todo esto se hace evidente la necesidad de tener una expresión que relacione los efectos de la tensión de agua sobre las plantas en cultivos que tienen floración susceptible y en cultivos que soportan la tensión. Jensen 1968 (23), desarrolló una fórmula para cuantificar la productividad en condiciones de déficits de humedad, pero incluye un factor de muy difícil cuantificación el cual se refiere a la sensibilidad del cultivo a la falta de agua en un estado dado.

Criterios clásicos utilizados para determinar las necesidades de agua de los cultivos

Como se indicó anteriormente, las medidas de evapotranspiración han sido de gran interés para el diseño de sistemas de irrigación. Varios autores, entre ellos Tanner 1967 (54), Slatyer 1967 (50), Taylor 1972 (55) Poirée 1966 (38), Sellers 1965 (46), Posadas 1969 (39), etc. han hecho revisiones muy completas de las medidas que se han utilizado para calcular evapotranspiración. De esta forma, en este capítulo sólo se hace referencia muy general al tema.

Se puede decir que en un primer grupo se encuentran fórmulas que calculan evapotranspiración a partir de datos meteorológicos, sin tomar en cuenta a la planta y al suelo y que suponen que el agua en el suelo se encuentra a capacidad de campo; a esta evapotranspiración se le conoce como potencial.

Entre este tipo de fórmulas se pueden citar las aerodinámicas que consisten en medir el flujo de vapor sobre la superficie estudiada mediante cálculos muy complicados. Las fórmulas sobre balance de energía miden la energía solar que entra y sale de una comunidad, de éste tipo es la famosa fórmula de Bowen 1926 (en 54).

Un segundo grupo de cálculos está representado por las llamadas fórmulas empíricas que relacionan datos climatológicos como radiación, temperatura media, déficits de saturación del viento, etc. con la evapotranspiración. También se pueden basar en medidas de evapórimetros, atmómetros o disminución del contenido de agua en el suelo; pero suelen referirse a la evapotranspiración potencial. Entre estas fórmulas están la de Dalton, Penman, etc. En general son muy inexactas desde el punto de vista climatológico, no consideran el tamaño del área de evapotranspiración, usan valores promedio por lo que no se considera el proceso en su totalidad y sobre todo no interviene el factor suelo-planta, Sellers 1965 (46).

Un segundo grupo más evolucionado de fórmulas empíricas incluye coeficientes de cultivo aunque en una etapa estable, tales constantes deben ser cambiadas según la variación que sufran al aplicar la fórmula en distintos sitios. Aquí se pueden citar una segunda fórmula de Penman y la de Turc. Quizá la más representativa del grupo, a su vez que la más empleada sea la de Blaney y Criddle, que tiene la forma:

$$E_t = -KF = -K \sum_{i=1}^m f_i \quad (3)$$

donde

E_t = Uso consuntivo

K = Coeficiente de cultivo

F = Factor de uso consuntivo

m = Número de meses en la época de crecimiento

f_i = Factor mensual de uso consuntivo

En general todas estas fórmulas tienen la desventaja de basarse en un sólo factor climático, toman datos promedio y no son válidas para datos de menor duración que un mes, ya que se supone que la evapotranspiración potencial varía muy poco día con día.

Posteriormente, se introduce el coeficiente de cultivo según el estado de crecimiento y la variedad, Blaney y Morin, Jensen, Olivier, Lowry-Johnson, Delivatov 1969, Posadas 1969, etc.

Dado que estos métodos no consideran todos los factores climáticos que influyen en la transpiración del agua, algunos autores han sugerido que la evapotranspiración sea estimada a partir de la evaporación del agua, ya que suponen que todos los factores meteorológicos que afectan la pérdida de agua del suelo y del cultivo se resumen en las medidas de evaporación de una cuba, lo cual puede ser debatido. A dichas estimaciones se les añaden coeficientes empíricos de cultivo y transformación de cuba a evaporación de lagos (35), (55), (54).

Tal vez el problema mayor de este método sea el empleo de evaporímetros y atmómetros que no siempre dan lecturas confiables, aunque se han propuesto ajustes como los de Jensen y Pruitt 1963 (en 55).

Una tercera forma de determinar las necesidades de agua es mediante el uso de la ecuación de balance de agua:

$$w = P - (O + U + E) \quad (4)$$

donde w es el cambio en el contenido de agua del suelo (contenido inicial menos final) P , O y U son la precipitación, el escurrimiento y el drenaje respectivamente. El método da información útil en períodos largos donde todos los parámetros son medibles. Se lleva a cabo a partir de mediciones hidrológicas donde se muestrea la disminución del contenido de agua en el suelo o por medidas de lisímetros. Este método llega a ser muy útil ya que puede dar información sobre

el uso real de agua; pero la instrumentación requerida se encuentra apenas en desarrollo, por lo que disminuye su eficacia.

En resumen, no basta con las medidas de evapotranspiración para conocer las necesidades de agua de un cultivo, dado que ningún método implica todos los factores que puedan modificar este uso de agua. Otros criterios que se presentarán después toman en cuenta no solo a la evapotranspiración sino también al suelo y a la planta.

Comparación entre los diferentes métodos clásicos

A varios autores les ha interesado encontrar la mejor fórmula para calcular la evapotranspiración; Taylor, -- 1972 (55) reporta un experimento llevado a cabo en Greenville E.U.A., en 1955, que consistía en evaluar la evapotranspiración real por el método de muestreo de humedad en el -- suelo y comparar dichos valores con los obtenidos por cuatro fórmulas empíricas. Como conclusiones se obtuvo que -- los cálculos de Blaney y Criddle dan valores a veces ligeramente más bajos que la evapotranspiración real, Thorthwaite da siempre valores más bajos, quizá porque no toma en cuenta la energía de advección. Los datos de evaporímetro son más bajos aún; se puede suponer entonces que los coeficientes de transformación usados (los de Ashcraft y Taylor, -- 1953) eran pequeños; y aparentemente los valores de Penman son los más parecidos a los reales, así como los más consistentes.

Se puede finalmente demostrar que los valores estacionales dados por todas estas fórmulas son relativamente precisas, pero que en periodos más cortos disminuyen su eficacia. De esta manera un sistema de irrigación basado en estos criterios sólo podrá planear necesidades de agua alejadas de la realidad ya que será difícil evaluar los diferentes usos diarios de agua por las plantas.

Los métodos meteorológicos que se mencionaron en el inciso anterior (aerodinámicos) llegan a medir la evapotranspiración en periodos muy cortos (minutos) pero requieren el empleo de instrumentación y datos muy complicados.

En cuanto a la evapotranspiración de cubas, debe hacerse notar que el intercambio de energía de la cuba es diferente que el de la vegetación ya que el almacenamiento de calor en el evaporímetro es mayor que en las superficies vegetales. A pesar de esta objeción, la correlación entre la evapotranspiración potencial y la de cuba (E_o) por periodos mensuales es relativamente alta, no sucediendo lo mismo al comparar con la evapotranspiración real donde la correlación es muy baja, Pouzoulet 1969 (40).

En forma resumida, se puede decir que la validez de los métodos empíricos aumenta, cuando son calibrados con medidas en cultivos específicos para una región dada y cuando se agranda el periodo de estimación. Los métodos como el de Penman (basado en el balance de energía) parecen ser más confiables y a continuación los que utilizan radiación (con

correcciones de temperatura). Las cubas pueden aumentar en confiabilidad una vez que son calibradas, pero los atmómetros no son útiles en la práctica por la dificultad de mantenerlos.

Se puede ver que la evapotranspiración que está -- siendo calculada, ya sea a partir del cultivo, clima y/o humedad del suelo está en un límite superior de evapotranspiración que a su vez está determinado por factores meteorológicos.

Dado que muchos cultivos no requieren tanta agua durante todas las etapas de su ciclo, como para tener siempre evapotranspiración potencial, es necesario utilizar un nuevo criterio para cuando el agua es limitante en una porción de su ciclo. De esta forma, en la planeación y discusión de los requerimientos de agua de los cultivos se debe incluir la evapotranspiración potencial y la real, suponiendo que pueden haber limitaciones de agua determinadas en algunos estados del crecimiento, así como otros factores que influyan significativamente sobre el cultivo, como las enfermedades, nutrientes, defoliación, etc.

CAPITULO III

CRITERIOS MODERNOS DE IRRIGACION

Una aportación importante al estudio de las relaciones agua-planta-suelo ha sido considerar que no siempre el agua en el suelo está a capacidad de campo y que por lo tanto los cultivos se someten a condiciones de déficits de agua de mayor o menor grado.

Aunque en un principio se suponía que la tensión de agua provocada por tales déficits de agua era constante, posteriormente Denmead y Shaw 1962 (46), en trabajos muy importantes, llegaron a la conclusión de que las distintas etapas de un cultivo cambian de susceptibilidad a la falta de agua y que el marchitamiento de la planta comienza tan pronto como la evapotranspiración decrece de su valor potencial, y no cuando la humedad en el suelo llega al punto de marchitamiento permanente como se consideró por mucho tiempo.

Estas nuevas ideas produjeron una escuela de fisiología vegetal que se interesaba en determinar el efecto de la disminución de agua en el suelo; pero midiéndolo sobre la planta misma, aduciendo que sólo el estado interno del agua en la planta podría indicar la tensión de agua a la que está sometida y que el potencial de agua en el suelo es

una medida muy relativa.

En el congreso de zonas áridas de la UNESCO, 1960, 1961, 1962 (en 55) se revisaron estos criterios y los métodos principales para medir el potencial de agua dentro de la planta. Pero con tales métodos el investigador se somete a muchas limitaciones metodológicas mientras no mejore la instrumentación. Debido a ésto, se han empleado medidas muy subjetivas y poco confiables.

Otros autores, en cambio, han tratado de introducir evaluaciones cuantitativas de las variables que afectan la producción y han desarrollado así nuevos métodos para programar la irrigación. Se pueden mencionar los trabajos de Shaw 1963 (en 25), Downey 1972 (11), Haise y Hagan 1967 (19), Jensen 1970 (24), Lembke 1972 (31), quienes incluyen en sus modelos datos climatológicos, humedad del suelo, evapotranspiración, el déficit de agua y su duración (sobre datos de funciones de producción). Aunque sus planteamientos son muy interesantes no definen la relación entre humedad del suelo, factores climatológicos y el crecimiento o rendimiento de la planta.

Wisner en 1970 (60) propone un modelo muy completo sobre balance diario de agua que incluye tanto precipitación como riego y utiliza datos de evaporación de cuba transformados a evapotranspiración potencial, déficits de agua permitidos, extensión de la raíz en el suelo, humedad en el

suelo, etc. Su método se basa en una revisión bibliográfica muy amplia y tiene la ventaja de que se adapta al número de datos disponibles donde se aplique, pero al mismo tiempo tiene el inconveniente de que sólo es útil para cuantificación directa en el campo, ya que para hacer predicciones a largo plazo se utilizan transformaciones mensuales o anuales, reduciéndose así su exactitud, como sucede con las fórmulas para calcular evapotranspiración que emplean datos promedio. De esta forma, es necesario que las estimaciones de evapotranspiración y otros factores que la modifican sean cuantificadas diariamente.

Se puede decir que algunos de los trabajos más completos sobre el tema son los que incluyen la relación entre el suelo, el clima y el crecimiento.

En 1967 Musgrave y Flinn (en 16) postularon un modelo de simulación para el crecimiento del maíz y suponen que cualquier día en que la evapotranspiración real es menor -- que la potencial, se está produciendo tensión sobre la planta y se detiene el crecimiento aunque no especifican si se detiene totalmente o si disminuye y en qué grado.

En 1968 Jensen (en 23) encontró que los cultivos se pueden dividir en determinados e indeterminados según si -- tienen o no, una etapa de su ciclo más sensitiva a la falta de agua. Presenta un término de difícil cuantificación como es la sensibilidad del cultivo en un estado determinado, pero Shaw y Lang 1966 (47) habían encontrado anteriormente

las funciones que permiten calcular el coeficiente de sensibilidad.

En 1971, Windsor (62) propuso un modelo en el que - para medir cuantitativamente el crecimiento, cuando el contenido de humedad del suelo excede un cierto porcentaje en que la planta ya no pierde turgencia, la planta transpira a la velocidad de la evapotranspiración potencial, pero cuando la humedad del suelo provoca pérdida de turgencia, se tiene un día de tensión de humedad.

Se basa también en trabajos de Denmead y Shaw, calcula evaporación de cuba y utilizando un coeficiente de cultivo obtiene la evapotranspiración potencial. La evapotranspiración real se calcula con datos de la humedad disponible en la zona radicular y con curvas experimentales que relacionan el porcentaje de pérdida de turgencia con la evapotranspiración potencial. (Fig. 2).

Supone que la producción biológica total Y_b , en un período K puede ser calculada por

$$Y_b = \sum_{k=1}^k w_k \quad (5)$$

donde w_k es el incremento en la acumulación de materia seca en un estado particular y que vale cero si la planta está sometida a tensión de agua.

Aunque el modelo considera muchas de las variables

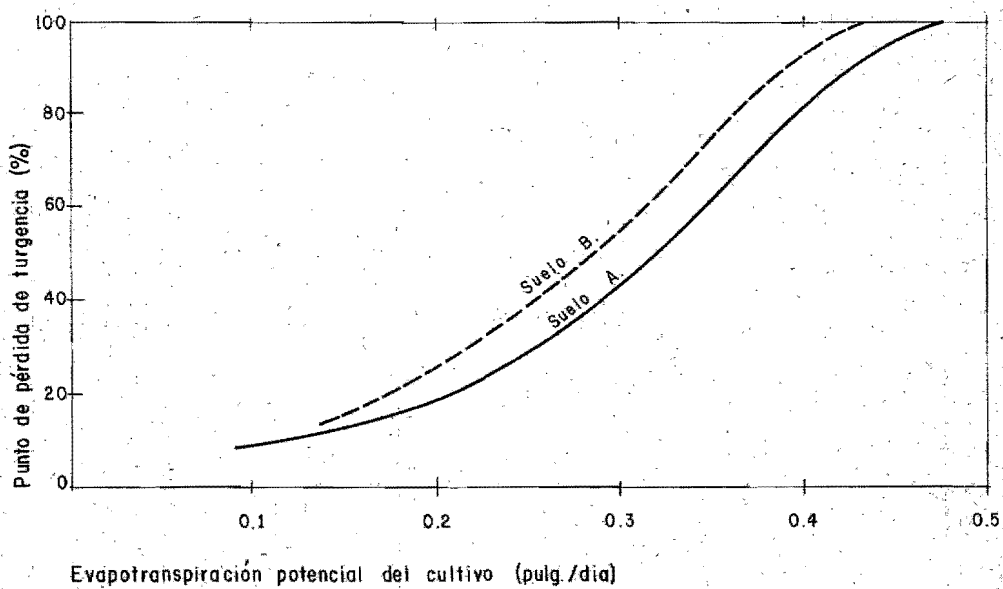


Fig- 2 Relación entre la evapotranspiración potencial y el punto de pérdida de turgencia (de Windsor, 1971)

que afectan el crecimiento vegetal, es todavía una versión muy simplificada del sistema físico.

El criterio de Windsor y el que se propone posteriormente en este trabajo, son muy semejantes entre sí, pero -- aunque ambos consideran que la suma de días de tensión es de terminante en la producción biológica final, Windsor cuantifica el crecimiento diario sobre una medida del estado interno de agua como es la turgencia mientras que Flinn, 1971 -- (15), lo cuantifica a partir de la evapotranspiración relativa.

Las tendencias antes expuestas muestran que la información presentada en adición a mejores datos y criterios más refinados, puede ser incorporada en métodos que predigan proyectos de irrigación.

La evapotranspiración, sin déficit de agua, puede calcularse de condiciones climáticas normales, a partir de registros de evaporímetro, mientras que la evapotranspiración sin irrigación puede predecirse de medidas de la profundidad del suelo, su capacidad para contener agua y el tipo de suelo en cuestión. Igualmente se considerará la lluvia que se presentó.

