



**ESTIMACION DE LOS USOS  
CONSUNTIVOS DE AGUA Y  
REQUERIMIENTOS DE RIEGO  
CON FINES DE FORMULACION  
Y DISEÑO DE PROYECTOS**

CRITERIOS Y PROCEDIMIENTOS

**CARLOS J. GRASSI**

ESTIMACION DE LOS USOS CONSUNTIVOS DE AGUA  
Y REQUERIMIENTOS DE RIEGO CON FINES DE FORMULACION  
Y DISEÑO DE PROYECTOS

CRITERIOS Y PROCEDIMIENTOS

CARLOS J. GRASSI

CIDIAT  
1975

## I N D I C E

	página
1. INTRODUCCION . . . . .	5
2. DISTRIBUCION DEL AGUA DERIVADA CON FINES DE RIEGO. . . . .	7
3. NIVELES DE ESTUDIO Y DATOS BASICOS NECESARIOS. . . . .	9
3.1 Factores climáticos. . . . .	10
3.2 Factores edáficos. . . . .	14
3.3 Factores de diseño, construcción y operación de la obra. . . . .	15
3.4 Factores agroeconómicos. . . . .	17
3.5 Factores legales, institucionales y humanos. . . . .	18
4. EVAPOTRANSPIRACION . . . . .	18
4.1 Evapotranspiración potencial . . . . .	19
4.2 Evapotranspiración actual, o uso consuntivo del agua . . . . .	20
5. PROCEDIMIENTOS PARA ESTIMAR LA EVAPOTRANSPIRACION. . . . .	24
5.1 Procedimientos para estimar la evapotranspiración en base a la radiación neta. . . . .	24
Fórmula de Penman. . . . .	24
5.2 Procedimientos para estimar la evapotranspiración en base a medidas de radiación solar . . . . .	26
Fórmula de Jensen y Haise. . . . .	26
5.3 Procedimientos para estimar la evapotranspiración en base a la evaporación del tanque. . . . .	27
5.4 Procedimientos para estimar la evapotranspiración en base a datos climáticos . . . . .	29
Fórmula de Blaney-Criddle. . . . .	29
Fórmula de Grassi-Christiansen . . . . .	31
Fórmula de Hargreaves. . . . .	32
5.5 Curvas únicas para estimar el coeficiente <u>k</u> . . . . .	34
5.6 Discusión de las fórmulas para estimar la evapotranspiración . . . . .	35

(sigue)

	página
6. BALANCE HIDRICO Y NECESIDAD DE RIEGO . . . . .	39
6.1 Precipitación. . . . .	39
6.2 Capacidad de almacenaje de agua en el suelo. . . . .	42
6.3 Profundidad de exploración y hábitos radicales de los cultivos. . . . .	43
6.4 Exceso y deficiencia de agua . . . . .	45
6.5 Necesidad de riego . . . . .	47
7. PERDIDAS Y DESPERDICIOS DE AGUA EN UN SISTEMA DE RIEGO . . . . .	48
7.1 Pérdidas y desperdicios de agua en la parcela. . . . .	50
Pérdidas y desperdicios en el sistema de distribución de la propiedad. . . . .	51
Pérdidas de agua en la parcela irrigada. . . . .	51
Eficiencia de aplicación de agua . . . . .	53
Pérdidas debidas a los requerimientos de lixiviación de las sales . . . . .	54
7.2 Pérdidas y desperdicios de agua en el sistema de riego . . . . .	56
Pérdidas en la regulación. . . . .	56
Pérdidas y desperdicios en la conducción y distribu- ción del agua. . . . .	57
Eficiencia de conducción de agua . . . . .	60
7.3 Usos sucesivos de agua . . . . .	60
8. REQUERIMIENTOS DE AGUA DEL PROYECTO. . . . .	62
8.1 Programa de riego. . . . .	62
Frecuencia de riego. . . . .	62
Lámina de agua a aplicar . . . . .	65
Requerimientos mensuales y estacionales de agua. . . . .	67
8.2 Superficie factible de riego . . . . .	68
Sin obras de regulación. . . . .	69
Con obras de regulación. . . . .	70
8.3 Capacidad para el diseño y operación de las obras. . . . .	72
Capacidad de diseño de los canales de riego. . . . .	72
Entrega por caudal continuo. . . . .	75
Entrega por turnos . . . . .	76
Entrega de acuerdo a la demanda. . . . .	78
Capacidad de diseño de los canales de drenaje. . . . .	80
Area total a beneficiar con el proyecto y área regable . . . . .	82
LITERATURA CITADA . . . . .	84

## 1. INTRODUCCION

El desarrollo agrícola basado en la explotación del recurso tierra, depende básicamente del aprovechamiento de las condiciones climáticas y de los recursos hídricos existentes en una determinada zona. Calor, agua y tierra, representan los tres factores naturales que inter-relacionados, hacen posible la actividad vegetativa y como consecuencia la producción de los cultivos.

Estos tres factores que se presentan en cada zona, con características propias e intensidad distinta, marcan las diferencias entre áreas de una región y entre regiones. Los cultivos asimismo, tienen exigencias óptimas y límites, que definen el rango de utilización combinada de estos recursos.

El hombre ha tenido hasta el presente, escaso éxito en su intento de cambiar las características climáticas de una región y las condiciones intrínsecas de los suelos, pero desde la antigüedad se esfuerza en modificar el balance hídrico, de áreas de adecuadas condiciones edafoclimáticas para la agricultura. Las obras de irrigación, de drenaje y las prácticas de cultivo en secano, demuestran claramente la capacidad de intervención del hombre, en el aprovechamiento de los recursos hídricos.

Sin embargo, para una acción planeada en el uso del agua disponible, se requiere no solamente la evaluación de este recurso, que se presenta como precipitación meteórica, escurrimiento superficial y subterráneo, sino también cuantificar su grado de agotamiento en el terreno, por el proceso evapotranspiratorio y las pérdidas que implica su conducción, distribución y utilización.

El balance hídrico de un área, en base a la velocidad de evapotranspiración, define a grandes rasgos el tipo de problema hidráulico y asienta sólidas bases para la programación agraria de una zona. Asimismo, el consumo individual de los cultivos a implantar permite estimar el área a beneficiar, diseñar las obras que integran el sistema de riego y programar su operación. De esta manera, la determinación de los requerimientos de agua de un sistema, proporciona la

unidad de medida del riego, que permite el posterior análisis socio-económico que fundamenta su ejecución y la eficiente explotación del mismo.

Lamentablemente, para cuantificar los requerimientos de riego de un proyecto, se debe contar con datos no fácil de obtener por medida directa, ya sea por razones de orden instrumental o de operación. Por otra parte, salvo en los casos de remodelación y/o ampliación de proyectos existentes, no se pueden efectuar medidas en un sistema aún no existente. Ello obliga en la generalidad de los casos, a estimar consumos y pérdidas a base de condiciones climáticas, de suelo, de diseño, de construcción y de operación de la obra.

La experiencia que brinda un gran número de obras de riego actualmente en explotación y la gran cantidad de datos acumulados como consecuencia, y el criterio personal del proyectista, juegan al respecto un rol preponderante. Aún cuando este aspecto, es uno de los más inciertos de una obra --ya que incluso debe asumirse una determinada eficiencia de manejo, que puede distar mucho de la realidad futura-- los métodos aplicados para estimar consumos y pérdidas, no son sin embargo menos precisos que los que se utilizan en otras etapas del diseño hidráulico y estructural, en las cuales debe recurrirse con frecuencia al empleo de coeficientes y a la experiencia que aporta el análisis de casos similares.

Para determinar los requerimientos de agua de un proyecto de desarrollo agrícola sobre la base del riego, cabe establecer primero las necesidades generales que permiten definir o no la realización de una obra de tal naturaleza. Resuelta la formulación de un proyecto, la siguiente etapa consiste en la determinación de los requerimientos de riego de los cultivos a implantar: uso consuntivo o evapotranspiración; y estimar luego las pérdidas: eficiencia de conducción y eficiencia de riego o sea el uso no consuntivo, que bajo determinadas circunstancias, representa un volumen de agua recuperable parcialmente por el sistema.

De esta manera los requerimientos de riego de un proyecto, resultan una función de un gran número de variables, que tienen en cuenta factores ambien-

tales, de diseño y de operación del mismo. Estos factores pueden ser agrupados en edafoclimáticos, de ingeniería, agroeconómicos, legales e institucionales, sociales y humanos. Dichos factores se discuten total o parcialmente en los diferentes capítulos de este trabajo, orientado fundamentalmente a la determinación de los requerimientos de agua para riego, con fines de proyecto.

## 2. DISTRIBUCION DEL AGUA DERIVADA CON FINES DE RIEGO

Tal como lo define Israelsen (1962), el riego tiene por fin la "aplicación artificial de agua al terreno para suministrar a las especies vegetales la humedad necesaria para su desarrollo". El cumplimiento de tal objetivo exige reponer periódicamente a la profundidad del suelo que exploran las raíces, el agua que consumen las plantas. Ello implica, que la reposición debe realizarse antes de que los cultivos sufran por falta de agua y en cantidad suficiente para satisfacer la capacidad de retención del agua al suelo.

Pero, dado que el sistema suelo-planta es tridimensional, el agua que escurre sobre la superficie humedece el suelo en tres direcciones: largo, ancho y profundidad, de modo tal que, con un determinado caudal aplicado durante un tiempo dado, debe humedecerse completamente, el volumen de tierra que resulta del área y profundidad de raíces de la parcela; ello sin que se produzcan pérdidas por percolación, debajo de la capa radical, ni por escurrimiento al pie de la misma.

El diseño adecuado de los métodos de riego, puede reducir significativamente las pérdidas de agua, pero no eliminarlas completamente. Por otra parte, en condiciones de salinidad en el suelo o en el agua de riego, se requiere perder agua por percolación profunda para lixiviar sales, ya que una producción sostenida de cultivos se logra al mantener en el suelo un adecuado nivel de humedad y balance de sales.

Dado la forma como se presentan las aguas superficiales en cauces naturales antes de su aplicación al terreno, se requiere derivarlas, conducir las y distribuir las; estas diferentes etapas se repiten sucesivamente varias veces

en un proyecto, si se tiene en cuenta el continuo fraccionamiento o partición del caudal hasta concluir en la parcela cultivada. Dicha conducción y distribución se realiza no sin pérdidas y desperdicios de agua, que modifica frecuentemente el proyectado recorrido de las aguas.

La Fig. 2.0.0 tomada de Jensen (1967), muestra gráficamente la disposición de las aguas de riego cuando se cuenta con un completo sistema de obras que comprende derivación, regulación, conducción, distribución y consumo de agua por los cultivos (evapotranspiración). Si se considera el área delimitada por cada flecha, resulta que la evapotranspiración que representa el proceso productivo y motiva la realización de la obra, constituye en cantidad la mitad o menos del agua derivada (comúnmente entre  $1/3$  y  $1/2$ ).

Las flechas dirigidas hacia arriba señalan el agua que cambia de estado físico y vuelve a la atmósfera en estado de vapor; las dirigidas hacia abajo, el agua que continúa en el mismo estado físico y escurre como agua superficial o se infiltra como agua no productiva en las diferentes etapas del proyecto. Estas últimas pérdidas y desperdicios constituyen un caudal que ingresa al sub-suelo elevando los niveles freáticos o escurre sobre la superficie por los desagües. La aproximación de los niveles freáticos a la superficie del terreno permite el desarrollo de la vegetación natural compuesta de especies sin o de escaso valor económico y que representan un uso no beneficioso del agua, particularmente cuando predominan especies freatófitas.

Tal como muestra el gráfico, Fig. 2.0.0, queda aún un flujo o caudal de retorno que puede ser usado nuevamente, si la calidad del agua no ha disminuido a límites peligrosos y siempre que, su nivel con respecto a los terrenos a regar posibiliten su uso económico.

El punto de partida para estimar los requerimientos de riego de un proyecto es la necesidad de agua que resulta del balance hídrico del suelo en equilibrio con el clima, donde la precipitación y la reserva de humedad en el suelo constituyen las entradas (haber) y la evapotranspiración las salidas (débito).

Dado que el agua se deriva, regula, conduce, distribuye y se aplica al terreno para compensar su deficiencia hídrica, todas las demás pérdidas son función de dicho déficit, y representan una fracción del mismo; de modo que el monto de las pérdidas, depende en principio de la velocidad de uso del agua por el cultivo, o sea de la evapotranspiración.

En su expresión más simple, los requerimientos de riego de un proyecto durante determinado período de tiempo, resultan de:

$$\text{Requerimientos del proyecto} = \frac{(\text{Evapotranspiración real, ponderada}) - (\text{Aportes hídricos})}{\text{Eficiencia del proyecto}}$$

En el numerador se incluye la influencia de las condiciones ambientales, o sea la relación agua-suelo-planta, sobre la cual el hombre puede influir sólo en parte, al decidir respecto a los cultivos y proporción relativa de cada uno de ellos en el patrón adoptado. En el denominador, en cambio, se incluye una expresión de la capacidad del hombre para aprovechar el recurso hídrico de acuerdo a su ingenio, habilidades y medios a su disposición.

### 3. NIVELES DE ESTUDIO Y DATOS BASICOS NECESARIOS

Para estimar los requerimientos de agua de un proyecto de riego y el área potencialmente irrigable con un determinado recurso hídrico, se requiere contar con datos e información básica. Algunos de estos datos colectados durante muchos años anteriores al estudio, tal como ocurre con la información meteorológica e hidrológica, y otros que resultan de otros capítulos de los estudios, tal como ocurre con la información relacionada con el recurso suelo.

Los objetivos y niveles de los estudios: reconocimiento, factibilidad, construcción, desarrollo de las tierras, plantea a su vez diferentes exigencias en cuanto a cantidad y calidad de los datos necesarios. Desde la concepción de una obra de riego hasta el total desarrollo físico y puesta en riego de las tierras, existe por lo general un largo intervalo que puede ser aprovechado para

el ajuste del proyecto, de manera tal, que las obras deben proyectarse con la elasticidad suficiente para realizar modificaciones; particularmente en la etapa de puesta en riego de las tierras así como durante la operación y manejo del sistema.

Sin embargo, dado que el punto de partida es la relación agua-suelo-planta, o sea el ambiente ecológico en el cual vegetarán y producirán los cultivos, y dicho ambiente ya existe en la naturaleza, se puede contar con la información anticipadamente por vía de estudios. El hombre y las obras entran en juego, pero éstos son parámetros que el proyectista maneja ya que las obras las diseña y las opera el hombre.

Los factores que afectan la determinación de la cantidad de agua necesaria y que a su vez fundamentan el diseño y operación de las obras, puede agruparse en: 1) climáticos; 2) edáficos; 3) de diseño, construcción y operación; 4) agro-económicos; 5) legales, institucionales y humanos.

### 3.1 Factores climáticos

Comprende la influencia del clima y del poder evaporante de la atmósfera sobre la velocidad de evapotranspiración. Para analizar las influencias del clima, se requiere información de los elementos que lo integran y en particular:

- a) Evaporación
- b) Radiación
- c) Heliofanía
- d) Temperatura del aire
- e) Humedad relativa
- f) Velocidad del viento
- g) Precipitación
- h) Período libre de heladas

Dichos datos se publican en los países latinoamericanos en boletines mensuales y la compilación de datos del año y los promedios de varios años en estadísticas climatológicas. En algunos países, tales como el caso del Ecuador, la compilación y publicación de datos está en manos de un servicio nacional especializado; en otros, como en Colombia y Venezuela, varias entidades oficiales se ocupan de registrar, coleccionar y publicar datos meteorológicos.

Una característica que es común a la generalidad de los países de Latinoamérica, es la escasez de datos climáticos en las áreas de desarrollo de proyectos. Escasean en particular los datos de evaporación, radiación, humedad relativa y velocidad del viento, que tienen gran significación para caracterizar la capacidad de evaporación de la atmósfera. Aún cuando en la última década, se ha hecho un gran esfuerzo en la instalación de estaciones meteorológicas completas, las series con que se cuenta son por lo general de escaso número de años. Por otra parte, una deficiencia que es común a los diferentes países, es la falta de publicación regular de los datos, ocultándose así involuntariamente, una información valiosa para la formulación de proyectos de desarrollo de aguas y tierras.

