

Cálculo de calendarios de riego

NEC-HID v.2.0

Manual del usuario



.587
2
40

Cálculo de calendarios de riego NEC-HID v.2.0 Manual del usuario

Coordinación de Tecnología Hidráulica
Subcoordinación de Hidráulica Rural y Urbana

Ariosto Aguilar Chávez¹
Nahun Hamed García Villanueva¹
Joaquín Rodríguez Chaparro ²

¹*Instituto Mexicano de Tecnología del Agua*

²*Centro de Estudios Hidrográficos
CEDEX-MOPT (España)*

Mayo 1995

**INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGIA DEL AGUA
CENTRO DE CONSULTA DEL AGUA**

Clas. 9631.587
A52/25640
Año. 42870
Precio _____
Proc: DONACIÓN
Fecha 03.02.03

Título:

Cálculo de calendarios de riego

NEC-HID v.2.0

Manual del usuario

Diseño y Producción:

Subcoordinación Editorial y Gráfica

Revisión Literaria:

Elena Haydée Vigouroux Chapuy

Diagramación y Formación:

Gema Alin Martínez Ocampo

Diseño de Portada:

Ricardo Espinosa Reza

Ilustración:

Jaime Vázquez Galicia

© Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 1995

Primera edición

ISBN 968-7417-03-X

Reservados todos los derechos. Prohibida su reproducción parcial o total por cualquier medio, mecánico, eléctrico, de fotocopia, térmico u otros sin permiso del editor.

Paseo Cuauhnáhuac Núm. 8532, Progreso, Jiutepec, Morelos

C.P. 62550

Tel.: (73) 19-40-00 ext. 727

Fax: (73) 19-39-46

Hecho en México

Made in Mexico

Índice

Prólogo	7
Introducción	9
Manual del usuario	11
Instalación	11
Inicio del <i>Programa NEC-HID v.2.0.</i>	11
Captura de datos de los cultivos	11
Captura de datos hidroclimatológicos	18
Determinación de la evapotranspiración	20
Presentación de resultados	22
Datos de evapotranspiración	22
Despliegue en pantalla	23
Impresión de resultados	26
Recomendaciones y limitaciones del programa	27
Bibliografía	29
A N E X O: Necesidades hídricas de los cultivos	31
Aspectos generales	33
El agua en las plantas	33
El clima y las necesidades de riego	36
Cuánta agua usar y cuándo regar	41
Evapotranspiración	45
Influencia y efectos de los agentes atmosféricos	45
Influencia y efectos de los agentes edáficos	47

Influencia y efectos de los agentes vegetativos	48
Métodos de cálculo	49
Métodos semiempíricos	49
Ecuación de Dalton	49
Teoría del balance energético	52
Formulación de Penman	57
Método de Penman modificado por la FAO	59
Método de Penman-Monteith	62
Método de Blaney-Criddle FAO-24	64
Evapotranspiración de los cultivos	65
Fases del periodo de desarrollo de los cultivos	65
Evaluación de los coeficientes de cultivo	66
Precipitación efectiva	69
Balance hídrico	71
Calendarios de riego	73
Lámina calculada	73
Lámina del primer riego	73
Láminas de los riegos posteriores	74
Calendarios de riego	74

Prólogo

Para el diseño de un sistema de riego el dato de partida es el conocimiento de las necesidades hídricas de los cultivos; en el presente trabajo, se muestra una herramienta computacional de cálculo para determinar estas necesidades.

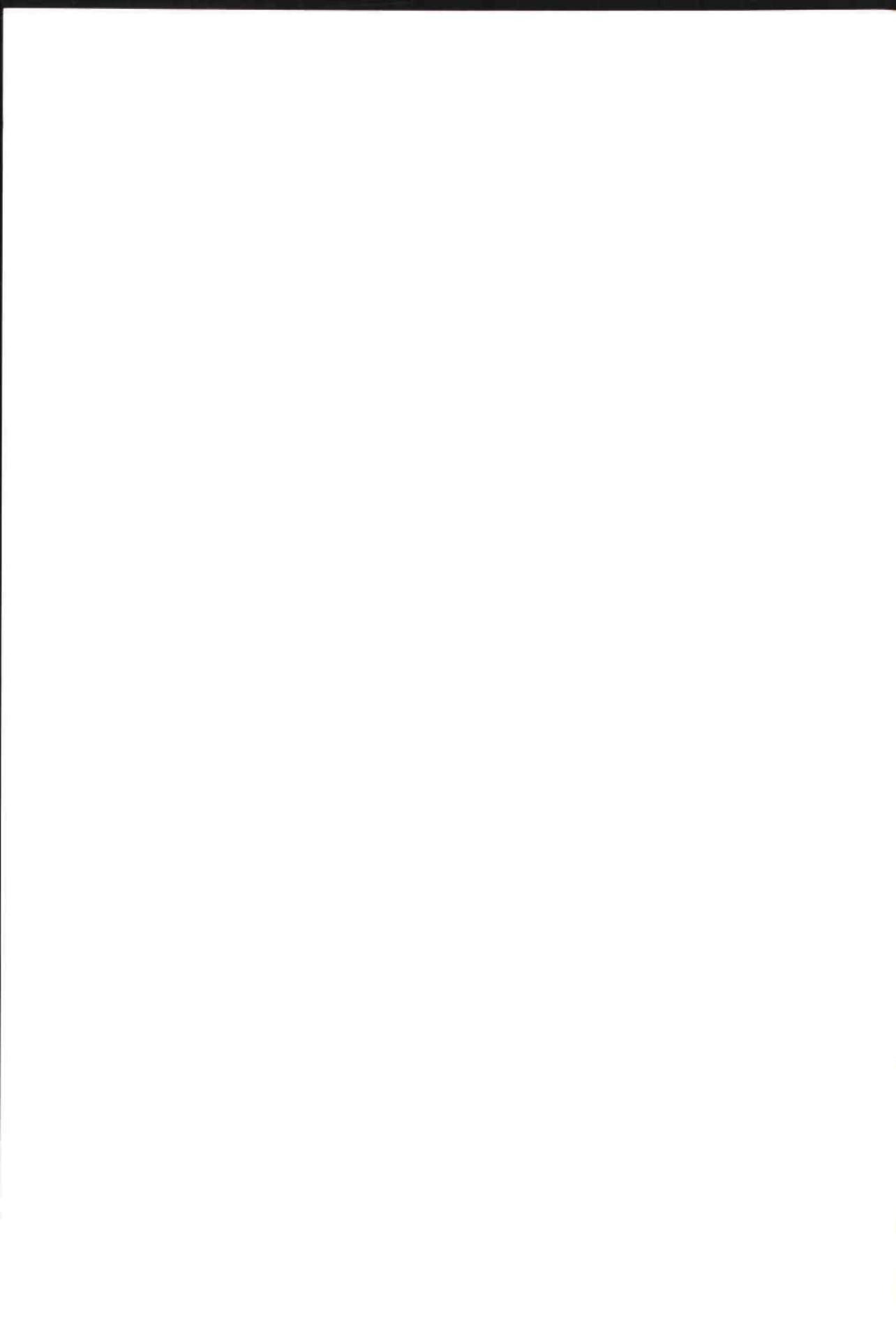
El programa de cómputo que aquí se expone utiliza los métodos semiempíricos de Penman-Monteith, de Penman FAO-24¹ y de Blaney-Criddle para determinar la evapotranspiración y los calendarios de riego.

Con esta herramienta computacional el especialista puede tomar decisiones sobre cuánto y cuándo regar. La aportación que proporciona el programa para lograr este objetivo, consiste en la generación y el despliegue inmediato de gráficas de evapotranspiración potencial y real de los cultivos, así como el balance hídrico y los calendarios de riego cuya interpretación visual facilita su comprensión.

La importancia del programa NEC-HID v.2.0, reside en que se proporciona al usuario una herramienta de suma confiabilidad, cuya clara presentación de resultados permite una fácil y rápida interpretación; esto lo convierte en un auxiliar muy práctico.

Como anexo al programa de cómputo y a manera de respaldo teórico, se presenta una descripción del fenómeno de evapotranspiración, del balance hídrico y de la forma de obtener los calendarios de riego de un cultivo.

¹ FAO, Crop Water Requirements, Irrigation and Drainage Paper 24, Roma, Italia, 1977.



Introducción

Uno de los aspectos fundamentales para el diseño y operación de un sistema de riego parcelario, es el conocimiento de las necesidades hídricas de los cultivos.

Los sistemas de irrigación son diseñados y construidos para satisfacer las necesidades hídricas de los cultivos durante los periodos de ausencia de precipitación, y para mantener la humedad dentro de las capacidades de almacenamiento del suelo, sin castigar al cultivo.

Es asombroso que un pequeño cambio en los requerimientos de agua en un cultivo, durante el diseño de los sistemas de riego, influya en los costos por el rango de décimos o cientos de pesos. Sin embargo, aquellos relacionados con la predicción de las necesidades de agua para los cultivos pueden no ser importantes, comparados con el costo total de la instalación del sistema. Por ejemplo, el tamaño apropiado de los canales o de las diferentes obras hidráulicas.

Hay múltiples ejemplos de sistemas de riego en México y en otros países, que demuestran que económicamente son redituables, si se estiman bien los requerimientos de agua (H. Cuenca, 1989).

Para la evaluación de dicha necesidad algunos investigadores (Penman, 1948; Blaney, 1955; Thornthwaite, et al, 1955) han propuesto y desarrollado diversos criterios y métodos que están basados, tanto en formulaciones empíricas como semiempíricas y teóricas derivadas de fundamentos físicos obtenidos, generalmente, a partir del principio de conservación de la energía.

Uno de los métodos más completos para estimar la necesidad hídrica de un cultivo es el que considera el balance de energía. El balance de energía se refiere a los componentes de la radiación solar que actúan sobre la superficie de la tierra y el

entorno atmosférico. Tal energía es utilizada para generar evaporación del agua de la superficie del suelo, así como de la planta. En 1948, Penman propuso un método para relacionar el balance de radiación contra el movimiento aerodinámico del ambiente que circunda la zona de cultivo, para estimar la evapotranspiración. Este método permite pronosticarla al usar un balance de energía que indica los consumos disponibles para la evaporación, y un término aerodinámico para cuantificar la influencia de las condiciones de advección sobre la superficie del cultivo, al remover el vapor de agua desde el suelo.

Una forma particular del método que originalmente propuso Penman (1948), es el Penman modificado propuesto por Pruitt (Doorenbos y Pruitt, 1975; Doorenbos y Pruitt, 1977). Fue inferido con base en estudios de medición hechos con lisímetro, para determinar la evapotranspiración real en diferentes lugares alrededor del mundo. Al comparar los resultados con el método de Penman, usando para ello datos meteorológicos capturados en cada sitio de estudio, se determinó por medio de un análisis estadístico cuál de los parámetros meteorológicos podía reducir el error entre la medición y la evapotranspiración estimada.

En la publicación de la FAO-24, se propusieron los métodos de Blaney-Criddle y Penman modificado; en este último se observó que en ciertas condiciones sobreestimaba las evapotranspiraciones. Por lo tanto la FAO, en su documento "Expert Consultation on Revision of FAO Methodologies for Crop Water Requirements", propuso el método de Penman-Monteith como la herramienta más exacta para precisar las evapotranspiraciones en los cultivos.

MANUAL DEL USUARIO

Instalación

Para instalar el *Programa NEC-HID v.2.0* es necesario contar con el siguiente equipo:

- Una computadora IBM-XT/AT o cualquier otra compatible, con un procesador (80286, 80386 u 80486) y un disco duro con un espacio libre de 200 Kb que cuente con el sistema operativo DOS, versión 3.1 en adelante.
- Un monitor VGA.

La secuencia de instalación es la siguiente:

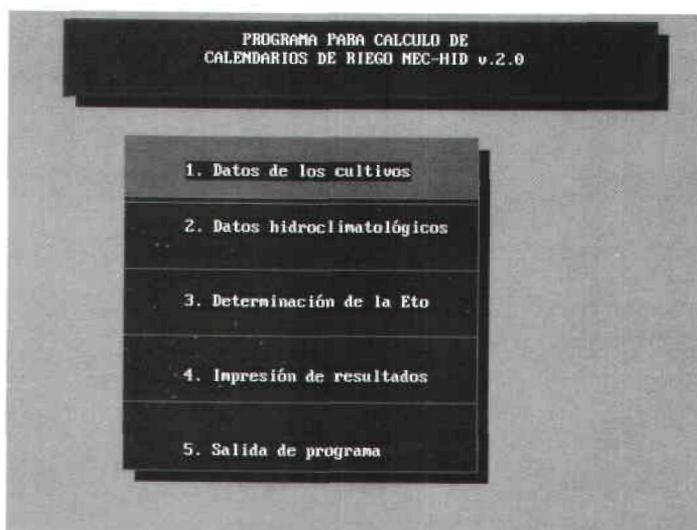
- Introduzca en la unidad de disco flexible: el *Programa NEC-HID v.2.0*.
- Teclee INSTALA.

Inicio del *Programa NEC-HID v.2.0*

Una vez instalado el programa el usuario queda ante el directorio de trabajo NEC-HID. En los siguientes incisos se describe cómo introducir la información de los cultivos y de los datos climatológicos. El manejo de esta información con el *Programa NEC-HID v.2.0*, permitirá determinar las necesidades hídricas de los cultivos.

Captura de datos de los cultivos

Para arrancar el programa teclee NEC-HID y se presentarán cinco opciones; para cambiar a cualquiera de ellas, se pueden usar las flechas hacia arriba o hacia abajo, o apretar el número de la opción deseada.



Para capturar los datos de los cultivos se selecciona la opción:

1- Datos de los cultivos

Presione RETURN, en seguida el programa cambia de pantalla y pregunta:

Nombre del archivo de datos de los cultivos

En esta parte del programa se despliegan los archivos que existen con datos de cultivos que ya han sido desarrollados; en nuestro caso se debe abrir un nuevo archivo, por lo tanto escriba, por ejemplo: **CUERNAVACA**. Una vez escrito el nombre del archivo que se tiene la intención de generar presione RETURN.

En seguida aparece la pregunta:

¿Desea generar archivo de los cultivos ?(S/N)

En este punto el programa solicita al usuario la confirmación para generar o no otros archivos. La razón principal de esta pregunta se explicará en el inciso de modificación de archivo de datos de los cultivos. Por lo tanto, si se desea abrir un nuevo archivo presione **S** para continuar; si no desea hacerlo, presione **N**.

En seguida se despliega el siguiente título en la pantalla:

TIPO DE CULTIVOS

¿Número de cultivos extensivos?

Los cultivos extensivos son:

ALGODÓN	GIRASOL	PATATA MEDIA
ALGODÓN(S.ESP.)	GRANOS	PATATA TARDÍA
ARROZ	FRIJOL	PATATA TEMPRANA
AVENA	FRIJOL (S. ESP.)	REMOLACHA AZUCARERA
CACAHUATE	LENTEJAS	RICINO
CAÑA DE AZÚCAR	LINO	SOYA
CÁRTAMO	LÚPULO	SORGO
CEBADA	MAÍZ GRANO	SORGO (S. ESP.)
CEREAL INVIERNO	MAÍZ (S. ESP.)	TABACO
CEREAL INVIERNO (S. ESP.)	MIJO	TRIGO

Introduzca el número de cultivos extensivos que quiere analizar y presione RETURN.

¿Número de cultivos forrajeros?

Los cultivos forrajeros son:

ALFALFA
CEREAL INV. FORRAJERO
MAÍZ FORRAJERO

Introduzca el número de cultivos forrajeros que quiere analizar y presione RETURN.

¿Número de cultivos hortícolas?