Los nuevos criterios presentan también la relación básica entre la producción de un cultivo, la humedad del suelo y la evapotranspiración.

Otros criterios para incluir en los modelos de riego

Para poder utilizar los modelos de irrigación de -- los cuales se habló se requiere, en general, información sobre la evaporación real y potencial en varios estados del crecimiento de las plantas, las características de retención de agua en el suelo, los déficits de agua permitidos en relación con la demanda evaporativa, el efecto de estos déficits en diferentes estados del ciclo vegetativo y su influencia en la producción final, las características de la raíz y su desarrollo principalmente. Uno de los criterios nuevos es el desarrollo de métodos cuantitativos que determinen el grado de tensión impuesto a una planta, para poder comprar cuantitativamente el resultado de diferentes manejos de un cultivo.

Hagan 1972 (20) propone que una vez que se conozca una forma de evaluar con exactitud la tensión sobre la planta, sería importante comparar la influencia de los déficits de agua sobre diferentes órganos de la planta, sobre todo con el que mayor valor económico tenga. Sugiere igualmente el desarrollo de tablas sobre disminución permitida de humedad en el suelo o de aumento de tensión, pero que incluyan las condiciones de demanda evaporativa, así como los factores que afectan la extracción de agua del suelo.

También es necesario la consideración de otros factores que afectan particularmente a la evapotranspiración, uno de los más importantes es el grado de cobertura vegetal,

ya que la mayor diferencia entre la evapotranspiración de los cultivos ocurre cuando la cobertura es menor del 50% -- máximo. En esta etapa la evapotranspiración de muchos cultivos es menor que cuando la cobertura es menor o igual que el 50% y por otra parte la diferencia en evapotranspiración de diferentes cultivos al tener una cobertura sobre 50% es casi nula, Gates 1967 (16).

Las prácticas de cultivo influyen grandemente en el uso de agua en agricultura, una de las principales es el -- deshierbe. La presencia de hierbas provoca un mayor uso de agua dado que provocan con sus raíces una menor resistencia difusiva del agua en el suelo, además de que transpiran agua que proviene de capas profundas del suelo, que no se evaporaría por si sola.

Las labores de cultivo en las primeras etapas del -- desarrollo sí llegan a reducir la evaporación, al igual que la alteración físico química del suelo por aplicación de -- insecticidas, herbicidas y otros, Kern 1967 (26), menciona estos aspectos pero no cita su grado de influencia que sería interesante evaluar en un estudio específico.

Las formas de aplicar riego deberán ser incluidas -- en modelos futuros, como sugiere Windsor 1971 (62). Otro -- factor importante es el uso de fertilizantes en su relación con la evapotranspiración y la producción del cultivo, la -- bibliografía al respecto es muy extensa, Black 1967 (2), -- Fernández 1968 (14), S.R.H. 1971 (52), etc. aunque se ha --

comprobado que la fertilización con nitrógeno y fósforo no influye en la evapotranspiración, Jensen 1969 (24), 1968 -- (23), la aplicación de fertilizante puede aumentar la producción sin variar las cantidades de agua.

Necesidades de nuevos criterios

La información con la que se cuenta en la actualidad permite en muchos casos cuantificar la demanda de agua y -- los beneficios de irrigación en agricultura, sin embargo, -- la respuesta de los cultivos no depende solo de la entrada de agua en un momento dado, sino además de una serie de fenómenos que deben intervenir en modelos que permitan la planeación futura.

En 1971 J. Flinn propuso un modelo de simulación de sistemas de irrigación de cultivo, que se basa en la recopilación de los aspectos más importantes del uso del agua por las plantas, integrados en forma lógica. Antes de hablar -- de dicho modelo se explican en este capítulo los criterios tomados en cuenta por Flinn para establecerlo y que hicieron que se le considerara el método más adecuado. Tres son las consideraciones principales para desarrollar el método:

a) El rendimiento potencial de un cultivo está determinado por su genotipo, por lo que debe seleccionarse un cultivo adaptado al medio.

b) Los factores que más modifican el rendimiento --

potencial son climáticos, nutricionales y el manejo del cultivo.

c) El crecimiento vegetal es dependiente del déficit de humedad al que se desarrolla el cultivo; este déficit a su vez depende de la relación entre la humedad disponible en el suelo y la demanda atmosférica de humedad.

En cuanto a las relaciones agua-planta-suelo, el modelo debe incluir el aspecto agronómico, el del suelo y la teoría meteorológica; sus interrelaciones deben ser medidas por los siguientes parámetros físicos y biológicos:

- La tensión de agua en la planta es consecuencia de la transpiración y ocurre cuando la turgencia baja de cierto valor, Kramer 1969 (29).

- Los parámetros que determinan la tensión son la velocidad con la que la raíz absorbe agua del suelo y la velocidad con que el agua se pierde en la atmósfera por transpiración. Si el suelo está seco y la demanda evaporativa excede la habilidad de la planta para absorber agua, se reduce la transpiración y la planta pierde turgencia, Levitt 1969 (32).

- Ante una situación de tensión de agua, disminuye el crecimiento o se detiene, de esta forma se reduce el rendimiento esperado, Windsor 1971 (62).

Por lo que se refiere a la atmósfera se toma en --

cuenta lo siguiente:

- La evapotranspiración potencial permite deducir la velocidad de transpiración, Denmead 1960 (9).

- Para calcular la evapotranspiración potencial hay varios métodos. Penman lo hace a partir de evaporación de cuba (E_o) y un factor empírico de cultivo (f), Flinn 1971 - (15).

$$E_t = fE_o \quad (6)$$

- El factor de cultivo varía con el estado de crecimiento el genotipo y el manejo. Aceptando las limitaciones que tiene su uso, es útil para indicar el estado en que se encuentra el cultivo, Flinn 1971 (15).

La E_o depende de la temperatura, la radiación y la humedad.

Sobre el riego Flinn postula que:

- Si se conocen E_o y f la demanda de agua puede ser satisfecha.

- Las necesidades de agua variarán con el volumen de suelo ocupado por las raíces, por lo tanto al calcular la lámina de agua por aplicar en cada riego, deberá considerarse la densidad y la profundidad radicular, Flinn 1971 (15).

- La verdadera disponibilidad de agua en el suelo

está dada por la tensión en el suelo. La capacidad de campo está en 0.3 bars. aprox. y el punto de marchitamiento permanente en 15 bars, Turk 1972 (57).

En cuanto a la pérdida real de agua las condiciones son:

- Cuando baja el nivel de humedad del suelo y por lo tanto aumenta la tensión se llega al marchitamiento donde la evapotranspiración real cae bajo la potencial, Taylor 1972 (55).

- Closs sugirió que para cualquier sistema agua-planta-suelo, para cada contenido de humedad hay una velocidad máxima con la que la planta puede absorber agua del suelo, a la que Lawry llamó E_m , Flinn 1971 (15).

- Denmead y Shaw midieron la evapotranspiración relativa E_a/E_t en función de la humedad del suelo y de la evapotranspiración potencial diaria (ver pag. y fig. 1), Denmead 1962 (10).

- Para Linacre la E_m depende de las condiciones de humedad del suelo, mientras que la E_t depende del clima. De esta forma hay posibilidad de que E_m sea menor que E_t y por lo tanto que E_a esté por debajo de E_t .

De esta forma

$$E_a = E_t \quad \text{si } E_t < E_m \quad (7)$$

$$E_a = E_m \quad \text{si } E_t > E_m$$

- Los aspectos anteriores se pueden reunir en una ecuación

$$P = \frac{E_a}{E_t} f(E_t, ASM) \quad (8)$$

donde

- P = Evapotranspiración relativa
- E_t = Evapotranspiración real
- ASM = Humedad disponible en el suelo

Por lo que respecta al déficit de humedad y al rendimiento se tiene que:

- La falta de agua afecta fisiológicamente al crecimiento vegetal, aunque no se han establecido claramente los límites, Levitt 1969 (32).

- La humedad del suelo, el tipo de suelo, el volumen y densidad de la raíz, el genotipo y la E_t determinan la tensión de agua, Slatyer 1967 (50).

- A pesar de que es difícil cuantificar la relación crecimiento-agua, Moore explica el crecimiento por la situación suelo-atmósfera. Flemming postula que se tiene un día de tensión cuando E_a es menor que E_t y el crecimiento se ve afectado. El rendimiento final del cultivo es entonces proporcional al número de días sin tensión acumulados en el ciclo, Flinn 1971 (15).

- Sin embargo el crecimiento no cesa definitivamente con la tensión, Flinn propone que cuando la evapotranspi

ración relativa (P) es menor que 0.5 el crecimiento vale ce_ ro. Y entre 1 y 0.5 el crecimiento decrece linealmente.

CAPITULO IV

EL MODELO PROPUESTO POR J. FLINN

En base a la información antes citada, Flinn postula que un modelo de simulación de crecimiento vegetal debe incluir:

- a) Un método para conocer E_a .

Puede ser determinada diariamente a partir de la fórmula de Penman $E_t = fE_o$, y $E_a = P_t$ donde f es el factor de cultivo y P corresponde a determinadas condiciones atmosféricas y del suelo.

- b) Un método para conocer la humedad del suelo en la zona radicular (SM_t). Esto se puede lograr restando la pérdida por evapotranspiración (E_{a_t}) menos la percolación y escurrimiento (DR_t) más la cantidad de lluvia efectiva (P_t), la irrigación (I_t) y el movimiento capilar (C_t), más lo que se tenía de humedad en el día anterior (SM_{t-1})

$$SM_t = SM_{t-1} + P_t + I_t + C_t - E_{a_t} - DR_t \quad (9)$$

- c) Un método para relacionar el crecimiento vegetal con la incidencia de déficits de agua en un tiempo dado. A partir de la evapotranspiración relativa (P):

$P < 0.5$, crecimiento igual a cero.
 $0.5 < P > 1$, el crecimiento disminuye linealmente.

Datos climatológicos requeridos

Registro diario de lluvia, temperatura, evaporación, humedad aprovechable, y capacidad de retención de agua en varias capas de suelo.

Datos biológicos

Factor de cultivo (f), valores de evapotranspiración relativa (P), efecto del déficit de agua en diferentes estados, humedad en la zona radicular, extensión de la raíz. - También es necesario considerar la relación entre los diferentes estados fisiológicos del cultivo y el tiempo.

Flinn propone, como algunos autores, que en el caso del maíz la suma de temperaturas diarias (grados-día) permite determinar el estado fisiológico del cultivo. Esto es útil ya que el factor de cultivo se determina para cada estado de desarrollo.

Los valores de evapotranspiración relativa (P), se obtienen del trabajo de Denmead y Shaw (pag. 14). En cuanto a la distribución espacial de la raíz, Shaw ha encontrado que el 60% de la humedad es extraído del primer tercio de la longitud total de la raíz, 30% del segundo tercio y finalmente 10% de la última porción. Para evaluar P se considera el contenido de humedad en el primer tercio de la raíz.

El modelo de J. Flinn

El criterio seguido es irrigar cuando la humedad en la zona de mayor absorción baje a un nivel predeterminado. Los valores de precipitación que solo humedecen una pequeña capa superficial de suelo son ignorados. La lluvia que no eleva la zona de mayor absorción del suelo a capacidad de campo no se infiltra y se pierde a velocidad E_t .

Con los datos iniciales de temperatura, precipitación y E_o diarios, se corre el modelo con $f = 0.15$ (condiciones de barbecho) hasta que se tienen condiciones aptas para la emergencia de las plántulas. De allí en adelante se inicia la suma de temperatura diaria que determinará el tiempo necesario para alcanzar cada estado fisiológico (y por lo tanto f). A partir de aquí el modelo opera en condiciones de crecimiento modificándose de acuerdo con la extensión de la raíz y por tanto con aumento de la zona de máxima absorción. El nivel de humedad en el suelo y su distribución en la zona radical se determina diariamente, junto con E_t , de manera que E_a pueda estimarse a diario. Comparando E_a con E_t , el crecimiento neto diario se puede calcular. La razón entre crecimiento real y potencial en cada estado da una medida del rendimiento en función de la irrigación y de variables climáticas.

Las salidas del modelo de irrigación son básicamente:

1. Cultivo, año, nivel de humedad en el suelo al -

que se irriga rendimiento máximo estimado, fechas predichas de plantación, formación de polen, maduración y cosecha.

2. Días a partir de la emergencia y grados día acumulados, E_o , f , E_t , niveles de humedad en el suelo, evaluación de E_a y a partir de ella, P y el crecimiento neto. Se incluyen también la lluvia, irrigación y patrón de extracción de humedad por la raíz.

3. Es un resumen del año de irrigación, en donde para cada estado fisiológico se da el número de días, E_o , E_t , E_a , precipitación, irrigación, crecimiento y rendimiento esperados.



CAPITULO V

ESTABLECIMIENTO DE UN EXPERIMENTO

Posiblemente una de las aportaciones más valiosas del modelo de Flinn sea el hecho de que permite predecir el manejo de un cultivo respecto al agua sobre la simulación diaria de las relaciones agua-planta-suelo. Esto significa que si se corre el modelo para varios años, diferentes datos meteorológicos y políticas de riego, se puede obtener una distribución de frecuencias del rendimiento, dependiendo de diferentes estrategias, de donde es posible escoger las cantidades óptimas de irrigación para tener el máximo rendimiento, bajo diferentes condiciones climatológicas para cada año.

Los resultados obtenidos deberán ser comparados con datos reales con objeto de determinar la eficacia del método. Dicha eficacia dependerá en gran parte de la evaluación suficientemente exacta de los parámetros en los que se basa el modelo, principalmente la evapotranspiración real (E_a) y la evapotranspiración potencial (E_p) cuya relación diaria determina si el cultivo está sometido a déficit de agua y por lo mismo si hay reducción en el crecimiento.

A pesar de que en el modelo se pueden incluir datos

reportados en la literatura o mediciones meteorológicas indirectas como lo hace Flinn, esto hace suponer que no hay cambios importantes al aplicarse en lugares diferentes o bien que las variaciones son suficientemente conocidas para tomarlas en cuenta.

Así se llegó a la necesidad de postular un experimento para obtener datos reales que permitieran detectar las dificultades en el uso y aplicabilidad del modelo.

Para Flinn las diferencias al comprobar sus resultados con datos reales se deben a la evaluación del aspecto biológico que es el objeto de estudio en este experimento.

Los valores de evapotranspiración potencial (E_t), evapotranspiración real (E_a) y el factor empírico del cultivo que se han considerado indirectamente en otros trabajos, se calculan experimentalmente.

Para un volumen conocido de suelo, la diferencia de humedad a la misma profundidad en 2 días consecutivos permite conocer la cantidad de agua perdida por evapotranspiración, o sea E_a . Aunque Flinn relaciona E_a con la humedad del suelo, si se hiciera con la tensión de humedad en el suelo ψ , se podría evitar la consideración del tipo de suelo, de esta forma, la relación entre E_a y la tensión permite calcular una E_t diaria. (Denmead y Shaw pag. 14). Si se registra E_o se puede obtener el factor de cultivo (f) diario.
$$\left(\frac{E_t}{E_o} = f\right).$$

El conocimiento experimental de f permitirá observar su variación real en el tiempo. Se supone que aumenta gradualmente en la etapa de emergencia hasta el estado de crecimiento rápido donde empieza a declinar su valor. Será también interesante determinar si es indirectamente dependiente del tiempo cuando el desarrollo del cultivo se ve afectado por algún factor ya sea climático o de manejo, así como la posible variación de valores de f dentro de un mismo estado de desarrollo.

Otro aspecto que habrá de estudiarse es el criterio que define el estado en el que se encuentra el cultivo. Flinn determina las diferentes etapas por suma de grados día pero posiblemente tal método no sea útil en regiones donde las temperaturas diarias sean siempre altas.