Frente a la escasez de datos, debe recurrirse a procedimientos de correlación que permitan "extender" datos escasos de un determinado elemento climático, en base a la medida de un factor del cual se tiene una serie mayor. Por ejemplo, escasean los registros de radiación global, que mide el actinógrafo, pero en cambio, se cuenta más frecuentemente con datos de medida de las horas de brillo solar, obtenidas en el heliógrafo. Una correlación lineal, permitirá estimar la radiación global en función de la heliofanía mediante una ecuación del siguiente tipo:

$$y = b_0 + b_1 x \quad \dots \dots (3.1.1)$$

donde:

$$y = \frac{R_g}{R} ; \quad y_x = \frac{n}{N}$$

cuyo significado es:

- R<sub>g</sub> la radiación global medida en el actinógrafo, cal/cm<sup>2</sup>
- R la radiación teórica al tope de la atmósfera, cal/cm<sup>2</sup>
- n la duración del brillo solar medida en el heliógrafo, en horas
- N la duración teórica astronómica del día, en horas.

Otro dato comúnmente escaso es el de la humedad relativa, o tensión de vapor del aire. Dado, que el contenido absoluto de la humedad de la atmósfera

varía muy poco, el valor máximo de humedad relativa, se registra en correspondencia con la temperatura mínima y el valor mínimo en correspondencia con la máxima. Por ello es que, es posible encontrar buenas correlaciones entre este elemento climático y las temperaturas extremas. Mathison (1963) relacionó la humedad relativa con la diferencia de temperatura máxima menos mínima mediante una ecuación de este tipo:

$$y = b_0 - b_1 x$$

donde:

$$y = Hr; \quad x = \Delta t$$

cuyo significado es:

Hr la humedad relativa media de 24 horas

$\Delta t$  la diferencia de temperatura: media de máximas y media de mínimas.

Otro dato básico comúnmente escaso es la temperatura. En áreas montañosas los datos de temperatura, pueden "extenderse" conociendo el gradiente térmico medio mensual de la localidad. El método de los "gradientes medianos" de De Fina y Sabella (1960), ofrece un camino a seguir sobre este particular.

La precipitación es un fenómeno muy variable en el espacio y en el tiempo, por lo que no puede esperarse una buena correlación con otros elementos climáticos, especialmente en las áreas donde predominan lluvias convectivas y orográficas, en cuyo caso no es posible prescindir de los registros directos. Aún así, las determinaciones puntuales pueden ser de escasa significación para extenderlos a toda el área de un proyecto, requiriéndose generalmente una red de estaciones. El método de los polígonos de Thiessen, empleado en Hidrología, constituye un intento de asignación de áreas de influencia a los registros.

Desde nuestro punto de vista, para estimar las necesidades de riego de un proyecto en la etapa de su formulación, las exigencias de datos meteorológicos es tal vez menor que en Climatología, pudiendo en consecuencia emplearse series

de menor número de años. La utilización o diseño de la serie de un elemento climático debe resultar de un análisis previo del posible error y de la significación que él mismo tendría en el diseño. Así la temperatura media de un determinado mes en una localidad, varía muy poco a través de los años; en cambio, los valores mensuales de precipitación, al comparar los distintos años, pueden variar en forma altamente notable. La diferencia radica en que la temperatura es un fenómeno continuo, mientras que la lluvia es un fenómeno esporádico. A. Binnie, citado por Ahuja (1957) ha determinado el error posible de cometer al estimar promedios de lluvias obtenidos con registros de diferentes números de años conforme se transcribe a continuación:

PROMEDIOS DE LLUVIA

Número de años de observación	Error por ciento al estimar la media
1	+ 51.00 a - 40.00
2	+ 35.00 a - 31.00
5	+ 15.00 a - 15.00
10	+ 8.22 a - 8.22
20	+ 3.22 a - 3.24
30	+ 2.26 a - 2.26

La estación de crecimiento de los cultivos, está definida por el período libre de heladas, que comprende el lapso en días que va desde la última helada de invierno y la primera de otoño. Con temperaturas de 0°C se produce un total receso vegetativo y como consecuencia en el consumo de agua del sistema suelo-planta. En países de latitudes avanzadas se reduce la estación de crecimiento a unos pocos meses, mientras que en el trópico existe potencialmente la posibilidad de realizar cultivos durante todo el año.

Dentro del área que abarca un proyecto de riego debe contarse con datos meteorológicos para detectar las diferencias climáticas que afectan el balance hídrico y los requerimientos de agua. Sin embargo, salvo en los casos de que existan diferencias notables en la orografía, la extensión que abarcan los proyectos de riego no requieren más que una estación meteorológica excepto en el caso de la precipitación.

### 3.2 Factores edáficos

Por ser el suelo el reservorio del cual las plantas extraen agua y principios nutritivos, además de proveer su sostén mecánico, se requiere conocer sus características diferenciales externas e internas y sus características de comportamiento del perfil, particularmente:

- a) Condición textural
- b) Profundidad efectiva
- c) Drenaje interno
- d) Contenido de fragmentos gruesos.

Dado que las características de un perfil de suelo, se obtienen mediante determinaciones puntuales, que muestran grandes cambios en el espacio, se requiere un número elevado de observaciones del perfil para delimitar áreas con características similares.

Los mapas más comúnmente empleados son los de clasificación en: series de suelo que definen el perfil, en tipos de suelos que definen la textura del horizonte superficial, y fases de suelo que destacan una característica relevante de gran importancia para su manejo: pendiente, erosión, pedregosidad, etc.

Dichos mapas son un auxiliar valioso para determinar las áreas de cultivos posibles en un proyecto de riego, las condiciones edáficas que caracterizan la relación agua-suelo-planta; y, de acuerdo a las condiciones diferenciales externas y especialmente el relieve y la topografía, los métodos de conducción y de aplicación de agua al cultivo.

La relación agua-suelo, merece especial consideración en el relevamiento y clasificación de tierras con fines de riego y en especial:

- a) Velocidad de penetración del agua en el suelo y de percolación a través del mismo.
- b) Valores de equilibrio de la humedad en el suelo: capacidad de campo y punto de marchitamiento permanente.
- c) Esfuerzo de extracción de agua del suelo por los cultivos: curvas de capacidad hídrica.

- d) Profundidad radical y patrones de extracción de agua del suelo.
- e) Peso aparente del suelo, porosidad y capacidad mínima del aire.

Dichas características requieren comúnmente investigaciones o relevamientos especiales, pero para extender los datos a áreas, se correlacionan con otras características físicas relevantes y mapeables. Por ejemplo, una guía confeccionada con el U.S. Department of Agriculture (1948), permite calificar la permeabilidad de un suelo para el agua de acuerdo a la textura, estructura y otras condiciones del perfil.

El problema de salinidad en el agua de riego o en el suelo, introduce otra variante en cuanto a las relaciones agua-suelo-planta, ya que las sales aumentan el esfuerzo de extracción de agua del suelo y exigen regar con exceso para satisfacer los requerimientos de lixiviación de sales. La presencia de sales, plantea así un problema especial, que debe ser considerado entre los factores edáficos que afectan los requerimientos de agua.

Los mapas de clasificación en serie, tipo y fase, complementados con estudios especiales, proveen información edáfica necesaria para investigar los requerimientos de agua del proyecto. La clasificación de aptitud de tierras para riego, desarrollada por el Bureau of Reclamation (1963) considera al suelo, la topografía y el drenaje, como factores fundamentales para la clasificación en clase y sub-clase que fundamentan la inclusión de otros factores de evaluación entre los cuales se encuentran los requerimientos de agua.

### 3.3 Factores de diseño, construcción y operación de la obra

Estos factores abarcan la capacidad técnica puesta en la concepción, formulación y proyecto de la obra, la inversión realizada en la construcción de canales, estructuras y desarrollo físico de las tierras, y el esfuerzo puesto en su posterior operación. Ello en todas las etapas que puedan considerarse desde la presa hasta el surco de riego.

Muy raras veces en los proyectos realizados en Latinoamérica, se ha puesto el énfasis necesario en todas y cada una de las etapas que abarca el desarrollo de un proyecto de riego. Comúnmente, se atiende con especial cuidado la construcción de las obras hidráulicas que constituyen el sistema de riego desde la derivación a la entrega del agua a los usuarios, descuidando en cambio la sistematización de las tierras y el riego en las propiedades. Como consecuencia, las metas no se cumplen al resultar un área beneficiada muy inferior a la estimada, recurriéndose al cómodo argumento de que "las metas no han sido realistas".

La Ingeniería Agrícola y la Ciencia del Riego con el desarrollo alcanzado en las últimas dos décadas, han provisto criterios y procedimientos para garantizar un más eficiente uso del agua en las propiedades. Al respecto, con relación a los proyectos y grado de preparación del agricultor para la agricultura de riego, que es común en los proyectos actualmente en desarrollo en Latinoamérica, Grassi (1967) sugiere trasladar la responsabilidad del uso eficiente del agua en las propiedades, a los técnicos que diseñan, construyen y operan el sistema.

De esta manera, el técnico que proyecta una obra de riego, diseña su derivación, conducción, distribución e incluso su aplicación al suelo. Su misión es conducir el mayor caudal y beneficiar al aplicarlo al terreno la máxima superficie posible; ello significa que su meta es reducir las pérdidas al mínimo compatible con la economía. Para ello, el técnico usa su criterio y procedimientos de diseño, construye la obra y el éxito o el fracaso depende del grado de acuerdo logrado entre el proyecto y la realidad en la operación de la misma.

Los factores de diseño, construcción y operación, inciden enormemente en la cuantía de agua necesaria para un proyecto de riego, siendo la mayor causa de variabilidad en los requerimientos de riego, cuando se comparan proyectos en igualdad de condiciones ambientales. Sin embargo, a diferencia de lo que ocurre con los edafo-climáticos, estos factores están sujetos al control del técnico y a él le cabe la responsabilidad de su correcta evaluación.

### 3.4 Factores agro-económicos

Dado que las obras de riego se realizan para instalar cultivos y el agua derivada en última instancia, integra los procesos fisiológicos que conducen a la producción, que está regida por la economía, es lógico suponer que habrá o no demanda de agua, según que haya o no demanda de productos agrícolas. Al respecto, Criddle et al. (1962) afirman que en el pasado "el agua derivada para riego, ha dependido de las condiciones económicas y de la experiencia pero no de las necesidades básicas".

El interés por productos agrícolas en diferente intensidad, define la célula o patrón de cultivos, que es básica para la determinación de los requerimientos de riego del proyecto, la que a su vez está regida por la economía y la planificación a nivel nacional o regional.

El proyectista se basa en la realidad del momento y en las proyecciones en el tiempo, pero pueden incidir otros factores en el futuro, fuera de su control, que actúan modificando la célula de cultivo, fundamento de la determinación de los requerimientos de riego. Estos cambios en la política agraria, deben ser previstos a fin de considerar alternativas que conduzcan a requerimientos similares del proyecto.

Aún cuando este trabajo no intenta tratar otros usos del agua considerados en todo proyecto de propósitos múltiples, cabe mencionar que, toda obra de riego debe considerar las necesidades para uso doméstico y para abrevadero de ganado; que si bien no tienen la significación cuantitativa del riego, afectan la operación si predominan explotaciones agrícola-ganaderas.

Todo estudio, cualquiera sea el nivel del mismo, dispone de un capítulo agro-económico que facilitará el trabajo del proyectista en la evaluación de los requerimientos de agua para las necesidades actuales y en cuanto a su proyección futura.

### 3.5 Factores legales, institucionales y humanos

Estos factores tienen una importancia decisiva, de modo que no pueden omitirse al considerar los requerimientos de agua, ya que inciden principalmente en el monto de las pérdidas y desperdicios de agua de un sistema, especialmente cuando se remodelan o amplían viejos sistemas de riego a base de tomas libres sobre el río, muchas veces fruto de la iniciativa individual o comunitaria de los agricultores propietarios de tierras adyacentes.

La incorporación de viejos regadíos a un sistema es posible y generalmente de interés de los propios regantes, pero legalmente, en ocasiones deben respetarse "derechos adquiridos", que configuran un pobre uso del agua. Es muy posible que frente a una situación como ésta, al planificar los recursos de agua, se hayan considerado las reformas legales correspondientes, pero puede que otras circunstancias ajenas a la voluntad del proyectista, tales como las de orden político, impidan tomar decisiones y deban considerarse como hechos existentes..

El tipo de instituciones para administrar los recursos hídricos y de extensión agrícola, así como la posible participación del regante, tiene que ser cuidadosamente considerada, a fin de deducir la posible eficiencia en la administración, operación y mantenimiento de la obra, que se refleja en la eficiencia de uso del agua en todo el sistema de riego.

El recurso humano, desde el punto de vista de su capacidad como agricultor de riego, interviene en el panorama, dado que la agricultura de riego, por su elevada intensidad, requiere de conocimientos y habilidades que no son comunes en el agricultor de secano. Asimismo, siendo el riego un problema que afecta a grupos, su grado de motivación para participar, en comunidad, en la solución de los mismos, juega un rol muy importante al considerar la posible eficiencia en el uso del agua.

### 4. EVAPOTRANSPIRACION

La evaporación es el proceso mediante el cual, se produce el cambio de

estado del agua, de líquido a vapor. En la naturaleza cabe distinguir dos casos: 1) evaporación de superficies libres de agua; 2) evaporación de superficies de terreno cubiertas de vegetación. En el segundo caso, dicho proceso tiene una denominación especial: evapotranspiración.

La evaporación de una superficie de terreno cubierta con vegetación --evapotranspiración-- requiere: energía para cambiar el estado físico del agua de líquido a vapor; disponibilidad de agua en el suelo; y un mecanismo de transmisión de agua, desde el suelo a la atmósfera.

La radiación solar provee la fuente de energía; la precipitación pluvial y/o el riego artificial, la periódica reposición de agua al suelo; y las diferencias de potencial creadas en diferentes partes del sistema suelo-planta, la circulación de agua hacia la superficie evaporante.

#### 4.1 Evapotranspiración potencial

En el caso de una vegetación de escasa altura en activo crecimiento, que cubre íntegramente el terreno y sin restricciones de humedad edáfica, la evaporación, o mejor la evapotranspiración potencial, depende fundamentalmente de las condiciones climáticas existentes, dadas por las características físicas de la atmósfera vecina al suelo.

El razonamiento de Penman (1948), basado en un balance de energía y en la ecuación aerodinámica, permite concluir que la evapotranspiración potencial,  $E_{tp}$ , depende de las siguientes variables:

$$E_{tp} = f(R_g, r, T, e_a, u, n) \quad . . . . . (4.1.1)$$

donde:

- $E_{tp}$  es la evapotranspiración potencial
- $R_g$  es la radiación global
- $r$  es el coeficiente de reflexión o "albedo"
- $T$  es la temperatura del aire

$e_a$  es la tensión de vapor del aire  
 $u$  es la velocidad del viento  
 $n$  es el número de horas de sol.

La evapotranspiración potencial, puede medirse por procedimientos directos en lisímetros, Pruitt (1962)(1964), y en evapotranspirómetros, Thornthwaite (1948); y por procedimientos indirectos mediante la ecuación de transferencia del vapor, de Thornthwaite-Holtzman, citado por Pruitt y Lourence (1966). Asimismo, puede estimarse mediante la ecuación de Penman (1948), Thornthwaite (1948) y Penman y Schofield (1951).

La Fig. 4.1.1 representa la marcha de la evapotranspiración potencial, según López y Mathison (1966), medida en un lisímetro flotante, en la Estación de Servicio Shell para el Agricultor, en Venezuela.

#### 4.2 Evapotranspiración actual, o uso consuntivo del agua

Las variables características de la cobertura vegetal natural o cultivada, de las condiciones edáficas y de los niveles de humedad en el suelo, tanto en las tres dimensiones del espacio como en la dimensión del tiempo, modifican los supuestos enumerados al definir  $E_{tp}$ , actuando como factores reductores de  $E_{tp}$  de manera que:

$$E_t = E_{tp} \cdot k \quad . . . . . (4.2.1)$$

donde:

$E_t$  es la evaporación real o actual, también denominada uso consuntivo  
 $k$  es un coeficiente que tiene en cuenta el efecto de la relación agua-suelo-planta.

De esta manera,  $E_{tp}$ , incluye aspectos de orden físico que dependen del clima, mientras que  $k$ , considera el efecto físico-fisiológico, que se deriva de la planta y el suelo.

El coeficiente  $k$ , y su variación a lo largo del ciclo, es una expresión de

las características morfológicas y fisiológicas del cultivo y de la incidencia del ambiente edáfico, en cuanto al volumen de suelo explorado por las raíces y disponibilidad de nutrientes, agua y aire. Limitaciones, al respecto, para las mismas condiciones climáticas, se manifiestan en la relación  $E_t/E_{tp}$ , o sea en el valor del coeficiente  $k$ .

Para analizar los factores que componen  $k$ , debe independizarse dicho coeficiente de los que determinan a  $E_t$ ; de lo contrario, otros factores no considerados en su definición afectarán su resultado. Así una estimación incorrecta de  $E_{tp}$ , por no considerar aspectos que inciden en forma significativa, se trasladará a  $k$ , invalidando el resultado, aún cuando se haya medido  $E_t$ , muy precisamente.