Los cultivos hortícolas son:

ALCACHOFAS	COLES	MELÓN (S. ESP.)
APIO	EJOTE	PEPINOS
BERENJENA	ESPINACAS	PIMIENTOS
CALABAZAS	FRESA	RÁBANOS
CEBOLLAS SECAS	GUISANTES	REMOLACHA MESA
CEBOLLAS VERDES	LECHUGA	TOMATE
CEBOLLAS SECAS(S.ESP.)	MAÍZ DULCE	TOMATE (S. ESP.)
CEBOLLAS VERDES(S.ESP.)	MELÓN	ZANAHORIAS

Introduzca el número de cultivos hortícolas que quiere analizar y presione RETURN.

¿Número de cultivos leñosos?

Los cultivos leñosos son:

AGUACATE
ALMENDRO
CÍTRICOS
CÍTRICOS (S.ESP.)
FRUTAL HOJA CADUCA I (S.ESP.)
FRUTAL HOJA CADUCA II (S.ESP.)
FRUTAL HOJA CADUCA I

FRUTAL HOJA CADUCA II
OLIVO
VID DE MESA
VIÑA
CACAO

Introduzca el número de cultivos leñosos que quiere analizar y presione RETURN.

Una vez definido el número de cultivos que se analizarán, el programa solicita conforme a la clasificación -extensivo, forrajero, hortícolas o leñosos- el nombre del cultivo para el cual se requiere determinar la evapotranspiración.

Primero aparece en la pantalla el nombre del cultivo y en seguida, dependiendo si el cultivo es no perenne, los siguientes datos:

```
Datos necesarios para calcular el ciclo vegetativo
Nombre del cultivo =ALGODON
1.-¿Duración de la primera fase (días)? 30
2.-¿Duración de la segunda fase (días)? 50
3.-¿Duración de la tercera fase (días)? 55
4.-¿Duración de la cuarta fase (días)? 45
5.-¿Dosis de riego neta (mm)? 100
6.-¿Frecuencia de riego (días)? 20
7.-¿Fecha de plantación? : 1 de abril
8.-¿Capacidad de almacenamiento del suelo (mm)? 120

Desea hacer la corrección de algún dato (S/N)
```

Cultivos no perennes

Alcachofa Cultivo perenne, replantada cada 4-7 años; plantada en abril en la costa de California 40/40/250/30¹ que suman (360); cosechada subsecuentemente, con cortes al nivel de crecimiento a finales de la primavera cada año y al final de la cosecha, 20/40/220/30 que suman (310).

¹ 40/40/250/30 que suman (360) esto se refiere a las diferentes etapas del crecimiento del cultivo (surgimiento, desarrollo, cobertura y la maduración, previa a la cosecha); el valor entre paréntesis es la duración total del ciclo vegetativo en días.

Cálculo de calendarios de riego

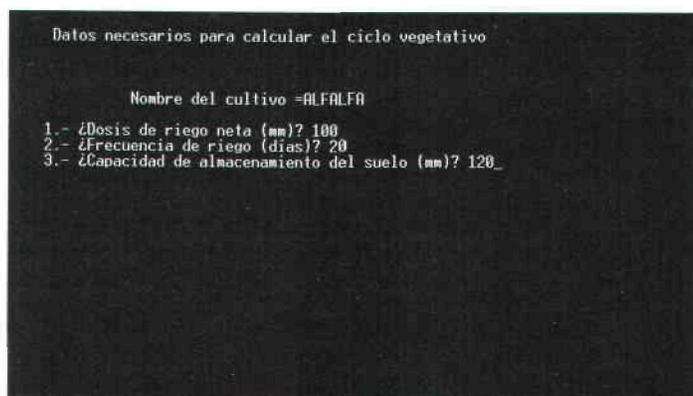
Algodón	Sembrado en marzo en Egipto, en abril-mayo en Pakistán y en septiembre en Arabia Saudita 30/50/60/55, que suman (195); plantado en la primavera y cosechado con máquina en Texas 30/50/55/45, que suman (180).
Apio	Plantado antes de la temporada de frío en climas semiáridos 25/40/95/20, que suman (180); en temporada de frío 30/55/105/20 que suman (210); y a mediados de la temporada húmeda del Mediterráneo, 25/40/45/15 que suman (125).
Avena	Ver cebada.
Berenjena	Plantada en climas cálidos del desierto 30/40/40/20, que suman (130); plantada en clima mediterráneo a fines de la primavera y a principios del verano 30/45/40/25, que suman (140).
Betabel	Plantado en la primavera mediterránea 15/25/20/10 que suman (70), plantado a principios de la primavera con clima mediterráneo, antes de los fríos en climas desérticos 25/30/25/10 que suman (90).
Cacahuete	Plantado en la temporada de secas en el este de África 25/35/45/25 que suman (130); plantado al final de la primavera en las planicies costeras del Líbano e Israel 35/45/35/25 que suman (140).
Calabaza de cabeza retorcida	Plantada en la primavera del Mediterráneo 25/35/25/15 que suman (100); a principios del verano en el Mediterráneo y en la zona marítima de Europa 20/30/25/15 que suman (90); plantada en invierno en climas desérticos cálidos 25/35/25/15 que suman (100).
Calabaza de invierno	Plantada a finales del invierno del Mediterráneo y en climas desérticos con invierno cálido 20/30/30/15 que suman (95); plantada en agosto en el desierto de California 20/35/30/25 que suman (110); plantada a principios de junio en el clima marítimo de Europa 25/35/35/25 que suman (120).
Cártamo	Plantado al inicio o a mediados de la primavera en la franja central de California 20/35/55/30 que suman (140); en climas desérticos con invierno cálido 35/55/60/40 que suman (190).
Cebada	También trigo, avena y otros cultivos extensivos con sus variantes; trigo plantado en noviembre en el centro de la India, 15/25/50/30 que suman (120); sembrada a principios de la primavera, en climas semiáridos entre las latitudes 35 ^o -45 ^o y en noviembre en la República de Corea 20/25/60/30 que suman (135); trigo sembrado en julio en las tierras altas del este de África a 2500m altitud y en la República de Corea 15/30/65/40 que suman (150).
Cebolla	Plantada en la primavera en clima mediterráneo 15/25/70/40 que suman (150); previo al invierno cálido en climas desérticos y semidesérticos 20/35/110/45 que suman (210).
Cebolla verde	Plantada en la primavera en clima mediterráneo 25/30/10/5 que suman (70); previo al invierno cálido en climas desérticos y semidesérticos 20/45/20/10 que suma (95).
Crucíferas	Rangos variables a lo largo de la temporada; plantadas en la primavera en las costas del Mediterráneo y climas continentales 20/30/20/10, que suman (80); plantadas en otoño en la costa del Mediterráneo 30/35/90/40, que suman (195).

- Chícharo Plantado al final del verano en climas fríos marítimos 15/25/35/15 que suman (90); plantado en el inicio de la primavera en el Mediterráneo y en el invierno cálido del desierto 20/25/35/15 que suman (95); plantado al final del invierno en el Mediterráneo 25/30/30/15 que suman (100).
- Espinacas Plantadas en la primavera del Mediterráneo 20/20/15/5 que suman (60); plantadas entre septiembre-octubre y a finales del invierno en el Mediterráneo 20/20/25/5 que suman (70); en climas desérticos con invierno cálido 20/30/40/10 que suman (100).
- Frijoles secos Plantados al final de la primavera en climas continentales 20/30/40/20 que suman (110); plantados en junio en el centro de California y en el oeste de Pakistán, 15/25/35/20 que suman (95); variedades de temporal largo 15/25/50/20 que suman (110).
- Frijoles verdes Plantados en febrero y marzo en el desierto de California y en el Mediterráneo, 20/30/30/10 que suman (90); plantados en agosto-septiembre en el desierto de California, Egipto y costa del Líbano, 15/25/25/10 que suman (75).
- Girasol Plantado en la primavera mediterránea 25/35/45/25 que suman (130); a principios del verano en el desierto de California 20/35/45/25 que suman (125).
- Granos Plantados en la primavera del clima mediterráneo 20/30/60/40, que suman (150); plantados en octubre-noviembre en climas cálidos del invierno de Pakistán y en zonas bajas del desierto 25/35/65/40, que suman (165).
- Lechuga Plantada en los climas mediterráneos en la primavera 20/30/15/10, que suman (75) y plantada a finales del invierno 30/40/25/10, que suman (105); a principios de la temporada de fríos en climas de desierto bajo 25/35/30/10, que suman (100); plantada a finales de la temporada de fríos, en climas de desierto bajo 35/50/45/10, que suman (140).
- Lenteja Plantada en la primavera en climas de invierno frío 20/30/60/40, que suman (150); y en la temporada previa a los fríos en climas de invierno cálido 25/35/70/40, que suman (170).
- Lino Plantado en la primavera en los climas fríos del invierno 25/35/50/40, que suman (150); plantado en las zonas bajas de Arizona, antes de la temporada de fríos 30/40/100/50 que suman (220).
- Maíz dulce Plantado a principios de marzo en Filipinas (a finales de la temporada de secas) 20/20/30/10, que suman (80); plantado a finales de la primavera en la costa del Mediterráneo 20/25/25/10, que suman (80); a finales de la temporada de fríos en climas desérticos 20/30/30/10, que suman (90); plantado a principios de la temporada de fríos en climas desérticos 20/30/50/10, que suman (110).
- Maíz grano Plantado en la primavera en las tierras altas del este de África 30/50/60/40, que suman (180); plantado a finales de la temporada de frío, en climas calurosos del desierto, 25/40/45/30 que suman (140); plantado en junio en zonas subhúmedas de Nigeria, y a finales de octubre en la India 20/35/40/30, que suman (125); plantado a finales de abril en el sureste de España, 30/40/50/30 que suman (150).
- Melón Plantado al final de la primavera en clima mediterráneo 25/35/40/20 que suma (120); plantado a mediados de invierno en climas de altitud baja en el desierto 30/45/65/20 que suman (160).

Mijo	Plantado en junio en Pakistán 15/25/40/25 que suman (105); planicies centrales de EUA, plantado en primavera 20/30/55/35 que suman (140).
Patata	Plantada en zonas de invierno caluroso 25/30/30/20 que suman (105); plantada al final del invierno en zonas áridas y semiáridas, y plantada en clima continental al final de la primavera o al inicio del verano 25/30/45/30, que suman (130); plantada al inicio o a mediados de la primavera en Europa central 30/35/50/30 que suman (145). Con el retardo del surgimiento del cultivo puede incrementar la duración del periodo inicial en 15 días, durante la primavera fría.
Pepino	Plantado en junio en Egipto y en agosto-octubre en el desierto de California 20/30/40/15, que suman (105); plantado en la primavera en climas semiárido y árido en partes bajas del desierto, 25/35/50/20 que suman (130).
Pimienta	Plantada al inicio de la fresca primavera mediterránea y al inicio del verano continental 30/35/40/20 que suman (125); plantada a mediados de la primavera en climas costeros continentales fríos 25/35/40/20 que suman (120); plantada en climas previos al invierno cálido de los desiertos 30/40/110/30 que suman (210).
Rábanos	Plantado en el Mediterráneo al inicio de la primavera y del verano continental 5/10/15/5 que suman (35); plantado en el Mediterráneo al final del invierno y en el invierno cálido del desierto 10/10/15/5 que suman (40).
Ricino	Plantado en climas semiáridos y áridos en primavera, 25/40/65/50 que suman (180).
Sorgo	Plantado en climas desérticos en épocas de calor 20/30/40/30 que suman (120); plantado a mediados de junio en Pakistán, en mayo en el Medio Oeste de EUA, y en el Mediterráneo 20/35/40/30 que suman (125); plantado a principios de la primavera en zonas con clima árido 20/35/45/30 que suman (130).
Soya	Plantada en mayo en la zona central de EUA 20/35/60/25 que suman (140); plantada en mayo-junio en el desierto de California 20/30/60/25 que suman (135); plantada a principios de diciembre en Filipinas -principios de la temporada de secas-, 15/15/40/15 que suman (85); plantada en Japón a principios y a mediados de junio 20/25/75/30 que suman (150).
Tomate	Plantado en climas desérticos de invierno cálido 30/40/40/25 que suman (135); a finales del otoño 35/45/70/30 que suman (180); plantado en la primavera en clima mediterráneo 30/40/45/30 que suman (145).
Trigo	Ver cebada.
Zanahoria	Plantada en la temporada de calor en zonas de semiáridas a áridas 20/30/30/20 que suman (100); para la temporada de frío, para plantarse a finales del invierno, subir a 20/30/80/20 que suman (150).

En esta recomendación no se encuentran todos los cultivos no perennes que el Programa NEC-HID V.2.0 puede manejar; si desea analizar algún caso que no se encuentre en la lista anterior, se recomienda buscar estudios en un centro de investigación agronómico en la zona de análisis, en los que se hayan determinado las etapas fenológicas de los cultivos.

Para analizar un cultivo perenne el programa pide los siguientes datos:



Una vez que se capturan los datos correspondientes al cultivo se tiene la opción de hacer una o más correcciones:

¿Desea hacer una corrección a los datos de los cultivos? (S/N)

La opción **S** muestra una pantalla con los datos que se han recopilado; escogiendo el número del dato que se requiere cambiar, se procede a hacer la modificación.

En el caso de la opción **N** el programa procede a pedir los datos del siguiente cultivo; si se trata del último cultivo por capturar, se regresa al menú principal.

Captura de datos hidroclimatológicos

Para iniciar la captura de los datos hidroclimatológicos, se escoge la opción:

2- Datos hidroclimatológicos

Presione RETURN, en seguida el programa cambia de pantalla y pregunta:

Nombre del archivo de datos hidroclimatológicos

A continuación, el programa despliega los archivos que existen con datos de cultivos que ya se han desarrollado. En nuestro caso se debe abrir un nuevo archivo, por lo tanto escriba: **CUERNAVACA**. Una vez escrito el nombre del archivo que desea generar, presione RETURN.

Los datos hidroclimatológicos de la zona de estudio son:

- 1- Sitio de ubicación del estudio
- 2- Latitud dar los grados y presionar ENTER, dar los minutos y presionar ENTER.
- 3- Longitud dar los grados y presionar ENTER, dar los minutos y presionar ENTER.
- 4- Altitud (metros sobre el nivel del mar)
- 5- Relación del viento entre el día y la noche
- 6- Altura a la que se hizo la medición del viento (m)
- 7- Capacidad de almacenamiento del suelo desnudo (mm)
- 8- Año de registro climatológico

Cuando se han terminado de escribir los datos anteriores, el programa solicita los datos mensuales de:

- Temperatura (°C)
- Humedad relativa (%)
- Horas de sol (horas)
- Velocidad del viento (km/día)
- Precipitación (mm)

que aparecen en la Pantalla de datos.

TABLA PARA CAPTURAR DE DATOS CLIMATOLÓGICOS					
Sitio : LERDO					
latitud : 25° 33' longitud = 103° 27' altitud = 1120 m F1 » para salir					
Use las flechas para mover el cursor					
MES	TEMPERATURA MEDIA °c	HUMEDAD RELATIVA %	HORAS DE SOL (h)	VELOCIDAD DEL VIENTO (km / día)	PRECIPITACION (mm)
ENERO	12.29	50.4	7.6	186.2	20
FEBRERO	14.39	54.1	8.4	188	4.4
MARZO	19.3	38.8	7.1	242.1	9.2
ABRIL	20.36	42.5	9.1	262.6	5.9
MAYO	26.38	42.4	10.5	194.8	19.4
JUNIO	28.7	50.1	11.2	278.4	61.9
JULIO	27.23	51.0	10.9	196.9	118.2
AGOSTO	25.47	62.1	7.9	236.7	106.7
SEPTIEMBRE	25.29	60.1	9.5	177.6	81.1
OCTUBRE	20.06	61.2	7.5	165.3	31.3
NOVIEMBRE	12.55	62.8	8	156.8	11.6
DICIEMBRE	13.67	63.1	6.8	160.7	21.6

La Pantalla de datos está estructurada para utilizarse como una hoja de cálculo electrónica y el trabajo se controla con las siguientes teclas:

flecha hacia arriba (mueve el cursor un renglón hacia arriba)

flecha hacia abajo (mueve el cursor un renglón hacia abajo)

flecha hacia la izquierda (mueve el cursor una columna hacia la izquierda. Cuando se encuentra en el borde de la pantalla, se traslada a la primera columna de la derecha, en el mismo renglón)

flecha hacia la derecha (mueve el cursor una columna hacia la derecha. Cuando el cursor se encuentra al borde de la pantalla, se traslada hacia la primera columna de la izquierda en el mismo renglón)

F1 (Cuando se han terminado de introducir todos los datos climatológicos en la pantalla, para salir y salvar la información en el archivo correspondiente, se tecléa F1).