Finalmente, otro punto importante es conocer la relación entre el crecimiento diario y la evapotranspiración relativa. El crecimiento puede ser proporcional a $\frac{E_a}{E_t}$; puede ser máximo hasta determinado nivel de tensión, o bien el número de días de tensión de humedad puede afectar el rendimiento en distinto grado.

Los puntos anteriores se estudian sobre maíz con objeto de utilizar el mismo cultivo considerado por Flinn y debido también a que la variedad empleada en este trabajo (H-30) es apropiada para siembra en el mes de septiembre, época de iniciación del experimento desarrollado.

CAPITULO VI

MATERIAL Y METODOS

En terrenos del Instituto de Ingeniería de la UNAM se construyó una zona experimental de 10.0 x 6.0 m., dividida en 6 parcelas de 1.50 x 4.0 m y 1.50 m de profundidad. - Se preparó además un área de 0.50 x 1.50 m y 1.50 m de profundidad, con una pared de vidrio transparente con objeto - de observar el crecimiento y desarrollo de la raíz y poder determinar la profundidad que se debía abarcar con cada riego. Las parcelas fueron techadas con láminas de material - translúcido ya que se quería contabilizar la humedad del -- suelo sin influencia de la lluvia.

Dentro de la misma zona experimental se instalaron un evaporímetro, para registrar evaporación de cuba (Eo), - un termógrafo y un higrómetro.

El seis de septiembre de 1973 se sembró maíz variedad H-30 (para zonas altas), tres semillas por puesto. Los surcos se formaron cada 60 cm y las plantas tenían una separación de 50 cm entre sí.

Se dió un riego de punta el día de la siembra, de - manera que la humedad del suelo llegara a capacidad de campo.

En lo sucesivo la política de riego consistió en regar a capacidad de campo cuando la humedad en el suelo en la zona de mayor absorción de agua (zona de mayor densidad radicular) bajaba hasta un límite previamente fijado, 80, 60 y 40% de la capacidad de campo en las parcelas 5 y 6, 1 y 2, 3 y 4, respectivamente, cuantificándose el agua empleada para regar.

De esta forma se intentó someter a cada par de parcelas a diferentes grados de tensión de humedad.

Características del suelo

Se empleó un suelo arcillo-arenoso, con una densidad aparente de 0.67, del mismo tipo en toda la profundidad, con el objeto de facilitar la cuantificación del contenido de humedad.

Las características químicas del suelo se analizaron en dos ocasiones. El primer análisis fué realizado por Guanos y Fertilizantes de México; el segundo por el Instituto de Ingeniería de la UNAM.

Las seis parcelas tenían contenidos muy semejantes de nutrientes; los niveles de nitrógeno y fósforo (90 Kgs/Ha. N y 20 Kgs/Ha. P) resultaron bajos, por lo que se fertilizó en los días 8 y 25 de octubre con 48 Kgs/Ha. de Sulfato de Amonio y 200 Kg/Ha. de superfosfato de calcio.

Se encontró un contenido de materia orgánica de 3.6%.

Medida de la capacidad de campo

En recipientes de varios volúmenes se colocaron muestras de suelo de las seis parcelas, y se regaron hasta que el agua escurrió por los agujeros de drenaje. A partir de este momento se tomaron lecturas del contenido de humedad y de succión, con intervalos de una hora.

Dado que la capacidad de campo es el contenido de humedad a partir del cual la humedad del suelo se estabiliza temporalmente o disminuye lentamente, o bien es el punto en el cual el tensiómetro empieza a registrar succión, las mediciones se suspendieron cuando la humedad no variaba sensiblemente.

Los resultados obtenidos coincidieron con los valores de capacidad de campo esperados con base en el análisis granulométrico, encontrándose entre 28 y 24% de humedad respecto a peso húmedo del suelo. Se tomó definitivamente el valor de 26%.

Medida del punto de marchitamiento permanente

Se determinó mediante la prueba estándar de girasol enano. Palacios Vélez 1966 (35). Se sembraron semillas de girasol enano en macetas con suelo problema. Cuando se desarrolló la cuarta hoja del girasol, se suspendió el riego. Conforme las plantas mostraban signos de marchitamiento en todas las hojas, se colocaban en una atmósfera saturada, -- por períodos de 16 a 18 horas. En caso de que las cuatro --

hojas recuperaron la turgencia, se retiraban las macetas de la atmósfera saturada, continuándose la restricción en el riego. Las plantas que no recuperaban la turgencia en la atmósfera saturada se regaban hasta la recuperación.

El punto de marchitamiento permanente es el contenido máximo de humedad en el suelo, en el cuál las plantas no se reponen en una atmósfera saturada cuando presentan signos visibles de marchitez. Los resultados encontrados están en el rango 6.1 y 8.25% de humedad respecto a peso húmedo.

Medición de la humedad del suelo

Entre el 7 y el 27 de septiembre de 1973 se midió el contenido de humedad en el suelo con el medidor "Bouyoucos" (Industrial Instruments, Inc. Mod. BN-2A). Consiste en un par de electrodos incluidos en un bloque de yeso que se entierra en el suelo. Los cambios de humedad en el suelo se traducen en un cambio de humedad en los bloques de yeso, variando la conductividad eléctrica de la solución entre los electrodos, que se registra mediante un puente de resistencia conectado a los bloques.

En el centro de cada parcela se enterraron tres pastillas de yeso a 0.20, 0.60 y 1.20 m de profundidad y se registraba la humedad dos veces al día.

Se intentó calibrar el aparato Bouyoucos con medidas de humedad dadas por el método gravimétrico, pero no se obtuvieron resultados consistentes. Cada contenido de hume

dad puede estar representado por más de dos valores muy diferentes del Bouyoucos. Incluso se encontraron diferencias notables de registro entre cada pastilla de yeso. De esta forma, se decidió adoptar otro método.

A partir del 27 de septiembre, se utilizó el aparato medidor de humedad "Speedy" (Thomas Ashworth & Co. Mod. F1). Consiste en una cámara metálica conectada a un manómetro. Un peso conocido de suelo (6.0 gr) se introduce en la cámara, junto con una medida constante de carburo de calcio, que actúa como desecador. El agua de la muestra de suelo reacciona con el carburo de calcio, emitiendo acetileno, cuya presión es registrada en el manómetro y es proporcional al contenido de humedad de la muestra. La calibración del aparato Speedy con el método gravimétrico demostró que la humedad registrada es ligeramente menor que la humedad real del suelo, pero la respuesta es consistente y predecible.

El muestreo se hizo en la zona de mayor absorción radicular.

Datos meteorológicos

Durante el curso del experimento se midieron diariamente la humedad relativa del ambiente (con un higrómetro de cabello R. Fuess Mod. 41a), y la evaporación de cuba (con evaporímetro clase A). La temperatura se registró con un termógrafo (R. Fuess Mod. 79).

Labores de cultivo

De manera preventiva se aplicó Clordano al suelo antes de la siembra.

El 21 de septiembre se hizo el aclareo dejando una planta por puesto y dos barbechos el 5 y 25 de septiembre - respectivamente.

Dado que en dos de las plantas se encontraron pulgones del maíz (Aphis maidis), adultos; se aplicó DDT al 5% - el 22 de septiembre y el 21 de noviembre, a todas las plantas.

Registro del crecimiento vegetal

Diariamente se tomaron medidas de la altura total y número de hojas de cada planta. La profundidad radicular - se midió en la zona experimental con pared de vidrio, descrita anteriormente.

Se anotó igualmente, el número de espigas y la fecha de aparición en cada parcela.

A pesar de que debido a la siembra tardía el cultivo debía considerarse como forraje, no fué posible cosechar en estado lechoso, debido a que se llegaron a presentar temperaturas de 3°C durante la noche. De esta forma, el día 13 de diciembre (antes de la aparición de las flores femeninas) se cortaron las partes aéreas, separándose el tallo de

las hojas. El peso fresco de este material se midió en el laboratorio.

Se pesaron también las raíces principales y la mayor cantidad de raicillas secundarias que fué posible separar del suelo, sin embargo, se estima que hay error en los valores del peso de la raíz. Todo el material fué secado al horno (105°C) para medir el rendimiento en peso seco.

Método de cálculo

Para conocer datos como el factor de cultivo (f), la evapotranspiración potencial (Et) y la evapotranspiración relativa (P) se hicieron los siguientes cálculos:

Se parte del conocimiento del nivel diario de humedad en el suelo, que como ya se dijo se obtuvo con el aparato "Speedy". Dado que las lecturas que da este aparato están expresadas sobre peso húmedo, hubo necesidad de transformarlas a por ciento de peso seco; para ésto, se graficó la equivalencia de "Speedy" con porcentos de humedad obtenidos con el método gravimétrico. (Fig. 3-A.a) Esta relación está representada por la función:

$$C = 0.57 \times S_1^{1.2625} \quad (10)$$

donde S_1 es la lectura del Speedy y C el peso seco. La función se obtuvo empíricamente por mínimos cuadrados.

El programa de cálculo se inicia como se muestra en

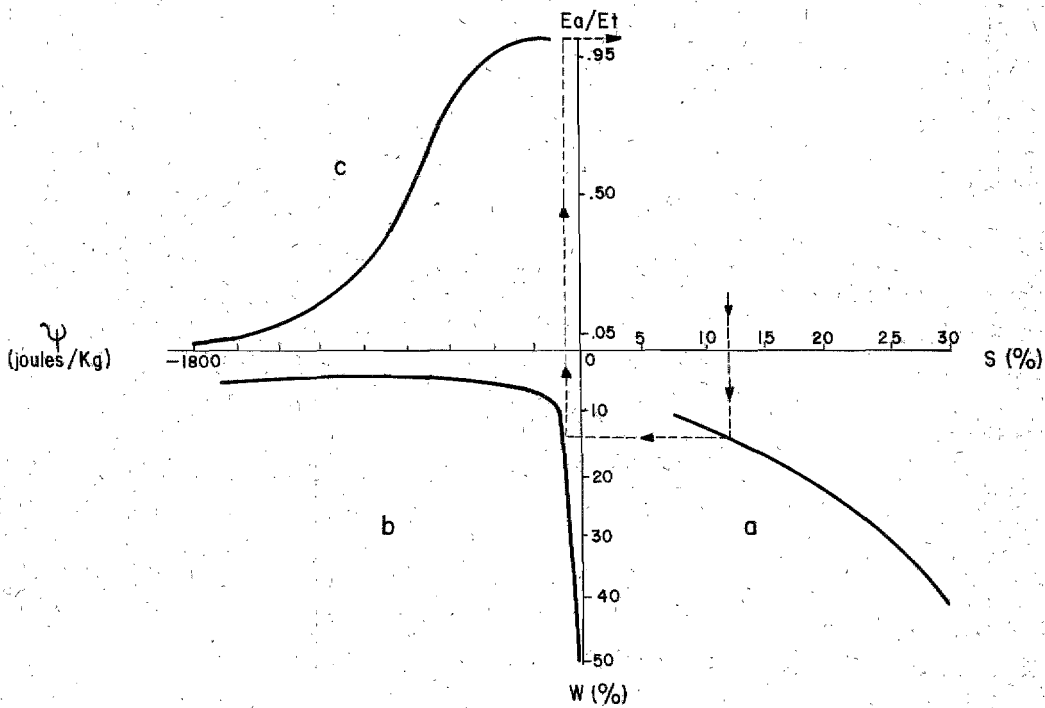


Fig- 3-A Resumen del método de cálculo.

el diagrama de flujo (Fig. 4-A); a partir de la lectura de S_1 (Speedy), de la evaporación (E_0) y de la cantidad de riego, si lo hubo. A continuación S_1 pasa por la curva C, transformándose la medida a peso seco (Fig. 4-A-a).

Se ha encontrado una relación entre la tensión de humedad en el suelo (ψ), registrada con tensiómetro, y el porcentaje de humedad (W). Relación que ha sido definida por Taylor 1972 (55). Para el tipo de suelo utilizado (arcillo arenoso), se determinó por mínimos cuadrados la siguiente función que relaciona a (ψ) y (W)

$$T = (46.2379/C)^{4.5458} \quad (11)$$

T = Tensión (ψ)

C = Contenido de humedad

El siguiente paso consiste en la transformación de la humedad en tensión.

Como ya se mencionó, Denmead y Shaw encontraron las curvas experimentales que definen la relación entre la evapotranspiración relativa (E_a/E_t) y la tensión para varias evapotranspiraciones potenciales (E_t), (Fig. 1). Norero 1971 en (55) agrupó dichas curvas experimentales en una curva promedio que se utilizó para los cálculos de este trabajo. La curva de Norero esta determinada por la ecuación:

$$P = \frac{1}{1 + (T/7351)^{4.84}} \quad (12)$$

DIAGRAMA DE FLUJO

PROGRAMA PARA EL CALCULO DE LA EVAPOTRANSPIRACION RELATIVA, REAL, POTENCIAL Y FACTOR DE CULTIVO

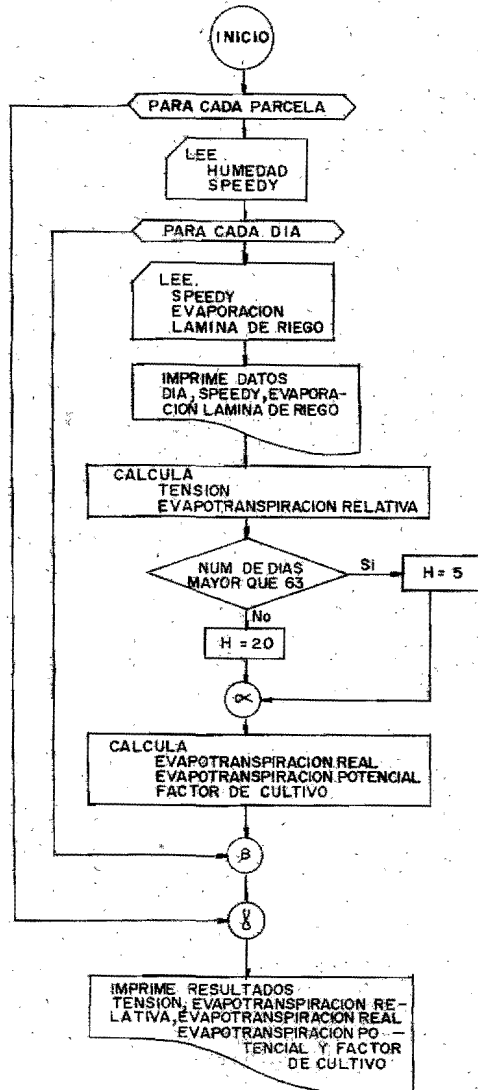


Fig. 4-A

donde P es la evapotranspiración relativa y T la tensión --
(ψ).

De esta forma, la tensión se hace coincidir en la curva P (Fig. 3-A-c), a su vez se obtiene una P para dicha tensión. Conociendo P se puede calcular la evapotranspiración potencial (E_t). Sin embargo, hace falta contar con valores de E_a . Dichos valores provienen de la ecuación (9):

$$SM_t = SM_{t-1} + P_t + I_t + C_t - E_{a_t} - DR_t$$

SM_t = Contenido de humedad en el suelo al final del período t

E_{a_t} = Agua pérdida por transpiración

DR_t = Escurrimiento

P_t = Lluvia efectiva

I_t = Irrigación

C_t = Movimiento capilar

SM_{t-1} = Contenido de humedad en un período previo a t.

En este caso no se tomaron en cuenta el escurrimiento (DR), la lluvia (P) ni el ascenso capilar (C).

Si se conoce el contenido diario de humedad en el suelo, se puede obtener una E_a diaria. E_a se hace entonces intervenir en los cálculos anteriores, que se llevaron a cabo cada día.

Hay que tomar en cuenta que SM está expresado originalmente en porciento de peso húmedo y por lo tanto se le debe transformar a lámina mediante la fórmula:

$$C_1 = S_1 \times 1.3 H/100 \quad (13)$$

C_1 = Contenido de humedad en lámina en cm.

S_1 = Lectura de Speedy (porciento de humedad sobre peso húmedo)

H = Profundidad radicular.