Los factores que afectan a  $k$ , pueden agruparse en tres sub-coeficientes, según Grassi (1966):

$$k = k_c \cdot k_s \cdot k_h \quad \dots \dots (4.2.2)$$

donde:

$k_c$  es el sub-coeficiente de cultivo

$k_s$  es el sub-coeficiente de suelo

$k_h$  es el sub-coeficiente de nivel de humedad.

Para condiciones en las cuales no existen limitaciones de orden edáfico,  $k$  depende fundamentalmente de  $k_c$ . En la Fig. 4.2.1, se representan curvas típicas de  $k$ , para un cultivo anual, un cultivo permanente de tipo forrajeras y un cultivo permanente tipo frutal. Dichas curvas expresan claramente, la variación de la capacidad del cultivo para extraer agua del suelo, la que depende de su tamaño y de la regulación fisiológica del proceso evapotranspiratorio.

Curvas típicas de evapotranspiración, con relación a la evaporación del tanque, en función del tiempo relativo, han sido propuestas por: Kijne (1961), Anderson (1963), Hansen (1963), Grassi y Christiansen, Grassi (1964), Hargreaves (1966). Dichas curvas, obtenidas de experiencias de riego, con dife-

rentes suelos y niveles de humedad edáfica, pueden no ser la expresión de  $k_c$ , tal como aquí se la considera, e incluso pueden no concordar con datos obtenidos en otras condiciones.

En el caso de cultivos anuales en particular, las curvas pertenecientes a diferentes especies, pueden diferir de la representada en la Figura 4.2.1, tal como lo señalan los ejemplos de la Fig. 4.2.2.

El sub-coeficiente  $k_c$  depende de las características anatómo-morfológicas y fisiológicas de la especie y expresa la variación de su capacidad para extraer agua del suelo, durante el ciclo vegetativo.

El tamaño de la planta, expresado por su volumen foliar o radical, gobierna así el coeficiente. Dicho comportamiento es más evidente en cultivos estacionales que aumentan significativamente de tamaño, en reducido tiempo; y es prácticamente imperceptible en cultivos de forrajeras permanentes, donde la cobertura del terreno y profundidad de raíces, cambian en el espacio de años. Los tratamientos culturales que reducen bruscamente el volumen foliar, disminuyen con proporcional intensidad el valor de  $k_c$ . Grassi y Chambouleyron (1965), han comprobado la dependencia de  $k_c$  de la altura de las plantas de alfalfa.

El sub-coeficiente  $k_s$ , tiene en cuenta las limitaciones del proceso evapotranspiratorio, por el ambiente edáfico, excepto humedad. Se refiere principalmente a restricciones de la profundidad del suelo, por presencia de capas impenetrables para las raíces como "duripanes" y nivel freático alto: condiciones físicas que reducen la capacidad de aire y el intercambio gaseoso; y nivel de fertilidad por debajo de lo requerido para un normal desarrollo del cultivo.

En condiciones de suelos profundos, de adecuadas condiciones físicas y de buena disponibilidad de nutrientes, puede considerarse que:  $k_s = 1.00$ ; en caso de existir limitaciones de este tipo, el valor de  $k_s$  se reduce afectando por consiguiente a  $k$ .

En cuanto al sub-coeficiente  $k_h$ , cabe señalar que, el análisis teórico de Philip (1957) y de Gardner (1960) y gran número de evidencias experimentales, compiladas por Stanhill (1957), demuestran claramente que la velocidad de agotamiento de la humedad edáfica no es lineal sino exponencial.

Las relaciones que vinculan el contenido hídrico del suelo,  $W$ , con la succión matriz,  $SM$ , Fig. 4.2.3, muestran claramente el mayor esfuerzo o succión que necesita realizar el cultivo para extraer agua del suelo a medida que disminuye  $W$ . Experimentalmente --Taylor (1962)-- se ha comprobado la disminución de la producción en gran número de cultivos, a medida que baja el potencial hídrico (o aumenta la  $SM$ ). Experiencias realizadas en el Instituto de Suelos y Riego, Mendoza, Argentina, concuerdan con el mismo temperamento.

Dado el número de variables incluidas en el coeficiente  $k$ , se requiere la realización de experiencias en las condiciones típicas de cada proyecto. Si bien hasta la etapa de desarrollo de un proyecto, existe un lapso considerable de años, suficiente para obtener valores experimentales, en otros niveles de los estudios previos al de desarrollo, se requiere información al respecto.

Un análisis de la información y de los datos existentes, provengan estos de trabajos experimentales sistemáticos o de la operación de otros sistemas de riego, constituyen en condiciones agroclimáticas similares, una información sumamente valiosa, si se usan con una buena dosis de criterio.

En áreas de agricultura de riego intensamente desarrollada, tal como ocurre en el oeste de los Estados Unidos, los centros de investigación y los sistemas de riego en operación, proveen suficiente base para adoptar valores de  $E_{tp}$  y de  $k$  que corresponden a cada cultivo. La investigación de riego en los países de Latinoamérica se encuentra en sus comienzos, de modo que muy pocos datos se cuentan en la actualidad, en relación al enorme potencial de desarrollo y a los proyectos de riego en ejecución.

La investigación en el campo de la Ingeniería Agrícola, realizada en los últimos 25 años en los Estados Unidos y Europa, ha conducido a la obtención de

procedimientos que permiten estimar con precisión aceptable el uso consuntivo de agua por los cultivos. Si bien dichos procedimientos han sido motivo de extensa discusión, y varios de ellos cuestionados en diversos trabajos, lo cierto es que constituyen excelentes herramientas, que apropiadamente usadas, se transforman en un valioso auxiliar al alcance del proyectista.

## 5. PROCEDIMIENTOS PARA ESTIMAR LA EVAPOTRANSPIRACION

Los métodos con que se cuenta para estimar la evapotranspiración, se basan en sólidos principios físicos, tales como el de transferencia del vapor acuoso o del balance de energía; o en la medida directa de evapotranspiración de una superficie libre de agua o del agua depositada en esferas de porcelana porosa; o en fórmulas basadas en datos meteorológicos, fácilmente disponibles.

### 5.1 Procedimientos para estimar la evapotranspiración en base a la radiación neta

#### *Fórmula de Penman*

Penman (1948) ha combinado la ecuación del balance de energía, con la ecuación aerodinámica, para obtener una expresión que permita calcular la evaporación de una superficie libre de agua,  $E_o$ :

$$E_o = \frac{\Delta R_n + \gamma E_a}{\Delta + \gamma} \quad \dots \dots (5.1.1)$$

donde:

$\Delta$  es la pendiente de la curva de tensión de vapor vs. temperatura

$R_n$  es la radiación neta, en mm/día

$\gamma$  es la constante psicrométrica,  $\gamma = 0.27 \text{ mm Hg}/^\circ\text{F} = 0.49 \text{ mm Hg}/^\circ\text{C}$

$E_a$  es el poder evaporante de la atmósfera obtenido por medio de la ecuación aerodinámica, en mm/día.

La radiación neta,  $R_n$ , es la diferencia entre la radiación recibida y la emitida. Para calcular la radiación recibida,  $R_p$ , Penman (1948), obtuvo para

el sur de Inglaterra la siguiente ecuación:

$$R_r = R(1 - r)(0,18 + 0,55 n/N) \quad \dots \dots (5.1.2)$$

donde:

R es la radiación teórica en ausencia de atmósfera, en mm/día

r es el coeficiente de reflexión o albedo, en décimos

n/N es la fracción de insolación (actuales sobre posibles horas de sol).

La radiación emitida,  $R_e$ , en cambio:

$$R_e = \sigma T_a^4 (0,56 - 0,092 \sqrt{e_a}) (0,10 + 0,9n/N) \quad \dots \dots (5.1.3)$$

donde:

$\sigma$  es la constante de Stefan-Bolsman

$T_a$  es la temperatura absoluta en grados Kelvin

$e_a$  es la presión de vapor del aire, en mm de Hg.

La ecuación aerodinámica expresa:

$$E_a = 0,35(0,50 + 0,15 u_2)(e_d - e_a), \text{ mm/día} \quad \dots \dots (5.1.4)$$

donde:

$u_2$  es la velocidad del viento a 2 m. de altura, en km/h

$e_d$  es la tensión de vapor al punto de rocío, en mm de Hg.

Para pasar de evaporación de una superficie libre de agua a evapotranspiración, Penman (1948) utiliza un factor reductor,  $f$ , cuyos valores oscilan desde 0.6, para los meses invernales, a 0.8 para los meses de verano. Con relación a una superficie libre de agua,  $f$ , tiene en cuenta el menor número de horas diarias que los estomas de las plantas permanecen abiertos. Por lo tanto:

$$E_{tp} = E_o \cdot f \quad \dots \dots (5.1.5)$$

Para facilitar los cálculos con la fórmula de Penman, se incluyen las siguientes tablas y gráficos: 1) valores de radiación solar al tope de la atmósfera,  $R$ , en mm/día, Tabla 5.1.1; 2) valores de irradiación,  $\sigma T_a^4$  en mm/día, Tabla 5.1.2; 3) valores de presión de vapor saturado,  $e_d$ , en mm de Hg, en función de la temperatura en °C, Fig. 5.1.1; 4) valores de la pendiente de la curva de presión de vapor vs temperatura,  $\Delta$ , Fig. 5.1.2. En el apéndice de este trabajo se agrega un ejemplo de aplicación de la fórmula de Penman.

En base a experiencias en los Estados Unidos, Kohler et al. (1955), encontraron aplicable la fórmula de Penman, con algunos ajustes, para estimar evaporación del tanque standard tipo A. Dichos autores confeccionaron un nomograma para facilitar el empleo de la fórmula de Penman y que, ampliado en parte y adaptado para operar en el sistema métrico decimal y temperaturas en escala centígrada, se incorpora al presente trabajo como Fig. 5.1.3.

## 5.2 Procedimientos para estimar la evapotranspiración en base a medidas de radiación solar

### *Fórmula de Jensen y Haise*

El procedimiento de Jensen y Haise (1963), ha sido desarrollado para estimar la evapotranspiración que se produce en períodos de una semana, en función de los registros de radiación solar,  $R_s$ . Para diferentes cultivos, dichos autores han representado la relación  $E_t/R_s$ , Tabla 5.2.1, en función de:

- a) El porcentaje de cubrimiento del terreno por el volumen foliar del cultivo, estimado en forma relativa, en cultivos anuales; alcanzando el 100% de cubrimiento del suelo, se consideran simplemente los días después de dicha etapa.
- b) El porcentaje de duración de la estación de crecimiento en alfalfa.
- c) Valores absolutos de tiempo, días o meses, en frutales.

La relación de  $WE_t/R_s$  variable en función de tiempo, ha sido tabulada para diferentes zonas de los Estados Unidos, además de los promedios semanales de  $R_s$  para diferentes localidades registradas por la oficina meteorológica de aquel país.

La fórmula de Jensen y Haise expresa que:

$$E = \left(\frac{E_t}{R_s}\right)_m R_s \quad \dots \dots (5.2.1)$$

donde:

$\left(\frac{E_t}{R_s}\right)_m$  es el valor promedio de la relación, correspondiente a un período específico; adimensional

$R_s$  es la radiación solar, promedio del período correspondiente expresada en altura equivalente de agua evaporada, en mm/día.

Jensen y Haise (1963) han obtenido asimismo, una fórmula para evapotranspiración potencial,  $E_{tp}$ , en función de la radiación solar y de la temperatura media en °F, que convertida a °C, se expresa:

$$E_{tp} = (0,078 + 0,0252 T^{\circ}C)R_s \quad \dots \dots (5.2.2)$$

### 5.3 Procedimientos para estimar evapotranspiración en base a la evaporación del tanque

Las medidas de evaporación de una superficie libre de agua en el tanque evaporímetro,  $E_v$ , integra los efectos de los diferentes factores meteorológicos que influyen en la evapotranspiración. Estudios de correlación en diferentes cultivos y períodos del ciclo vegetativo, permiten obtener coeficientes para estimar  $E_t$ , en función de la evaporación de una superficie libre de agua:

$$E_t = E_v \cdot k \quad \dots \dots (5.3.1)$$

Se han ensayado tanques de diferentes características, en cuanto a tamaño, color, ubicación y nivel con respecto al terreno. Trabajos experimentales de evaluación del comportamiento de los diferentes tanques, han sido realizados por Pruitt (1960) con relación a la evapotranspiración en lisímetros de una completa cobertura vegetal. La relación  $E_{tp}/E_v$ , varió según tipo, tamaño y ambiente entre 0.75 y 1.25.

Dada su mayor universalidad, ya que se emplea en la mayor parte de los ser

vicios meteorológicos, se ha usado más frecuentemente el tanque standard tipo A, del servicio meteorológico de los Estados Unidos. Dicho evaporímetro mide 1.20 m. de diámetro por 0.25 m. de profundidad, se construye de chapa galvanizada y se instala con su fondo 0.15 m. por sobre el nivel del terreno.

La Fig. 4.1.1, obtenida de López y Mathison (1966), muestra muy buen acuerdo entre la marcha de  $E_{tP}$  y  $E_v$  en las condiciones del trópico con un coeficiente de correlación  $r = 0.913$  y una relación media  $E_{tP}/E_v = 0.75$ .

Kijne (1961) estudió la relación entre el uso consuntivo y la evaporación del tanque standard tipo A; Hansen (1963), Anderson (1963) y Grassi y Christiansen, Grassi (1964), han propuesto procedimientos para estimar  $E_t$  en base a  $E_v$ . El procedimiento de Anderson (1963) se basa en una curva única, que vincula el porcentaje de la relación máxima  $E_t/E_v$ , con el porcentaje del período de crecimiento activo de la planta. Conocida la relación máxima para el cultivo --para diferentes especies de California-- se ajustan las relaciones obtenidas directamente de la curva única para cada período del ciclo vegetativo, multiplicándolo por el valor tabulado.

Grassi y Christiansen, Grassi (1964), han obtenido la siguiente ecuación para estimar  $E_t$  en base a  $E_v$ :

$$E_t = 0.95 E_v C_T C_{Vc} F \quad \dots \dots (5.3.2)$$

y también

$$C_T = 1.40 - 0.020 T^{\circ}C \quad \dots \dots (5.3.3)$$

$$C_{Vc} = 0,0942 + 0,02774 Vc - 0,0002126 Vc^2 \quad \dots \dots (5.3.4)$$

donde:

$T$  es la temperatura en  $^{\circ}C$

$C_T$  es el coeficiente de temperatura, adimensional

$Vc$  es el porcentaje de la duración del ciclo vegetativo

$C_{VC}$  es el coeficiente del ciclo vegetativo, adimensional

F es el factor de cultivo.

En la Figura 5.3.1, se representa la variación de los valores de  $C_{VC}$ , en función de  $V_c\%$  según la ecuación (5.3.4). Dicha ecuación tiene en cuenta, en cultivos estacionales, el efecto de variación del tamaño del cultivo desde emergencia a total cubrimiento del terreno, (en cuyo caso  $C_{VC} = 1.00$  para  $V_c = 68\%$ ), y el efecto de maduración al final del ciclo; no es en consecuencia aplicable a cultivos permanentes, en cuyo caso debe considerarse  $C_{VC} = 1.00$  durante todo el ciclo.

Los valores del factor de cultivo, F, varían de la siguiente manera:

FACTOR DE CULTIVO, F

Valores provisionales

	F
Alfalfa . . . . .	1.10
Algodón . . . . .	0.98
Avena . . . . .	0.83
Frijoles. . . . .	0.86
Maíz. . . . .	1.05
Papas . . . . .	1.04
Remolacha azucarera . . .	1.16
Trigo de invierno . . . .	0.87

5.4 Procedimientos para estimar la evapotranspiración en base a datos climáticos

*Fórmula de Blaney-Criddle*

El método de Blaney-Criddle (1950) fue desarrollado para las condiciones del oeste de los Estados Unidos, relacionando valores reales (actuales) de uso consuntivo, con la temperatura media mensual,  $t$ , y el porcentaje mensual de las horas anuales del brillo solar,  $p$ . La fórmula general, que permite determinar el uso consuntivo o evapotranspiración real del mes, se escribe:

$$u = k . f \quad . . . . . (5.4.1)$$

Para el ciclo vegetativo de un cultivo de  $n$  meses:

$$U = \sum^n (k \cdot f) = K \cdot F$$

donde:

- $k$  es el coeficiente mensual de cultivo
- $f$  es el factor de uso consuntivo mensual
- $K$  es el coeficiente de cultivo para la estación de crecimiento o ciclo vegetativo
- $F$  es la suma de los factores mensuales de uso consuntivo.