Para introducir un valor numérico en la pantalla de datos en la posición requerida, tanto de renglón como de columna, simplemente se tecléa el número deseado y se presiona la tecla RETURN, con lo que la pantalla de datos procede a su captura y almacenamiento. Para hacer una corrección, el procedimiento es el mismo que para el de captura.

Una vez que se capturan los datos climatológicos, se puede hacer una corrección:

¿Desea hacer una corrección de los datos climatológicos? (S/N)

La opción S permite regresar a la pantalla que muestra los datos recopilados; escogiendo los datos que se piensan cambiar, se hace la modificación.

En el caso de la opción N, el programa regresa al menú principal.

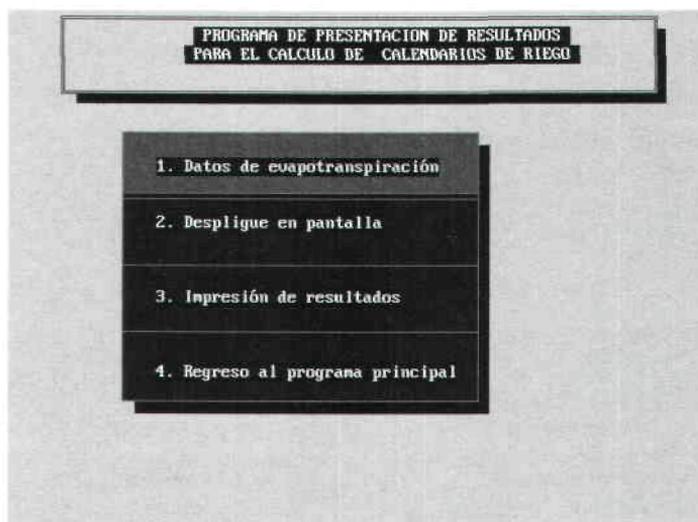
Determinación de la evapotranspiración

La opción 3- **Determinación de la evapotranspiración** del Programa NEC-HID v.2.0, permite utilizar los datos de los cultivos y los climatológicos, para determinar la evapotranspiración potencial del cultivo de referencia y la evapotranspiración, precipitación efectiva y el balance hídrico del cultivo seleccionado.

Una vez que se introducen los archivos con los correspondientes datos, el *Programa NEC-HID V.2.0* comienza a determinar la evapotranspiración del cultivo de referencia y la evapotranspiración, precipitación efectiva y balance hídrico de los cultivos seleccionados.

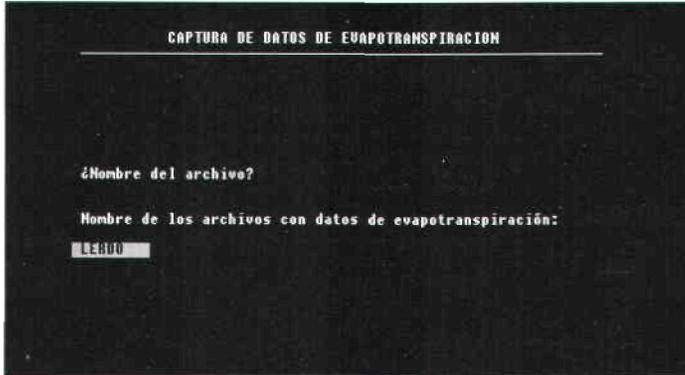
Presentación de resultados

Para la presentación de resultados seleccione la opción **4-Presentación de resultados** y presione RETURN; con esta opción se corre el programa IMPRE, el cual consta de las siguientes alternativas:



Datos de evapotranspiración

La captura de datos de evapotranspiración es un paso obligado para la presentación de resultados; teclee 1, o con la flecha correspondiente seleccione la opción **1-Datos de evapotranspiración**. En seguida, presione RETURN y en la pantalla aparecerán los siguientes datos:



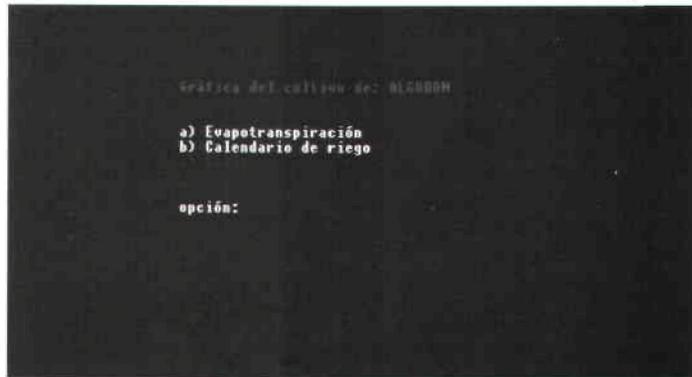
Teclee el archivo de datos de evapotranspiración que piensa desplegar en la pantalla o imprima resultados en la impresora y presione RETURN, el *Programa NEC-HID v.2.0* regresará al menú principal del programa IMPRE.

Despliegue en pantalla

Para lograr desplegar los resultados en pantalla seleccione la opción **2-Despliegue en pantalla** y presione RETURN, en ese momento, aparecerán los siguientes datos:

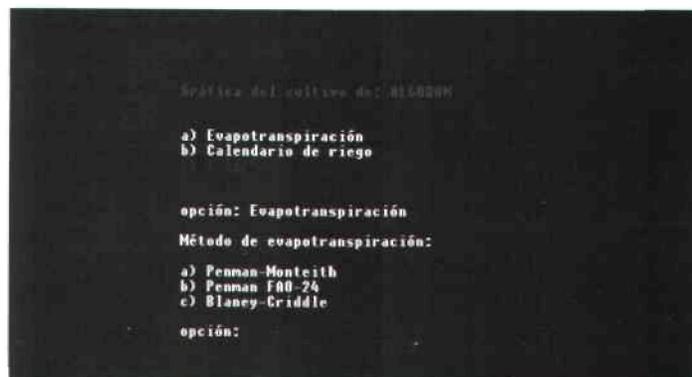


Presione el número de cultivo deseado o, en su caso, el número que indica SALIR para regresar al menú principal y en la pantalla aparecerá:



- En esta pantalla se pide señalar la gráfica que se desea ver de ese cultivo, presione:
- a) Para la gráfica de evapotranspiración del cultivo de referencia y del cultivo seleccionado (evapotranspiración, precipitación efectiva y balance hídrico).
 - b) Para la gráfica del calendario de riego para el cultivo seleccionado.
 - c) Para regresar al menú principal.

En el momento de definir a) o b) se despliega en la pantalla lo siguiente:



El Programa NEC-HID v. 2.0 calcula las necesidades hídricas para cada cultivo de acuerdo a los tres métodos citados; para conocer el resultado de alguno en particular debe presionarse la letra correspondiente.

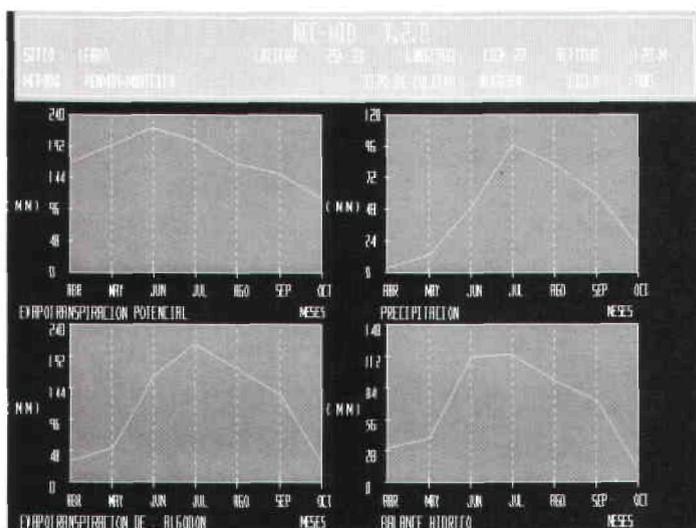
Una vez que se definió el método de evapotranspiración, aparece en forma gráfica la evapotranspiración o el calendario de riego del cultivo seleccionado.

Los resultados se presentan en forma gráfica y se despliegan en dos pantallas: la primera proporciona el comportamiento temporal de los requerimientos hídricos del cultivo en relación con las variables climatológicas, y la segunda proporciona una recomendación sobre los pasos a seguir en la dotación de las láminas de riego (calendario de riegos).

La pantalla 1 despliega los siguientes resultados (contra tiempo):

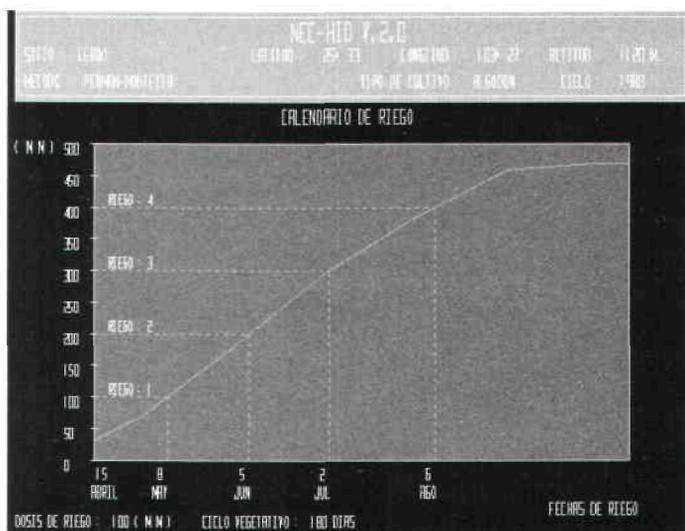
- Evapotranspiración potencial en mm
- Evapotranspiración real en mm
- Precipitación efectiva en mm
- Balance hídrico en mm

El análisis comprende todo el ciclo vegetativo.



Pantalla 1

Cuando las pantallas 1 y 2 están presentes en el monitor, adicionalmente se pueden imprimir tecleando IMPRIME PANTALLA.



Pantalla 2

Impresión de resultados

Una vez seleccionado el archivo (datos de evapotranspiración, pág. 22), para conocer los valores numéricos de los resultados del cálculo de las necesidades hídricas, escoja la opción **3- Impresión de resultados**.

El programa, en ese momento, presenta los resultados de la siguiente manera:

PROGRAMA PARA DETERMINAR LAS NECESIDADES HÍDRICAS DE LOS CULTIVOS

LUGAR:

LATITUD:

LONGITUD:

AÑO:

CULTIVO:

Ciclo vegetativo:

Fecha de siembra:

**Evapotranspiración
potencial
(mm)**

**Evapotranspiración
del cultivo
(mm)**

**Precipitación
(mm)**

**Balance
hídrico
(mm)**

**MÉTODO PARA DETERMINAR LA ETO: PENMAN-MONTEITH
ENERO**

.

.

DICIEMBRE

**MÉTODO PARA DETERMINAR LA ETO: PENMAN-FAO-24
ENERO**

.

.

DICIEMBRE

**MÉTODO PARA DETERMINAR LA ETO: BLANEY-CRIDDLE
ENERO**

.

.

DICIEMBRE

El formato de presentación en impresora se repite para cada uno de los cultivos. Una vez que se termina de imprimir, el programa automáticamente regresa al menú principal de la opción IMPRE.

Para regresar al programa principal del *Programa NEC-HID v.2.0*, seleccione la opción **4- Regreso al programa principal** y presione RETURN.

Para salir del menú principal del *Programa NEC-HID v.2.0*, seleccione **5- Salir del programa** y presione RETURN. En ese momento usted se encontrará en el sistema operativo de su equipo de cómputo.

Recomendaciones y limitaciones del programa

Para elaborar este programa se han incluido los valores recomendados por la FAO-24, 1977, (ver anexo, Evaluación de los coeficientes de cultivo, pág. 66) que toma en cuenta cuatro fases vegetativas.

Considerando que la duración de las fases de crecimiento del cultivo pueden ser variables dependiendo del clima, latitud y altitud del lugar, para obtener mejores resultados con el *Programa NEC-HID v.2.0*, se recomienda determinar experimentalmente las cuatro etapas de crecimiento para los diferentes cultivos de la región.

Con el objeto de definir con mayor precisión las necesidades hídricas de uno o varios cultivos, se proporciona al *Programa NEC-HID v.2.0* los datos climatológicos actualizados durante el ciclo vegetativo. Para su modificación, se utiliza la opción 2, de dicho Programa.



Bibliografía

Aguilar, Ch. A; García, V. N., *Calendarios de riego*, Programa Penman V.1, Publicación interna, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, México, 1991.

Airadov I. P., Golovánov A. I; Mamáev M.G., *El riego*, URSS, Editorial MIR, 1985, 367 pp.

American Society of Civil Engineers, *Evapotranspiration and Irrigation Water Requirements*, ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice no.70, New York, USA, 1990, 331 pp.

Bernstein L. "Las necesidades y usos del agua por las plantas", *Water*, Washington, D. C., Anuario publicado por el United States Department of Agriculture, 1955, 20-26 pp.

Blaney H.F., "El clima como índice de las necesidades de riego", *Water*, Washington, D. C., Anuario publicado por el United States Department of Agriculture, 1955, 370-374 pp.

Cuenca, H.R., *Irrigation System Design: an Engineering Approach*, New Jersey, Prentice-Hall, Inc., 1989, 552 pp.

Doorenbos and Pruitt, FAO, *Crop Water Requirements*, Irrigation and Drainage Paper 24, Roma, Italia, 1977.

FAO, *Expert Consultation on Revision of FAO Methodologies for Crop Water Requirements*, Land and Water Development Division, Roma, Italia, octubre 1991.

Israelsen O.W.; Hansen V. E., *Principios y aplicaciones del riego*, España, Editorial Reverté, 1981, 3a. ed., 396 pp.

Notario, B. C., *Apuntes del curso internacional de ingeniería de regadíos*, Madrid, Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX, Vol. III, 1992.

Taylor S. A., "¿Cuándo hay que regar y cuánta agua hay que emplear?", *Water*, Washington, D. C., Anuario publicado por el United States Department of Agriculture, 1955, 402-407 pp.

Thorntwaite C. W.; Mather J.R., "El presupuesto hidráulico y su uso en el riego", *Water*, Washington, D. C., Anuario publicado por el United States Department of Agriculture, 1955, 375-387 pp.

Torres, A., *Agrometeorología*, México, Editorial Diana, 1983, 2a. impresión, 150 pp.

Los fundamentos de la agricultura, México, Editorial Océano/Centrum, Biblioteca práctica agrícola ganadera, 1989.

Aguiló B.J., et al. *Manual de ingeniería de regadíos*, Madrid, Ministerio de Obras Públicas de España, 1981, 2,318 pp.

Withers B.; Vipond S., *El riego*, México, Editorial Diana, 1983, 4a. impresión, 350 pp.

Zimmerman D.J., *El riego*, México, Editorial CECSA, 1982, 6a. impresión, 604 pp.

ANEXO:

Necesidades hídricas de los cultivos



Aspectos generales

El agua en las plantas

En este inciso se presenta una descripción simplificada de las necesidades y usos del agua en las plantas (León Bernstein, 1955).