Una vez conociendo E_t se puede obtener el factor de cultivo mediante la relación:

$$E_t = E_o f \quad (14)$$

ya que E_o (La evaporación) se registró para cada día.

Los cálculos se hicieron diariamente para cada tratamiento de humedad.

CAPITULO VII

RESULTADOS

En este capítulo se presenta el registro de datos meteorológicos, tomados durante el desarrollo del cultivo de maíz. Se incluyen también los resultados de los cálculos llevados a cabo para determinar la evapotranspiración potencial (E_t) y real (E_a), el factor de cultivo (f) y la tasa de evapotranspiración relativa (P).

Igualmente se presentan los resultados de tres diferentes tratamientos de humedad en cuanto a altura, crecimiento de la raíz, factor de cultivo y rendimiento en peso seco.

TABLA 1

Datos meteorológicos y profundidad radicular durante el desarrollo del maíz.

Días desde la siembra	Eo (mm)	Profundidad radicular (cm)	Grados día acumulados (°F)	Humedad relativa (%)	Temperatura (°C)
				Lectura a las 17 hr	
22	10	*	1 246.3	-	-
23	0	12.4	1 300.0	45	22
24	40	-	1 356.2	62	18
25	10	14.4	1 407.1	-	-
26	40	15.1	1 463.4	-	-
27	30	18.8	1 517.9	-	-
28	30	20.0	1 574.2	21	24
29	30	21.0	1 628.7	-	-
30	40	21.2	1 680.5	27	24
31	20	21.2	1 732.3	-	-
32	20	20.0	1 787.7	44	22
33	10	21.8	1 844.0	33	24
34	0	21.2	1 893.1	50	23
35	10	18.8	1 941.3	71	18
36	0	20.6	1 993.1	51	21
37	25	23.0	2 044.0	-	-
38	25	-	2 090.4	-	-
39	30	21.5	2 143.1	-	-
40	10	21.6	2 194.0	27	23
41	50	22.6	2 242.2	39	20.5
42	40	22.8	2 290.4	35	21
43	10	-	2 338.6	35	21
44	10	21.0	2 375.1	-	-
45	10	-	2 417.0	-	-
46	10	24.4	2 458.0	-	-
47	30	24.5	2 506.2	60	17
48	0	23.6	2 558.9	33	22
49	30	27.2	2 612.5	51	18
50	0	31.4	2 664.3	36	20
51	25	31.8	2 718.8	50	19
52	25	-	2 767.9	-	-
53	10	33.0	2 816.1	-	-
54	15	34.0	2 866.1	65	18
55	15	43.0	2 917.0	35	23
56	20	39.6	2 971.5	44	19
57	20	-	3 026.0	42	19
58	15	45.4	3 084.1	-	-
59	15	-	3 139.5	32	24
60	30	44.8	3 194.9	-	-
61	20	46.7	3 248.5	21	24
62	10	45.0	3 300.3	26	22

TABLA 1

Días desde la siembra	Eo (mm)	Profundidad radicular (cm)	Grados día acumulados (°F)	Humedad relativa (%)	Temperatura (°C)
				Lectura a las 17 hr	
63	20	48.2	3 353.9	21	23
64	20	5.0	3 404.8	14	24.5
65	20		3 451.2	-	-
66	20		3 495.8	-	-
67	20		3 544.0	54	16
68	20		3 592.2	92	12
69	10		3 639.5	48	18
70	30		3 687.7	18	21
71	10		3 735.0	-	-
72	20		3 783.2	-	-
73	20		3 833.2	-	-
74	25		3 885.0	27	22
75	25		3 939.5	16	23.5
76	10		3 993.5	21	24
77	10		4 046.7	23	20
78	20		4 100.3	-	-
79	20		4 149.4	-	-
80	20		4 201.2	42	20
81	20		4 249.4	31	21.5
82	10		4 301.2	60	15
83	10		4 343.1	32	16.5
84	30		4 381.4	35	17
85	10		4 420.6	-	-
86	15		4 462.5	-	-
87	15		4 508.9	31	19
88	10		4 560.7	18	23
89	10		4 611.6	29	21
90	30		4 661.6	32	18
91	20		4 704.4	75	12
92	10		4 739.1	-	-
93	20		4 782.8	-	-
94	20		4 823.8	-	-
95	20		4 859.4	34	17
96	10		4 901.3	30	18
97	0		4 944.1	-	-

* Los espacios en blanco corresponden a falta de registro.

PARCELA NUMERO 1 (60%)

Día	Evaporación	ETP	ETA	P	F	S1
1	0.01	-0.71	-0.71	1.00	-71.00	33.50
2	0.10	0.05	0.05	1.00	0.52	33.30
3	0.10	0.47	0.47	1.00	4.68	31.50
4	0.10	0.03	0.03	1.00	0.26	31.40
5	0.20	0.21	0.21	1.00	1.04	30.60
6	0.40	0.03	0.03	1.00	0.07	30.50
7	0.20	0.03	0.03	1.00	0.13	30.40
8	0.30	0.03	0.03	1.00	0.09	30.30
9	0.20	0.03	0.03	1.00	0.13	30.20
10	0.10	0.05	0.05	1.00	0.52	30.00
11	0.20	0.16	0.16	1.00	0.78	29.40
12	0.40	-0.91	-0.91	1.00	- 2.28	32.90
13	0.01	0.03	0.03	1.00	2.60	32.80
14	0.40	0.03	0.03	1.00	0.07	32.70
15	0.20	0.03	0.03	1.00	0.13	32.60
16	0.30	0.05	0.05	1.00	0.17	32.40
17	0.20	0.03	0.03	1.00	0.13	32.30
18	0.20	0.05	0.05	1.00	0.26	32.10
19	0.20	0.03	0.03	1.00	0.13	32.00
20	0.20	0.03	0.03	1.00	0.13	31.90
21	0.10	0.03	0.03	1.00	0.26	31.80
22	0.10	-0.52	-0.52	1.00	- 5.20	33.80
23	0.01	0.10	0.10	1.00	10.40	33.40
24	0.40	0.05	0.05	1.00	0.13	33.20
25	0.10	0.05	0.05	1.00	0.52	33.00
26	0.40	0.05	0.05	1.00	0.13	32.80
27	0.30	0.16	0.16	1.00	0.52	32.20
28	0.30	0.10	0.10	1.00	0.35	31.80
29	0.30	0.10	0.10	1.00	0.35	31.40
30	0.40	0.10	0.10	1.00	0.26	31.00
31	0.20	0.10	0.10	1.00	0.52	30.60
32	0.20	0.16	0.16	1.00	0.78	30.00
33	0.10	0.05	0.05	1.00	0.52	29.20
34	0.01	0.21	0.21	1.00	20.80	29.00
35	0.10	0.05	0.05	1.00	0.52	28.80
36	0.00	0.16	0.16	1.00	0.52	28.20
37	0.25	0.31	0.31	1.00	1.25	27.60
38	0.25	0.10	0.10	1.00	0.42	27.20
39	0.30	0.10	0.10	1.00	0.35	26.80
40	0.10	0.10	0.10	1.00	1.04	26.40
41	0.50	0.16	0.16	1.00	0.31	25.80
42	0.40	0.10	0.10	1.00	0.26	25.40
43	0.10	0.10	0.10	1.00	0.04	25.00
44	0.10	0.05	0.05	1.00	0.52	24.80
45	0.10	0.05	0.05	1.00	0.52	24.60

PARCELA NUMERO 1 (60%)

Hoja No. 2

46	0.10	0.05	0.05	1.00	0.52	24.40
47	0.30	0.08	0.08	1.00	0.26	24.10
48	0.01	0.03	0.03	1.00	2.60	24.00
49	0.30	0.08	0.08	1.00	0.26	23.70
50	0.01	0.08	0.08	1.00	7.80	23.40
51	0.25	0.05	0.05	1.00	0.21	23.20
52	0.25	0.05	0.05	1.00	0.21	23.00
53	0.10	0.05	0.05	1.00	0.52	22.80
54	0.15	0.05	0.05	1.00	0.35	22.80
55	0.15	0.08	0.08	1.00	0.52	22.30
56	0.20	0.08	0.08	1.00	0.39	22.00
57	0.20	0.05	0.05	1.00	0.26	21.80
58	0.15	0.08	0.08	1.00	0.52	21.50
59	0.15	0.03	0.03	1.00	0.17	21.40
60	0.30	0.08	0.08	1.00	0.26	21.10
61	0.20	0.05	0.05	1.00	0.26	20.50
62	0.10	0.08	0.08	1.00	0.78	29.60
63	0.20	0.05	0.05	1.00	0.26	20.40
64	0.20	3.99	3.99	1.00	19.96	20.20
65	0.20	0.01	0.01	1.00	0.07	20.00
66	0.20	0.01	0.01	1.00	0.07	19.80
67	0.20	0.01	0.01	1.00	0.07	19.60
68	0.20	0.02	0.02	1.00	0.10	19.30
69	0.10	0.01	0.01	1.00	0.07	19.20
70	0.30	0.01	0.01	1.00	0.04	19.00
71	0.10	0.01	0.01	1.00	0.13	18.80
72	0.20	0.01	0.01	1.00	0.07	18.60
73	0.20	0.03	0.03	1.00	0.13	18.20
74	0.25	0.05	0.05	1.00	0.18	17.50
75	0.25	0.04	0.04	1.00	0.16	16.90
76	0.10	0.06	0.06	1.00	0.59	16.00
77	0.10	0.07	0.06	1.00	0.65	15.00
78	0.20	0.09	0.09	1.00	0.46	13.60
79	0.20	-1.12	-1.12	1.00	-5.59	30.20
80	0.20	0.18	0.18	1.00	0.91	28.00
81	0.20	0.19	0.19	1.00	0.97	25.00
82	0.10	0.16	0.16	1.00	1.56	22.60
83	0.10	0.08	0.08	1.00	0.78	21.40
84	0.30	0.08	0.08	1.00	0.26	20.20
85	0.10	0.04	0.04	1.00	0.39	19.60
86	0.15	0.04	0.04	1.00	0.26	19.00
87	0.15	0.03	0.03	1.00	0.17	18.60
88	0.10	0.03	0.03	1.00	0.26	18.20
89	0.10	0.01	0.01	1.00	0.13	18.00
90	0.30	0.01	0.01	1.00	0.04	17.80
91	0.20	0.01	0.01	1.00	0.07	17.60
92	0.10	0.01	0.01	1.00	0.13	17.40
93	0.20	0.01	0.01	1.00	0.03	17.30
94	0.20	0.01	0.01	1.00	0.07	17.10
95	0.20	0.01	0.01	1.00	0.03	17.00
96	0.10	0.01	0.01	1.00	0.13	16.80

PARCELA NUMERO 2 (40%)

Día	Evaporación	ETP	ETA	P	F	S1
1	0.01	-0.71	-0.71	1.00	-71.00	33.50
2	0.10	0.31	0.31	1.00	3.12	32.30
3	0.10	0.26	0.26	1.00	2.60	31.30
4	0.10	0.08	0.08	1.00	0.78	31.00
5	0.20	0.13	0.13	1.00	0.65	30.50
6	0.40	0.13	0.13	1.00	0.32	30.00
7	0.20	0.08	0.08	1.00	0.39	29.70
8	0.30	0.05	0.05	1.00	0.17	29.50
9	0.20	0.03	0.03	1.00	0.13	29.40
10	0.10	0.10	0.10	1.00	1.04	29.00
11	0.20	0.16	0.16	1.00	0.78	28.40
12	0.40	-0.88	-0.88	1.00	- 2.21	31.80
13	0.01	0.03	0.03	1.00	2.60	31.70
14	0.40	0.03	0.03	1.00	0.07	31.60
15	0.20	0.03	0.03	1.00	0.13	31.50
16	0.30	0.05	0.05	1.00	0.17	31.30
17	0.20	0.08	0.08	1.00	0.39	31.00
18	0.20	0.08	0.08	1.00	0.39	30.70
19	0.20	0.10	0.10	1.00	0.52	30.30
20	0.20	0.03	0.03	1.00	0.13	30.20
21	0.10	0.03	0.03	1.00	0.26	30.10
22	0.10	0.03	0.03	1.00	0.26	30.00
23	0.01	0.78	0.78	1.00	78.00	27.00
24	0.40	0.99	0.99	1.00	2.47	23.20
25	0.10	0.83	0.83	1.00	8.32	20.00
26	0.40	0.52	0.52	1.00	1.30	18.00
27	0.30	0.31	0.31	1.00	1.04	16.80
28	0.30	0.16	0.16	1.00	0.52	16.20
29	0.30	0.10	0.10	1.00	0.35	15.80
30	0.40	0.05	0.05	1.00	0.13	15.60
31	0.20	0.10	0.10	1.00	0.52	15.20
32	0.20	0.05	0.05	1.00	0.26	15.00
33	0.10	0.05	0.05	1.00	0.52	14.80
34	0.01	0.05	0.05	1.00	5.20	14.60
35	0.10	0.05	0.05	1.00	0.52	14.40
36	0.01	0.10	0.10	1.00	10.40	14.00
37	0.25	0.10	0.10	1.00	0.42	13.60
38	0.25	0.08	0.08	1.00	0.31	13.30
39	0.30	0.18	0.18	1.00	0.61	12.60
40	0.10	0.16	0.16	0.99	1.58	12.00
41	0.50	0.22	0.21	0.93	0.45	11.20
42	0.40	0.12	0.10	0.84	0.31	10.80
43	0.10	0.07	0.05	0.75	0.69	10.60
44	0.10	0.08	0.05	0.64	0.81	10.40
45	0.10	-1.72	-1.72	1.00	-17.16	17.00
46	0.10	-1.92	-1.92	1.00	-19.24	24.40
47	0.30	-1.04	-1.04	1.00	- 3.47	28.40

PARCELA NUMERO 2 (40%)

Hoja No. 2

48	0.01	0.05	0.05	1.00	5.20	28.20
49	0.30	0.08	0.08	1.00	0.26	27.90
50	0.01	0.05	0.05	1.00	5.20	27.70
51	0.25	0.08	0.08	1.00	0.31	27.40
52	0.25	0.05	0.05	1.00	0.21	27.20
53	0.10	0.05	0.05	1.00	0.52	27.00
54	0.15	0.08	0.08	1.00	0.52	26.70
55	0.15	0.08	0.08	1.00	0.52	26.40
56	0.20	0.10	0.10	1.00	0.52	26.00
57	0.20	0.10	0.10	1.00	0.52	25.60
58	0.15	0.16	0.16	1.00	1.04	25.00
59	0.15	0.10	0.10	1.00	0.69	24.60
60	0.30	0.10	0.10	1.00	0.35	24.20
61	0.20	0.13	0.13	1.00	0.65	23.70
62	0.10	0.10	0.10	1.00	1.04	23.30
63	0.20	0.60	0.60	1.00	2.99	21.00
64	0.20	4.27	4.27	1.00	21.35	18.30
65	0.20	0.08	0.08	1.00	0.39	17.10
66	0.20	0.07	0.07	1.00	0.36	16.00
67	0.20	0.05	0.05	1.00	0.26	15.20
68	0.20	0.01	0.01	1.00	0.07	15.00
69	0.10	0.01	0.01	1.00	0.07	14.90
70	0.30	0.01	0.01	1.00	0.02	14.80
71	0.10	0.01	0.01	1.00	0.07	14.70
72	0.20	0.01	0.01	1.00	0.03	14.60
73	0.20	0.01	0.01	1.00	0.03	14.50
74	0.25	0.01	0.01	1.00	0.03	14.40
75	0.25	0.01	0.01	1.00	0.03	14.30
76	0.10	0.01	0.01	1.00	0.07	14.20
77	0.10	0.01	0.01	1.00	0.07	14.10
78	0.20	0.01	0.01	1.00	0.03	14.00
79	0.20	0.01	0.01	1.00	0.03	13.90
80	0.20	0.01	0.01	1.00	0.03	13.80
81	0.20	0.01	0.01	1.00	0.03	13.70
82	0.10	0.01	0.01	1.00	0.07	13.60
83	0.10	0.01	0.01	1.00	0.07	13.50
84	0.30	0.01	0.01	1.00	0.02	13.40
85	0.10	0.01	0.01	1.00	0.13	13.20
86	0.15	0.01	0.01	1.00	0.04	13.10
87	0.15	0.01	0.01	1.00	0.04	13.00
88	0.10	0.01	0.01	1.00	0.07	12.90
89	0.10	0.01	0.01	1.00	0.07	12.80
90	0.30	0.01	0.01	1.00	0.02	12.70
91	0.20	0.01	0.01	1.00	0.03	12.60
92	0.10	0.01	0.01	1.00	0.07	12.50
93	0.20	0.01	0.01	1.00	0.03	12.40
94	0.20	0.01	0.01	0.99	0.03	12.30
95	0.20	0.01	0.01	0.99	0.03	12.20
96	0.10	0.01	0.01	0.99	0.13	12.00