Las expresiones anteriores son válidas para la temperatura en °F y evapotranspiración en pulgadas. Para temperatura en °C y  $u$  en mm/mes, la expresión de  $f$  sería:

$$f = (0.457t + 8.13)p \quad . . . . . (5.4.2)$$

En la Tabla 5.4.1 se incluyen para diferentes latitudes, los valores de  $p$ , correspondientes a los doce meses del año, según Blaney-Criddle (1950). El coeficiente de cultivo  $K$ , es variable con la especie en explotación; los valores dados por los autores, se consignan en la Tabla 5.4.2.

Dado que aún para terreno completamente cubierto por la vegetación, caso de la alfalfa y de las gramíneas perennes, la fórmula de Blaney-Criddle requiere un coeficiente de cultivo variable a lo largo de la estación de crecimiento, Stephens y Stewart (1963) han introducido en la fórmula (5.4.2) un factor de corrección, en función del ángulo cenital. Con idéntico objetivo es un trabajo del Servicio de Conservación de Suelos, de los Estados Unidos, discutido por Castilla Pérez (1965), se introduce un factor de correlación de  $k$  en función de la temperatura media del mes. Por lo tanto:

$$k = k_t \cdot k_c$$

donde:

$$k_c = 0.24 + 0.0312t \text{ } ^\circ\text{C} \quad . . . . . (5.4.3)$$

$k_c$  es un factor de cultivo que varía a lo largo del ciclo vegetativo.

El referido trabajo incluye curvas de variación de  $k_c$  en función del porcentaje del ciclo vegetativo para diferentes cultivos, algunas de las cuales se reproducen en la Fig. 5.4.1.

#### *Fórmula de Grassi-Christiansen*

Trabajando con los datos compilados por Jensen-Haise (1962) pero incluyendo la radiación al tope de la atmósfera,  $R$ , en lugar de la radiación solar,  $R_s$ , y un mayor número de factores meteorológicos, Grassi-Christiansen, Grassi (1964), obtuvieron la siguiente ecuación:

$$E_t = 5.46 C_R C_{Clc} C_T C_{TD} F, \text{ mm/día} \quad . . . . . (5.4.4)$$

que también puede escribirse:

$$E_t = E_{tp} \cdot C_{Vc} \cdot F$$

Para cada uno de los coeficientes anteriores se ha determinado una ecuación:

$$C_R = 0.1824 + 0.0575R$$

$$C_{Clc} = 1.15 - 0.05C_{lc}$$

$$C_T = 0.62081 + 0.02633T - 0.0003682T^2$$

$$C_{TD} = 0.9361 + 0.007670TD$$

$$C_{Vc} = \text{ecuación (5.3.4)}$$

donde:

$R$  es la radiación teórica al tope de la atmósfera, en mm/día

$C_{lc}$  es la nubosidad expresada en décimos.

Las letras  $T$ ,  $V_c$  y  $F$  tienen el mismo significado que en la ecuación (5.3.2).

Una variante de la ecuación (5.4.4) elimina la influencia de la diferencia de temperatura  $C_{TD}$ , y resuelve el coeficiente de temperatura  $C_T$ , en base a una ecuación lineal. En base a dicha variante, se ha confeccionado un nomograma, Fig. 5.4.2, que resuelve gráficamente la multiplicación de los cuatro coeficientes y la constante. Para ajustar la fórmula y obtener  $E_t$ , se multiplica  $E_{t1}$ , del nomograma, por el valor del factor  $F$  correspondiente, que se detalla a continuación:

FACTOR DEL CULTIVO, F

Valores provisionales

Cultivo	F
Alfalfa. . . . .	1.00*
Algodón. . . . .	1.08
Avena. . . . .	0.89
Cebolla. . . . .	1.01
Frijoles . . . . .	0.98
Maíz . . . . .	1.00
Manzana. . . . .	1.02*
Papas. . . . .	1.02
Remolacha azucarera. . . .	1.00
Tomate . . . . .	0.82
Viña . . . . .	0.73*

\*Debe tomarse  $C_{VC} = 1.00$

NOTA: En el caso de los frutales, los coeficientes consignados se refieren a cultivos adultos.

### *Fórmula de Hargreaves*

La fórmula de Hargreaves (1956), permite calcular el uso consuntivo mensual, en función de la temperatura media, la humedad relativa media al medio día y la duración del día dependiente de la latitud. Ultimamente (1966), su autor ha introducido factores adicionales de corrección de la fórmula y una tabla que incluye coeficientes para tener en cuenta el efecto del cultivo.

En unidades métricas y con temperatura en °C, la fórmula se expresa:

$$E_t = 17.37 \text{ kdT} (1.0 - 0.01 \text{ Hn}) \quad . . . . . (5.4.5)$$

donde:

$k$  es un coeficiente empírico de cultivo

$d$  es un coeficiente mensual de duración del día

$T$  es la temperatura media mensual

$H_n$  es la humedad relativa media, al mediodía.

El coeficiente  $d$  está relacionado con el  $p$  de Blaney-Criddle, Tabla 5.4.1, de modo que:

$$d = 0.12 p \quad . . . . . (5.4.6)$$

Dado, que los valores de humedad relativa que generalmente se publican en las estadísticas meteorológicas, corresponden a la media diaria, Al Barrak (1964), ha obtenido una relación, Fig. 5.4.3, entre dicho valor y la humedad relativa al medio día. Los valores de  $k$  se consignan en Tabla 5.4.3, en función del porciento de la época de crecimiento, para ocho grupos de cultivos, en cada uno de los cuales se han incluido las especies que responden a un mismo tipo de curva.

Dado que la fórmula ha sido desarrollada para condiciones meteorológicas medias, los resultados mejoran al ser afectados por los siguientes factores de corrección, según Hargreaves (1966):

- a) Efecto de la velocidad del viento: los resultados deben aumentarse o disminuirse en 9% por cada 50 km/día de aumento o disminución, con respecto a 100 km/día que corresponde a las condiciones de obtención de la fórmula.
- b) Duración del resplandor solar: la fórmula se obtuvo con una insolación del 90%. Para situaciones diferentes corresponde aplicar las siguientes correcciones.

Insolación %	30	40	50	60	70	80	90
Corrección %	-34	-28	-24	-20	-16	-9	0

- c) Altitud: los resultados deben aumentarse en 1.0% por cada 100 m. de elevación a partir de los 150 m. que corresponde a las condiciones de obtención de la fórmula.

### 5.5 Curvas "únicas" para estimar el coeficiente $k$

La mayor parte de los esfuerzos para llegar a procedimientos estimativos de la evapotranspiración, han sido volcados a condiciones de dependencia mayor de los factores climáticos, como ocurre con la evapotranspiración potencial. No se cuenta, sin embargo, con suficiente información experimental que permita estimar  $E_t$  en base a  $E_{tp}$ , ecuación (4.2.1), dado la diversidad de especies y de prácticas culturales que se dan en las zonas irrigadas.

En cultivos permanentes, dado que  $k$  varía poco en función de  $t$ , Fig. 4.2.1, el problema es más simple, pues se trata de adoptar un coeficiente único para el cultivo. En cultivos anuales, Fig. 4.2.2, se requiere conocer el valor de  $k$  que corresponde a cada período en que puede dividirse el ciclo vegetativo. Para resolver este vacío que impide la aplicación de procedimientos que sólo estiman  $E_{tp}$  ó  $E_v$ , o que consignan relaciones medias  $K$  del ciclo, Tabla 5.4.2, se han propuesto "curvas únicas" tales como las de Hansen (1963) y la de -- Grassi (1966).

Hansen (1963) ha propuesto una curva que relaciona la evapotranspiración relativa  $k$ , Fig. 5.5.1, con el crecimiento y maduración relativa. Evapotranspiración relativa, significa que en el denominador puede emplearse indistintamente la evaporación del tanque standard tipo A, o del evaporímetro Piche, así como estimaciones con la fórmula de Penman o Blaney-Criddle. En tal caso, los valores de  $k$  periódicos, resultan directamente de la curva y el  $k$  medio del ciclo resulta del punto de la rama descendente al cual se efectúa la cosecha o recolección de los frutos.

Grassi (1966) en base a relaciones estudiadas por Grassi-Christiansen, Grassi (1964), entre  $E_t/R_s$ ,  $E_t/E_v$  y  $E_t/E_{tp}$ , en función del tiempo relativo, encontró que la ecuación (5.3.4) es aplicable a cualquiera de dichas relaciones, obteniendo una ecuación promedio que permite estimar los valores de  $k$  en función de  $V_c\%$ , cuando se conoce el valor de  $K$  medio del ciclo.

La Fig. 5.5.2, incluye varias curvas para los valores de  $k$  más comunes, y la Tabla 5.5.1, los valores de  $k$  con intervalos de  $V_c = 10\%$  y las correspon-

dientes áreas bajo la curva resultante de integrar la ecuación promedio entre los límites correspondientes.

Dicho procedimiento es aplicable a cultivos anuales, y posiblemente pueda extenderse a frutales de hoja caduca; o sea, a los casos que constituyen los mayores problemas al estimar los requerimientos de agua.

La literatura incluye diferentes valores medios,  $K$ , de la evapotranspiración relativa. Blaney-Criddle (1950) han determinado coeficientes de cultivo  $K$ , variables para diferentes cultivos, aplicables a la fórmula propuesta por ellos; Reiss (1937), con respecto al evaporímetro Piche, determinó un  $K=0.60$ ; Penman (1948), con respecto a la evaporación estimada de una superficie libre de agua, un  $K=0.75$ ; Grassi (1964), promediando gran número de datos experimentales obtenidos en el oeste de los Estados Unidos, obtuvo las siguientes relaciones:

$$E_t/R_s = 0.45; \quad E_t/E_v = 0.75; \quad E_t/E_{tp} = 0.77$$

#### 5.6 Discusión de las fórmulas para estimar evapotranspiración

Dado las variables que intervienen en la evapotranspiración real, la comprobación de las fórmulas han sido planteadas en condiciones de una máxima dependencia de los factores físicos, tal como se presenta con la evapotranspiración potencial. Para ello se han empleado lisímetros con una completa cobertura vegetal, sin limitaciones de humedad edáfica.

Además, para establecer la validez de un proceso estimativo, debe tenerse en cuenta el lapso para el cual se estima: algunos métodos han sido desarrollados para valores mensuales, otros para períodos reducidos de una a dos semanas y finalmente otros pueden pronosticar valores diarios con aceptable precisión.

Desde el punto de vista aplicado, en estudios del balance hídrico de una localidad y de requerimientos de agua de los cultivos, interesa la estimación para períodos de dos semanas a un mes. Con tal criterio, se discuten las fórmulas y procedimientos más conocidos en la literatura: Thornthwaite, Penman,

Blaney-Criddle y evaporación del tanque. Dichos procedimientos han sido comprobados en lisímetros por Pruitt (1960, 1962, 1964), por Stephens y Stewart (1963) y por Eagleman (1967).

En la Figura 5.6.1 y en la Figura 5.6.2, se incluyen gráficos tomados de Pruitt (1964), que condensan cuatro años de observaciones de valores mensuales de evaporación potencial, los que se dibujan nuevamente con datos expresados en mm/día. En la Fig. 5.6.1, se representa la ecuación de regresión entre  $E_{tp}$  media del mes y el valor mensual estimado de  $E_o$  de Penman,  $E_{tp}$  de Thornthwaite,  $(p.t)/100$  de Blaney-Criddle, y  $E_v$  del tanque. En la Fig. 5.6.2 en cambio, se representa la variación mensual de  $E_{tp}/E_o$ ,  $E_{tp}/E_{tp}(\text{calc})$ ,  $E_{tp}/f$  y  $E_{tp}/E_v$ . Dado que las condiciones de los ensayos --completa cobertura vegetal y sin limitaciones de humedad edáfica-- la relación anterior debe ser aproximadamente constante, la mayor o menor constancia de la misma es una expresión del comportamiento de la fórmula.

Con la fórmula de Penman, se ha obtenido un alto coeficiente de correlación  $r$  y la recta que representa la ecuación de regresión, se encuentra muy próxima a la de  $45^\circ$ . La marcha mensual de  $E_{tp}/E_o$ , muestra una razonable constancia de la misma, que sin duda mejora y se aproxima a la unidad, mediante el empleo de los coeficientes previstos en la ecuación.

La fórmula de Penman es el resultado de un racional planteo físico, pero se basa en varios factores meteorológicos, que no se observan sino en las estaciones meteorológicas de primera categoría. Estudios de comprobación realizados por Tanner y Pelton (1960) y por Aziz (1961) con datos diarios de evapotranspiración, mostraron errores al aplicar la fórmula en condiciones de aridez y semi-aridez, dado que no tiene en cuenta el efecto de energía advectiva. Al ser desarrollada la fórmula para estimar  $E_{tp}$ , se requieren coeficientes variables para cada cultivo a fin de obtener  $E_t$ .

Las pruebas con la fórmula de Thornthwaite, en cambio, dieron mayor desplazamiento de la recta que representa la ecuación de regresión. Las estimaciones en todos los casos han sido inferiores, como se evidencia también al

estudiar la marcha de la relación  $E_{tp}/E_{tp}(\text{calc})$  a lo largo del ciclo. En condiciones de clima húmedo en Florida, Stephens y Stewart (1963), observaron con esta fórmula el coeficiente  $\underline{r}$  más bajo.

En general, los resultados con la fórmula de Thornthwaite no son buenos en condiciones de aridez y semi-aridez, ya que ha sido desarrollada con datos del área húmeda de los Estados Unidos. Van Vijke y De Vries (1963), encontraron un razonable acuerdo al emplear la fórmula de Thornthwaite para valores anuales, pero para valores mensuales notaron retraso, en razón de que para la misma radiación, la temperatura generalmente es mayor en otoño que en primavera. Dado que la fórmula permite obtener  $E_{tp}$ , cabe la misma observación formulada al discutir la de Penman.

La fórmula de Blaney-Criddle, ha arrojado valores superiores en condiciones de bajas exigencias evapotranspiratorias ( $< 5$  mm/día) y valores inferiores con altas exigencias ( $> 5$  mm/día). La gran variación de  $E_{tp}/f$  a lo largo del ciclo, muestra la necesidad de un coeficiente corrector, aún en las condiciones de uniformidad mantenidas en el lisímetro.

El método de Blaney-Criddle, aún cuando emplea los mismos datos que el método de Thornthwaite, presenta la ventaja de haber sido desarrollado en base a datos obtenidos en experiencias de riego, en condiciones de aridez y semi-aridez. Además, incluye un coeficiente  $\underline{K}$  que tiene en cuenta el factor individual de cada cultivo; pero dado que dicho coeficiente varía a lo largo de la estación de crecimiento, la correcta elección de  $\underline{k}$ , para estimaciones mensuales, depende de la experiencia local o del criterio de quien emplea el procedimiento.

La medida de la evaporación en el tanque standard tipo A,  $E_v$ , ha arrojado en las pruebas realizadas en lisímetros, valores superiores a  $\underline{E}$ . La curva de variación de  $E_{tp}/E_v$  a lo largo del ciclo, muestra la mayor constancia, si se comparan entre sí las cuatro relaciones consideradas, poniendo en evidencia claramente la necesidad de un coeficiente reductor cuyo valor oscila alrededor de 0.8.

Dado que la evaporación del tanque es un proceso similar a la evapotranspiración, ya que integra la mayor parte de los factores que intervienen en el mismo, parece ser hasta el presente el procedimiento más confiable. Lamentablemente se trata de un dato escaso, ya que se registra solamente en las estaciones meteorológicas completas; además, los procedimientos que permiten estimar la evaporación del tanque, se basan a su vez en un gran número de factores meteorológicos, algunos de los cuales --tensión de vapor y velocidad del viento-- también son escasos. Los procedimientos propuestos por Hansen (1963), Anderson (1963) y Grassi-Christiansen (1964), permiten obtener la evapotranspiración actual,  $E_t$ , en base a  $E_v$ .

Teniendo en cuenta que las fórmulas que se discuten han sido desarrolladas en países de latitudes medias, de clima templado, incluyen parámetros climáticos que cambian sustancialmente a lo largo del año y aún durante la estación de crecimiento, tal como ocurre con la radiación solar, la temperatura del aire y la duración del día. Por lo tanto, están estructurados para detectar diferencias en la velocidad de evapotranspiración, mediante diferencias notables en el valor de dichos parámetros.

En las áreas del Trópico, las variaciones de la temperatura media a lo largo del año son mínimas, así como las diferencias en los valores tabulados de la radiación teórica y la duración del día. Sin embargo, la velocidad de evapotranspiración y de evaporación de una superficie libre de agua cambia sustancialmente según el régimen de lluvias, ya que un importante efecto de advección se produce en "verano" (invierno astronómico) durante el período de sequía. La Fig. 4.1.1, obtenida de experiencias en clima tropical, es al respecto suficientemente explicativa.