El agua en la planta es fundamental para llevar a cabo sus funciones vitales. La célula de una hoja consiste en una pared exterior relativamente rígida que rodea al protoplasma, el cual constituye la materia viviente de la misma. Debido a su rigidez, la pared de la célula determina su forma. Un gran número de células que se adhieren en sus puntos de contacto determinan la forma de la planta.

Al relacionarse las células con el agua, cada parte, las paredes, el protoplasma y el vacuolo, tiene una función necesaria y diferente. La pared de la célula permite el libre curso del agua y de la mayoría de las sustancias disueltas ahí, pero el protoplasma limita su paso.

A diferencia de las partículas que componen las materias sólidas y que ocupan espacios relativamente fijos, las partículas de gases, líquidos y sólidos en solución también se mueven al azar. Por lo tanto, a todas las partes de una solución les ocurre lo mismo y, por consiguiente, tienden a quedar igualmente concentradas.

Si sumergimos una célula en una gota de agua cuyo contenido sea material disuelto de azúcares, sales y demás compuestos y con concentraciones inferiores a las del agua dentro de la célula, los materiales disueltos tienden a salir de ésta. El agua penetra en ella mediante el proceso de difusión, y cada sustancia tiende a obtener

concentraciones uniformes en el sistema "gota de agua-célula". Sin embargo, el protoplasma restringe el movimiento de la mayoría de las sustancias disueltas en el agua dentro de la célula hacia el exterior. De manera que el agua penetra a la célula y las sustancias disueltas, en su mayoría, quedan dentro.

Aquella se acumula en el vacuolo de ésta y aumenta la presión que fuerza al protoplasma contra la pared de la célula, manteniéndola totalmente distendida. Se dice que una célula en tales condiciones se encuentra túrgida.

La presión difusiva del agua en la célula, que es índice de su tendencia a salir de ésta, aumenta en igual medida que su turgidez. En el punto de equilibrio la turgidez de la célula aumenta la presión de difusión del agua en la misma, hasta compensar la menor concentración debido a la presencia de sustancias disueltas.

Si se reemplaza la gota de agua por una solución concentrada de materia sólida, el agua dentro de la célula comienza a salir. La presión dentro de ella disminuye, y si continúa el movimiento hacia afuera, la célula pierde su turgidez y se vuelve flácida.

Se conoce como osmosis al movimiento del agua a través de una membrana semejante al protoplasma, que es más permeable a su circulación que a las sustancias disueltas en ella.

Además, las células tienden a absorber agua mediante un proceso de adhesión característico de sustancias finamente divididas o dispersas. Las grandes superficies expuestas la atraen y la retienen con fuerza considerable. Las proteínas y carbohidratos, tales como la celulosa de la pared de la célula, representan una elevada proporción de los sólidos en las células de las plantas, y la fuerza de atracción que ejercen retiene una parte del agua de la célula.

Podemos comprender ahora la ventaja de las plantas acuáticas en relación con su suministro de agua. Los protoplastos sólo necesitan conservar su capacidad de retener las sustancias disueltas que la célula produce o absorbe, y las células de las plantas obtendrán el agua mediante una sencilla difusión u osmosis. En contraparte, las plantas terrestres, al estar expuestas al aire, son susceptibles de la desecación causada por evaporación del agua de la célula. Se conoce como transpiración la pérdida por evaporación del agua de las plantas. La mayor parte, absorbida por las raíces de una planta, se pierde debido a este proceso.

Comúnmente, se encuentran de cinco a diez partes en peso de agua por cada parte en peso de materia seca en una planta, pero ésta debe absorber varios cientos de partes en peso de agua por cada parte de materia seca que produzca. La diferencia

de las cinco o diez partes y los varios cientos de partes en peso de agua, representa la pérdida por transpiración. En contraste, la planta acuática tiene que absorber solamente el agua necesaria para su crecimiento, es decir las diez partes en peso de agua por parte de materia seca que constituye el cuerpo de la planta. Es evidente, por lo tanto, que las plantas terrestres tienen que contar con medios eficientes para la absorción del agua para su distribución a través de ellas y para controlar hasta donde sea posible la pérdida de agua.

La mayor parte del agua que absorben las plantas terrestres se pierde por transpiración, de la cual depende la magnitud del consumo. Los procedimientos mecánicos que rigen esta relación son muy sencillos. Algunas de las células quedan directamente relacionadas con los elementos conductores de agua en las venas de las hojas. Algunas tienen contacto indirecto a través de otra célula.

Cuando el agua se pierde por transpiración, la turgencia de las células de la hoja disminuye y tienden con mayor fuerza a absorberla de los tejidos que la conducen, por lo que la pérdida en la hoja significa que llega más agua a ella, lo que a su vez hace que se mueva mayor cantidad a lo largo de los elementos que la conducen desde las células de las raíces que están en contacto con la humedad de la tierra. Por lo tanto, se trata de un proceso encadenado, en el cual el elemento regulador es la proporción de agua perdida por transpiración.

Como ésta es el elemento clave que utilizan las plantas para absorber agua, los factores que la rigen son muy importantes. La transpiración comprende el proceso de evaporar agua en los espacios de aire de las hojas y su difusión hacia afuera en la atmósfera circundante. Dentro de la hoja, los espacios de aire están casi completamente saturados de vapor de agua, y la difusión al aire circundante, que ocurre primordialmente a través de los estomas, es proporcional a la diferencia de concentración de vapor de agua entre los espacios de la hoja y el aire que la rodea. Por lo tanto, si los demás factores son iguales, mientras menor sea el contenido de humedad relativa será más rápida la transpiración.

A medida que las hojas absorben la radiación solar, tienden a volverse más calientes que el aire. Frecuentemente la diferencia de temperatura es de hasta de 2.5 a 5 °C.

La cantidad de agua que puede existir en el aire saturado se incrementa a medida que se eleva la temperatura. Por lo tanto, el calentamiento de la hoja por los rayos solares aumenta la concentración de vapor de agua y agiliza su pérdida. No es sorprendente, entonces, que la proporción de transpiración siga un ciclo diario que tiende a ser paralelo a la intensidad de la luz. Desde luego se pierde mayor cantidad durante las horas de luz; la proporción de tal pérdida es más rápida a mediodía. La transpiración tiende a aumentar la concentración de vapor de agua en el aire que

rodea la hoja, lo que a su vez tendería a disminuir aún más la pérdida de líquido en la planta. Las corrientes de aire contrarrestan esa tendencia al disipar el vapor acumulado.

La transpiración continua sólo es posible si la planta tiene un constante suministro de humedad disponible. Si el mismo se agota o si la pérdida excede la proporción de consumo, eventualmente se marchita, los estomas se cierran y queda impedida la transpiración. Aunque dicho control puede evitar o demorar que se produzcan serios daños o aun la muerte, ello no puede ocurrir sin consecuencias. La turgencia o estado distendido de las células de las plantas es necesaria para el continuo crecimiento de las mismas: una disminución en la turgidez, o marchitamiento, se refleja en el retraso o inhibición del crecimiento.

Una planta gravemente marchita, cuyos estomas estén cerrados, no puede continuar eficazmente el proceso de fotosíntesis, porque se dificulta el necesario intercambio de gases con el aire circundante. El agua es una de las materias primas de la fotosíntesis, ya que es la sustancia en la que actúa la luz para producir hidrógeno, reacción básica. Sin embargo, las cantidades empleadas en el proceso son pequeñas si se les compara con las pérdidas. Aun en una planta gravemente marchita, la disminución de la fotosíntesis es consecuencia de las escasas existencias de bióxido de carbono o de daños al protoplasma, como resultados de la desecación, más que por deficiencia de agua como materia prima del proceso.

Aunque la transpiración excesiva puede dañar las plantas y disminuir su rendimiento, es poco lo que se puede hacer para regularla en condiciones de campo, porque factores tales como temperatura, luz y viento son muy difíciles de modificar.

Es posible, sin embargo, mantener un suministro adecuado de agua para la planta, si se proporcionan aquellas condiciones de la tierra que permitan un máximo desarrollo y actividad de sus raíces. Un sistema de raíces sano y activo y un suministro adecuado de agua son las únicas soluciones prácticas al problema de la transpiración.

El clima y las necesidades de riego

En este inciso se analiza la influencia del clima sobre las necesidades de riego. El resumen que se presenta a continuación está basado en una serie de ideas y conclusiones presentadas por Harry F. Blaney, C.W. Thornthwaite y J. R. Mather, las cuales fueron publicadas en 1955 por el United States Department of Agriculture en el libro denominado *Water*.

La mayor parte del agua de riego que se aplica en una parcela se pierde por evaporación y transpiración. En la práctica es difícil separar estos dos procesos y se consideran generalmente integrados en uno solo, al cual se le denomina evapotranspiración. Incluye todas las pérdidas por evaporación del suelo y transpiración en que crece cualquier clase de planta más la evaporación del suelo desnudo y de la superficie de agua, siendo por tanto el mejor índice de las necesidades de riego. Las necesidades de riego son las cantidades de agua que se requieren para la producción agrícola; excluyen la precipitación, e incluyen la transpiración de las plantas, la evaporación, la filtración y otros desperdicios inevitables.

Las mediciones reales para utilizar consumos en cada una de las condiciones físicas o climatológicas de cualquier área muy extensa, son costosas y consumen mucho tiempo. Los resultados de las investigaciones y mediciones de la evapotranspiración, conjuntamente con las mediciones meteorológicas, proporcionan datos básicos que son necesarios para calcular los requerimientos de agua de las tierras de riego sobre las que, con excepción de los datos climatológicos, puede haber muy pocos o ninguno.

Muchos factores operan separada o conjuntamente para influenciar la cantidad de agua consumida por las plantas. Sus efectos no son necesariamente constantes y pueden diferir con la localidad, y fluctuar de año en año. Algunos de ellos implican el factor humano y otros se relacionan con las influencias naturales, clima, suministro de agua, suelo y topografía.

La precipitación que cae en cantidades suficientes durante el periodo vegetativo puede disminuir los requerimientos de riego. Ligeras precipitaciones del orden de 1mm prácticamente no añaden nada de humedad al suelo para la transpiración de las plantas, pues se pierde por evaporación. Una gran parte de las intensas precipitaciones de corta duración se pierden por escurrimiento superficial. Las precipitaciones con intensidades inferiores a la capacidad de infiltración son absorbidas por el suelo, almacenándose, e incrementan la humedad en forma suficiente para cubrir parte de los requerimientos de las plantas durante su ciclo vegetativo.

Las tres posibles fuentes de energía que generan la evapotranspiración son las siguientes: la radiación solar, el calor que llega a la superficie de evaporación desde el aire y el que se almacena en el cuerpo que produce el fenómeno. El sol es la fuente de toda la energía comprendida en el proceso de transformación de líquido a vapor de agua. Sin embargo, en la evaporación no se utiliza toda la energía que se recibe del sol, y una parte se refleja inmediatamente de la superficie del agua hacia la atmósfera. En una superficie cubierta de vegetación, la radiación reflejada puede constituir, aproximadamente, un 25% de la radiación total recibida. Igualmente,

cierto porcentaje de esa radiación recibida se vuelve a radiar de la superficie hacia la atmósfera. La cantidad depende de la temperatura de la superficie de la tierra y de la atmósfera que se encuentra sobre ella, siendo a menudo entre diez y 15% de la radiación recibida.

Después de deducir las pérdidas debidas a reflexión y reirradiación, el sector sobrante (que se conoce como radiación neta) debe dividirse en tres partes, una de las cuales calienta la tierra, otra el aire en contacto con la superficie terrestre y la tercera se utiliza para la evaporación. En 1953, C. W. Thornthwaite obtuvo una serie de mediciones meteorológicas mediante las cuales es posible computar los diversos componentes de la radiación neta para cierto número de días. Los cálculos muestran que, cuando la tierra está muy húmeda, más del 80% de la radiación neta se emplea en evaporación. Cuando la tierra está seca la evaporación disminuye considerablemente. La mayor parte se destina a calentar el aire y queda muy poca para evaporación. Entre los dos extremos, la proporción que se utiliza en evaporación varía en una forma tan compleja que no se ha podido precisar completamente. No obstante, la dificultad se ha seleccionado con el concepto de potencial de evapotranspiración.

Es factible determinar la evapotranspiración de las áreas que tienen cantidades variables de humedad del suelo cuando ésta descende de su capacidad de campo. Para ello se considera que el porcentaje de la radiación neta utilizada en la vaporización del agua es proporcional a la humedad del suelo. De hecho sería posible determinar el potencial de evapotranspiración directamente de la radiación neta, si no fuera por la circunstancia de que el calor de la tierra y del aire es fuente adicional de energía.

Los diferentes tipos de plantas varían en su potencial de evapotranspiración porque absorben cantidades diferentes de energía solar. A medida que aumenta la parte de luz que se refleja en una superficie y el total que cae sobre ella, o sea, a medida que aumenta el albedo de una superficie, la mayor parte de la radiación solar se refleja de nuevo hacia la atmósfera y queda una parte menor para el calentamiento y la evapotranspiración. El potencial de evapotranspiración de los cultivos es menor en las superficies cubiertas de hierba y mayor en las selvas de pinos.

Es necesario todavía un considerable trabajo para determinar la magnitud exacta de la evapotranspiración por parte de cada una de las tres fuentes de energía ante diferentes condiciones de clima, estructura de tierra y humedad.

Debido a tales factores y a que las observaciones de la radiaciones netas son muy escasas, es necesario recurrir a otros datos climatológicos, con el fin de determinar el potencial de evapotranspiración.

La temperatura delimita en gran parte los tipos de cultivos que son más adecuados para una cierta región, de tal manera que se obtengan los mejores rendimientos. Interviene en la proporcionalidad de utilización del agua por las plantas en cualquier localidad más que cualquier otro factor. Las temperaturas anormalmente bajas pueden retrasar el crecimiento de las plantas; las extraordinariamente altas, producir una situación de reposo.

La evapotranspiración puede cambiar mucho aun en años con temperaturas acumuladas iguales, a causa de la variancia en su distribución estacional, ya que la transpiración queda influenciada no sólo por la temperatura, sino por el área de follaje y las necesidades fisiológicas de la planta. Ambos factores están relacionados con el estado de madurez de la misma.

La evaporación y la transpiración se aceleran en días de baja humedad y se hacen más lentas durante los periodos de humedad abundante.

La evaporación del agua de la tierra y de las superficies de las plantas ocurre más rápidamente cuando el aire está en movimiento que cuando está en calma. Los vientos calientes y secos y otras características de los mismos durante el periodo de crecimiento de las plantas, afectan a la cantidad de agua utilizada por las mismas.

La estación de crecimiento, en la que influye la temperatura, tiene un importante efecto en las necesidades hídricas de las plantas. Puede emplearse como una guía para calcular los consumos y los requerimientos de riego. Los datos sobre las fechas de siembra y recolección de las cosechas son de gran importancia, así como las fechas anuales de los primeros riegos y de los últimos para determinar las necesidades de consumo de agua.

La latitud tiene gran influencia en lo que se refiere al consumo de agua por las plantas. Debido al movimiento de la Tierra y a la inclinación sobre su eje, la luz durante el verano es mucho más duradera en las latitudes septentrionales que en el ecuador. Los días más largos pueden hacer que la transpiración de las plantas continúe durante un periodo diario más prolongado, con lo que se genera un efecto semejante al de alargar la estación de crecimiento.

Los suministros de agua disponibles en un área influyen en el tipo de cultivos que se siembran y, por lo tanto, en las necesidades de riego. Si hay agua en abundancia, los agricultores tienden a regar excesivamente, tanto en frecuencia como en profundidad de aplicaciones. Si la superficie del suelo se humedece frecuentemente y si la evaporación resultante es alta, es muy probable que aumente el consumo. En algunos

lugares la calidad del agua afecta también las necesidades de riego; en ocasiones es necesario incrementar la lámina de riego para controlar la acumulación de sales en el suelo.