PARCELA NUMERO 3 (80%)

Día	Evaporación	ETP	ETA	P	F	S1
1	0.01	-0.06	-0.06	1.00	-6.00	31.00
2	0.10	0.03	0.03	1.00	0.26	30.90
3	0.10	0.03	0.03	1.00	0.26	30.80
4	0.10	0.03	0.03	1.00	0.26	30.70
5	0.20	0.23	0.23	1.00	1.17	29.80
6	0.40	0.03	0.03	1.00	0.07	29.70
7	0.20	0.03	0.03	1.00	0.13	29.60
8	0.30	0.03	0.03	1.00	0.09	29.50
9	0.20	0.05	0.05	1.00	0.26	29.30
10	0.10	0.08	0.08	1.00	0.78	29.00
11	0.20	0.26	0.26	1.00	1.30	28.00
12	0.40	-0.75	-0.75	1.00	-1.89	30.90
13	0.01	0.03	0.03	1.00	2.60	30.80
14	0.40	0.03	0.03	1.00	0.06	30.70
15	0.20	0.03	0.03	1.00	0.13	30.60
16	0.30	0.03	0.03	1.00	0.09	30.50
17	0.20	0.03	0.03	1.00	0.13	30.40
18	0.20	0.03	0.03	1.00	0.13	30.30
19	0.20	0.03	0.03	1.00	0.13	30.20
20	0.20	0.03	0.03	1.00	0.13	30.10
21	0.10	0.03	0.03	1.00	0.26	30.00
22	0.10	0.00	0.00	1.00	0.00	30.00
23	0.01	0.36	0.36	1.00	36.40	28.60
24	0.40	0.13	0.13	1.00	0.33	28.10
25	0.10	0.05	0.05	1.00	0.52	27.90
26	0.40	0.05	0.05	1.00	0.13	27.70
27	0.30	0.03	0.03	1.00	0.09	27.60
28	0.30	0.05	0.05	1.00	0.17	27.40
29	0.30	0.03	0.03	1.00	0.09	27.30
30	0.40	0.08	0.08	1.00	0.20	27.00
31	0.20	0.05	0.05	1.00	0.26	26.80
32	0.20	0.05	0.05	1.00	0.26	26.60
33	0.10	0.10	0.10	1.00	1.04	26.20
34	0.01	0.13	0.13	1.00	13.00	25.70
35	0.10	0.10	0.10	1.00	1.04	25.30
36	0.01	0.18	0.18	1.00	18.20	24.60
37	0.25	0.13	0.13	1.00	0.52	24.10
38	0.25	0.21	0.21	1.00	0.83	23.30
39	0.30	0.23	0.23	1.00	0.78	22.40
40	0.10	0.21	0.21	1.00	2.08	21.60
41	0.50	0.78	0.78	1.00	1.56	18.60
42	0.40	-3.15	-3.15	1.00	-7.87	30.70
43	0.10	0.03	0.03	1.00	0.26	30.60
44	0.10	0.08	0.08	1.00	0.78	30.30
45	0.10	0.05	0.05	1.00	0.52	30.10
46	0.10	0.05	0.05	1.00	0.52	29.90
47	0.30	0.05	0.05	1.00	0.17	29.70

PARCELA NUMERO 3 (80%)

Hoja No. 2

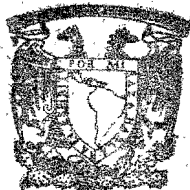
48	0.01	0.05	0.05	1.00	5.20	29.50
49	0.30	0.08	0.08	1.00	0.26	29.20
50	0.01	0.05	0.05	1.00	5.20	29.00
51	0.25	0.05	0.05	1.00	0.21	28.80
52	0.25	0.05	0.05	1.00	0.21	28.60
53	0.10	0.03	0.03	1.00	0.26	28.50
54	0.15	0.05	0.05	1.00	0.35	28.30
55	0.15	0.08	0.08	1.00	0.52	28.00
56	0.20	0.05	0.05	1.00	0.26	27.80
57	0.20	0.05	0.05	1.00	0.26	27.60
58	0.15	0.05	0.05	1.00	0.35	27.40
59	0.15	0.08	0.08	1.00	0.52	27.10
60	0.30	0.08	0.08	1.00	0.26	26.80
61	0.20	0.08	0.08	1.00	0.39	26.50
62	0.10	0.13	0.13	1.00	1.30	26.00
63	0.20	0.26	0.26	1.00	1.30	25.00
64	0.20	5.01	5.01	1.00	25.03	23.00
65	0.20	0.26	0.26	1.00	1.30	19.00
66	0.20	-0.12	-0.12	1.00	- 0.59	10.80
67	0.20	-0.14	-0.14	1.00	- 0.72	23.00
68	0.20	-0.22	-0.22	1.00	- 1.11	26.40
69	0.10	0.28	0.28	1.00	2.80	22.10
70	0.30	0.08	0.08	1.00	0.28	20.80
71	0.10	0.08	0.08	1.00	0.78	19.60
72	0.20	0.07	0.07	1.00	0.33	18.60
73	0.20	0.10	0.10	1.00	0.52	17.00
74	0.25	0.10	0.10	1.00	0.42	15.40
75	0.25	-0.16	-0.16	1.00	- 0.65	17.90
76	0.10	-0.18	-0.18	1.00	- 1.76	20.60
77	0.10	-0.35	-0.35	1.00	- 3.51	26.00
78	0.20	-0.21	-0.21	1.00	- 1.04	29.20
79	0.20	0.16	0.16	1.00	0.81	26.70
80	0.20	0.06	0.06	1.00	0.29	25.80
81	0.20	0.05	0.05	1.00	0.26	25.00
82	0.10	0.04	0.04	1.00	0.39	24.40
83	0.10	0.03	0.03	1.00	0.33	23.90
84	0.30	0.04	0.04	1.00	0.13	23.30
85	0.10	0.05	0.05	1.00	0.46	22.60
86	0.15	0.04	0.04	1.00	0.26	22.00
87	0.15	0.07	0.07	1.00	0.43	21.00
88	0.10	0.07	0.07	1.00	0.65	20.00
89	0.10	0.10	0.10	1.00	0.04	18.40
90	0.30	0.18	0.18	1.00	0.61	15.60
91	0.20	-0.74	-0.74	1.00	- 3.70	27.00
92	0.10	0.13	0.13	1.00	1.30	25.00
93	0.20	0.10	0.10	1.00	0.52	23.40
94	0.20	0.07	0.07	1.00	0.33	22.40
95	0.20	0.08	0.08	1.00	0.39	21.20
96	0.10	0.08	0.08	1.00	0.78	20.00

TABLA 3

Rendimiento promedio en peso seco y fresco para tres tratamientos de humedad

Peso (gr)	Organo	Tratamiento		
		80% H.A.	60% H.A.	40% H.A.*
fresco	hojas	93.7	195.5	178.3
fresco	tallos	156.3	415.1	322.3
seco	hojas	18.8	36.5	31.1
seco	tallos	13.6	32.5	32.4
seco	raíces	18.1	34.5	22.3
seco	hojas por planta	2.1	3.6	3.1
seco	raíz por planta	2.0	3.4	2.2
seco	total	43.5	103.5	85.8
seco	total por planta	4.8	10.3	8.6
seco	hojas/total	0.43	0.35	0.36
seco	raíces/aéreos	0.57	0.50	0.41
seco	aéreos	31.70	69.0	54.70
seco	tallo/raíz	0.72	0.94	1.45

* H.A. = Humedad aprovechable.



CAPITULO VIII

BIBLIOTECA
CENTRO DE ECOLOGIA

DISCUSION

Como ya se indicó anteriormente, en el método de J. Flinn, a partir de la evaporación de cuba (E_0) y del factor de cultivo (f), se calcula la evapotranspiración potencial (E_t). De la diferencia de humedad en dos días consecutivos se obtiene la evapotranspiración real (E_a). La tasa de evapotranspiración relativa $E_a/E_t = P$, permite conocer el crecimiento del cultivo. El crecimiento es lineal entre 0.5 y 1. Lo más importante es que se puede determinar el rendimiento neto al final de cada ciclo de cultivo de la manera siguiente:

$$NY = \sum_{i=x}^{i=n} \frac{y_x R_x}{100} \times \frac{G_x}{N} \quad (15)$$

donde:

NY = Rendimiento neto en el ciclo de cultivo

y = Rendimiento esperado sin castigar al cultivo

Rx = Reducción en crecimiento en el estado x, si todos los días se sometiera al cultivo a tensión en dicho estado.

Gx = Suma del crecimiento en el estado x

N = Número de días que duró el estado x

Sería muy interesante aplicar el método a resultados ya existentes, o bien poderlo calibrar con base en un experimento. Sin embargo, no era tal el objetivo de este trabajo, sino el estudio de los aspectos biológicos que postula.

De manera general el estudio consistió en dos etapas, el cálculo de los datos y el aspecto experimental.

Cálculo de datos

La curva obtenida para transformar las lecturas de porcentaje de peso húmedo a peso seco (Fig. 3-A-a), permitió comprobar que las medidas del contenido de humedad registradas en el aparato "Speedy" son muy consistentes.

En cuanto a la curva de relación entre porcentaje de humedad y tensión (Fig. 3-A-b), debe hacerse notar que hay posibilidades de hacer intervenir en el modelo cinco diferentes tipos de suelo, ya que se cuenta con información bibliográfica sobre esta relación.

En la tercera parte (Fig. 3-A-c) se deseaba conocer E_t a partir de las curvas de Denmead y Shaw, tratando de localizar la E_t más probable de acuerdo a una P y a una E_a conocidas; sin embargo, no se logró un buen ajuste de tales curvas. Norero 1971 (en 55), reunió las curvas antes mencionadas en una sola, que fué la que se usó para calcular E_t . Aparentemente la relación funciona como un promedio, pero --

con dicho método podrían obtenerse resultados poco reales, porque como se observa, las curvas de Denmead y Shaw difieren mucho entre sí.

El factor de cultivo se calculó a partir de la fórmula de Penman, que es el criterio que usa el modelo para determinar E_t . Aparentemente la fórmula de Penman es una de las más exactas y fáciles de calcular cuando se tiene la E_o experimental. Por otra parte, cuando no se cuenta con ese valor, la E_o estimada teóricamente por Penman parece ser muy confiable. Se ha encontrado un alto coeficiente de correlación al calcular la regresión entre la E_t media del mes y el valor mensual estimado de E_o de Penman, Sellers 1965 (46).

Aspecto experimental

Estados de desarrollo del cultivo

Una parte importante del modelo es la delimitación de los estados de crecimiento del cultivo, ya que la detección de un estado permite a la larga fijar una política de riego específica para cada etapa.

Flinn escogió el criterio de grados día como patrón de delimitación. Delivatorov 1969 (8), opina también que es el método más conveniente, ya que la temperatura representa el resto de los factores climáticos.

Hay que tomar en cuenta que no todos los cultivos tienen determinado su desarrollo por la temperatura; en algu

nos casos pueden usarse factores más indicativos que a su vez dependen de la temperatura, como la evaporación, días frío, etc.

Aunque Leng (en 15) reporta que para la mayoría de las variedades de maíz la suma de grados día en el ciclo completo es aproximadamente de 3 000*; los resultados de la Tabla 1, demuestran que apenas en el estado de espigamiento (día 75 después de la siembra), ya se tenían 3 783 grados día. Flinn encuentra para el espigamiento una suma de 1 440 grados día y Delivatov 2 087 para el primer cultivo del año, que se da en la época más caliente. Aparentemente dado los altos valores de temperatura obtenidos, las condiciones climáticas de México requieren un criterio diferente para delimitar los estados de crecimiento. Se intentó relacionar los resultados experimentales con algún registro de temperatura en un área de cultivo en el país, pero no fué posible localizar tal información. Por lo pronto, el modelo se puede utilizar definiendo cada estado únicamente por el número aproximado de días que dura un ciclo normal de desarrollo. Dada la variabilidad que tiene este método, deberá definirse para condiciones locales.

Posiblemente el exceso de grados día se debió también a un retraso en el ciclo de cultivo ya que a los cuatro meses después de la siembra, aún no se presentaba la flora--

* Suma de la temperatura máxima sobre 50°F, por día.

ción femenina y hubo de retirarse el cultivo por causa de --
las heladas.

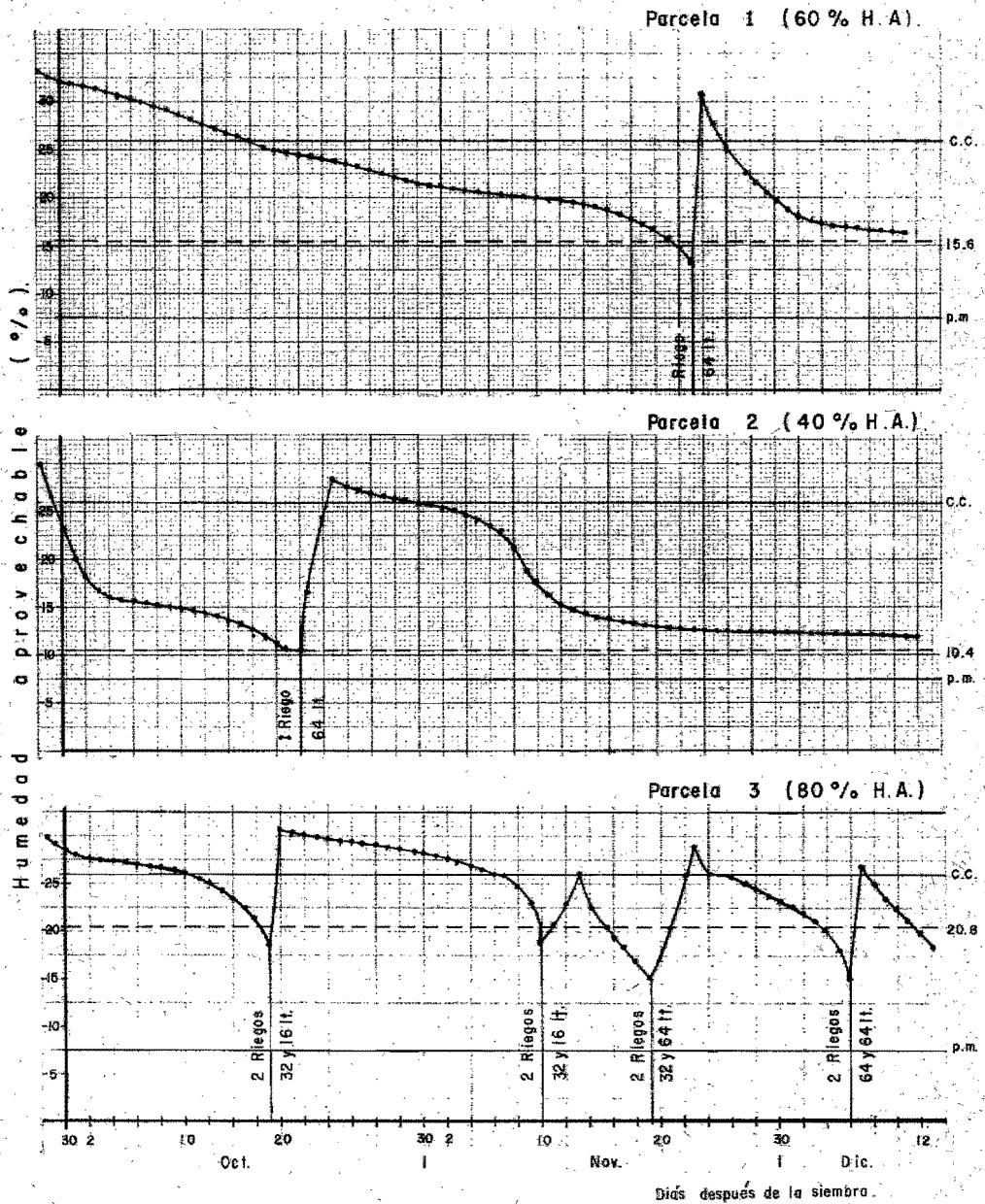
Desarrollo del cultivo

Aparentemente, otras causas impidieron el desarrollo normal del cultivo. En un principio se intentaba provocar -- tensión en las plantas con diferentes tratamientos de hume-- dad. Se dejaba bajar el contenido de humedad del suelo a -- 80%, 60% y 40% de la humedad aprovechable, suponiéndose que -- la parcela de 40% estaría sometida a un mayor déficit de -- agua.