En la Fig. 5.6.3 se incluye la estimación de la evapotranspiración potencial y la evaporación del tanque con la mayoría de los procedimientos que hemos considerado, correspondiente a una localidad del Trópico, comparativamente con la medida directa de la evaporación en el tanque standard tipo A; al respecto, se ha empleado el procedimiento de Penman, utilizando el nomograma de Kohler, et al., Fig. 5.1.3,; el de Jensen y Haise, ecuación (5.2.2); el de Blaney-

Criddle, ecuación (5.4.2); y el de Hargreaves, ecuación (5.4.5), asumiendo  $k = 1,00$ . El mayor acuerdo se obtiene con la fórmula de Penman y la de Hargreaves, y particularmente con la primera, comparativamente con las basadas en datos de temperatura y duración teórica astronómica del día.

## 6. BALANCE HIDRICO Y NECESIDAD DE RIEGO

El proceso inverso al de agotamiento de la humedad edáfica por evapotranspiración, lo constituye el aporte hídrico por diversos conceptos: precipitación, ascenso del agua por capilaridad, condensación del vapor acuoso.

El movimiento del agua en estado de vapor producido por diferencias de potencial y la condensación de vapor acuoso en la capa de suelo que exploran las raíces, es generalmente de escasa importancia práctica. El ascenso de agua por capilaridad tiene significación en condiciones muy especiales de conductividad capilar de los suelos, distancia a la superficie freática y calidad del agua; y en tal caso, debe considerarse como un aporte hídrico de alguna importancia.

### 6.1 Precipitación

En la generalidad de los casos, la precipitación representa la casi totalidad del aporte hídrico al suelo.

Del agua que cae sobre la superficie del terreno, parte es interceptada por la vegetación (intercepción foliar), parte infiltra y se incorpora a la capa radical, parte percola debajo de las raíces del cultivo y parte escurre sobre la superficie del terreno. La proporción de agua retenida en la capa radical con relación a la lluvia, depende de las características del terreno para recibir agua: condiciones físicas y grado de humedad, cobertura, pendiente; y de las características de la lluvia: altura, intensidad, duración y frecuencia.

La relación entre la altura de la lámina retenida en la capa radical del

suelo y la que representa la precipitación, es una medida de la eficiencia de la misma. En los cálculos, debe en consecuencia tenerse en cuenta la precipitación efectiva,  $P_e$ , que es igual a la precipitación,  $P$ , multiplicada por un coeficiente menor que la unidad.

Si bien, en base a los datos de velocidad de infiltración y de intensidad de precipitación, ambos variables en función de tiempo, es posible calcular  $P_e$  para un determinado evento, no es sencillo asignar valores a  $P_e$  cuando se cuenta con un determinado registro de promedios mensuales o estacionales.

Un método citado por Anderson (1963), consiste en descartar 0,5 pulgadas (12,5 mm) por cada tormenta y tomar el 80% del resto, en tal caso:

$$P_e = P \cdot 0,8 - n \cdot 12,5 \quad \dots \dots \dots (6.1.1)$$

donde:

$P$  es la precipitación media del período considerado  
 $n$  es el número de eventos.

Otro método citado por Blaney-Criddle (1962), consiste en aplicar coeficientes decrecientes por cada una pulgada (25mm) de incremento en el total de lluvia mensual, conforme se señala seguidamente:

Precipitación mensual	Precipitación efectiva mensual		
	Coefficiente	Incremento	Acumulado
mm		mm	mm
25	0.95	24	24
50	0.90	22	46
75	0.82	20	66
100	0.65	16	82
125	0.45	11	93
150	0.25	6	99
150	0.05	1	-

En la Figura 6.1.1 se representa la precipitación efectiva en función de la precipitación mensual.

Al sistematizar los terrenos para el riego, el hombre a través del diseño controla la efectividad de la precipitación, reduciendo la escorrentía aunque en condiciones de elevada precipitación esto trae como consecuencia el aumento de las pérdidas por percolación profunda.

Dado que la precipitación es un factor muy variable, conviene conocer su valor probable mediante el análisis estadístico para obtener la precipitación que realmente contribuye al uso consuntivo. Para ello se colocan los  $n$  valores de precipitación mensual,  $P$ , en orden decreciente, asignándole a cada uno un número de orden o rango,  $m$  decreciente. Luego se calcula la frecuencia  $F$ , o probabilidad de ocurrencia, mediante la ecuación:

$$F = \frac{m}{n + 1} \quad \dots \dots (6.1.2)$$

Se representa luego en un papel de probabilidades, los valores de altura de  $P$  en función de  $F$ , trazando por todos los puntos una línea recta compensadora que permite obtener datos adicionales por extrapolación.

Un buen ajuste debe seguir la recta determinada por tres puntos:  $\bar{y}$ ,  $\bar{y} + \sigma$ ,  $\bar{y} - \sigma$ , siendo:

$\bar{y}$  el valor promedio aritmético de los  $n$  datos

$\sigma$  la desviación standard.

La desviación standard,  $\sigma$ , resulta de la ecuación:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (y - \bar{y})^2}{n - 1}}$$

El período o intervalo de retorno de un determinado evento,  $T$ :

$$T = \frac{1}{1 - F}$$

En la Tabla 6.1.1 y Fig. 6.1.2, se incluye un ejemplo completo calculado por Ochoa (1966).

El riesgo a correr, depende lógicamente del valor económico del cultivo. En general, para una agricultura de riego donde se realizan inversiones con siderables, conviene trabajar con una probabilidad del 80%; ello significa, que, dos años de cada diez podría producirse una precipitación mensual menor de lo previsto. En el caso de cultivos forrajeros, en cambio, puede adoptarse una probabilidad menor.

## 6.2 Capacidad de almacenaje de agua en el suelo

La capacidad de almacenaje de agua en el suelo y su disponibilidad para la planta, está comprendida entre el contenido hídrico que comprende la Capacidad de Campo,  $W_c$ , y el Punto de Marchitamiento Permanente,  $W_m$ .

Dado que  $W_c$  representa la capacidad máxima capilar de un suelo, la que a su vez está relacionada con el tamaño de sus partículas, ella depende fundamentalmente de la textura. La Tabla 6.2.1, tomada de Israelsen y Hansen (1962) incluye valores para suelos de diferente textura y el posible rango de variación para cada tipo. Con relación a los valores de energía de retención de agua, está dentro del orden de 1/10 bares de succión matriz en suelo arenoso, 1/3 bares en suelo franco y 1/2 bares en suelo arcilloso.

En cambio,  $W_m$  representa el límite inferior de aprovechamiento de agua del suelo por las plantas. Algunas fuentes de error se presentan en su determinación, ya que el  $W_m$  al igual que  $W_c$ , es un término dinámico, que debe ser considerado como una región de contenido de humedad; sin embargo, se acepta comúnmente las 15 bares de succión matriz, como límite inferior de disponibilidad de agua para los cultivos. Como en la generalidad de los casos, la relación  $W_c/W_m$  oscila entre 2 y 2,5, en la práctica se ha empleado esta relación para determinar  $W_m$  en base a  $W_c$ .

La Tabla 6.2.1, incluye asimismo para suelos de diferente textura, valores de disponibilidad de agua para las plantas, con relación al peso de suelo seco

y con relación al volumen de suelo; expresados en por ciento y en lámina equivalente de agua en mm por cada 100 cm de profundidad del suelo.

Si  $W_c$  y  $W_m$  se expresan en por ciento de peso seco, la lámina de agua disponible,  $d$ , se calcula por la siguiente ecuación:

$$d = \frac{W_c - W_m}{100} \rho_a D \quad \dots \dots (6.2.1)$$

La representación de las curvas de contenido hídrico con relación a la energía de retención, muestran claramente que las mismas son distintas para diferentes tipos de suelo. Dado que, para el mismo contenido, la tenacidad con que está retenida el agua es mayor en suelos finos (arcillosos) que en gruesos (arenosos), el agua resulta más accesible a las plantas en suelos de textura gruesa con un menor contenido hídrico, que en suelos de fina textura. Determinaciones realizadas en el Instituto de Suelos y Riego, Mendoza, Argentina, con suelos locales, muestran que con una succión matriz de 1 bares, el contenido hídrico es de 75,6% en suelo franco arenoso de la Consulta y de 30,18% en suelo arcillo-yesoso del Sauce.

### 6.3 Profundidad de exploración y hábitos radicales de los cultivos

El muestreo de suelo, con un determinado intervalo después de un riego o lluvia, permite definir la potencialidad del sistema radical. La Fig. 6.3.1 muestra la profundidad,  $D$ , a la cual no se produce cambio en el contenido del agua. Ello no es absolutamente exacto, ya que el movimiento lento en terreno no saturado, reduce el contenido hídrico del suelo, aún fuera de la acción radical.

El agua extraída, puede representarse gráficamente en porcentaje absoluto, en porcentaje relativo al total del agua disponible, o en altura de la lámina de agua. Un procedimiento recomendable, es dividir  $D$  en cuatro capas, en coincidencia con las capas de muestreo y expresar el agua extraída en cada capa, en porcentaje del total, Fig. 6.3.2. El cuadro típico de distribución radical, obtenido por el proceso expuesto, puede asimilarse a un triángulo equi-

látero con el vértice hacia abajo. En tal caso, dividiendo  $D$  en cuatro capas, la cantidad de agua extraída en cada una de arriba hacia abajo, sería 40%, 30%, 20%, 10%.

Existen varios factores que modifican el cuadro típico expuesto, y que se pueden agrupar en los siguientes puntos: 1) cultivo; 2) naturaleza física del suelo y características del perfil; 3) régimen pluviométrico y de riego; 4) nivel del plano freático con relación a la capa radical.

Se presentan como consecuencia de las referidas variables diferencias en las características del sistema radical de los diferentes cultivos. La profundidad está relacionada con el tamaño del cultivo; y ello a su vez con el lapso de vida de los mismos. En los cultivos permanentes: forestales, frutales y alfalfa,  $D$ , supera en suelo de textura media 1.50 m a 2 m; mientras que en los cultivos estacionales, sólo alcanza en las mismas condiciones entre 0.50 y 1.00 m. En los cultivos estacionales, a su vez, cabe distinguir entre los hortícolas de ciclo corto y de raíces someras (entre 0,30 y 0,50 m), y los cereales e industriales de ciclo de mayor duración, que pueden alcanzar 1.00 m de profundidad.

Las características físicas y en especial la textura del suelo, tienen una gran influencia en la profundidad radical. Los suelos de textura gruesa permiten una mayor exploración de las raíces, que los de textura fina. En suelo arcilloso, la profundidad de las raíces puede ser la mitad de la que es común en un suelo en condiciones medias. Combinaciones de profundidad y de condiciones físicas, representan diferentes capacidades de almacenaje de agua a disposición de los cultivos.

La Tabla 6.3.1 de Thornthwaite-Matter (1957), permite estimar la profundidad de exploración radical y la disponibilidad de agua para el cultivo, de acuerdo a la textura del suelo y el tipo de cultivo. Para el caso de la vegetación natural, los mapas de suelo y de vegetación de un área proveen la información requerida al respecto. Conocidas las áreas absolutas porcentuales  $A$  de diferentes cultivos y/o especies naturales y las capacidades de almacenaje

de agua en la profundidad de exploración radical del suelo, se obtiene en pro medio ponderado d:

$$d = \frac{d_1 \cdot A_1 + d_2 \cdot A_2 + \dots + d_n \cdot A_n}{A_1 + A_2 + \dots + A_n}$$

#### 6.4 Exceso y deficiencia de agua

Al enfrentar los valores de evapotranspiración potencial de un determinado período,  $E_{tp}$ , con la precipitación media,  $P$ , se tiene un cuadro de las posibles deficiencias o de los sobrantes de agua. Sin embargo, dado que el suelo almacena agua, su capacidad de reserva debe ser considerada en el balance hídrico.

Conocidos los aportes en concepto de precipitación  $P$ , ascenso capilar  $d_{ca}$ ; y además, la evapotranspiración de un período de días, es posible plantear un balance hídrico asumiendo una determinada capacidad de almacenaje,  $d$ , que depende de las circunstancias apuntadas. De esta manera, para cada período, --una semana o un mes-- por ejemplo, en el cual  $\sum^n E_{tp} = ETP$ , y cantidad inicial de agua almacenada,  $d_i$ , el exceso o deficiencia de agua resulta:

$$(d_i + P + d_{ca}) - ETP > d \quad \dots \dots \dots \text{Exceso}$$

$$(d_i + P + d_{ca}) - ETP < 0 \quad \dots \dots \dots \text{Deficiencia}$$

Siguiendo el procedimiento de Thornthwaite (1948), para un año en el cual se opera con valores mensuales, el balance se inicia a continuación de un período en el cual los aportes, lluvia, superan notablemente la evapotranspiración, en cuyo caso está colmada la capacidad de almacenaje; o contrariamente, después de un período durante el cual se han sucedido varios valores de ETP, superiores a  $P$ , por lo que el almacenaje será nulo.

En la Tabla 6.4.1 se agrega, a modo de ejemplo, el balance hídrico de Morana, Estado Cojedes, Venezuela, calculado en base a la evaporación del tanque. Los valores consignados marcan un período de déficit de agua que se extiende

desde el mes de enero a abril; un período de exceso de junio a octubre; un período de almacenamiento de agua en el suelo en mayo; y un período de consumo de la reserva de humedad edáfica en noviembre y diciembre, Fig. 6.4.1.

El balance hídrico, puede realizarse con cualquiera de las fórmulas para estimar evapotranspiración y fijando la capacidad de almacenaje,  $d$ , que corresponde, de acuerdo a las características de los suelos y cultivos que se presentan en el caso particular en consideración.

El período de déficit marca el lapso en el cual los cultivos dependerán del riego artificial y la lámina de agua aproximada que representa la necesidad de riego. El período de exceso, por el contrario, da una indicación de la posible existencia de problemas de drenaje superficial y/o subterráneo, si es que no existen condiciones naturales que faciliten la evacuación de los excedentes; y a su vez, permite cuantificar el grado de recarga de los acuíferos subterráneos.

La profundidad de exploración radical y la lámina de agua disponible para el cultivo, modifican el comportamiento del balance hídrico en cuanto a monto de las deficiencias y los excesos y en particular con relación a la eficiencia de la precipitación.

Si se repite el balance hídrico del ejemplo incluido en la Tabla 6.4.1, con  $d = 50$  mm, con  $d = 150$  mm y con  $d = 250$  mm, se obtendrán los resultados siguientes, como resumen de valores anuales:

d mm	Exceso		Deficiencias	
	mm	meses	mm	meses
50	606	6	554	5
150	506	5	454	4
250	406	5	354	2

Otra variante la constituye el lapso o intervalo adoptado para efectuar el balance. Teniendo en cuenta que los datos climáticos se publican en promedios

mensuales, generalmente, éste es el intervalo que se adopta. Sin embargo, dado que la evapotranspiración y los elementos climáticos de los cuales depende: radiación, temperatura, tensión de vapor, etc., son fenómenos continuos y la precipitación es un fenómeno esporádico, puede haber diferencias notables en el resultado del balance, al alargar o acortar el período.

Un balance hídrico con intervalos de una semana permitirá individualizar períodos de sequía de una, dos o tres semanas, que en ocasiones afectan sensiblemente el rendimiento de los cultivos; en especial cuando por tratarse de cultivos anuales, de raíces superficiales, las diferencias aumentan al disminuir la capacidad de almacenaje de agua durante el período de lluvias.

Otro aspecto digno de consideración es el posible cambio en los resultados del balance hídrico, como consecuencia de las variaciones en la precipitación en diferentes años. Esto no tiene mayor importancia en los climas áridos, pero es de gran importancia en los climas húmedos, dado la enorme dependencia del balance de energía del régimen de precipitación.

En áreas del Trópico con clima de sabana, caracterizado por la presencia de un período seco y otro lluvioso, se observa un comportamiento opuesto al comparar el régimen de evaporación y el régimen de lluvias. De lo expuesto, surge que las variaciones en la precipitación, tienen un gran significado en el balance hídrico, de allí la conveniencia de repetirlo para períodos de 3 a 5 años, reconocidos en la serie de registros como períodos de años secos y de años húmedos; o incluso con todos los valores que comprende la serie para individualizar los años y meses con máximo déficit o exceso de agua.

#### 6.5 Necesidad de riego

La necesidad de riego o requerimiento de riego durante un período, de determinado cultivo en particular, que aparece con un posible déficit en el balance hídrico, resulta de restar a la evapotranspiración actual:  $\sum^n E_t = ET$ , la precipitación efectiva  $P_e$ , y al aporte de humedad del perfil,  $d_1$ , que es igual a la diferencia de la lámina inicial y final del período; y el eventual aporte de un nivel freático alto,  $d_2$ . Por lo tanto:

$$N_r = ET - (P_e + d_1 + d_2) \quad \dots \dots \dots (6.5.1)$$

Dado que el balance hídrico general de un área y la necesidad individual de riego de cada cultivo, puede calcularse para diferentes intervalos de tiempo y con datos promedios de diferentes series de registros y de capacidades de almacenaje de agua en el suelo, es posible a través de este análisis, detectar necesidades permanentes: riego integral, o necesidades temporarias: riego suplementario o eventual.