Existen varios métodos para determinar las necesidades hídricas de los cultivos y la vegetación nativa. Pueden determinarse valores unitarios del consumo para diferentes tipos de cultivos mediante estudios de humedad del suelo agrícola, mediciones con lisímetro o depósitos, análisis de datos climatológicos y otros métodos. Los valores unitarios observados en un área pueden usarse para calcular las demandas en otras que tengan condiciones climatológicas más o menos iguales. Ello, en el caso de que existan registros disponibles de temperatura y precipitación.

Prácticamente desde la década de los cuarenta los ingenieros de riego han calculado las demandas hídricas de los cultivos por medio de datos climatológicos y de algunos otros disponibles. C.R. Heske desarrolló el método de calor efectivo en 1924. Robert L. Lowry y Arthur F. Johnson analizaron en 1940 los datos de consumos hídricos en valles y vertientes hidráulicas húmedas con gran diferencia de clima, latitud, altitud y tipos de cultivos, y encontraron una relación lineal entre el consumo anual y el suministro de calor expresado en términos de la acumulación de temperaturas máximas diarias superiores a 0 °C.

Se han desarrollado métodos para predecir la evapotranspiración por medio de registros climatológicos. C. W. Thornthwaite preparó en 1948 un procedimiento para determinar el potencial de evapotranspiración por medio de los elementos atmosféricos. En la Estación Experimental de Rothmsted, en Inglaterra, H. L. Penman y R. K. Schofield correlacionaron la evaporación de superficies cubiertas de agua y la evapotranspiración de las plantas con observaciones meteorológicas, y encontraron un índice para calcular la evapotranspiración.

Los estudios realizados por Harry F. Blaney y Karl V. Morin durante 1941-42 demostraron que pueden usarse los datos de evaporación, evapotranspiración, promedio mensual de temperaturas, porcentaje mensual de horas de luz, estación de crecimiento, precipitación mensual y eficiencia, para calcular las necesidades de riego. Por medio de los registros de temperatura, horas de luz y humedad, determinaron fórmulas empíricas para calcular las proporciones de evaporación y utilización de agua por las plantas.

En resumen, se puede indicar que los métodos más exactos para el cálculo de la evapotranspiración que pueden relacionarse con los factores climatológicos se basan en los datos mensuales o estacionales de las zonas de riego en que se establecen los cultivos y en las diarias observaciones de los tanques evapotranspirómetros (lisímetros) que se hacen funcionar cuidadosamente. En la actualidad los trabajos efectua-

dos en varios lugares están progresando hacia el perfeccionamiento de una fórmula que se base únicamente en principios físicos. Mientras tanto, es apropiado continuar utilizando métodos de cálculo semiempíricos, como son los propuestos por Blaney, Thornthwaite y Penman, entre otros.

Cuánta agua usar y cuándo regar

Las raíces de las plantas no se desarrollan en un suelo seco. El agua suministrada por la precipitación o por el riego que no humedece el suelo agrícola en toda su profundidad producirá raíces poco profundas que normalmente son indeseables. Si sólo se humedece la parte superficial del suelo, aumentan las pérdidas por evaporación y se retrasa el crecimiento de las plantas. Tanto la escasez como la abundancia de agua en la zona radicular producen efectos indeseables en los rendimientos y calidad de las cosechas y desperdician el agua que puede necesitarse para otros fines o en otras partes. De aquí que sea sumamente importante aplicar el agua necesaria para humedecer la zona radicular sin que se produzcan pérdidas excesivas por filtración profunda, excepto cuando hay que lavar el exceso de sales o productos químicos perjudiciales que en ocasiones se acumulan en el suelo.

Cuando se suministra una cierta cantidad de agua al suelo, se infiltra y forma un frente húmedo bien definido. Después del suministro continuará moviéndose del suelo húmedo al seco durante largo tiempo; generalmente la mayor parte de dicho movimiento terminará en un día o dos. Se llama capacidad de campo del suelo a la cantidad de agua retenida después de un día o dos de desagüe, y se expresa como porcentaje de peso o volumen de suelo seco. Esta forma de evaluar la capacidad de campo no da siempre el mismo valor, ya que puede continuar el movimiento del agua y por otra parte el grado de sequía antes de la aplicación. Así también, la estructura o textura influyen en la cantidad que retiene el suelo.

Se requiere cierto trabajo para remover el agua retenida por el suelo. Llamamos curvas de liberación de humedad a las que relacionan la cantidad retenida por un suelo determinado con la fuerza por unidad de distancia necesaria para remover un volumen de agua en cada nivel a diferentes contenidos de humedad.

Es necesario mayor trabajo a medida que el suelo se vuelve más seco. Se usa la presión por unidad de área a modo de medida para que el suelo retenga agua. Se llama tensión de humedad a tal fuerza de retención.

Cuando el suelo está a capacidad de campo, el agua se retiene aproximadamente a un décimo de atmósfera de tensión.

No obstante que las raíces de las plantas absorben libremente el agua del suelo que se encuentra a capacidad de campo, el trabajo aumenta progresivamente a medida que disminuye el contenido de humedad del suelo y aumentan las fuerzas de retención. Cuando el contenido de humedad del suelo disminuye hasta el punto de que se requiere una gran energía para remover pequeñas cantidades de agua, las plantas sufren efectos nocivos e irreversibles por la deficiencia de humedad. Para evitar que mueran por marchitamiento o se detenga su desarrollo, debido a la falta del recurso hídrico necesario para satisfacer sus necesidades vitales, el agua de riego debe aplicarse antes de que se empiecen a manifestar dichos efectos nocivos.

Se considera que un suelo está en el punto de marchitamiento permanente cuando su contenido de humedad disminuye hasta causar un daño irreversible a las plantas, es decir, ya no se recuperan cuando se colocan a oscuras en una atmósfera húmeda. Esto constituye el límite más bajo de humedad disponible, y al igual que la capacidad de campo (CC), el punto de marchitamiento permanente no puede determinarse con exactitud. Incluso prácticamente es complicado conocer estos parámetros en suelos con alto contenido de sales. En la mayoría de los suelos agrícolas, el punto de marchitamiento permanente queda situado dentro del rango de tensión de humedad comprendido entre diez y veinte atmósferas (Sterlink A. Taylor y C. S. Slater, 1955); de aquí que frecuentemente se considere que el porcentaje de humedad de 15 atmósferas equivale al punto de marchitamiento permanente (PMP).

Se necesita aproximadamente 45 veces más de trabajo para remover la humedad en el PMP que a CC (Sterlink A. Taylor y C. S. Slater, 1955). A pesar de que teóricamente se considera que toda el agua, desde la CC hasta el PMP, queda disponible para las plantas, en la realidad éstas se marchitan temporalmente mucho antes de que la humedad disminuya a tal punto.

Las plantas responden de modo diferente a la tensión de humedad del suelo en diversas etapas de su crecimiento. Cuando éste es rápido, reaccionan inmediatamente a la escasez de humedad. Si el suelo se seca en este punto, no se desarrollan adecuadamente y se retrasa el crecimiento de las hojas nuevas. Una vez que el agua queda disponible nuevamente, puede renovarse el crecimiento rápido; pero las hojas y tallos pequeños que se produjeron en condiciones de escasez de humedad nunca se desarrollan por completo.

Las plantas tiernas que sólo cubren parcialmente el terreno tienen sistemas radiculares muy pequeños y necesitan el agua tanto como si estuvieran maduras. No debe permitirse que sufran escasez de agua a causa de la idea errónea de que así se forzarán sus sistemas de raíces para penetrar a profundidades mayores. Las raíces de las plantas penetran más profundamente en suelos que se mantienen húmedos, pero no saturados, durante las primeras etapas de crecimiento.

El agua debe suministrarse durante un periodo tal que permita humedecer el suelo seco sin que se muevan cantidades apreciables en la parte húmeda que está debajo de la zona radicular de las plantas. A fin de lograrlo, deben suspenderse los riegos un poco antes de que toda la zona de raíces quede bien mojada. El desagüe subsecuente en las próximas 24 horas, será suficiente para humedecer el resto del suelo en la zona radicular sin que ocurra un exceso de filtración profunda.

Para aplicar el riego es necesario conocer la profundidad radicular del cultivo, así como la presión de humedad. Se obtienen los mejores resultados en la mayoría de los cultivos si el agua se aplica antes de que el promedio de tensión en la zona de extracción sea a un cuarto de la profundidad radicular y se eleve a más de cuatro atmósferas. Se interrumpen los riegos siempre que la tensión sea inferior a media o una atmósfera.

La lámina de riego que ha de aplicarse, esto es, el volumen de agua que se suministra por unidad de área para llevar el suelo a CC, se puede obtener a partir de datos del suelo y del cultivo como son: la CC, el PMP, la densidad aparente del suelo (D_a) y la profundidad radicular del cultivo (Pr).

El conocimiento de la magnitud de la evapotranspiración durante el periodo vegetativo del cultivo ofrece una alternativa para determinar cuándo regar, sin necesidad de llevar a cabo una medición directa del contenido de humedad del suelo. Para tal fin se considera ésta como un equilibrio entre lo que penetra como resultado de la precipitación y el riego, y lo que sale en forma de evapotranspiración. La precipitación se mide fácilmente por medio de pluviómetros o pluviógrafos.

Por su parte, la evapotranspiración es determinada mediante algún método como el de Penman. En consecuencia, es factible precisar la pérdida diaria de humedad del suelo debido a la evapotranspiración si se compara con la precipitación diaria. Puede prepararse de esta manera un balance hídrico para definir el calendario de riegos semejante a un procedimiento contable.

Por lo tanto, sólo es necesario vigilar la diferencia entre la evapotranspiración y la precipitación, y reintegrarla cuando ésta sea igual a la lámina de riego obtenida entre CC y un contenido de humedad tal que se requiera una tensión de trabajo para remover el agua cercana a 4 atm (C. W. Thornthwaite y J. R. Mather, 1955). Una práctica común es suministrar el riego cuando la diferencia acumulada entre la evapotranspiración y la precipitación es del orden del 60% de la lámina de agua almacenada en la zona radicular.



Evapotranspiración

Se define como la suma del agua evaporada que todavía no se ha incorporado al organismo vegetal más la que, habiéndose incorporado ya a los tejidos, tiene que ceder por medio de sus estomas debido al fenómeno de transpiración. Ambos sumandos se presentan generalmente en forma simultánea; de ahí la dificultad para diferenciar el efecto.

No obstante que en el capítulo anterior ya se informó sobre los principales componentes de la evapotranspiración, dada la importancia que tiene su descripción cualitativa para el entendimiento de los métodos de cálculo que se emplean para evaluarla, en los incisos siguientes se comentará con mayor detalle la influencia de los principales elementos físicos que intervienen.

Influencia y efectos de los agentes atmosféricos

Los principales agentes atmosféricos que producen la evapotranspiración son, fundamentalmente, la energía calorífica que llega a la superficie del suelo y la capacidad del aire para remover el vapor que dicha energía extrae del sistema.

La energía calorífica utilizada en la evapotranspiración procede de la radiación solar y el calor sensible transmitido por el aire o por el suelo.

La radiación de origen solar está constituida, en su mayor parte, por ondas cortas cuya longitud oscila entre 0.3μ y 2μ , ya sea directa, reflejada o difusa; y en menor proporción por radiaciones de onda larga, con longitudes comprendidas entre 2μ y

100 μ , que son emitidas por distintos cuerpos capaces de absorber las ondas cortas y remitirlas en longitudes largas.

Para medir este efecto con fines prácticos se considera la radiación global incidente y la radiación neta. La primera es definida como la radiación medida a la altura del suelo, sobre una superficie horizontal, y que en su totalidad proviene del espacio; la radiación neta se define como la cantidad de energía disponible en la superficie, y constituye un balance entre la radiación global y la que el suelo emite en onda larga.

Para una misma radiación incidente neta disponible depende de las características de su albedo que, como ya se ha indicado, es el porcentaje de la radiación total que el propio suelo devuelve a la atmósfera.

El calor sensible para el sistema que transmite el aire o el suelo sirve también como fuente de energía para la evapotranspiración. Ello es debido a que tanto el aire como el suelo actúan como acumuladores de energía de radiación y compiten, por tanto, en su consumo con la evapotranspiración. Cabe indicar que el modo de repartirse la energía total de radiación neta entre calentamiento del suelo, del aire o en producción de evapotranspiración, depende de la accesibilidad del agua a las superficies evaporantes y de la facilidad de transporte del vapor producido lejos de superficies.

El efecto del calor sensible del aire en la evapotranspiración se hace notar, de manera intensa, cuando una masa caliente con contenido bajo de humedad se desplaza sobre una superficie regada; el fenómeno se conoce como advección y también como efecto oasis; es más frecuente en parcelas de tierras secas de gran extensión, ya regadas, y también en los bordes de las grandes superficies en regadío. En todo caso es un fenómeno apreciable en zonas áridas y poco notable en las semihúmedas y húmedas.

La capacidad del aire para transportar el vapor de agua lejos de la superficie evaporante, una vez que ha tenido lugar el cambio de fase, influye en la difusión del fenómeno y, definitivamente, en el reparto de la energía disponible durante los procesos de evapotranspiración y acumulación de calor, así en el suelo como en el aire. Esta capacidad depende básicamente de la velocidad del viento y de la rugosidad en la superficie evaporante.

De lo anterior concluimos que la intensidad de la evapotranspiración está condicionada por la accesibilidad del agua a las superficies evaporantes, sean vegetales o edáficas. La capa seca formada en los primeros centímetros del suelo reduce bruscamente la evaporación, por el descenso en la conductividad hídrica; también la transpiración disminuye con el cierre de los estomas de las plantas. De aquí que la accesibilidad del agua sea uno de los factores más importantes en la evapotranspiración real, la cual

puede hacerse inexistente en regiones no regadas de zonas áridas, a pesar de la gran cantidad de energía calorífica disponible en la superficie.

Un concepto comúnmente empleado es el de evapotranspiración potencial, que se define como evapotranspiración de una superficie vegetal en la que la accesibilidad del agua no es limitante del fenómeno. La característica implica, en última instancia, que la evapotranspiración potencial está solamente limitada por los efectos climatológicos.

Influencia y efectos de los agentes edáficos

La mayor o menor coincidencia entre la evapotranspiración real y la potencial depende fundamentalmente de las características del suelo. De hecho el objetivo potencial se refiere básicamente al grado óptimo con que el suelo suministra agua a la planta y a su superficie.

Conforme los factores edáficos que regula este suministro son más restrictivos, mayor es la diferencia entre ambas.

Han sido numerosos los ensayos directos acerca de la medida de evaporación. Consisten en aislar dicho proceso del general de evapotranspiración. En unos casos se han analizado parcelas colindantes, una de ellas con cubierta vegetal y la otra sin vegetación, con el intento de deducir conclusiones sobre la magnitud relativa de la evaporación respecto a la evapotranspiración por substracción de los valores medidos. Con el mismo objetivo se han comparado datos de parcelas similares con cultivos idénticos, pero hallándose cubierto el suelo de una de las parcelas con una lámina de materia impermeable. Sin embargo, hasta el momento no ha sido posible obtener conclusiones generales y válidas para estimar separadamente la influencia de la evaporación.

No obstante, es admitido que, cuando se suministran dosis de riego normales en buenos suelos agrícolas, las pérdidas por evaporación oscilan entre el 25 y el 50% de las totales por evapotranspiración. También se admite que en zonas donde la precipitación o el riego son frecuentes, las pérdidas por evaporación superan el 50%; esta proporción se reduce conforme es menor la dosis de agua o más densa la cobertura vegetal, e incluso se acepta que para una misma proporción de superficie cubierta resulta menor la evaporación cuando la altura de las plantas es mayor.