Crafts 1968 (4), encuentra que en los cultivos de -- grano como el maíz, se requiere una cantidad de agua al prin-- cipio del ciclo para llevar al cultivo al estado reproductor; si falta esta mínima cantidad de agua se reducirá o no habrá rendimiento. En un principio se creyó que tal era la expli-- cación para la parcela de 40%, más no para las de 60% y 80% de humedad aprovechable. Denmead y Shaw 1960 (9), encontra-- ron por su parte, que cualquier tipo de tensión de agua en -- la etapa de expansión activa retarda la reproducción. De es-- ta forma se empezó a confirmar que el cultivo estaba sometido a una constante tensión.

Posibles efectos de un drenaje deficiente

Si se analizan los resultados sobre la disminución -- del contenido de humedad en el suelo (Fig. 5-R), se puede -- ver que tal disminución es muy lenta. Además, en los tres --



tratamientos la humedad del suelo permaneció en varias ocasiones sobre capacidad de campo (capacidad de campo = 26% -- H.A.); hecho que fué más notorio en la parcela de 80%. Se consideró entonces que el problema no era de déficits de humedad sino de un mal sistema de drenaje, y que la tensión a la que se sujetaba al cultivo se debía a un exceso de agua.

La contradictoria disminución de humedad en el suelo que se observa en la misma Fig. 5-R, puede deberse a que como el muestreo para medir contenido de humedad se tuvo que hacer muy superficial debido a un escaso desarrollo de las raíces, la disminución de humedad se debió a la evaporación en la superficie del suelo o bien al poco uso que las plantas hicieron del agua.

Otros resultados obtenidos permiten confirmar que se tenía un problema de drenaje, como fué el notable aumento en el diametro de las raíces. Para Schramm 1960 (en 29), éste es un hecho común en casos de mala aereación en el suelo, -- así como el escaso crecimiento de la raíz que como puede verse en la Fig. 6-R, alcanzó 50 cm. en la zona de máxima densidad en la región de observación, pero en las parcelas apenas medían 30 cm.

Se tienen evidencias experimentales de los efectos fisiológicos del exceso de agua que permiten entender algunos resultados de este experimento: (Kramer, 1969) (29)

a). Impide la absorción de agua.

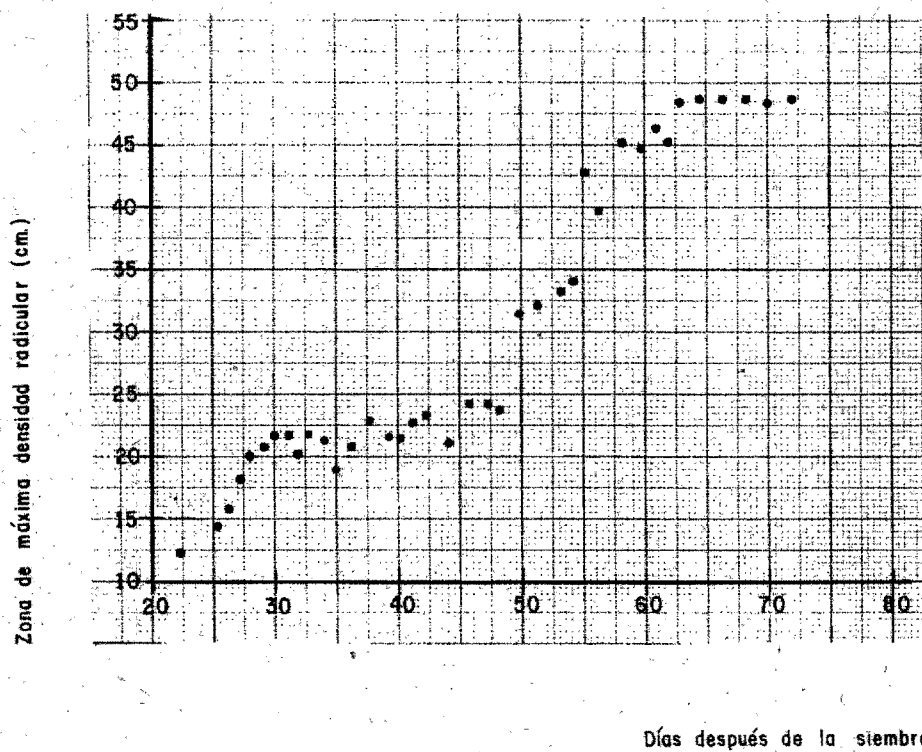


Fig-6R Crecimiento de la zona de máxima densidad radicular.

- b). El efecto en la etapa de crecimiento activo es particularmente nociyo.
- c). Impide la permeabilidad de la raíz y el transporte activo de iones.

Es interesante notar también las alteraciones que -- puede sufrir el factor de cultivo, en este caso probablemente debido a una mala aereación. Los valores no tienen un patrón determinado de distribución, en cinco días consecutivos hay variaciones desde uno hasta 0.07 (Fig. 7-R) y Tabla 2. - Tanner 1967 (54), encuentra que el coeficiente de cultivo se incrementa cada semana a medida que aumenta el grado de cobertura vegetal, hasta el estado de madurez en que su valor tiende a disminuir.

Otro objetivo del estudio era tratar de relacionar - la evapotranspiración relativa (P) con el crecimiento para - diferentes tratamientos de humedad. Sin embargo, se encontró que P vale siempre uno (ver Tabla 2) y obviamente no se tuvieron crecimientos óptimos que es cuando P vale uno. Si se observa la tabla de resultados podrá notarse que en muchos casos la evapotranspiración potencial es mayor que la - evaporación, y más aún, la evapotranspiración real llega a - ser mayor que dichos valores, lo cual no puede ocurrir en la realidad. El orden de los valores debe ser E_o , E_t y E_a , de donde se deduce que en este caso los valores se vieron alterados por presencia de agua de gravedad.

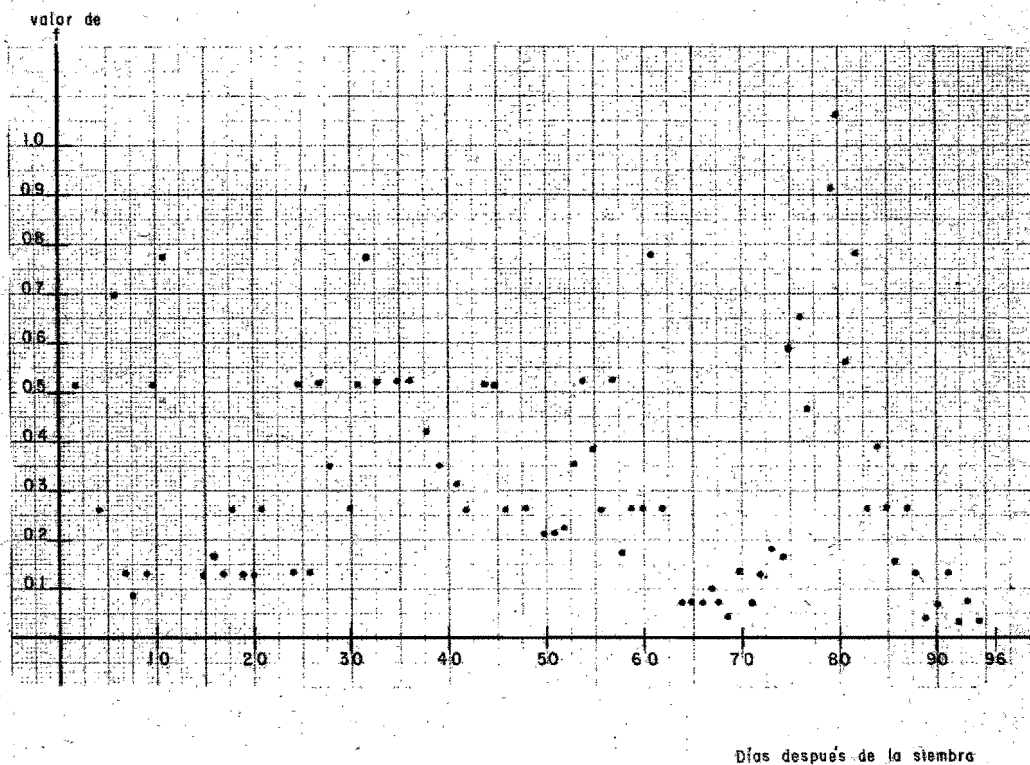


Fig-7-R: Distribución del factor de cultivo (f) en el ciclo de desarrollo. Para el tratamiento de 60 % H.A.

Hagan 1972 (20) sugiere que la influencia de factores ambientales anormales es tan fuerte, que quita toda validez a los métodos de cálculo, principalmente a los de uso consuntivo, como ocurrió en este caso. Los problemas de drenaje se han reconocido sobre todo como una fuente probable de error en los métodos que se basan en muestreos de la humedad en el suelo. Además, los datos de uso consuntivo reportados en la literatura, suelen incluir una componente significativa de drenaje. Haise 1967 (19).

De esta forma, en la ecuación (9) para calcular el contenido de humedad en un día, la ascensión capilar es más importante de lo que propone Flinn, quien incluso no la toma en cuenta.

Otra evidencia de que se tuvo un problema de exceso de agua, fué el aspecto externo de las plantas y su escaso crecimiento. El amarillamiento de las hojas y el notable desarrollo de raíces adventicias es atribuido por Kramer 1967 (29) a una senectud prematura debido a que no hay circulación hormonal desde las raíces a las hojas. Parece ser que en plantas sumergidas se desarrolla también un bloqueo de translocación de carbohidratos y algunos reguladores de crecimiento de las hojas al resto de los órganos, y que hay acumulación de alcoholes en la raíz como resultado de una respiración incompleta. Walley 1966 (en 29), encuentra además que el maíz es una de las plantas más susceptibles a la inundación del suelo.

Posiblemente uno de los aspectos más importantes sea el efecto del exceso de agua sobre la absorción de nutrientes, que se ve afectada en el siguiente orden: K, N, P, Ca, Mg. A tal grado que en un principio se supuso que la alteración del crecimiento se debía a escasez de nutrientes; pero el análisis del suelo solamente mostraba falta de nitrógeno. El desarrollo lento, las hojas amarillas y quemadas en la punta y la muerte prematura, son indudablemente los signos de ausencia de absorción de Potasio principalmente, Turk - - 1972 (57).

Discusión de otros aspectos del modelo

En el modelo de Flinn el efecto de la tensión en un estado de crecimiento no influye en los otros, por ahora puede verse que con exceso de agua sí parece haber interacción entre la primera etapa de desarrollo y las restantes. Por supuesto que se deberá comprobar experimentalmente.

La posible relación lineal entre P y el crecimiento encuentra apoyo en la literatura. Hagan 1972 (20), postula que si no se tienen datos para conocer la severidad de un déficit de agua, la mejor estimación del rendimiento, dado un déficit o una restricción en la evapotranspiración es una línea recta, y que si se conoce la etapa más susceptible del cultivo, el rendimiento caerá bajo la recta dependiendo también de la sensibilidad del estado y la duración del "castigo". Por otra parte, a medida que declina la transpiración, también declina la fotosíntesis y de esta forma, la produc--

ción total de materia seca es función directa de la transpiración hasta alcanzar la zona de máxima tasa de crecimiento.

El mismo autor presenta curvas experimentales rendimiento-agua, para alfalfa; donde se encuentra siempre, que el rendimiento se inicia con el primer incremento de agua, siendo al mismo tiempo función lineal de la evapotranspiración. En el caso de cultivos no forrajeros como el maíz, quizá la función no se inicie estrictamente en el origen.

Por ahora el postulado de Flinn parece ser válido, es decir, cuando hay déficits de humedad disminuye la turgencia, de la cual depende en gran parte el crecimiento de la planta; y la tensión o el déficit se da cuando E_a es menor que E_t . Por lo pronto se puede emplear el método tratando de mejorarlo en base a nuevos experimentos, como los que están por desarrollarse en nuevas parcelas de prueba con un drenaje eficiente.

Un modelo de simulación

Consistiría en tener en el eje del contenido de humedad, diferentes láminas de agua para humedecer una profundidad radicular estándar. De este eje se llegaría al de tensión, usando una curva diferente para el tipo de suelo que se quiera. El valor de tensión permitiría calcular sobre las curvas E_a/E_t una E_a ya que E_t se obtendría de la fórmula de Penman, una vez conocida E_o . Restando el valor de E_a en cm. al de contenido de humedad en lámina del día anterior se

tendría la humedad en el siguiente día, f se sacaría de tablas y Eo de registros meteorológicos. Conociendo P se calcularía el crecimiento por etapas y en cada una de ellas se podría fijar una política de riego variando la lámina mínima requerida para volver a aplicar riego. Este programa está desarrollándose en el Instituto de Ingeniería de la UNAM. -- Los cálculos se muestran gráficamente en la (Fig. 8-A).

Crecimiento vegetal

Hasta ahora el modelo puede usarse para simular el crecimiento en un cultivo sometido a déficits de humedad pero no con exceso de agua.

Para extender su aplicación en estos casos, podría modificarse la relación P-crecimiento, de tal forma que para un contenido de humedad mayor que la capacidad de campo, el valor de P decayera nuevamente, como se muestra en la (Fig. 9-A).

Rendimiento del cultivo

Para Denmead y Shaw 1960 (9), en el maíz, uno de los mejores índices de crecimiento es la elongación de las plantas. Como puede verse en la (Fig. 10-R), la máxima altura que alcanzaron las plantas fué de 95 cm. aproximadamente, para los tres tratamientos de humedad. En la gráfica se observa un mayor crecimiento con 60% de humedad aprovechable.