El riego integral generalmente se justifica cuando aparece un déficit bien marcado, de varios meses, durante los cuales no se pueden realizar cultivos sin riego artificial. El balance hídrico con valores climáticos mensuales lo señalará generalmente con toda claridad. En el caso del riego suplementario, el déficit requerirá un análisis más detallado, en lapsos más cortos para individualizar posibles períodos de sequía.

## 7. PERDIDAS Y DESPERDICIOS DE AGUA EN UN SISTEMA DE RIEGO

En todo sistema de riego, se producen pérdidas y desperdicios de agua que deben ser evaluados a fin de determinar la factibilidad técnica, económica y social del proyecto. El planificador y el proyectista, se enfrentan al evaluar pérdidas y desperdicios, con una tarea difícil, teniendo en cuenta la es casa correlación obtenida entre diversos factores de diferentes proyectos exis tentes, y el número de aspectos imponderables que intervienen.

La eficiencia de uso del agua en un proyecto de riego, depende no sólo de las condiciones edafoclimáticas del área de diseño, construcción y operación de la obra, sino de los factores de orden agrícola, económico, social, legal e institucional, que juegan un rol preponderante. De allí que los datos obte nidos en un proyecto, deben ser trasladados con mucha cautela a otro proyecto, ya que la motivación para el uso eficiente del agua puede variar sustancialmente de una zona a otra: mercadeo de la producción, régimen legal del agua, competencia de los agricultores, etc. La experiencia y el criterio del proyectista se debe evidenciar en el adecuado uso de los datos disponibles, para

ajustarlos a las condiciones del proyecto en estudio.

Muchos de los proyectos antiguos operan con baja eficiencia, ya que los recursos técnicos a la época de su construcción y el valor económico del agua, en condiciones de abundancia, eran menores. En los actuales proyectos de desarrollo agrícola en base a riego, la meta no es conducir y entregar el agua en la toma de cada propiedad, sino que va más allá, incluyendo el sistema de distribución interna y el desarrollo físico de las tierras y los métodos de aplicación de agua. Ello unido a la mayor atención que debe prestarse a la operación de una obra, redundará sin duda en un aumento de las eficiencias en los futuros regadíos.

Las pérdidas, en general, son proporcionalmente mayores durante los primeros años de desarrollo de un proyecto; la mayor infiltración en la red de canales, la inadecuada preparación de los terrenos para el riego y la falta de experiencia en el personal encargado de la operación, son los factores que inciden en el mayor monto de las pérdidas y desperdicios.

Ello no perjudica la etapa de puesta en cultivo de los terrenos, pero crea en usuarios y operadores, la idea de abundancia de agua, reduciendo la eficiencia de su aprovechamiento. Luego, a medida que aumenta el área cultivada, resulta difícil reducir el abastecimiento de agua, ya que la sistematización del terreno y los cultivos implantados, a veces de carácter permanente, son aptos para regar con grandes láminas de agua.

Si bien en los tópicos que a continuación se discuten, se incluyen datos de pérdidas y desperdicios, conforme a la experiencia que brindan los sistemas de riego existentes, el presente trabajo pone especial énfasis en la adopción de eficiencias razonablemente altas, para alcanzar altas relaciones de beneficios sociales y económicos con respecto al costo de la obra; y acondicionar su diseño y desarrollo con miras a lograr la meta trazada, Grassi (1967).

El gráfico, Fig. 2.0.0, señala claramente la secuencia en las pérdidas y

desperdicios, que se producen en un sistema de riego que incluye derivación, regulación, conducción y aplicación de agua al cultivo. A los fines de su tratamiento, las consideramos agrupadas en: 1) pérdidas y desperdicios en la propiedad; 2) pérdidas y desperdicios en el sistema general de riego; en ambos casos se considera como valor numérico la eficiencia; la diferencia con la unidad o 100, según que se exprese en forma decimal o en porcentaje.

### 7.1 Pérdidas y desperdicios de agua en la propiedad

Las pérdidas y desperdicios de agua en una propiedad irrigada, se producen en el sistema de distribución o red de riego de la propiedad, así como durante la aplicación de agua a las parcelas en que se divide el área irrigada.

Los factores que inciden en las pérdidas y desperdicios y por lo tanto en la eficiencia de riego, tal como se explicó anteriormente, son varios más que los de orden estrictamente edáfico. Sin embargo, dado que es prácticamente imposible tabular valores en función de todas las variables, se agrega a continuación una tabla típica preparada por Blaney y Criddle (1962), donde las pérdidas de agua (y eficiencias) se expresan en función de las características físicas de los suelos, a saber:

	TIPO DE SUELO		
	Liviano (arenoso)	Medio (franco)	Pesado (arcilloso)
	%	%	%
Pérdidas en los laterales sin revestir	15	10	5
Pérdidas por escurrimiento superficial	5	10	25
Pérdidas por percolación profunda	35	15	10
Eficiencia de riego en la parcela	60	75	65
Eficiencia de riego en la propiedad	45	65	60

Se analizan separadamente las pérdidas y desperdicios en la red de distribución interna de la propiedad y las pérdidas y desperdicios en la aplicación de agua a la parcela.

### *Pérdidas y desperdicios en el sistema de distribución de la propiedad*

Comprende las pérdidas de agua por infiltración, y por evaporación, en todo el recorrido de las acequias primarias, secundarias y terciarias; y los desperdicios por escurrimiento, como consecuencia de fugas a través de los bordes de las mismas.

Las pérdidas por evaporación directa a través de la superficie libre de agua tienen poca importancia, dado la reducida área evaporante que en general totaliza el sistema de riego de una propiedad. La infiltración, en cambio, depende de la naturaleza física del terreno, de la superficie de infiltración que representa el cauce de las acequias, y del régimen de funcionamiento de las mismas.

### *Pérdidas de agua en la parcela irrigada*

En la parcela irrigada se producen pérdidas: 1) al pie de la misma, por escurrimiento; 2) debajo del horizonte de raíces, por percolación profunda; 3) evaporación, durante el riego. La primera constituye una pérdida relativa, o sea un desperdicio, ya que en determinadas condiciones, integra el caudal con que se riega otra parcela de la propiedad; mientras que las otras dos representan generalmente para la propiedad una real pérdida, pues el agua que se evapora o que supera la capa de raíces, no puede ser aprovechada en el mismo terreno.

El método de aplicación de agua tiene incidencia en la magnitud y tipo de pérdidas. En riego por aspersión, predominan las pérdidas por evaporación, mientras que en riego por superficie son mayores las pérdidas y desperdicios por infiltración debajo del sistema radical y por escurrimiento al pie. Las pérdidas por evaporación directa en riego por aspersión pueden llegar a 10% en condiciones de alto poder evaporante de la atmósfera. Oriolani y Grassi (1963), comprobaron en pleno mediodía del verano en Mendoza, Argentina, una pérdida del 11,5% por tal concepto.

Las pérdidas y desperdicios en riego por superficie, dependen de la capacidad de infiltración del suelo y de la relación entre el tiempo requerido para

aplicar a la capa radical una determinada lámina de agua y el tiempo que demora el agua sobre la superficie para llegar al final de la parcela: tiempo de escurrimiento o de "mojado".

Kostiakov, citado por Tschapek (1966), relaciona la lámina de agua infiltrada,  $\underline{d}$ , con el tiempo,  $\underline{t}$ , mediante la siguiente ecuación:

$$\underline{d} = K \underline{t}^m \quad \dots \dots (7.1.1)$$

Los valores numéricos de los parámetros  $\underline{K}$  y  $\underline{m}$ , se obtienen al representar, Fig. 7.1.1, en escala doble logarítmica, los valores de  $\underline{d}$  en función de  $\underline{t}$ , obtenidos por medio de un ensayo experimental. En tal caso,  $\underline{K}$  es la ordenada en origen de la recta envolvente de los puntos representados, y  $\underline{m}$  es la pendiente de la recta.

Despejando de la ecuación (7.1.1), el tiempo para aplicar a una determinada lámina neta  $\underline{d}_n$ , se obtiene el tiempo de riego,  $\underline{tr}$ :

$$\underline{tr} = \left( \frac{\underline{d}_n}{K} \right)^{\frac{1}{m}} \quad \dots \dots (7.1.2)$$

La relación entre el tiempo de riego,  $\underline{tr}$ , y el tiempo de escurrimiento o de mojado,  $\underline{te}$ , será en consecuencia:

$$R = \underline{tr}/\underline{te} \quad \dots \dots (7.1.3)$$

Bishop (1962) derivó en función de  $\underline{R}$  y  $\underline{m}$ , la siguiente ecuación para determinar el porcentaje de agua percolada, con relación al total de agua aplicado:

$$P_P = \frac{(R + 1)^m - R^m}{(R + 1)^m + R^m} 100 \quad \dots \dots (7.1.4)$$

La Figura 7.1.2 permite obtener gráficamente dichas pérdidas, en función de  $\underline{R}$  y de  $\underline{m}$ .

Keller, en base a un trabajo de Willardson y Bishop (1967), ha asimismo confeccionado curvas, Fig. 7.1.3, que permiten obtener las pérdidas por escurrimiento al pie de la parcela, en función de  $R$ . Dichos autores representan en la parte inferior del gráfico los valores de  $P_p$  en función de  $R$ , para distintos valores de  $m$ . La distancia entre las dos curvas para cada valor de  $R$ , medida en la ordenada del gráfico, representa la pérdida total por escurrimiento y por percolación, en porciento del agua aplicada.

De la ecuación (7.1.4), resulta un aumento de las pérdidas por percolación a medida que disminuye  $R$ , pero el gráfico, Fig. 7.1.3, muestra aún con valores extremos de  $m$ , una amplia gama de valores de  $R$  para los cuales la eficiencia es máxima. Esto pone en evidencia que, dado la complementación de las pérdidas a que se ha hecho referencia, no puede esperarse una significativa variación en la eficiencia si se logra una adecuada relación  $R$  durante el riego.

#### *Eficiencia de aplicación de agua*

La eficiencia de aplicación de agua o eficiencia de riego,  $E_{fr}$ , es la relación entre el volumen o lámina neta de agua incorporada o almacenada,  $d_n$ , en la capa edáfica que exploran las raíces y luego empleada en el proceso evapotranspiratorio, y el volumen o lámina de agua derivado,  $d_d$ , a saber:

$$E_{fr} = \frac{d_n}{d_d} \cdot 100 \quad \dots \dots (7.1.5)$$

La lámina de agua derivada en la toma de la propiedad,  $d_d$ , se reparte de la siguiente manera:

$$d_d = d_n + d_e + d_p + d_{in}$$

donde:

$d_e$  es la lámina de agua escurrida al pie de la parcela

$d_p$  es la lámina de agua percolada debajo de la capa radical

$d_{in}$  es la lámina de agua infiltrada en el sistema de distribución interno de la propiedad.

Keller (1965) ha graficado al respecto, relaciones entre la eficiencia de riego con diferentes métodos y la lámina de agua almacenada en el suelo al alcance de las raíces del cultivo, resultando en todos los casos una relación lineal positiva, donde las mayores eficiencias se logran al aplicar cinco pulgadas (127 mm) de agua, Fig. 7.1.4.

Keller y McCulloch (1962), han tabulado asimismo valores de eficiencias de riego con métodos de riego por superficie, Tabla 7.1.1, y por aspersión, Tabla 7.1.2; en el primer caso, en función de la textura del suelo y la topografía, y en el segundo caso en función de la lámina de agua a aplicar, la velocidad del viento y de la evapotranspiración máxima. En dichas tablas, pueden observarse valores extremos que van desde el 20% al 75% en riego por superficie, y desde el 58% al 80% en riego por aspersión.

En términos generales, puede considerarse un 65% como una eficiencia razonablemente buena, cuando se riega por superficie, y un 75% en riego por aspersión. Houk (1951), después de analizar un gran número de proyectos, concluye que la eficiencia de riego, para cultivos comunes osciló entre 20% y 50%; y para cultivos especiales y frutales entre 35% y 70%.

Según Jensen et al. (1967), el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, considera que, con adecuada selección, diseño y operación de los métodos de riego, los agricultores logran eficiencias del 70 al 75%. Sin embargo, en promedio, sólo el 47% del agua a disposición de una propiedad se incorpora al horizonte de raíces de los cultivos.

#### *Pérdidas debidas a los requerimientos de lixiviación de sales*

En determinadas condiciones, las pérdidas por percolación profunda, están impuestas por las necesidades de lavado de los terrenos que presentan un alto contenido de sales solubles, o por la naturaleza salina de las aguas empleadas en el riego.

En los suelos calificados como "salinos", de acuerdo a los standards de clasificación del Soil Salinity Laboratory (1954) y que son los que tienen

una conductividad eléctrica en el extracto a saturación,  $CE \cdot 10^3 > 4.0$  mmhos y un porcentaje de sodio intercambiable,  $PSI < 15$ , la disminución de su contenido salino se logra mediante la práctica del lavado. Para ello, se agrega al suelo una lámina excesiva de agua, cuya magnitud depende de la profundidad de suelo a lavar, de su contenido salino inicial y del grado de sensibilidad de los cultivos a la salinidad. Reeve, citado por Christiansen (1966), obtuvo para las condiciones del Coachella Valley, California, la siguiente expresión:

$$d_L/D = \frac{1}{5 (C_f/C_i)} + 0.15 \quad . . . . . (7.1.6)$$

donde:

$d_L$  es la lámina de agua de lixiviación requerida

$D$  es la profundidad de suelo a lavar

$C_f$  es el contenido promedio final de sal en el suelo

$C_i$  es el contenido promedio inicial de sal en el suelo.

Una regla práctica citada por Christiansen (1966), establece que la aplicación de una determinada profundidad de agua, reducirá el contenido de sal de una igual profundidad de suelo, a una pequeña fracción de su contenido inicial. Dado que el desarrollo físico de los terrenos en los proyectos de riego, se realiza en forma sucesiva en áreas parciales, en oportunidad de abundancia de agua, generalmente no se requiere prever una especial disponibilidad de recursos hídricos para estos fines.

Cuando, en cambio, son las aguas usadas en el riego, las que presentan un alto contenido salino, se requiere regularmente la aplicación de un exceso de agua durante el riego, para evitar que aumente su concentración en la fase líquida del suelo. Dicho excedente se denomina "requerimiento de lixiviación" o de drenaje, y está dado por el porcentaje de agua de riego que debe superar en profundidad la capa radical; el que a su vez es inversamente proporcional a la conductividad eléctrica de las aguas de riego y de percolación, o sea:

$$RL = \frac{d_p}{d_r} \cdot 100; \quad RL = \frac{CE_r}{CE_p} \cdot 100 \quad . . . . . (7.1.7)$$

donde:

RL es el requerimiento de lixiviación o de drenaje

$d_p$  es la lámina de agua percolada

$d_r$  es la lámina de agua de riego

$CE_p$  es la conductividad eléctrica del agua de percolación

$CE_r$  es la conductividad eléctrica del agua de riego.

En tal caso,  $d_r$  comprende la lámina de agua repuesta al suelo  $d_n$ , más la percolación  $d_p$ . En consecuencia,  $d_p$  a emplear en la ecuación (7.1.7) deberá ser:

$$d_p = d_r \cdot \frac{RL}{100}$$

Y la lámina de agua de riego,  $d_r$ :

$$d_r = \frac{d_n}{(1 - RL/100)}$$

Generalmente, la baja eficiencia con que se riega en la práctica compensa en forma indirecta los requerimientos de lixiviación. Sin embargo, con altas eficiencias de aplicación y aguas de baja calidad, puede ser necesario considerar una lámina de agua adicional para mantener un balance de sales que no represente un peligro para la producción del cultivo.

## 7.2 Pérdidas y desperdicios de agua en el sistema de riego

### *Pérdidas en la regulación*

Comprende las pérdidas por evaporación de la superficie libre de agua del embalse y por percolación a través de la superficie de infiltración del vaso. Las pérdidas por evaporación dependen de la velocidad de este proceso y de la superficie de evaporación del embalse.

En condiciones topográficas favorables, la relación del volumen almacenado a área de exposición es alta, con la reducción consiguiente del monto de las pérdidas; mientras con relaciones bajas, desfavorables, las pérdidas relativas

al caudal regulado, son más elevadas en igualdad de exigencias evaporantes de la atmósfera. La curva de altura de presa o de volumen almacenado, ambas en función del área, Fig. 7.2.1, representa un dato valioso para estimar el monto de las pérdidas por evaporación a partir de la ecuación correspondiente.