En el caso de que se logaran establecer condiciones óptimas para que sea verdadera la evapotranspiración potencial, es de subrayar que la forma de aplicar el agua no

influye en el proceso total. Por lo tanto, la eficiencia de los métodos de riego -aspersión, goteo, gravedad, subirrigación, etc.- no tiene relevancia en este contexto.

Influencia y efectos de los agentes vegetativos

Las principales características vegetativas que influyen en la evapotranspiración son:

- Morfología de la planta.
- Densidad de la cubierta o "sombrija" vegetal.
- Apertura estomática.

Los efectos morfológicos vegetales suelen considerarse al evaluar la eficiencia en la remoción del vapor.

La densidad de la cobertura vegetal debe ser considerada sólo cuando se alcanzan magnitudes tales que se reduzcan las pérdidas respecto de su valor potencial. El punto exacto en que esto sucede depende, principalmente, de la resistencia a la transpiración por unidad de superficie de la planta y, en menor grado, de las características climáticas. Es difícil encontrar datos confiables sobre este aspecto; Penman indica que en un clima frío y húmedo la evapotranspiración potencial, o al menos la máxima, se alcanza cuando aproximadamente la mitad del suelo queda sombreado por el cultivo. Van Babel, al estudiar plantaciones de alfalfa en Arizona, concluyó que la evapotranspiración potencial se alcanzaba a los cuatro o cinco días después de que el cultivo fuera segado a ras del suelo, con tal de que su humedad fuera suficiente para el rebrote.

Sin embargo, pueden producirse evapotranspiraciones inferiores al valor potencial en cultivos plenamente desarrollados, a causa del efecto restrictivo del mecanismo estomático. Este efecto puede radicar en el número total y la morfología de los estomas, o en su grado de apertura.

La mayoría de las plantas cultivables tienen hojas delgadas con estomas en sus dos lados, las cuales alcanzan densidades comprendidas entre dos mil y diez mil unidades por centímetro cuadrado.

Suele suponerse que la evapotranspiración procedente de un cultivo bien desarrollado y sin restricciones en sus disponibilidades de agua, alcanza los valores de la evapotranspiración potencial. Resulta lo mismo que aceptar lo pequeño de la

resistencia que los estomas ofrecen al fenómeno global de transferencia y transporte del agua. Este criterio parece quedar confirmado por los experimentos realizados por Van Babel en Arizona con cultivos de alfalfa.

Métodos de cálculo

Los métodos de cálculo que normalmente se utilizan para estimar la evapotranspiración tienen siempre una mayor o menor base experimental. No obstante, pueden clasificarse en tres grandes grupos:

- Métodos racionales con fundamento físico.
- Métodos semiempíricos.
- Métodos empíricos.

Normalmente los métodos racionales se apoyan en campañas de adquisición de datos de campo que usualmente son costosas y lentas; por ello, su principal aplicación es investigar y apoyar el mejoramiento de los otros métodos.

Métodos semiempíricos

Para su aplicación, toman en cuenta las consideraciones de Dalton de carácter aerodinámico y las hipótesis de establecimiento del balance energético. De aquí que sea necesario estudiar previamente estos principios, antes de describir la metodología de cálculo propuesta por el autor.

Ecuación de Dalton

Se puede considerar que el estudio del fenómeno físico de la evapotranspiración se inicia con la idea de Coutagne, que se refiere a medir el estado de la atmósfera próxima a la superficie evaporante y a la aptitud para generar la evaporación. A este concepto se le denominó "potencial atmosférico evaporante", PAE. Desde un principio se consideró que el PAE prácticamente no tenía influencia alguna en la superficie evaporante, es decir, se pensó que era invariable respecto a las características del suelo. De aquí que el concepto sea prácticamente equivalente al de evapotranspiración potencial introducido por Thornthwaite.

Los principales factores que intervienen en el PAE son:

- El déficit higrométrico, o déficit de saturación de la atmósfera.
- La temperatura del aire.
- La insolación.
- La presión barométrica.
- La velocidad y turbulencia del viento.

Dalton demostró en 1802 que la velocidad de evaporación E de una lámina libre de agua es proporcional al déficit higrométrico, siempre que el resto de los factores preñados se mantengan constantes. Definió el déficit como la diferencia entre la tensión de saturación del vapor e_o del agua en la superficie y la tensión efectiva e_a existente en el aire circundante. La relación algebraica que propuso para representar dicho fenómeno está dada por la siguiente expresión:

$$E = K e_o (1 - \epsilon) \quad (1)$$

donde K es la constante de proporcionalidad, ϵ es el grado higrométrico, igual con e_a/e_o y, por lo tanto, equivalente al concepto de humedad relativa del aire.

El déficit higrométrico normalmente se evalúa mediante el psicrómetro, aparato compuesto por dos termómetros que se sitúan muy próximos entre sí. Uno de ellos, al que se denomina termómetro seco, se encuentra en contacto directo con el aire en toda su superficie; el otro, al que se llama termómetro húmedo, tiene su depósito de mercurio recubierto con una muselina permanentemente empapada de agua. Puesto que la evaporación del agua que empapa la muselina reduce la temperatura, el termómetro húmedo marcará valores t' inferiores a los t del termómetro seco, excepto cuando el aire ambiente esté saturado, circunstancia para la cual será $t = t'$.

La diferencia $t-t'$ se denomina "intervalo térmico psicrométrico"; el déficit ($e_o - e_a$) es proporcional a su valor.

La tensión e_o del vapor saturado del agua crece con la temperatura de ésta; por lo tanto, aumenta la velocidad de evaporación, o más brevemente la evaporación para un mismo valor de ($e_o - e_a$) en el aire, con la temperatura del agua o de la superficie evaporante que, a su vez, se relaciona estrechamente con la temperatura del aire ambiental.

Puesto que a grandes rasgos dicha temperatura está relacionada con los restantes factores meteorológicos de la evaporación, tales como la insolación y la sequedad del aire, es concebible que las variaciones de la evaporación se acomoden a las de la temperatura media mensual o anual, incluso para zonas muy intensas.

En general se admite que la evapotranspiración aumenta conforme decrece la presión barométrica, aunque la mayoría de los investigadores consideran la influencia como muy pequeña y, además, encubierta por otros condicionantes de mayor actividad que la acompañan, como el aumento de la insolación y la transparencia del aire con el incremento de altitud.

La acción del viento asegura la renovación del aire más o menos saturado que se halla en contacto con la superficie evaporante, sustituyéndola por nuevas capas atmosféricas con menor temperatura y humedad. Por tanto, favorece la evaporación conforme aumenten su velocidad y turbulencia.

Con base en lo anterior se ha perfeccionado la ecuación (1) propuesta inicialmente por Dalton. El primero que modificó la fórmula para ampliar sus alcances fue el propio Dalton; introdujo el efecto de la velocidad del viento al expresar la evaporación E como:

$$E = f(u) (e_o - e_a) \quad (2)$$

donde $f(u)$ es una función de la velocidad del viento, la cual se incrementa al aumentar la propia velocidad u . Dicha función suele adoptar la forma:

$$f(u) = a (1 + b u) \quad (3)$$

donde a y b son constantes locales. En el caso de una superficie libre de agua, en 1948 Penman encontró que:

$$f(u) = 0.4 (1 + 0.17 u) \quad (4)$$

donde u es la velocidad del viento en millas por hora [millas hr^{-1}], obteniéndose E en milímetros por día [mm d^{-1}]. Según Lugeon, la evaporación E, medida en milímetros por mes [mm mes^{-1}], puede evaluarse con la fórmula:

$$E = 0.398 n (e_e - e_a) \frac{273 + t}{273} \frac{760}{B - e_e} \quad (5)$$

donde n es el número de días del mes, e_c es la tensión de saturación del vapor de agua, en mm de Hg, correspondiente a la temperatura media máxima mensual t en °C, e_a es la tensión media mensual real, en mm de Hg, del vapor de agua, medido al mismo tiempo que las lecturas de temperatura y B es la presión barométrica media mensual, en mm de Hg.

Meyer ha propuesto una fórmula más sencilla que la de Lugeon, la cual se expresa en la forma:

$$E = C (e_c - e_a) \left[1 + \frac{u}{10} \right] \quad (6)$$

donde E es la evapotranspiración media mensual en pulgadas, e_c y e_a tienen igual significado que en la fórmula de Lugeon, pero expresadas en pulgadas de mercurio; u es la velocidad del viento en millas por hora y medida a 2.5 pies por encima de la superficie evaporante y C es el coeficiente empírico que se ajusta mediante un conjunto de mediciones directas en cada situación particular. Es aproximadamente igual a 15 para láminas de agua poco profundas.

Es importante destacar que las relaciones (5) y (6) pierden precisión en el tiempo al referirse al potencial evaporante medio mensual.

El perfeccionamiento de las fórmulas, y sobre todo de los conceptos físicos que representan el fenómeno de evapotranspiración, en las últimas décadas se ha basado en dos teorías fundamentales: la del balance energético y la del intercambio turbulento. Aunque estas modernas teorías no aportan aún en la práctica una ayuda directa, son el fundamento de muchas fórmulas empíricas como las de Blaney-Criddle y Thornthwaite.

Teoría del balance energético

La evaporación procedente de un suelo con cubierta vegetal se realiza, en rigor, en un espacio tridimensional, puesto que la superficie evaporante tiene frecuentemente un espesor no despreciable en absoluto, que se extiende desde la superficie del suelo hasta la altura máxima alcanzada por el cultivo.

La evaporación se produce en todos los niveles intermedios. Viene condicionada desde todas las direcciones, puesto que al no ser nunca permanente el régimen del

fenómeno, la advección de calor y humedad, provenientes del ambiente, hacia un volumen elemental de esta porción de espacio, no es despreciable, sobre todo si se consideran intervalos de tiempo suficientemente cortos.

Para simplificar conceptos es común plantear el balance "vertical" de las transformaciones energéticas. Para ello se supone que el espesor de la superficie evaporante es pequeño y que también lo son las aportaciones energéticas por advección. En tales condiciones el balance energético queda reflejado en la siguiente ecuación:

$$R_n = F_s + F_a + F_e \quad (7)$$

donde R_n es la intensidad de la radiación solar neta recibida, [$\text{cal cm}^{-2} \text{min}^{-1}$], F_s es la intensidad del flujo de calor emitido o absorbido por el suelo, [$\text{cal cm}^{-2} \text{min}^{-1}$], F_a es la intensidad del flujo de calor sensible, [$\text{cal cm}^{-2} \text{min}^{-1}$] y F_e es la intensidad del flujo de calor latente que corresponde a la evaporación, [$\text{cal cm}^{-2} \text{min}^{-1}$].

En la ecuación (7) se ha eliminado la energía absorbida por fotosíntesis en la cobertura vegetal; normalmente el fenómeno absorbe entre 1 y 2% de R_n , raras veces, y siempre, de manera esporádica, puede alcanzar valores próximos al 10%.

La evaluación del flujo de calor latente F_e correspondiente a la evaporación a través de la ecuación (7) depende de la posibilidad de medir o estimar los otros términos que la componen.

En general, el problema se aborda de la siguiente manera:

en primer término debe conocerse el valor de la radiación solar incidente, R_i . Para ello es preferible determinarla con mediciones directas que se realizan normalmente con el pirheliómetro de Eppley o distintos modelos de pirómetros o solarímetros. En caso de que no se pueda disponer de medidas directas, es usual calcular el valor de R_i según expresiones del tipo:

$$R_i = R'_i \left[a + b \frac{h}{H} \right] \quad (8)$$

donde R'_i es el valor de la radiación incidente sin tener en cuenta el efecto de la atmósfera (depende de la latitud y época del año), h es el número de horas de sol medidas por el heliógrafo, H es la duración astronómica del día medida en horas luz, a y b son las constantes empíricas que varían según la localidad.

Una vez que se conoce el valor de R_i , se considera que la intensidad de la radiación solar neta, R_n , puede ser calculada con la siguiente expresión:

$$R_n = R_s - R_L \quad (9)$$

donde R_s es la radiación neta de onda corta que es absorbida por la superficie evaporante; R_L es la radiación neta de onda larga, radiación térmica, absorbida también por la superficie evaporante. Esta última entra siempre como negativa en la ecuación (9), ya que es más importante la que la superficie evaporante devuelve hacia lo alto que la que absorbe.

La radiación neta R_s es igual a:

$$R_s = R_i (1 - r) \quad (10)$$

donde r es el albedo de la superficie evaporante; equivale a la fracción que la superficie refleja.

El valor de R_L depende de numerosos factores y, fundamentalmente, del vapor de agua en la atmósfera, de su temperatura, contenido de CO_2 y nubosidad. Cuando no se cuenta con mediciones directas de este parámetro, se puede utilizar la fórmula de Brunt que da valores medios aproximados:

$$R_L = \sigma T_a^4 (0.56 - 0.08 e^{0.5}) (1 - 0.09 m) \quad (11)$$

donde R_L es la radiación neta de gran longitud, [$cal\ cm^{-2}\ min^{-1}$], σ es la constante de Stephan-Boltzman, equivalente a 0.13×10^{-11} [$cal\ cm^{-2}\ min^{-1}$], T_a es la temperatura absoluta del aire en grados Kelvin [$^{\circ}K$], e es la tensión de vapor del agua en el aire, expresada en milibares [mbar], y m es el índice de nubosidad, el cual se suele medir en décimas de cielo cubierto.

En resumen: mediante medidas directas o la utilización de las relaciones (8), (9), (10) y (11) se puede llegar a determinar el valor de R_n .

Lo intenso del flujo de calor emitido F_s o absorbido por el suelo, depende de su transmisión térmica y del gradiente de temperatura en las capas de terreno de interés. Se puede evaluar por medio de los perfiles de humedad y de conductividad térmica de dichas capas para diversos regímenes de evaporación. En general, la influencia

de este parámetro es pequeña, por lo que normalmente no se le considera al establecer el balance energético.

La determinación de la intensidad F_a del flujo de calor sensible intercambiado, principalmente por convección con el ambiente, es bastante compleja. Hasta la fecha no se ha desarrollado un método suficientemente preciso para la estimación del valor F_a , y en general, se le estima con auxilio de la llamada relación de Bowen.

$$\beta = \frac{F_a}{F_e} \quad (12)$$

La aplicación de la relación de Bowen parte de admitir que los procesos de transferencia de calor por convección y de transferencia de vapor de agua, obedecen a las mismas leyes; es decir, se admite que:

$$\beta = \gamma \frac{K_c}{K_e} \frac{\Delta T}{\Delta e} \quad (13)$$

donde K_c es el coeficiente de difusión del calor y K_e es el coeficiente de difusión del vapor de agua.

Es demostrable, lo cual queda aparte de los propósitos de este resumen, que la relación de Bowen puede ser expresada con la forma:

$$\beta = 0.665 \frac{P}{1000} \left[\frac{T_e - T_a}{e_s - e_a} \right] \quad (14)$$

donde P es la presión atmosférica, en [mbar]; T_e es la temperatura absoluta de la superficie evaporante, en [°K]; T_a es la temperatura absoluta del aire ambiente, en [°K]; e_s es la tensión de saturación del vapor de agua a la temperatura T_e ; y e_a es la tensión de saturación del vapor de agua a la temperatura T_a .

Para intervalos cortos de tiempo la relación de Bowen puede variar entre $-1 \leq \beta \leq 1$, pero calculada para 24 horas supera raramente el valor 0.3 y es muy frecuentemente inferior a 0.2; la relación es próxima a cero durante los periodos en que la evaporación es importante.

Finalmente, teniendo en cuenta la relación (12), la ecuación (7) se puede expresar en la forma:

$$F_e = \frac{R_n - F_s}{1 + \beta} \quad (15)$$

El valor de F_e se obtiene en [$\text{cal cm}^{-2} \text{min}^{-1}$]. La transferencia de valores F_s a valores E en mm/día es simple y se realiza a través de la equivalencia $1 \text{ mm/día} = 0.0144 \text{ cal/cm}^2/\text{min}$.