Con el tratamiento de 80% se obtuvo el menor creci--

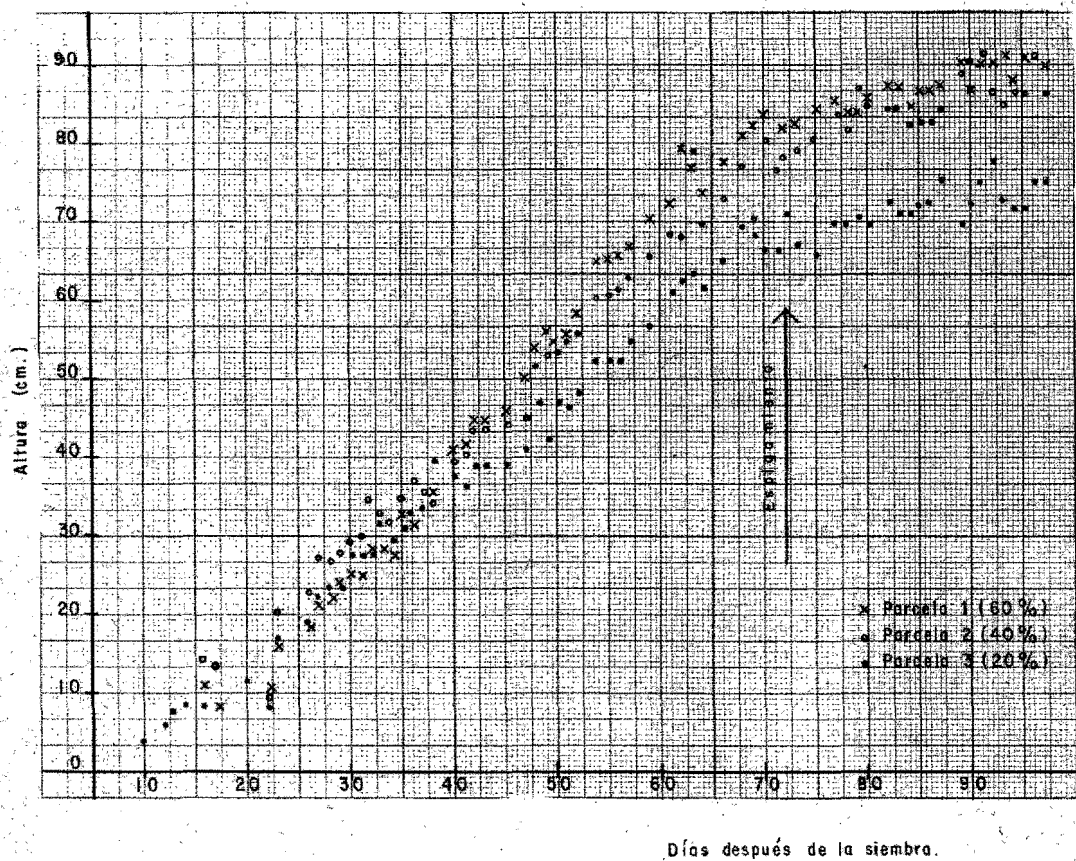


Fig-10-R. Crecimiento total promedio de las plantas bajo 3 tratamientos de humedad.

miento, posiblemente debido a que en esta parcela se tenía una mayor saturación de agua, dado que los riegos eran más frecuentes. Slatyer 1957 (en 2) encuentra en el maíz una marcada reducción en elongación del tallo con falta de agua; en este caso también con exceso. Currier 1967 (3), determinó que el máximo contenido de agua en el maíz en estado vegetativo debe ser el 55% de humedad aprovechable y el 70-80% de H.A. cerca de la madurez. Según tales datos, en el estado vegetativo solo en la parcela de 40% no se excedió el valor fijado por Currier.

Las respuestas de crecimiento de las plantas son muy variables, ya que son el resultado de un conjunto complejo de procesos fisiológicos. Pero sí es posible basarse en índices de crecimiento para detectar factores alteradores de las funciones vegetales, particularmente en el caso de la raíz. Evans 1972 (13) y Stanhill 1967 (53), han comprobado que en los casos de falta de agua se altera más el crecimiento de las partes aéreas, mientras que con exceso de agua la raíz es el órgano más afectado.

En una situación de drenaje defectuoso el problema puede referirse a falta de oxígeno o bien a exceso de CO_2 , además de la presencia de otros factores que impidan el crecimiento. Si se observa la gráfica del crecimiento de la raíz (Fig. 6-R) puede notarse que al principio es rápido, quizá debido a que aún había oxígeno en el suelo. Las interrupciones en crecimiento y que son muy notorias en la

parte ascendente de la curva son atribuidas por Hunter y Rich 1925 (en 53) a acumulaciones excesivas de CO_2 en el suelo.

Por otra parte, la defoliación que ocurrió en las primeras etapas de desarrollo, elimina las reservas alimenticias necesarias para el crecimiento de la raíz.

Mediante tres análisis de variancia se encontró que para raíces, tallos y hojas, los rendimientos en peso seco difieren significativamente entre los tres tratamientos de humedad (80, 60 y 40%) para F 0.05. Se obtuvieron valores de F de 118.22, 295.36, 527.32, para hojas, tallos y raíces respectivamente, que en los tres casos exceden a 9.55, el valor de F 0.05 para 2 y 3 grados de libertad, concluyéndose que los tres tratamientos afectan el rendimiento en peso seco para los tres órganos.

Con objeto de conocer si las diferencias entre las medias de peso seco por cada tratamiento diferían significativamente, se analizaron dichos valores con la prueba de Duncan (prueba de rangos múltiples). Se encontró que entre tallos, hojas y raíces, los rangos para las medias de los tres tratamientos de humedad exceden al mínimo rango significativo, por lo tanto, las diferencias entre las medidas son significativas; entre dos medias adyacentes se obtiene que para raíz y hojas, los rangos exceden también al mínimo rango significativo, de donde es posible suponer que el mejor tratamiento es el de 60% H.A. y a continuación los de 40% y 80% -

que es el orden decreciente de las medias de peso seco obtenidas. En el caso de los tallos, entre los tratamientos de 60% y 40% las diferencias no son significativas; en este caso el tratamiento de 80% arroja una media significativamente diferente al resto de los tratamientos.

Stanhill 1967 (53), reporta que en una situación de tensión o déficit de humedad, la reducción en peso húmedo es mayor que en peso seco. En este caso en la parcela de 40%, donde tal vez si hubo menos agua, el peso húmedo se reduce en 82% y el seco en 80% sobre el más alto. Podría entonces considerarse que había menos turgencia en las plantas; pero no menos producción de materia viva.

La tasa tallo/raíz (T/R) es un buen índice del crecimiento anormal. Se ha encontrado que T/R decrece linealmente al disminuir el tratamiento de humedad, esto indica que al faltar agua la raíz tiende a crecer más que el tallo. Se graficó esta relación para los datos obtenidos y se encuentra que la tasa T/R aumenta linealmente con tratamientos de humedad mas altos (Fig. 11-R). Todos estos resultados, subrayan la importancia de hacer intervenir al factor drenaje en los modelos de predicción de rendimiento ante diferentes políticas de riego.

Posibles mejoras del modelo

Por lo pronto el modelo deberá modificarse o completarse para poder ser usado con otros cultivos, esto implica

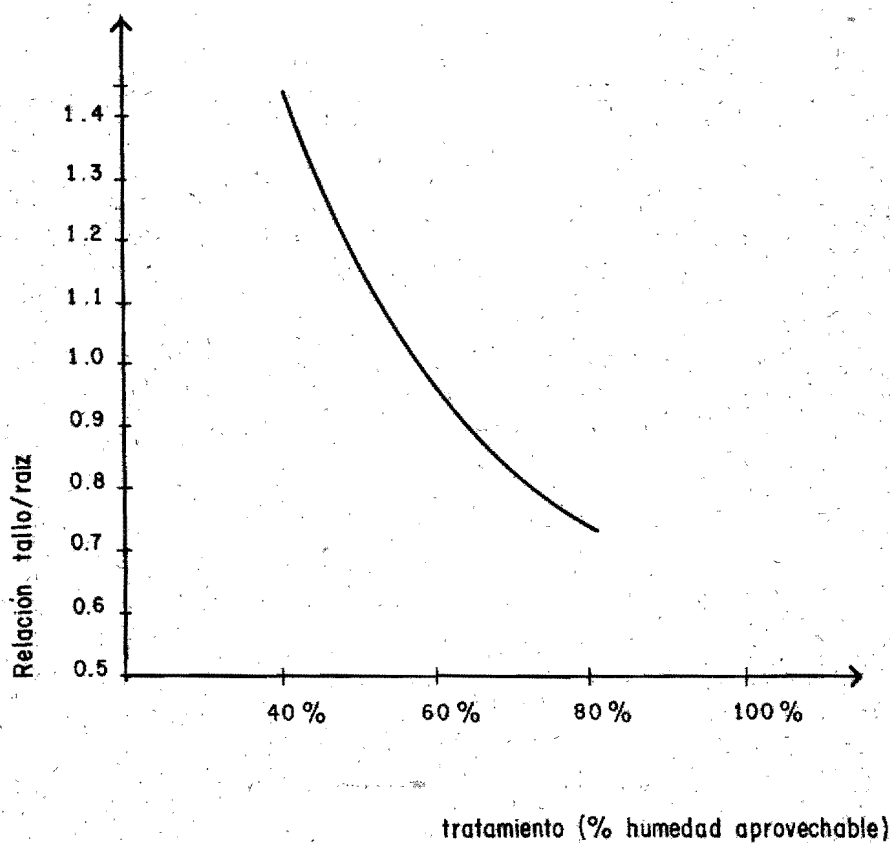


Fig.-11R Relación entre la tasa tallo/raíz y el tratamiento de humedad.

que se hagan algunos cambios, principalmente en lo que se refiere a la interacción de las diferentes etapas de crecimiento. Por ejemplo, en el caso del frijol soya ya se sabe que los déficits de humedad en un estado, alteran al siguiente, - Black 1967 (2).

En cuanto al día de siembra, Flinn postula que el rendimiento se reduce en un bushel/acre por día en que se siembra después del 15 de mayo; en México se procura sembrar también antes del mes de junio, pero habría que definir este criterio de disminución del rendimiento para condiciones locales, ya que Flinn se refiere a una región climatológica determinada, así como a diferente variedad de maíz.

Otro dato importante que hace falta introducir en el caso del maíz, es la fecha probable de cosecha a partir del contenido de humedad en el grano.

Finalmente, se mencionarán otros factores que se consideran modificadores del uso de agua por las plantas y que no han sido incluidos en la generalidad de los modelos sobre relaciones agua-planta-suelo.

Densidad de población

Aunque Kern 1967 (26) no encuentra que haya dependencia entre la evapotranspiración y la densidad de vegetación, Gates 1967 (16) y Black 1967 (2), determinan que a mayor grado de cobertura y mayor cantidad de agua, aumenta la evapotranspiración. La densidad de población parece afectar de la mis-

ma forma que el grado de cobertura.

En cuanto a la altura del cultivo se ha reportado -- que un cultivo de mayor talla impide la pérdida de energía - de radiación y por lo tanto permite un mayor grado de evapotranspiración aunque la diferencia de evapotranspiración en cultivos de más altura no excede a los más bajos en 17%. Sin embargo, estos aspectos podrían estar representados en el -- factor de cultivo, el cual se calcula en condiciones norma-- les de densidad de siembra.

Las labores de cultivo

Kern 1967 (26) ha investigado que este factor hace - variar notoriamente el grado de evapotranspiración de un cul- tivo, generalmente disminuyendo el uso de agua. Sería inte- resante conocer con detalle qué tan significativo resulta en un método de simulación y hacer intervenir a las labores de beneficio según el grado de tecnificación agrícola donde se utilice el modelo.

Presencia de hierbas

Shaw 1966 en (2) estimó que las pérdidas anuales en maíz en Estados Unidos, por presencia de hierbas en el terre- no de cultivo, ascienden a 439 millones de dólares al año. - Esto se explica dado que compiten por nutrientes, agua y luz con el cultivo. Por otra parte, las hierbas usan más agua - que un cultivo normal. En el caso del maíz sin control de - hierbas, se requiere el triple de agua por libra de materia

seca producida. Este y otros factores como enfermedades, rotaciones, etc., no pueden ser ignoradas en futuras determinaciones del uso del agua en el campo.

Fertilizantes

Finalmente, quizá uno de los factores más importantes sea el uso de fertilizantes en cuanto a la modificación en el rendimiento agrícola y al uso de agua, dado que:

a) Aumentan el desarrollo de la raíz. Por lo mismo, el suelo se usa con más profundidad y las láminas de agua -- aplicadas deben ser mayores.

b) Aumenta el grado de cobertura vegetal y por lo mismo se impide el escurrimiento de agua y se reduce la evaporación.

c) Acelera la madurez del cultivo por lo que disminuye el uso de agua por ciclo.

d) Aumenta el rendimiento del cultivo y por lo tanto el valor del uso de agua.

La eficiencia del uso de agua (rendimiento/cant. de agua empleada) muestra que al fertilizar aumenta el rendimiento sobre la cantidad de agua evapotranspirada.

Aunque los datos son aún pocos, por lo menos en el caso del Nitrógeno y del Fósforo parece ser que hay una interacción en el uso de estos nutrientes y el agua para aumen

tar el rendimiento hasta un punto límite. Pero el problema no es tan sencillo, dado que la información experimental es a corto plazo y que la conducta de los nutrientes en el suelo no ha sido totalmente explicada. Por lo pronto, con los resultados actuales y conociendo el uso de fertilizantes en ciertas áreas podría modificarse el modelo ya sea en cuanto al uso de agua, o bien a la idea que hasta ahora se ha planteado sobre los rendimientos esperados ante un manejo determinado del cultivo.

CAPITULO IX

CONCLUSIONES

1. De una revisión bibliográfica sobre diferentes - criterios para estimar necesidades de agua para los cultivos, se consideró como el más adecuado, el modelo propuesto por - J. Flinn en 1971.

2. En el modelo de J. Flinn aunque aún está a nivel de parcela, se involucran múltiples evidencias experimenta-- les; además permite conocer la influencia de factores meteo-- rológicos sobre el crecimiento o rendimiento del maíz.

3. El estudio experimental de los aspectos biológi-- cos del modelo, permitió concluir que:

a) El criterio de grados-día para determinar las -- distintas etapas de crecimiento del maíz, debe ser definido para las condiciones climáticas de México.

b) El factor de cultivo parece ser muy susceptible a las variaciones en el manejo del cultivo.

c) La ecuación (9), para calcular la cantidad de -- agua en el suelo debe incluir además de las pérdidas por eva-- potranspiración y las ganancias de agua por irrigación y llu-- via, una componente de escurrimiento y ascensión capilar.

d) En el caso del maíz, la elongación de las partes aéreas y de la raíz, son índices claros de la respuesta del cultivo a tensiones de humedad.

4. El postulado de que la relación entre el crecimiento y la evapotranspiración relativa (P) es lineal entre 0.5 P 1.0, tiene apoyo en referencias bibliográficas, pero no pudo comprobarse experimentalmente.

5. El postulado anterior no es válido para contenidos de humedad sobre capacidad de campo. Se sugiere un cambio al calcular (P), donde su valor disminuya de uno frente a contenidos de humedad mayores de capacidad de campo. Esto deberá comprobarse experimentalmente, incluyendo la duración de la sumergencia.

6. En este trabajo se propone un modelo de simulación que puede usarse con 5 tipos de suelo y que tiene posibilidades de mejorarse con nueva información. Dicho método forma parte de un modelo que se desarrolló en el Instituto de Ingeniería de la UNAM que simula además, el uso del agua desde la fuente de abastecimiento hasta el riego del cultivo y su rendimiento.

7. Es necesario adaptar el modelo para usarse con diferentes cultivos y hacer una calibración con datos de distritos de riego o de un experimento a gran escala.

8. Aún falta definir en el modelo el criterio para determinar la fecha de cosecha, así como la posible reducción

del rendimiento potencial debido a una siembra tardía.

9. Se deberá igualmente, incluir el efecto de factores que modifican el uso de agua de un cultivo, como son el grado de cobertura vegetal, la presencia de hierbas, y sobre todo la adición de fertilizantes, que podría modificar al método propuesto.