Las pérdidas por percolación en el embalse, dependen de las condiciones geológicas y de suelo del vaso. Se estiman en base a estudios geológicos y de mecánica de suelos, que se tienen en consideración al seleccionar el sitio de presa.

La eficiencia de almacenaje de agua en el embalse será entonces, la relación entre el volumen de agua derivada para riego del embalse y el volumen de agua afluente al mismo, como agua superficial y subterránea.

#### *Pérdidas y desperdicios en la conducción y distribución del agua*

Las pérdidas en la red de canales que conducen el agua hasta las propiedades irrigadas depende principalmente: 1) de la naturaleza física del terreno; 2) del diseño hidráulico; 3) de la conservación y régimen de funcionamiento del sistema; 4) de la eficiencia de los administradores del proyecto en la operación del mismo.

Los factores que inciden en las pérdidas y desperdicios en los canales son: evaporación de la superficie libre de agua, transpiración de la vegetación nativa en los taludes, infiltración a través del cauce, derrames por los bordes del canal y estructuras hidráulicas.

Las pérdidas por evaporación y por transpiración, no tienen mayor significado en los canales, dado el escaso área que representa su superficie evaporante en relación al caudal en circulación; de modo que la mayor proporción corresponde a la infiltración y a los desperdicios en la operación del sistema.

La bibliografía incluye datos por pérdidas en la red de riego que en términos generales oscilan entre 15 y 45%. Israelsen (1950), consigna al respec

to que en los 17 países del oeste de los Estados Unidos, en el volumen conducido en 1939, en los 200.000 km de canales de riego, las pérdidas representaron el 38%.

Houk (1951) transcribe asimismo una tabla preparada por el Bureau of Reclamation, donde se detallan las pérdidas de agua para gran número de obras durante un período de cinco años, con un promedio del 33% y extremos que van desde el 14 a 44%. Etcheverry y Harding (1933), refiriéndose a pérdidas determinadas en la India, señala oscilaciones entre un 13% y un 55%; aunque este máximo, para sistemas viejos donde ha habido deposición de material limoso, se redujo a un 30%.

De un trabajo de Bistrain (1959), se extractan a continuación datos de pérdidas de agua en distintos sistemas irrigados, consignados a su vez por distintos autores, en diferentes países y condiciones.

Pérdidas	Fuente de Información						
	1	2	3	4	5	6	7
1) Conducción	32,5	30,7	33,2	35,7	47,0	44,0	44,0
2) Desperdicios diversos	15,5	10,8	10,1	8,9	-	-	14,0

Para determinadas condiciones de suelo, las posibles pérdidas por infiltración pueden determinarse en función del perímetro mojado, en  $m^3/m^2$ , en base a la ecuación propuesta por Moritz. Dicha ecuación, descrita en los manuales del Bureau of Reclamation (1961), permite obtener las pérdidas en función del área de la sección de escurrimiento y el tipo de material de que está construido el canal, expresada en pie cúbico por segundo y por milla de canal. Transformando la ecuación para operar en el sistema métrico decimal, la expresión de Moritz, según de Ondiz (1966), se escribe:

$$P_c = 0,0375 C \sqrt{Q/V} \quad \dots \dots (7.2.1)$$

En la ecuación anterior,  $Q$  es el caudal y  $V$  la velocidad de agua en el canal.

En tal caso, las pérdidas  $P_C$  se expresan en  $m^3/s$  por km de canal, siendo los valores de  $C$  los siguientes:

VALORES DE $C$ PARA DIFERENTES MATERIALES	
Clase de Material	$C$ (m)
Franco arcilloso, impermeable	0.08 - 0.11
Franco arcilloso, semi-impermeable sobre arcilla compactada a una profundidad no mayor de 1 m	0.11 - 0.15
Franco arcilloso, ordinario limoso	0.15 - 0.23
Franco arcilloso con arena y grava cementado (conglomerados) arcilla y arena	0.23 - 0.30
Franco arenoso	0.30 - 0.40
Suelos arenosos sueltos con grava	0.55 - 0.75
Roca desintegrada con arena	0.75 - 0.90
Suelos con mucha grava	0.90 - 1.80

Además de los expuestos, otros factores pueden incidir en determinadas circunstancias, tales como la altura del nivel freático con relación al canal, la calidad del agua y presencia de microorganismos, la temperatura del agua y del suelo.

La Fig. 7.2.2 incluye un gráfico preparado por el Bureau of Reclamation para calcular pérdidas por infiltración en los canales, en función de la capacidad de conducción y la velocidad del agua, la que a su vez depende del material de construcción del canal.

En un sistema de riego integrado por una red de canales de diferentes materiales y sección de escurrimiento, la pérdida total,  $P_{CT}$ , que corresponde a los diferentes tramos,  $L$ , en km, de sección  $A$ , en  $m^2$ , será:

$$P_{CT} = P_{C_1} + P_{C_2} + P_{C_3} \dots + P_{C_n} \dots \dots \dots (7.2.2)$$

En tal caso,  $P_{C_1}$ ,  $P_{C_2}$ ,  $P_{C_3}$ ,  $\dots + P_{C_n}$ , se calcula por la ecuación 7.2.1.

Los standards del Bureau of Reclamation (1961), consignan valores de infiltración para canales en tierra que oscilan según material, entre  $0,18 \text{ m}^3/\text{m}^2$  y  $0,33 \text{ m}^3/\text{m}^2$ , por día (24 h.); y para canales revestidos  $0,09 \text{ m}^3/\text{m}^2$  por día. En este caso, el área de infiltración se determina en función del perímetro mojado y la longitud del canal.

Los desperdicios por operación del sistema, en cambio, comprenden las pérdidas como consecuencia de entrega de caudales superiores a la capacidad de conducción de los canales y de funcionamiento de las estructuras de toma; además, las pérdidas directas en las compuertas y las demandas reducidas a causa de lluvias generales. Las pérdidas por operación, en sistemas adecuadamente administrados, no superan el 5%; sin embargo, puede aumentar en forma muy significativa si se descuida este importante rubro.

#### *Eficiencia de conducción de agua*

Finalmente, la eficiencia de conducción,  $E_{fc}$ , que comprende la relación entre el volumen o lámina entregada a las propiedades y el volumen o lámina derivada en la obra de cabecera, se expresa:

$$E_{fc} = \frac{V_d}{V_o} \cdot 100 = \frac{d_d}{d_o} 100 \quad \dots \dots (7.2.3)$$

donde:

$V_d$  y  $d_d$  es el volumen y la lámina derivada por las propiedades

$V_o$  y  $d_o$  es el volumen y la lámina derivada en la obra de cabecera.

#### 7.3 Usos sucesivos de agua

De lo expuesto, se deduce que un bajo porcentaje de agua derivada en la obra de cabecera: presa de derivación o embalse, es realmente evapotranspirada por los cultivos y como consecuencia integrante del proceso productivo. Aún cuando, de acuerdo a lo expuesto, la eficiencia de uso del agua en un sistema de riego debe ser una meta que se traza el proyectista, existen algunas pérdidas y desperdicios controlables sólo parcialmente y otras impuestas por problemas de salinidad en suelos y aguas. El caudal así producido,

podría ser usado nuevamente cuando exista escasez de agua con relación al potencial de desarrollo existente, o se necesita descender los niveles freáticos para resolver problemas de drenaje y/o salinidad en ciertas áreas del proyecto.

Pero aún cuando el agua no se haya empleado para otros usos diferentes al riego, su posición topográfica y su calidad habrá variado. Como lógica consecuencia de la intervención del hombre y del proceso evapotranspiratorio, las aguas disminuyen su calidad a medida que aumenta su uso, lo que ha sido comprobado en gran número de sistemas de riego en operación.

En ausencia de problemas de salinidad, las aguas que escurren por los desagües y las aguas del subsuelo, engrosado su caudal por pérdidas y desperdicios del sistema de riego, pueden ser usadas nuevamente mediante derivación directa o mediante el bombeo.

Un criterio muy aceptable en la actualidad en cuanto al uso de los recursos hidráulicos es el incorporar áreas de bombeo de aguas subterráneas en los proyectos de riego, con el fin de: 1) aumentar la eficiencia de aprovechamiento del recurso hídrico; 2) contribuir a la solución de los problemas de drenaje y/o salinidad de las tierras beneficiadas.

Houk (1951) distingue en el caudal recuperable, el que proviene del flujo de retorno visible y el que proviene del drenaje del subsuelo. Discute los factores que modifican el monto del caudal y su régimen de acuerdo a la experiencia en el oeste de los Estados Unidos. Concluye que en proyectos sin limitaciones en la disponibilidad de agua, el caudal recuperable puede oscilar entre uno y dos tercios del derivado; pero que, en zonas áridas, la disponibilidad de algún recurso estable puede evidenciarse 20 a 30 años después de la iniciación del riego.

Asimismo, Houk (1951), concluye que del caudal anual recuperable, entre el 50 y el 65% vuelve a estar disponible durante la estación de crecimiento y en consecuencia sujeto a un uso inmediato.

## 8. REQUERIMIENTO DE AGUA DEL PROYECTO

Para calcular los requerimientos de agua del proyecto en áreas parciales o en la obra de cabecera, se necesita conocer: 1) el área a regar; 2) el programa de cultivos del proyecto; 3) el ciclo vegetativo de cada cultivo; 4) el uso consuntivo de agua de cada cultivo; 5) la precipitación y demás aportes hídricos; 6) la eficiencia de aplicación del agua, de conducción y de operación del sistema.

Generalmente, interesa el volumen anual, los volúmenes estacionales y mensuales y el volumen que corresponde al período de máximas necesidades. En los cálculos, puede trabajarse indistintamente con volúmenes,  $V$ , o láminas,  $d$ , para determinado tiempo, o con el caudal,  $Q$ .

El cálculo del balance hídrico señala en términos generales los meses de déficit de agua y los períodos en los cuales el régimen de evapotranspiración, de precipitación y de variación de la humedad edáfica, permiten la realización de cultivos.

A fin de poder establecer los requerimientos mensuales del proyecto, se necesita un detalle mayor con respecto al programa de riegos: oportunidad o intervalos entre un riego y otro en los diferentes cultivos y las láminas a aplicar, neta y bruta.

### 8.1 Programa de riego

#### *Frecuencia de riego*

Refiriéndonos a un cultivo típico que cumple todo un ciclo vegetativo, puede señalarse en términos generales los cuidados del riego en las diferentes fases o período vegetativo. Durante el período de crecimiento, se requieren buenas condiciones de humedad en el suelo, dado las crecientes necesidades del proceso evapotranspiratorio. El período de floración, generalmente es crítico para todas las especies vegetales y en consecuencia se requiere un buen abastecimiento de agua en la capa de raíces que se extiende en profundidad. Durante el período de fructificación, el crecimiento aéreo y de las

raíces se ha completado y la velocidad de evapotranspiración comienza a disminuir.

Siendo en tal caso  $E_t$  la evapotranspiración media diaria del período correspondiente, el turno o intervalo de riego será:

$$Tr = \frac{d_n}{E_t} \dots \dots \dots (8.1.1)$$

Y también:

$$Tr = \frac{d_n}{Nr} \dots \dots \dots (8.1.2)$$

donde:

$Tr$  es el turno de riego, en días

$d_n$  es la lámina neta de agua que representa el grado de agotamiento de humedad establecido, en mm

$E_t$  es la evapotranspiración media del período, en mm/día

$Nr$  es la necesidad de riego, en mm/día.

Dado que la precipitación no es un fenómeno continuo, sino esporádico, la ecuación (8.1.1) ofrece un margen de seguridad, especialmente cuando la precipitación es despreciable durante la estación de riego. La ecuación (8.1.2) debe emplearse en cambio en zonas de riego suplementario, cuando la lluvia tiene significación para compensar las exigencias evapotranspiratorias.

De acuerdo a la ecuación (6.2.1), la lámina  $d_n$ , será:

$$d_n = \frac{Wc - Wu}{100} \rho a D \dots \dots \dots (8.1.3)$$

El valor de  $Wu$  es el contenido hídrico umbral aceptable para la producción económica del cultivo. Una regla práctica que es válida en la casi totalidad de los casos, establece que debe regarse cuando se ha agotado entre el 50% y

el 60% de la humedad disponible. Adoptando  $W_c - W_u = 0.60(W_c - W_m)$ , y reemplazando la (8.1.3) en la (8.1.1), resulta:

$$Tr = \frac{0.6(W_c - W_m)}{100 E_t} \rho a D \quad \dots \dots (8.1.4)$$

Dicha ecuación muestra que, para la misma profundidad de raíces, la frecuencia de riego es mayor en suelos de textura gruesa (menor  $W_c - W_m$ ), que en la de los suelos medios y finos; además, es mayor a medida que disminuye la profundidad de las raíces,  $D$ , y a medida que aumenta la evapotranspiración diaria,  $E_t$ .

Dado que, para el mismo valor de  $(W_c - W_m)$ , el turno o intervalo de riego,  $Tr$ , varía a lo largo del ciclo vegetativo con la profundidad de las raíces,  $D$ , y con la evapotranspiración diaria,  $E_t$ , resulta que el  $Tr$  en cultivos anuales o estacionales cambia continuamente. Las diferencias entre los turnos no son, sin embargo, importantes, en especial en el "gran período de crecimiento", durante el cual  $D$  y  $E_t$  aumentan en función de  $t$  al crecer  $k$ . Una vez que el cultivo ha alcanzado su máximo crecimiento, la profundidad radical permanece estacionaria y por lo tanto el intervalo entre riego y riego aumenta, como consecuencia de la paulatina reducción de  $E_t$  al final de la estación.

En los cultivos permanentes, en los cuales un cambio en el tamaño radical se produce a través de los años, puede suponerse un valor de  $D$  constante para determinado año; en tal caso el intervalo  $Tr$  es función de  $E_t$ .

Dado las dificultades que en la práctica del riego en las propiedades se presentarían como consecuencia del periódico cambio del intervalo entre una y otra suministración, al establecer un programa de riego pueden adoptarse valores medios de  $D$  y  $E_t$ , para diferentes épocas del ciclo vegetativo.

La oportunidad del riego que resulta de la relación agua-suelo-planta, crea un problema especial al diseñar la capacidad de un sistema, ya que la posible simultaneidad en los "períodos críticos", resultantes de la demanda de los cultivos, puede conducirnos a obras de gran capacidad, que requieren una excesiva

concentración de esfuerzos en la operación.

Al respecto se presentan dos situaciones diferentes: 1) que la fuente de agua se encuentre a disposición del regante; 2) que la fuente de agua no dependa del regante.

El primer caso es el que corresponde a obras individuales de riego, sobre la base del bombeo de agua o de derivaciones propias. La organización del riego depende sólo de la programación de las diferentes labores agrícolas en la propiedad y de la composición de la cédula o patrón de cultivos.

En el segundo caso, que es el que corresponde a "sistemas" de riego, con una obra de derivación que incluye o no embalse, la voluntad del regante puede tenerse en cuenta sólo parcialmente; y la programación del riego, obedece más al planeamiento general, que incluye una célula de cultivo típica. Además, la capacidad de almacenaje de agua en el suelo se aprovecha en un porcentaje más alto, aceptando mayores niveles de agotamiento, aún a costa de alguna disminución en los rendimientos, en favor de una mayor economía en la construcción y operación de la obra.

#### *Lámina de agua a aplicar*

La lámina neta de agua a aplicar en cada riego,  $d_n$ , es una determinada fracción de  $d$ , tal como se ha considerado anteriormente; sin embargo, dado que se producen pérdidas en su aplicación, la lámina bruta,  $d_b$ , resulta:

$$d_b = \frac{d_n}{E_{fr}} \quad \dots \dots (8.1.5)$$

Pero como, en cultivos anuales, al comienzo del ciclo, el numerador de la (8.1.5) es bajo, resulta una  $d_b$  que no puede ser manejada eficientemente en el campo; ya que el  $te$  está limitado por el caudal máximo no erosivo y no puede reducirse para mantener el valor de  $R$  (ecuación 7.1.3). En tales circunstancias, el valor bajo de  $R$  nos lleva a la rama descendente de la curva, Fig. 7.1.3, con el consiguiente descenso de la eficiencia, lo que señala que debe

lógicos, la duración mensual correspondiente a la totalidad del proyecto, o de una zona del mismo, expresada en caudal ficticio,  $q$  continuo medio, l/s/ha resulta:

$$q_p = \frac{\sum (N_r \cdot a_c) \cdot 0.116}{E_{fr} \cdot E_{fc} \cdot t \cdot A_c} \quad \dots \dots \dots (8.1.9)$$

donde:

$N_r$  es la necesidad de riego de cada cultivo, en mm/mes

$a_c$  es el área de cada cultivo, ha

$A_c$  es el área total cultivada, ha

$t$  es el número de días del mes.