Los valores de F_s y β normalmente son tan pequeños que se pueden obviar, de aquí que siempre la alimentación de agua esté asegurada y el valor de F_e sea prácticamente igual al de la radiación solar neta R_n . Sobre terrenos húmedos se ha encontrado que la relación F_s/F_n para una duración de 24 horas, es igual a 1 en cubiertas vegetales de trigo y césped, y a 1.1 para la alfalfa en pleno desarrollo. En terrenos secos la relación anterior puede reducirse hasta valores del orden de 0.5.

En definitiva: si bien los métodos basados en el balance energético de la superficie evaporante permiten determinar con cierta precisión la suma $F_a + F_e$ la utilización de la relación de Bowen significa, en ciertos casos, un gran margen de incertidumbre en la estimación del flujo de calor F_e absorbido por la evaporación.

De acuerdo con investigaciones hechas por Penman en la campaña inglesa durante los meses de verano, cuando la relación de Bowen está comprendida entre el 1 y 10% y el agua no es un factor excluyente, los métodos basados en el balance energético delimitan una velocidad de evaporación que concuerda con las mediciones de campo.

Por el contrario, en países secos donde los valores de la relación de Bowen son sensiblemente más elevados, la relación (13) conduce a resultados erróneos si los coeficientes de difusión son muy diferentes. También esta ecuación puede llevar a resultados dudosos para los periodos nocturnos, durante los cuales el gradiente de temperatura sea negativo y el de humedad débil; en general, dicha circunstancia conlleva a sobreestimar la evaporación en el periodo invernal y en los climas marítimos.

Con frecuencia se utiliza otra relación para evaluar la evapotranspiración, que es la siguiente:

$$E = -\rho k^2 \left[\frac{\Delta u}{\Delta \log z} \right] \left[\frac{\Delta q}{\Delta \log z} \right] \quad (16)$$

donde la evaporación (E) es directamente proporcional al producto de los gradientes logarítmicos de la velocidad del viento (u) y de la humedad absoluta (z). Este concepto permite evaluar la velocidad de evaporación en función de las diferencias entre las humedades específicas y las velocidades del viento que se presentan a dos niveles distintos: z1 y z2.

A costa de una mayor precisión en los resultados se ha intentado simplificar la aplicación práctica de las ecuaciones. Se admite que la velocidad de evaporación es proporcional a la velocidad media del viento, y a la diferencia entre las tensiones del vapor de agua en el aire al nivel de la superficie evaporante y a una altura normalizada por encima de la misma. Así por ejemplo, Swinbank ha propuesto para el cálculo de la velocidad de evaporación en el mar la siguiente expresión:

$$E = 0.24 \times 10^{-5} u_{800} (q_s - q_{800}) \quad (17)$$

donde E es la evaporación en $[\text{gr cm}^{-2} \text{s}^{-1}]$, u_{800} es la velocidad del viento medida a 800 cm de la superficie en $[\text{cm s}^{-1}]$, q_s es la humedad del aire sobre la superficie del mar en gramos de agua por gramos de aire, y q_{800} es la humedad del aire a 800 cm de la superficie del mar en gramos de agua por gramos de aire.

Formulación de Penman

El método de Penman estudia, en primer lugar, la evaporación procedente de una superficie de agua libre, partiendo del balance energético establecido en la ecuación (5). La intensidad del flujo de calor latente correspondiente a la evaporación se evalúa mediante una expresión del tipo Dalton:

$$F_e = f(u) [e_o - e_a] \quad (18)$$

De la misma manera, la intensidad del flujo de calor sensible intercambiado, F_a , la estima según la relación:

$$F_a = \gamma f(u) [t_o - t_a] \quad (19)$$

donde γ es la constante psicrométrica, cuyo valor es aproximadamente $0.66 \text{mb}/^\circ\text{C}$; t_a es la temperatura del aire medida al mismo nivel que e_a , t_o es la temperatura del aire medida al mismo nivel que e_o , $f(u)$ es una función idéntica a la establecida en la relación (2).

Con tales simplificaciones Penman llega a la siguiente expresión de la relación de Bowen:

$$\beta = \gamma \frac{t_o - t_a}{e_o - e_a} \quad (20)$$

Para evitar conocer previamente los parámetros t_o , t_a , e_o y e_a , Penman propone la siguiente relación, cuya deducción queda fuera de este resumen, para la obtención del flujo F_e .

$$F_e = \frac{(\delta/\gamma) R_n + E_a}{(\delta/\gamma) + 1} \quad (21)$$

donde δ es la pendiente de la curva de tensión de saturación del vapor de agua, medido en el punto correspondiente a la temperatura media $(t_o + t_a)/2$, a la que se realiza el proceso.

$$E_a = f(u) (\epsilon_a - e_a) \quad (22)$$

en donde E_a es la tensión de saturación del vapor en el aire al nivel de medida del vapor e_a . La función $f(u)$ se sigue considerando igual a la indicada en la ecuación (2). Dicha función ha de ser definida mediante procedimientos empíricos; Penman encontró utilizable la siguiente relación:

$$f(u) = 0.26 (0.5 + 6.21 \times 10^{-3} u) \quad (23)$$

en la cual u se mide a 2 m de altura sobre la superficie evaporante y en $[Km \text{ hr}^{-1}]$; con ello F_e , en la ecuación (21), se obtiene directamente en $[mm \text{ d}^{-1}]$, siempre que R_n se transforme en la misma escala.

Para aplicar la ecuación (23) en superficies cubiertas por cultivos, Penman propone afectarla con un factor de reducción f , el cual se obtiene experimentalmente y es variable según el lugar, el mes y el tipo de cultivo en estudio. Este factor f está influido principalmente por la duración del día; para Europa occidental encontró valores de $f = 0.8$ en verano, $f = 0.6$ en invierno y $f = 0.7$ en los equinoccios. En las regiones ecuatoriales f toma valores cercanos a 0.7 durante todo el año.

Método de Penman modificado por la FAO

A la fecha el método originalmente propuesto por Penman en 1948 ha sido modificado y mejorado por diversos investigadores. Posiblemente el método de Penman modificado con mayor aceptación y difusión es el propuesto por Pruitt en la década de los setenta: introduce una función de viento revisada y una corrección adicional para las condiciones meteorológicas diurnas y nocturnas no representativas de los climas en los que se haya determinado la función del viento. Se le conoce como "método de Penman modificado por la FAO", ya que para su desarrollo se tomaron en cuenta sugerencias y experiencias del personal técnico de la FAO perteneciente a la división de Producción y Protección Vegetal.

Para realizar los cambios al método original se utilizó información de la evapotranspiración medida en lisímetros en diversas partes del mundo. Posteriormente, se compararon las mediciones de campo con los resultados obtenidos con el método original. Para evaluar la evapotranspiración con el método de Penman se utilizaron datos meteorológicos de cada sitio en estudio. De la comparación de los resultados se derivaron las modificaciones propuestas.

La ecuación de Penman modificada por la FAO para evaluar la evapotranspiración de un cultivo de referencia (ET_r), tal como la alfalfa con un desarrollo de 30 a 50 cm y en óptimas condiciones de abastecimiento de agua, está dada por la siguiente expresión:

$$ET_r = c \left[\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} R_n + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} F(u) \Delta e \right] \quad (24)$$

donde

$$\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} R_n \quad (25)$$

es el término de energía que depende de la radiación,

$$\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} f(u) \Delta e \quad (26)$$

es el término aerodinámico que depende de la humedad y el viento; c es el factor de corrección basado en la radiación, humedad relativa máxima, velocidad del viento y cociente entre la velocidad del viento diurna y nocturna,

$$c = a_0 + a_1 HR_m + a_2 R_s + a_3 U_d + a_4 DN + a_5 U_d DN + a_6 HR_m R_s + a_7 HR_m R_s DN \quad (27)$$

donde HR_m es la humedad relativa máxima (%), R_s es la radiación solar [$mm\ d^{-1}$] y R_n se obtiene de la siguiente manera:

$$R_s = \left[0.25 + \frac{n}{N} \right] R_a \quad (28)$$

U_d es la velocidad media del viento durante las horas de luz en [$m\ s^{-1}$], DN es el cociente entre la velocidad del viento del día y de la noche,

$$\begin{aligned} a_0 &= 0.6817006 \\ a_1 &= 0.0027864 \\ a_2 &= 0.0181768 \\ a_3 &= -0.0682501 \\ a_4 &= 0.0126514 \\ a_5 &= 0.0097297 \\ a_6 &= 0.43025 \times 10^{-4} \\ a_7 &= -0.92118 \times 10^{-7} \end{aligned}$$

Δ es la pendiente de la curva de presión de vapor en saturación frente a la temperatura, [$mbar\ ^\circ C^{-1}$],

$$\Delta = \frac{5300e_a}{(t + 273)^2} \quad (29)$$

donde t es la temperatura media ($^\circ C$) y e_a es la presión de vapor en saturación [$mbar$].

$$e_a = 6.105 \exp \left[\frac{25.22t}{t+273} - 5.31 \ln \left(\frac{t+273}{273} \right) \right] \quad (30)$$

γ es la constante psicrométrica [$mbar\ ^\circ C^{-1}$],

$$\gamma = 0.3852 \frac{(1013 - 0.115Z)}{(597.3 - 0.56t)} \quad (31)$$

Z es la altitud del lugar (m); R_n es la radiación neta [mm d^{-1}],

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (32)$$

R_{ns} es la radiación solar neta de onda corta,

$$R_{ns} = \left[0.25 + 0.5 \frac{n}{N} \right] \quad (33)$$

donde n es el número efectivo de horas de sol por día. N es el número máximo de horas de sol por día.

$$N = \frac{\arcsin(-\tan \text{Lat} \tan \text{Dec})}{7.5}$$

donde Lat es la latitud del lugar en grados, Dec es la declinación solar en grados,

$$\text{Dec} = 23.46 \sin \left[300 \frac{284 + \text{día}}{365} \right] \quad (35)$$

día, es el día del año (1 a 365) en que se realiza el cálculo. Para el hemisferio sur los días se cuentan a partir del mes de julio. R_a es la radiación que llega al exterior de la atmósfera [mm d^{-1}].

$$R_a = I_s \left[\frac{7.5 N \pi}{180} \sin \text{Lat} \sin \text{Dec} + \cos \text{Lat} \cos \text{Dec} \sin (7.5 N) \right] \quad (36)$$

donde I_s es la constante solar.

$$I_s = 15.195 \left[1 + 0.33 \cos \left(\frac{72 N}{73} \right) \right] \quad (37)$$

R_{nl} es la radiación neta de onda larga

$$R_{nl} = f(t) f(e_d) f(n/N) \quad (38)$$

$$f(t) = \sigma (273 + t)^4 \quad (39)$$

$$f(e_d) = 0.34 - 0.044 e_a H_R / 100 \quad (40)$$

$$f(n/N) = 0.1 + 0.9 n/N \quad (41)$$

$$f(u) = 0.27 \left[1 + \frac{u}{100} \left(\frac{2}{z} \right)^{0.2} \right] \quad (42)$$

donde σ es la constante de Stephan-Boltzman (0.2×10^{-8} mm), H_R es la humedad relativa (%), $f(u)$ es la función de velocidad de viento, u es la velocidad del viento [km d^{-1}], z es la altura sobre el nivel del suelo a que fue tomada la velocidad u [m] y Δe es el déficit de vapor de presión [mbar].

$$\Delta e = e_a \left[1 - \frac{H_R}{100} \right] \quad (43)$$

Método de Penman-Monteith

Si se define la evapotranspiración de referencia (ET_0) como la razón de evapotranspiración que se origina en un cultivo hipotético con una altura estimada de 12 cm, con una resistencia de crecimiento de 70 sm^{-1} y un albedo de 0.23, acercándose a una evapotranspiración parecida que se origina en la superficie del cultivo extensivo de pasto con una altura uniforme, crecimiento activo, con la superficie completamente cubierta y sin falta de agua, la estimación de la ET_0 puede determinarse con la fórmula combinada de Penman-Monteith, donde se combinan los términos derivados tanto aerodinámico como de radiación que se presentaron en los capítulos anteriores, la fórmula combinada es:

$$ET_o = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_a - e_d)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34U_2)} \quad (44)$$

- donde: ET_o : Evapotranspiración del cultivo de referencia [$mm\ d^{-1}$]
 R_n : Radiación neta en la superficie del cultivo [$MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$]
 G : Flujo de calor de suelo [$M\ m^{-2}\ d^{-1}$]
 T : Temperatura media [$^{\circ}C$]
 U_2 : Medición de la velocidad del viento a 2m de altura [ms^{-1}]
 $(e_a - e_d)$: Déficit de presión de vapor: ecuación (30)
 Δ : Pendiente de la curva de presión de vapor [$kPa\ ^{\circ}C^{-1}$]
 γ : Constante psicrométrica [$kPa\ ^{\circ}C^{-1}$]
 900 : [$kJ^{-1}\ kg\ K$]

Cuando los datos de medición de radiación no están disponibles, la radiación neta puede estimarse de la siguiente manera:

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (45)$$

$$R_{ns} = 0.77 \left[0.19 + 0.38 \frac{n}{N} \right] R_a \quad (46)$$

$$R_{nl} = 2.45 \times 10^{-9} \left[0.9 \frac{n}{N} + 0.1 \right] (0.34 - 0.14 \sqrt{ed}) (T_{kx}^4 + T_{kx}^4) \quad (47)$$

$$G = 0.14 (T_{mes\ n} - T_{mes\ n-1}) \quad (48)$$

- donde: R_n : Radiación neta [$M\ m^{-2}\ d^{-1}$]
 R_{ns} : Radiación neta de onda corta [$M\ m^{-2}\ d^{-1}$]
 R_{nl} : Radiación neta de onda larga [$M\ m^{-2}\ d^{-1}$]
 R_a : Radiación extraterrestre [$M\ m^{-2}\ d^{-1}$]; ver ecuación 36.
 n/N : Fracción relativa de horas sol []

T_{kx}	:	Temperatura máxima [K]
T_{kn}	:	Temperatura mínima [K]
e_d	:	Presión de vapor actual [kPa]
G	:	Flujo de calor del suelo [$\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$]: ver ecuación 48.

Método de Blaney-Criddle FAO-24

En 1977 Doorenbos y Pruitt, (FAO-24, 1977) presentan la mejor revisión fundamental del método de Blaney-Criddle desde que fue planteado originalmente. El método de Blaney-Criddle requiere el paso intermedio para estimar la evapotranspiración de referencia de un pasto de base, ET_o , para poder aplicar los coeficientes de cultivo del pasto base, K_c (pasto), a obtener del cultivo la ET. Las versiones posteriores del método de Blaney-Criddle no están relacionadas para el uso del cultivo de referencia ET.