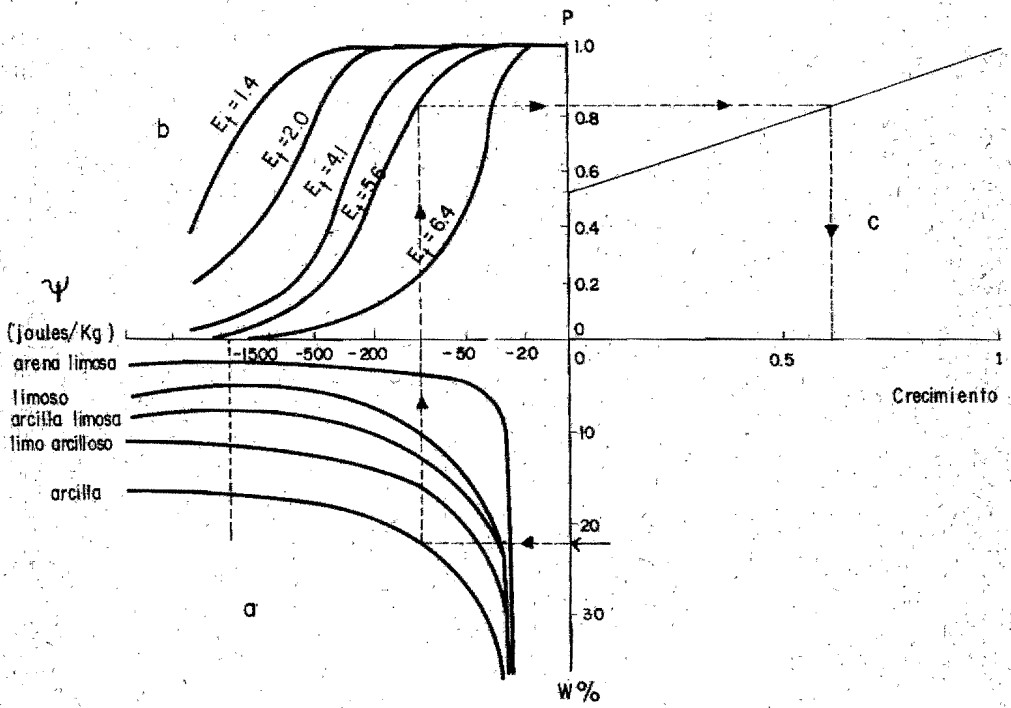


Fig-8-A Resumen de un modelo de simulación.

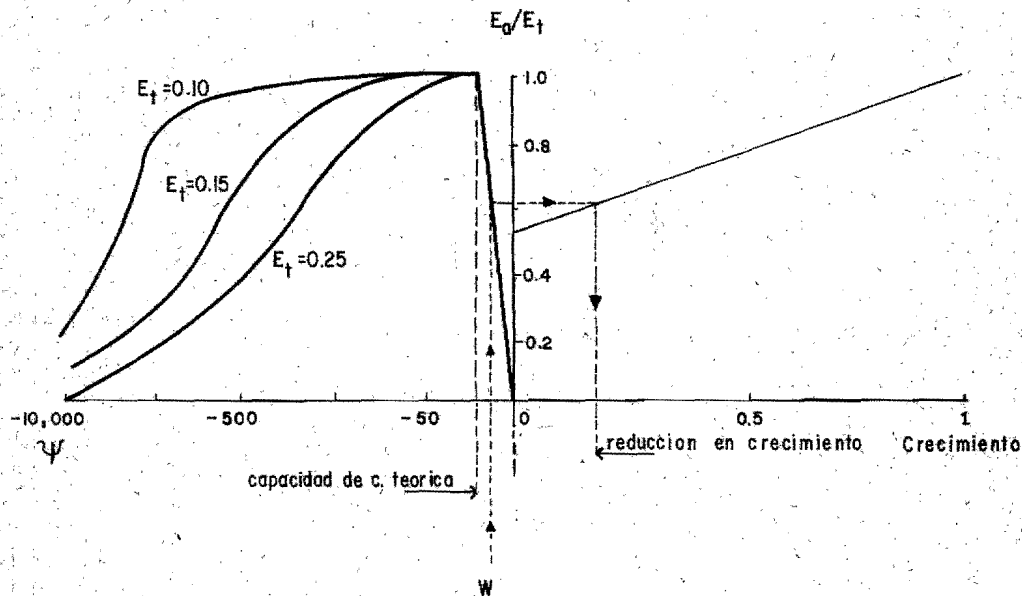


Fig. 9-A - Posible modificación en el modelo con contenidos de humedad sobre capacidad de campo.

TABLA 4

Índice de abreviaturas.

H.A.	Humedad aprovechable
E_t	Evapotranspiración potencial
E_a	Evapotranspiración real
E_a/E_t	Evapotranspiración relativa
P	Evapotranspiración relativa
D.P.D.	Déficit de presión de difusión
T.S.M.	Tensión de humedad en el suelo
w	Cambio en el contenido de humedad en el suelo
f	Factor de cultivo
E_o	Evaporación en evaporímetro
E_m	Velocidad máxima de absorción de agua del suelo
SM_t	Contenido de humedad en el suelo en la zona radicular.
C_1	Contenido de humedad en el suelo expresada en lámina en cm.
NY	Rendimiento neto del cultivo
T/R	Relación entre peso secos del tallo y de la raíz.

BIBLIOGRAFIA

1. Berycet, O., and D. Dincer. 1969. Water requirements of some field crops at western Central Anatolia, Turk. 7th Congress of Irr. & Drain. México. 3: R-23-Q23.
2. Black, C.A. 1967. Crop Yields in relation to water supply and soil fertility. In W. H. Pierre (ed.), "Plant Environment and Efficient Water Use", pp. 177-201. Am. Soc. Agron., and Soil Sci. Soc. of Am., Wisconsin.
3. Currier, H.B. 1967. Nature of Plant Water. In R.M. Hagan (ed.), "Irrigation of Agricultural Lands", pp. 307-313. Am. Soc. Agron., Wisconsin.
4. Crafts, A.S. 1968. Water deficits and Physiological Processes. In T. Kozlowski (ed.), "Water Deficits and Plant Growth", Vol. II, pp. 85-135. Academic Press. New York.
5. Dale, R., and R. Shaw, 1965. Effect of corn yields of moisture stress and stand at two fertility levels. Agr. J. 57: 475-479.
6. Danielson, R.E. 1967. Root Systems in Relation to Irrigation. In R. M. Hagan (ed.), "Irrigation of Agricultural Lands", pp. 307-313. Am. Soc. Agron., Wisconsin.
7. Darley, P.R., and J.R. Rydzewski, 1972. A simulation model for the optimal design and operation of irrigation systems based on yield-water deficit relationships. Sym. Int. Con.Irr. & Drain. 3: R-5; S36.
8. Delivatov, I., and C. Christov, 1969. Determination du besoin en eau des cultures agricoles d'apres la methode bioclimatique par la somme de temperature. 7th Cong. Irr. & Drain. México 3 R29-Q23.
9. Denmead, O.T., and R.H. Shaw, 1960. The effects of soil moisture stress at different stages of growth on the development and yield of corn. Agr. J. 52: 272-274.
10. Denmead, O.T., and R. H. Shaw, 1962. Availability of soil water to plants as affected by soil moisture content and meteorological conditions. Agr. J. 54: 385-390.
11. Downey, L., 1972. Water yield relations for nonforage

- crops. J. of the Irr. and Drain. Div. Proc. Am. Soc. C. -- Eng. March. 107-115.
12. Epstein, E., 1973. Roots. Sci. Am. May: 48-58.
 13. Evans, C.G., 1972. "The Quantitative Analysis of Plant -- Growth". University of California Press, Los Angeles.
 14. Fernández, R., y R.J. Laird, 1958. Efecto de la humedad del suelo y de la fertilización con nitrógeno sobre la calidad y el rendimiento del trigo. Folleto Técnico. S.A.G. No. 27.
 15. Flinn, J.C., 1971. The simulation of crop-irrigation systems. In J.B. Dent (ed.), "Systems Analysis in Agricultural Management", pp. 123-152. John Wiley & Sons. Australia.
 16. Gates, D.M., and R.J. Hanks, 1967. Plants factors affecting evapotranspiration. In R.M. Hagan (ed.), "Irrigation of Agricultural Lands", pp. 506-521. Am. Soc. Agron. Wisconsin.
 17. Gingrich, L., 1956. Effect of soil moisture tension on the growth of corn roots. Agr. J. 48: 517-521.
 18. Gupta, S.N., and A.P. Bhattacharya, 1969, Variations in - consumptive use of wheat-an experimental study. 7th Cong. Irr. & Drain. México. 3: R-24, Q23.
 19. Haise, H.R., and R.M. Hagan, 1967, Soil, plant and evapotranspiration measurements as criteria for scheduling - - irrigation. In R.M. Hagan (ed.), "Irrigation of Agricultural Lands", pp. 577-597. Am. Soc. Agron., Wisconsin.
 20. Hagan, R.M., and J.I. Stewart, 1972. Water deficits, irrigation design and programming. J. of Irr. & Drain. Div. 98: 215-235.
 21. Halkias, N.A., 1969. Level of available soil moisture -- and crop yield responses. 7th Cong. of Irr. & Drain. México co. 3: R-47, Q23.
 22. Holmes, J.W., and S.A. Taylor, 1967. Measurement of soil water. In R.M. Hagan (ed.), "Irrigation of Agricultural - Lands", pp. 275-303. Am. Soc. Agron. Wisconsin.
 23. Jensen, M.E., 1968. Water consumption by agricultural - - plants. In T.T. Kozlowski (ed.), "Water Deficits and Plant Growth", Vol. II. pp. 1-22. Academic Press. New York.
 24. Jensen, M.E., 1969. Les besoins en eau des cultures. - - Trans. Int. Commission on Irr. & Drain. 7th Congress Irr. & Drain. México. 2: FQ23.

25. Kelley, O.J., 1944. A rapid method of calibrating various instruments for measuring soil moisture in situ. Soil -- Sci. 58: 433-440.
26. Kern, P.C., and J.S. Robins, 1967. Soil and cultural factors affecting evapotranspiration. In R.M. Hagan (ed.), "Irrigation of Agricultural Lands", pp. 522-533. Am. Soc. Agron., Wisconsin.
27. Korkeit, O., 1969. Water requirements of crops as seen -- from the system capacities standpoint. 7th Cong. Irr. & Drain. México. 3: R-22.
28. Kramer, P.J., and O. Biddulph, 1967. Water absorption, conduction and transpiration. In R.M. Hagan (ed.), "Irrigation of Agricultural Lands", pp. 320-336. Am. Soc. Agron., Wisconsin.
29. Kramer, P.J., and O. Biddulph, 1969. "Plant, Soil and Water Relationships", Mc. Graw - Hill. Book Co., New York. 449 p.
30. Laird, R.J., 1968. Field technique for fertilizer experiments. Research Bull. No. 9. CIMMYT. México.
31. Lembke, W.D., and B.A. Jones Jr., 1972. Selecting a method for scheduling irrigation using a simulation model. Trans. of the ASAE. 284-286.
32. Levitt, J., 1969. "Introduction to Plant Physiology". The C.V. Mosby Co., Saint Louis. 304 p.
33. Moss, G.I., and L.A. Downey, 1971. The influence of drought stress on female megagametophyte development in corn (Zea mays. L.) and subsequent grain yield. Crop. Sci. 2: 368-372.
34. Olivier, H., 1963. "Riego y Clima". CECSA. 262 p. México.
35. Palacios, V.O., 1966. Cómo, cuándo y cuánto regar. Mem. - Técnico No. . S.R.H.
36. Peters, D.B., and J.R. Runkles, 1967. Shoot and root - - Growth as affected by water availability. In R.M. Hagan (ed.), "Irrigation of Agricultural Lands", pp. 307-313. - Am. Soc. Agron., Wisconsin.
37. Piolanti, G.th and A. Capparelli, 1969. Water requirements of crops. 7th Cong. Irr. & Drain. México 3: R26, Q23.
38. Poirée, M., et C. Ollier, 1966. "Irrigation". 3^{eme} ed. - Ed. Eyrolles, Paris. pp. 153-191.

39. Posadas, R. del R., 1969. Determinación práctica del uso consuntivo de los principales cultivos de los distritos de riego en México. Tesis Profesional. ENA., Chapingo. - México.
40. Pouzoulet, J.M., 1969. La connaissance des besoins en eau des cultures. 7th Cong. Irr. & Drain. México. 3: R1, Q23.
41. Robins, J.S., and C.E. Domingo, 1953. Some effects of severe soil moisture deficits at specific growth stages in corn. Agr. J. 45: 618-621.
42. Robins, J.S., and C.E. Domingo, 1956. Moisture deficits in relation to the growth and development of dry beans. - Agr. J. 41: 618-621.
43. Rutter, A.J., 1968. Water Consumption by Forests. In T.T. Kozlowski (ed.), "Water Deficits and Plant Growth", Vol. II, pp. 23-76. Academic Press. New York.
44. Salisbury, F.B., and C. Ross, 1969. "Plant Physiology", - Wadsworth Pub. Co. Inc., California. 747 p.
45. Santiago, A.R., 1970 Importancia del uso consuntivo y su determinación. Banco Agropecuario del Noroeste, S. A. México. 36 p.
46. Sellers, W.D., 1965. "Physical Climatology". The University of Chicago Press. USA., pp. 156-180.
47. Shaw, R.H., and D.R. Lang, 1966. Moisture stress and plant response In W.H. Pierre (ed.), "Plant Environment and Efficient Water Use", pp. 73-94. Am. Soc. Agron., and Soil Sci. Soc. of Am., Wisconsin.
48. Shiina, K., 1969. Variation of soil moisture and change of consumptive use of water and yield of crops. 7th Cong. of Irr. & Drain. México. 3: R39-Q23.
49. Slatyer, K.O., 1957. The significance of the permanent wilting percentage in studies of plant and soil water relations. Bot. Rev. 23: 585-636.
50. Slatyer, K.O., 1967. "Plant Water Relationships". Academic Press. London & New York. 366 p.
51. Slatyer, K.O., and E. Shmueli, 1967. Measurements of internal water status and transpiration. In R.M. Hagan (ed.), "Irrigation of Agricultural Lands", pp. 337-353. - Am. Soc. Agron., Wisconsin.
52. S.R.H., 1971. Estudio para el mejoramiento integral e incremento de la productividad en los distritos de riego --

- del Río Fuerte, Río Mayo, Río Yaquí y Colonias Yaquis. --
SIKA. Contrato EI-71-57.
53. Stanhill, G., and Y. Vaadia, 1967. Factors affecting --
plant responses to soil water. In R.M. Hagan (ed.), *Irri-
gation of Agricultural Lands*", pp. 447-457. Am. Soc. --
Agron. Wisconsin.
 54. Tanner, C.B., 1967. Measurement of evapotranspiration. --
In R.M. Hagan (ed.), *"Irrigation of Agricultural Lands"*,
pp. 534-577. Am. Soc. Agron., Wisconsin.
 55. Taylor, S. A., 1972. *"Physical Edaphology"*. W.H. Freeman
and Co. San Francisco. 533 p.
 56. Tovey, R., and J. Spencer, 1969. Water requeriments of --
Lawn Grass. Transactions of the ASAE. 356-358.
 57. Turk, L.M., and H.D. Foth, 1972. *"Fundamentals of Soil -
Science"*. 5^{ed}. John Willey & Sons. Inc., New York. 454 p.
 58. Vaadia, Y., and Y. Waisel, 1967. Physiological processes
as affected by water balance. In R.M. Hagan (ed.), *"Irri-
gation of Agricultural Lands"*, pp. 354-372. Am. Soc. --
Agron., Wisconsin.
 59. Waggoner, P.E., 1967. Decreasing transpiration and the --
effect upon growth. In W.H. Pierre (ed.), *"Plant Enviro-
ment and Efficient Water Use"*, pp. 49-72. Am. Soc. Agron.
and Soil Sci. Soc. of Am., Wisconsin.
 60. Wiesner, C.L., 1970. *"Climate, Irrigation and Agricultu-
re"*. Halsted Press. Australia. 246 p.
 61. Williams, C.N., and K.T. Joseph, 1970. *"Climate, Soil --
and Crop Production in the Humid Tropics"*. Oxford Univer-
sity Press. 177 p.
 62. Windsor, J.S. and Ven Te Chow, 1971. Model for farm irri-
gation in humid areas. *J. of Irr. & Drain. Div.* 369-383.