Después de calcular la ET_o , los coeficientes de cultivos de referencia de FAO-24 o de otra fuente deben utilizarse para estimar la ET del cultivo. El método de Blaney-Criddle FAO-24 está basado en la relación lineal general entre la medición de referencia ET y el factor f de Blaney-Criddle, encontrada en muchas partes del mundo en que se ha investigado este factor. Poniendo el dato obtenido en estos lugares en varias clasificaciones utilizando los rangos de la velocidad del viento, HR mínima, y el factor de nubosidad expresado como n/N , Allen y Pruitt (1986) desarrollaron una expresión de a y presentaron una tabla de valores de b , para usarse como a continuación se indica:

$$ET_o = a + bf \quad (49)$$

$$f = p (0.46 T + 8.13) \quad (50)$$

$$a = 0.0043 HR_{\min} - n/N - 1.41 \quad (51)$$

donde:

ET_o	:	Evapotranspiración de referencia en [mm d^{-1}]
p	:	Porcentaje medio diario anual de horas de día [$\text{mes } p / (\text{día/mes})$]
T	:	Temperatura media del aire [$^{\circ}\text{C}$]
n/N	:	Relación de horas sol efectivas []
HR_{\min}	:	Porcentaje de humedad relativa mínima [%]
U_d	:	Velocidad del viento en el día a 2m de altura [ms^{-1}]

El valor de b , es determinado por la siguiente fórmula propuesta por FAO-24.

$$\begin{aligned} b = & 0.908 - 0.00483 HR_{\min} + 0.7949n/N + 0.0768 [\ln(U_d + 1)]^2 \\ & - 0.0038 HR_{\min} n/N - 0.000443 HR_{\min} U_d \\ & + 0.281 [\ln(U_d + 1)] [\ln(n/N + 1)] \\ & - 0.00975 [\ln(U_d + 1)] [\ln(HR_{\min} + 1)]^2 [\ln(n/N + 1)] \end{aligned} \quad (52)$$

Y los límites de aplicación de la ecuación (52) son:

$$0 \leq HR_{\min} \leq 100\%$$

$$0 \leq n/N \leq 1.0$$

$$0 \leq U_d \leq 10 \text{ ms}^{-1}$$

Evapotranspiración de los cultivos

La ET_c se obtiene mediante el producto de la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o) por un coeficiente característico del cultivo en estudio (k_c):

$$ET_c = k_c ET_o \quad (53)$$

donde ET_c es la evapotranspiración de un cultivo exento de enfermedades en una parcela mayor de una hectárea, en condiciones de suelo óptimo en fertilización y contenido de humedad, y que alcanza su pleno potencial de producción en el medio vegetativo dado; y k_c es la relación entre ET_c y ET_o cuando ambas se obtienen en parcelas mayores de una hectárea y en condiciones de crecimiento óptimo del cultivo. Esta relación es función de las fases de desarrollo del cultivo.

Fases del periodo de desarrollo de los cultivos

Normalmente se considera que el periodo de desarrollo de los cultivos está constituido por cuatro fases:

Fase inicial:

Es el intervalo de tiempo durante el cual se produce la germinación y surgencia del cultivo, durante en la que el suelo aún no está cubierto o apenas lo está.

Fase de desarrollo del cultivo:

Comprende desde el fin de la fase inicial hasta que se tiene una cubierta totalmente sombreada.

Fase de mediados del periodo:

Abarca desde el final de la fase de desarrollo hasta el inicio de la maduración. En algunos cultivos, esta fase puede extenderse hasta muy cerca de la recolección.

Fase final del periodo:

Comprende desde el final de la fase anterior hasta que se llega a la plena maduración o a la recolección.

Evaluación de los coeficientes de cultivo

El procedimiento para obtener los valores de los coeficientes de cultivo (k_c) se puede resumir de la manera siguiente:

- Definir la fecha de plantación o siembra a partir de la información local o de prácticas que se sigan en zonas climáticas semejantes.
- A partir de información local o de información de localidades con clima semejante, determinar el periodo vegetativo total y los intervalos de tiempo correspondientes a cada fase.
- Para obtener el valor de k_c correspondiente a la fase inicial, es necesario predecir la frecuencia de riego en días (F_r) y conocer la ET_0 media en mm/día correspondiente

al mes de siembra del cultivo. Una vez conocidos dichos datos, se calcula k_c^* con la expresión siguiente:

$$k_c = A_0 + A_1 ET_o + A_2 ET_o^2 \quad (54)$$

donde

$$A_0 = 1.179632 - 0.01859952F_r - 0.005348993F_r^2 + 0.0002322558F_r^3 \quad (55)$$

$$A_1 = 0.0019967 - 0.03809327F_r + 0.00393883F_r^2 - 0.0001129559F_r^3 \quad (56)$$

$$A_2 = -0.001556739 + 0.002226F_r - 0.0002179996F_r^2 - 0.00000167F_r^3 \quad (57)$$

- El k_c correspondiente a la fase de mediados del periodo se obtiene a partir de valores que recomienda la FAO para dicha fase. La selección depende del tipo de cultivo, de la humedad relativa mínima y de la velocidad del viento.

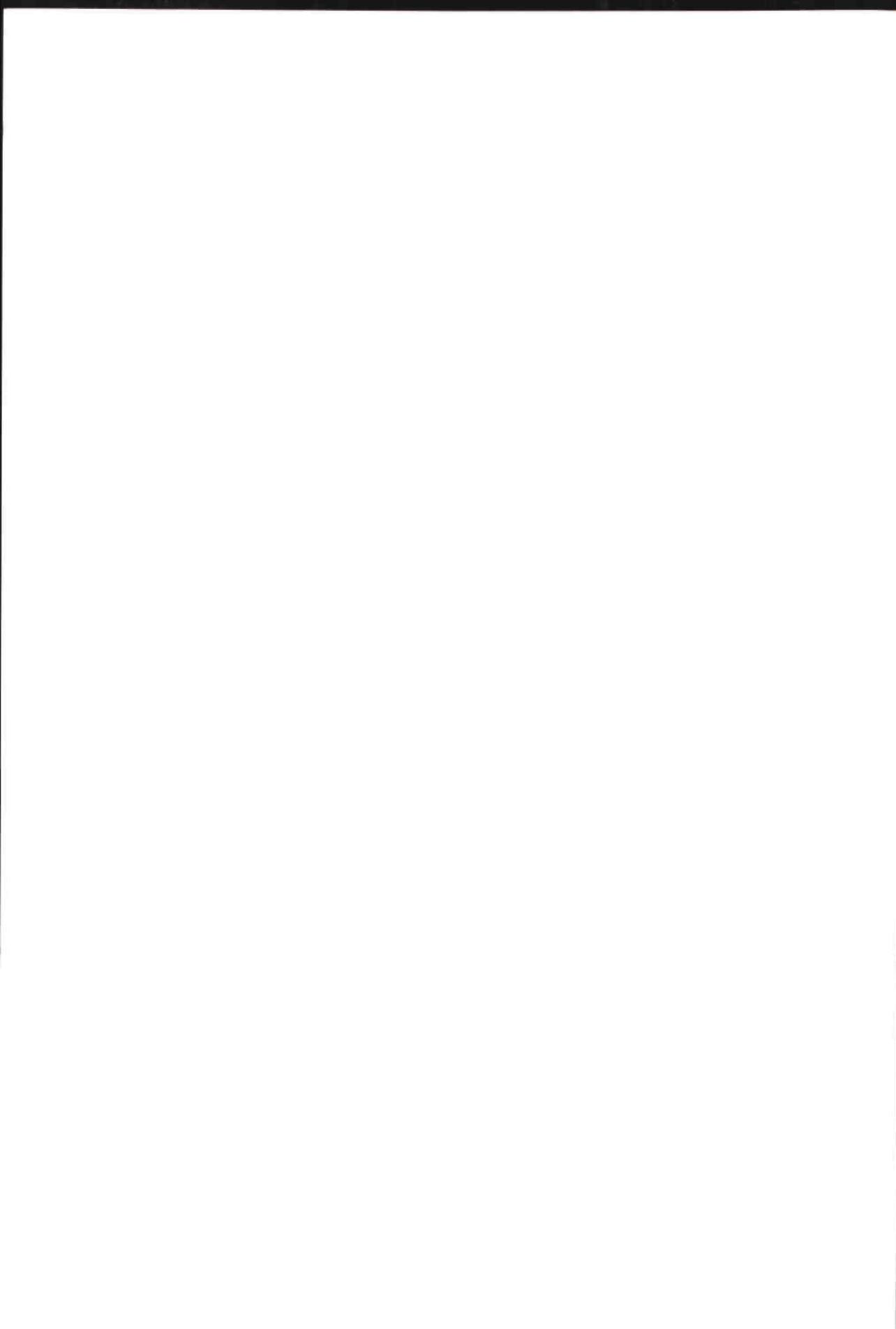
1- Para la fase de desarrollo se considera que k_c adquiere los valores correspondientes a los de los puntos, tomados éstos sobre la recta obtenida al unir el valor de k_c al final de la fase inicial, con el de k_c correspondiente al principio de la fase a mediados del periodo.

- El k_c al final del periodo total se obtiene al utilizar valores recomendados por la FAO.

- El k_c de la última fase, variará a lo largo de la recta que se obtiene al unir el punto con el valor al término de la fase de mediados del periodo y el que representa el valor al final del periodo total.

* La relación fue obtenida en el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua por los autores del presente trabajo. El ajuste se obtuvo a partir de la correlación polinomial múltiple con datos obtenidos de curvas basadas en información experimental, y es válida en los rangos:

[2 días $\leq F_r \leq$ 20 días]
[0 mm/día $\leq ET_o <$ 10 mm/día].



Precipitación efectiva

La precipitación que cae sobre el suelo se dispersa de varios modos:

- Una parte es retenida temporalmente por el suelo, tanto en el lugar donde cae como en las proximidades; luego se evapora o es absorbida por las plantas y, en tal caso, transpirada por las mismas.
- Otra parte escurre sobre la superficie del suelo hasta llegar a arroyos y ríos.
- Una porción más penetra en el terreno y pasa a recargar los acuíferos subterráneos, los cuales eventualmente desembocan en los océanos, afloran espontáneamente o son explotados por el hombre.

De aquí, que la precipitación aprovechable o efectiva que queda para los cultivos esté dada por la relación siguiente:

$$P_e = L_p - (L_s + L_i + L_e) \quad (58)$$

donde P_e es la lámina efectiva o aprovechable por las plantas [mm], L_p es la lámina precipitada [mm], L_s es la lámina escurrida fuera del área de interés [mm], L_i es la lámina infiltrada fuera de la zona radicular [mm] y L_e es la lámina evaporada [mm].

En zonas áridas la lámina infiltrada (L_1) profundiza muy poco y generalmente no rebasa la profundidad radicular, por lo que es común eliminarla de la ecuación (54). Por otra parte, si el agua se evapora y vuelve a la atmósfera, procedente de las plantas (transpiración), es necesaria una determinada cantidad de calorías para transformar un centímetro cúbico de agua líquida en vapor. En este caso el calor disponible se utiliza en evaporar el agua que existe en las cavidades de las hojas. Ahora bien, si el calor disponible se utiliza en la evaporación del agua de la superficie del terreno y de la superficie de las hojas, entonces se reducirá la transpiración en forma más o menos proporcional.

En consecuencia, no se toman en cuenta precipitaciones pequeñas del orden de un milímetro, pues no humedecen el suelo en el caso de cultivos de cobertura completa; sin embargo, una ligera precipitación del orden de 2 mm, aun cuando se quede la mayor parte sobre el follaje de las plantas, no puede considerarse como pérdida, ya que se reducirá en una magnitud semejante a la transpiración del día.

De acuerdo con lo indicado con anterioridad, la lámina evaporada (L_e), puede eliminarse de la ecuación (54), resultando que la ecuación para evaluar la precipitación aprovechable en zonas áridas se simplifica a:

$$P_e = L_p - L_s \quad (59)$$

La lámina aprovechable bajará a medida que aumente la lámina precipitada, debido a una mayor pérdida por escurrimiento superficial.

Con base en dichas observaciones y en información experimental obtenida directamente en campo, los técnicos del Servicio de Conservación de Suelos del Ministerio de Agricultura de los Estados Unidos establecieron la siguiente ecuación empírica para evaluar la precipitación efectiva:

$$P_e = f(1.252474 P_t^{0.82416} - 2.935224) 10^{0.00095U_c} \quad (60)$$

$$f = 0.531747 + 0.011621D - 0.000089D^2 + 0.00000023D^3 \quad (61)$$

donde P_e es la precipitación efectiva mensual [mm], P_t es la precipitación total mensual [mm], U_c es el uso consuntivo medio mensual y D es la capacidad de almacenamiento del suelo [mm].

Para fines prácticos se considera $U_c = ET_o$.

Balance hídrico

Para definir cuánto y cuándo regar es necesario hacer un balance hídrico (B_h) a lo largo del periodo vegetativo. Dicho balance está dado por la siguiente relación:

$$B_h = ET_c - P_e - \text{Agua aportada por el suelo} \quad (62)$$

El agua aportada por el suelo está constituida por los excedentes de las precipitaciones efectivas sobre la evapotranspiración durante las épocas de lluvia, los cuales, al quedar almacenados en el suelo, pueden ser aprovechados posteriormente por los cultivos.

El balance hídrico comúnmente se realiza cada mes. En el caso de que B_h sea negativo, se considerará este valor como agua aportada al suelo para el mes siguiente. En el caso contrario, el valor de B_h resultante corresponde a la cantidad de agua que se tendrá que proporcionar por medio del riego.



Calendarios de riego

Lámina calculada

Se define como lámina calculada (L_c) a la de agua necesaria para elevar el contenido de humedad del suelo desde el punto de marchitamiento permanente (PMP) hasta la capacidad de campo (CC) en toda la profundidad radicular (P_r). Para el cálculo de L_c se emplea la siguiente ecuación:

$$L_c = \left[\frac{CC - PMP}{100} \right] P_r D_a \quad (63)$$

donde L_c es la lámina calculada [mm], PMP es el punto de marchitamiento permanente (%), CC es la capacidad de campo (%), D_a es la densidad aparente (gr cm^{-3}) y P_r es la profundidad radicular [mm].

Lámina del primer riego

Es aplicable durante el primer riego de presiembra (si se siembra en humedad) o riego de siembra (cuando se hace en seco). Se determina a partir de la lámina calculada L_c y de acuerdo con la eficiencia de aplicación del sistema de riego (la eficiencia de riego en sistemas por gravedad varía de 0.5 a 0.85 aproximadamente). La expresión para evaluar esta primera lámina de riego está dada por:

$$LR_1 = \frac{L_c}{E_f} \quad (64)$$

donde LR_1 es la lámina para el primer riego (mm) y E_f es la eficiencia de aplicación del método de riego (%).

Láminas de los riegos posteriores

Para los riegos posteriores no se deberá permitir el abatimiento de la humedad desde CC hasta PMP como en el caso del primer riego, sino permitir únicamente un determinado porcentaje de abatimiento.

Para zonas áridas se puede permitir que la humedad aprovechable descienda hasta un 30% de su valor total; es decir, se permitirá el consumo del 70% de la diferencia de humedad existente entre CC y PMP. De aquí que la lámina de los riegos de auxilio se evalúe con la siguiente relación:

$$LR_2 = \frac{f L_c}{E_f} \quad (65)$$

donde LR_2 es la lámina de riego de auxilio (mm) y f es el factor de consumo permisible (normalmente se toma $f = 0.7$).

Calendarios de riego

Para determinarlo se utiliza normalmente un método gráfico. Consiste en realizar una gráfica de tiempo (t) contra balance hídrico acumulado (ΣB_h).

Para definir la fecha de riego se entra, sobre el eje correspondiente al balance hídrico acumulado, con el producto $f L_c$ (factor de consumo permisible por la lámina calculada) y se sale sobre el eje de tiempos, obteniéndose la fecha de riego.

Cálculo de calendarios de riego. NEC-HID v 2.0, Manual del usuario, se terminó de imprimir en el mes de agosto de 1995 en los talleres de **Servicios Gráficos de Morelos, S.A. de C.V.** La edición consta de 500 ejemplares y su cuidado estuvo a cargo de la Subcoordinación Editorial y Gráfica.

IMTNEC2.0S95.1 001

Ejemplar núm. 0111



IMTA[®]
Instituto Mexicano de
Tecnología del Agua

CENTRO DE CONOCIMIENTO DEL AGUA

PAPELETA DE DEVOLUCIÓN

El lector se obliga a devolver este libro a la fecha del vencimiento del préstamo señalado en el último sello.

<p><i>DEVUELTA</i> <i>26/4/08</i></p>		
---	--	--

F0.C6.3.08



42870

IMTA

CENTRO DE CONSULTA DEL AGUA



42870

INTA

CENTRO DE CONSULTA DEL AGUA