Los valores de  $q_p$  permiten confeccionar la curva de requerimientos mensuales del proyecto, la que puede variar para diferentes zonas del mismo, en razón del plan de cultivos y/o de la eficiencia de riego y de conducción.

Comúnmente, el trazado de los canales secundarios, define a su vez áreas de diferentes condiciones, en cuanto a topografía, suelo y drenaje; dichos factores, sin duda, inciden en la elección de los cultivos y en el área relativa cultivada de cada uno, así como también en el método de riego y en la eficiencia. De esta manera resulta distinta la dotación en la cabecera de cada secundario y como consecuencia varía la curva de requerimientos de agua.

## 8.2 Superficie factible de riego

Comúnmente, el problema se presenta a la inversa que en el caso tratado en el punto anterior; o sea, se conocen los recursos hídricos disponibles y las necesidades individuales de cada cultivo, y se quiere determinar el área factible de riego, y por consiguiente, el área que abarcarán las obras.

Hasta aquí se ha expuesto el procedimiento para llegar a definir la curva de requerimientos medios mensuales del proyecto. La Hidrología Analítica ofrece los métodos para evaluar los recursos hidrológicos disponibles; a los fines del tema de rubro, se consideran aspectos elementales relacionados con el régimen hidrológico del recurso.

Partiendo de un registro, correspondiente a un determinado número de años de datos hidrométricos medios mensuales, expresados en gasto medio en  $m^3/s$  y en volumen escurrido en  $Hm^3$  (millones de  $m^3$ ) se dibujan las curvas de régimen o hidrogramas, y de volúmenes acumulados o de masa. Dichas curvas permiten determinar el área irrigable, sin o con obras de regulación.

### *Sin obras de regulación*

Previamente y dado la variabilidad en los diferentes años, se aplica el mismo procedimiento utilizado para determinar la lluvia probable. De esta manera, se tienen los caudales con que puede contarse para un determinado período de retorno.

Luego, aunque no se conoce el área a regar, en base a la distribución porcentual que resulta del programa de cultivos en el área irrigable,  $A_c \%$ , del total del mes y el caudal ficticio continuo de cada cultivo,  $q_c$ , se calculan los requerimientos mensuales del proyecto,  $q_p$ :

$$q_p = \Sigma (q_c \cdot 0,01 A_c \%) \quad \dots \dots (8.2.1)$$

El área hipotética irrigable cada mes será:

$$A_{ir} = \frac{Q}{q_p}$$

donde:

$Q$  es el caudal probable del mes, en l/s

$q_p$  requerimientos de riego del proyecto, en l/s/ha.

Se presenta la curva  $A_{ir}$  mes por mes, Fig. 8.2.1. El área bajo la curva, expresada en ha/mes, está dado por la sumatoria de las áreas hipotéticas irrigables de cada cultivo, multiplicando por el número de meses,  $n$ , en los cuales se requiere riego.

Teniendo en cuenta que el ciclo vegetativo se cumple dentro de un determinado intervalo de tiempo, la parte superior del área bajo la curva no puede

ser cubierta, dado la dificultad en ubicar en las mismas, aún las áreas correspondientes a los cultivos de ciclo más corto.

Para lograr el máximo aprovechamiento del recurso, debe totalizarse bajo la curva, el máximo de superficie integrada por la sumatoria de los rectángulos parciales, cada uno de los cuales pertenece a un cultivo. El procedimiento consiste en un tanteo, en el cual se fija un valor de área bajo la curva menor que  $A_{ir}$ , a totalizar por  $N$  cultivos, cuyo ciclo abarca  $n$  meses.

Si, representadas gráficamente las áreas de cada rectángulo, no se alcanza al total fijado, entonces debe tantearse con menores áreas individuales de cada cultivo. Contrariamente, si aún resta espacio aprovechable, debe aumentarse tentativamente el área.

Los rectángulos correspondientes a los cultivos de ciclo más largo (permanentes), se ubican en la base del área, y a medida que disminuye la longitud del ciclo, sucesivamente más arriba.

El procedimiento gráfico propuesto permite determinar la superficie irrigable y las áreas relativas de cada uno, y fundamentar la modificación del programa de cultivos, especies y épocas de siembra, para un más racional aprovechamiento de los recursos hídricos disponibles. Por ejemplo, en la Fig. 8.2.1, si se comienza el período de riego activo en especies hortícolas, en enero, en lugar de iniciarlo en diciembre, el área irrigable aumenta en un 17.6% con relación a la primera alternativa. Además, durante los meses de febrero y marzo se produce un sobrante de agua que puede utilizarse en el lavado de los terrenos con problemas de salinidad.

### *Con obras de regulación*

La curva de volúmenes acumulados de disponibilidades de agua o de masa, y de requerimientos de riego, permiten determinar la capacidad de una obra para la regulación total. La Fig. 8.2.2 representa el procedimiento gráfico, que, en base a los datos medios mensuales de volúmenes escurridos, define la capacidad de un embalse, en la etapa de anteproyecto.

El cómputo del área irrigable con un embalse, como primera aproximación, puede obtenerse de la relación entre el volumen total escurrido al año y los requerimientos totales de riego por ha que pueden estimarse conforme se trató anteriormente.

Dado que los aportes y las necesidades de un área determinada varían para la misma superficie a lo largo del año, conviene realizar un cálculo mes por mes, simulando la operación del embalse. Para ello, se requiere conocer los requerimientos totales, los caudales afluentes y las pérdidas por evaporación. Además, se requiere conocer la capacidad total del embalse y la no utilizable, ya sea por problemas de sedimentos o de cota de derivación.

Los recursos hídricos y los requerimientos de riego, varían a su vez de año en año. Años de sequía con escasa precipitación y como consecuencia de una mayor necesidad de riego, son a su vez los de menores aportes al embalse y como consecuencia los que dan la menor superficie de riego.

Aplicando el criterio de probabilidad de ocurrencia, tanto en los derrames como en la precipitación, se adopta un margen de seguridad; aunque en el caso de los embalses, lo ideal es simular la operación con todos los datos mensuales de derrame correspondientes a los años que comprende el registro disponible.

Al simular la operación de un embalse, el porcentaje de meses en los cuales se presenta déficit con relación al total, ofrece elementos de juicio para reducir el área irrigada, o aumentar la capacidad de embalse; o para aumentar el área a irrigar o reducir la capacidad de embalse, cuando a través del análisis, crecen continuamente las reservas. Al respecto, conviene individualizar en el registro, los períodos de años de sequía, pudiendo incluso investigarse las tendencias y las variaciones cíclicas; estos períodos de alrededor de 5 años, son los que juegan un papel decisivo en la determinación del área regable.

Al determinar la superficie factible de riego, tanto en este caso como en

el explicado en el punto anterior, no debe pretenderse un grado de garantía tal, como para reducir exageradamente el área irrigable y como consecuencia, desperdiciar agua y posibilidades de cultivo en los años de buena disponibilidad hídrica. La agricultura es una actividad riesgosa por su naturaleza, de modo que, aún cuando se efectuara un riguroso control de los recursos hídricos, la producción estaría dependiendo de otras variables que intervienen en el proceso productivo.

Deficiencias hídricas temporarias son sobrellevadas por determinados cultivos sin una sustancial disminución en la producción. La existencia en todo programa de "cultivos compensadores", como las forrajeras permanentes, capaces de subsistir con menores niveles de humedad edáfica, permite cubrir con riego un área mayor. Además, es común en algunos sistemas, la demarcación de áreas de riego eventual, generalmente dedicados a cultivos de menor valor económico que son atendidos cuando existe agua disponible para ello.

### 8.3 Capacidad para el diseño y operación de las obras

#### *Capacidad de diseño de los canales de riego*

La capacidad de la red de canales y estructuras que integran una obra de riego, depende principalmente de: 1) la evapotranspiración máxima: semanal, quincenal o mensual; 2) el área bajo riego; 3) el grado de disponibilidad del recurso agua; 4) el sistema de distribución y entrega de agua a los usuarios.

La evapotranspiración máxima ocurre en el "período crítico", coincidentemente con la época de floración y "cuaje" de los frutos que corresponde al valor máximo de  $k$ , la Fig. 4.2.2. En los cultivos permanentes y particularmente en el caso de las forrajeras y frutales, la evapotranspiración máxima coincide con la del mes de máximo consumo; en cambio, en los estacionales de ciclo corto, se produce en un período breve, de una a dos semanas que no se evidencia en las estimaciones mensuales. Algunos autores incluyen relaciones al respecto, Tabla 5.4.2, que permite el empleo del procedimiento con fines de diseño. Otro criterio tomado de Ozal (1966) tiene en cuenta un factor multiplicador

del uso consuntivo, dado en función del turno o intervalo de riego,  $T_r$ , a saber:

$T_r$	Factor
30	1.00
15	1.09
10	1.15
6	1.21
3	1.28

Los standards del Bureau of Reclamation (1961), especifican que la demanda para fines de diseño, debe ser suficiente para satisfacer la máxima evapotranspiración de un período de diez días, y Stamm (1967) considera al respecto que debe ser entre un 10 a un 15% mayor que la del mes de máximo consumo.

En regiones de clima templado y sin precipitación invernal, al iniciar la primavera, se presentan grandes demandas de agua, como consecuencia de la realización de las labores de roturación de tierras. En tal caso, se produce un "período crítico" para la administración de riego, que no depende de la velocidad de evapotranspiración de los cultivos.

En los casos de monocultura, con especies y variedades de similares características fisiológicas, existe coincidencia en las exigencias máximas, que obliga a un aumento de la capacidad de los canales. Una agricultura diversificada, en cambio, permite escalonar las siembras, evitando así la superposición de los períodos críticos, especialmente si las condiciones climáticas permiten contar con una larga estación de crecimiento.

La disponibilidad del recurso hídrico, juega asimismo un rol muy impor tante. Con obras de regulación el problema es más simple, ya que en tal caso el caudal a derivar del embalse mensualmente depende de la célula de cultivo adoptada y del área bajo riego. Sin obras de regulación, en cambio, y cuando existe limitación del recurso hídrico, el planteo puede tender a lograr una coincidencia máxima entre la curva de régimen y de requerimientos mensuales de agua, lo que puede conducir a una gran capacidad de diseño.

La red de riego, que compone un "sistema" incluye: canal matriz, canal principal, canales secundarios y canales terciarios, Fig. 8.3.1. El canal matriz y principal, parte de la obra de cabecera y domina altimétricamente todo el perímetro irrigable, entre el canal y el thalweg del valle. Los canales secundarios derivados del principal, abastecen diferentes subáreas dentro del área irrigable, que tienen características topográficas y edáficas particulares y que están generalmente delimitadas por los thalwegs secundarios. Los canales terciarios que se derivan de cada secundario, tienen comúnmente como área de influencia la "sección de riego" y distribuyen el agua a las propiedades. Su capacidad de conducción y trazado, obedece más a condiciones topográficas y edáficas, al grado de subdivisión de la tierra, al régimen de distribución de agua a los usuarios y al caudal o "módulo" de entrega de agua.

Comprende a su vez todo sistema de riego, una red de evacuación de los excedentes de agua ingresados al área del proyecto, unos naturalmente: precipitación, aportes laterales y otros artificialmente como consecuencia de pérdidas en la conducción del agua, operación del sistema y aplicación de agua al terreno. Dicha red tiene por fin eliminar los excesos superficiales y del subsuelo y comienza por los colectores de sección en el límite de las propiedades, que desembocan en colectores generales de áreas parciales, y llegan finalmente a un emisario general del proyecto, comúnmente un cauce natural, Fig. 8.3.1.

Los canales de riego principal y secundarios, se diseñan generalmente funcionando en caudal continuo, mientras que los terciarios pueden diseñarse en caudal continuo o intermitente. Por lo tanto:

$$Q_p = \sum^n Q_{si} = c A_p \cdot q_p \quad \dots \dots (8.3.1)$$

$$Q_s = \sum^n Q_{ti} = c A_s \cdot q_s \quad \dots \dots (8.3.2)$$

$$Q_t = c A_t \cdot q_t \quad \dots \dots (8.3.3)$$

donde:

$Q_p$ ,  $Q_s$  y  $Q_t$  es el caudal de los canales principal, secundario y terciario, respectivamente

$A_p$ ,  $A_s$  y  $A_t$  es el área irrigable por los canales principal, secundario y terciario, respectivamente

$q_p$ ,  $q_s$  y  $q_t$  es el requerimiento de riego en l/s/ha en la cabecera de los canales principal, secundario y terciario, respectivamente

$c$  es un coeficiente de seguridad.

El coeficiente  $c$  puede tener los siguientes valores, según referencias de Ozal (1966): principal,  $c = 1.05$  a  $1.10$ ; secundarios,  $c = 1.10$  a  $1.20$ ; terciarios,  $c = 1.20$  a  $1.40$ .

En la Fig. 8.3.2, se representa gráficamente el caudal  $Q$  en función del área  $A$ , en el canal Skeedee, en Estados Unidos, para diferentes áreas decrecientes por servicio en ruta; ello conforme a datos de área servida y capacidad requerida, que consignan como ejemplo los standards del Bureau of Reclamation (1961). Dicho gráfico señala que, aún cuando los requerimientos unitarios de agua van disminuyendo al reducirse las pérdidas por conducción, crece la relación  $Q/A$  debido al aumento del coeficiente  $c$ , para acueductos de orden menor, conforme se expresa anteriormente.

Con referencia al sistema de distribución de agua a los usuarios, cabe distinguir tres procedimientos: 1) caudal continuo; 2) por turnos; 3) de acuerdo a la demanda.

#### *Entrega por caudal continuo*

Consiste en entregar a cada propiedad irrigada, un caudal constante para un determinado lapso, pero que sufre modificaciones a lo largo de la estación de riego, de acuerdo a: 1) la disponibilidad de recurso hídrico; 2) modificación del área irrigada; 3) variación en los requerimientos de riego. Si no existen limitaciones en la disponibilidad del recurso hídrico, el caudal de entrega mensual será el dado por ecuación (8.3.3).

Este sistema tiene la ventaja que representa la continua disponibilidad

de agua en la propiedad y la de reducir al mínimo la sección de los acueductos y la gran desventaja que significa el estar atendiendo un caudal, en ocasiones exiguo, que conduce a bajas eficiencias de aplicación de agua; o que, para salvar estos inconvenientes, se requiere la realización de embalses en la propiedad. Se emplea el procedimiento cuando el área irrigada está fraccionada en propiedades grandes, y donde el caudal resulta por lo menos el de un canal terciario, el del módulo o un múltiplo del módulo. Asimismo, se lo emplea cuando las propiedades se riegan por aspersión, o en los casos en que una regulación interna es económicamente factible.

#### *Entrega por turnos*

En la entrega "por turnos" o "tandas" o "por rotación", el área que atiende un terciario, con el cual se riegan sucesivamente  $n$  propiedades de área,  $a_c$ , resulta:

$$A_t = n a_c \quad \dots \dots \dots (8.3.4)$$

Considerando que  $T_e$  es el turno o intervalo de entrega de agua y  $H$  el horario de entrega, resulta:

$$n = \frac{T_e}{H} \quad \dots \dots \dots (8.3.5)$$

En tal caso,  $H$  y  $T_e$ , expresados en las mismas unidades de tiempo: días u horas.

En la ecuación anterior,  $T_e$ , o intervalo administrativo de entrega, está relacionado con el turno o intervalo de riego en la propiedad,  $Tr$ , ecuación (8.1.4);  $T_e$  debe ser igual o menor a  $Tr$  pero nunca mayor. En la práctica, es común tener varios cultivos que se riegan con diferente  $Tr$ ; entonces se elige  $T_e$ , que sea una fracción entera de  $Tr$  correspondiente a los diferentes cultivos, o sea:

$$T_e = Tr_1 = \frac{Tr_2}{2} = \frac{Tr_3}{3}$$

Ello significa que el cultivo 1 requiriendo un turno  $Tr_1$ , se regará toda vez que se entregue agua a la propiedad, el cultivo 2 de turno  $Tr_2$ , cada dos turnos, y el cultivo 3 de turno  $Tr_3$ , cada tres turnos. Dado que  $dn$  y  $E_t$  varían a través del ciclo,  $Tr$  debe ajustarse siguiendo el mismo criterio para cada período del ciclo vegetativo.

El horario de entrega,  $H$ , en cambio, debe estar relacionado con el tiempo de riego de una parcela,  $tr$ , con el tiempo de escurrimiento o de mojado,  $te$ , y con el tiempo adicional de entrega para compensar pérdidas en el sistema de distribución  $tp$ . Si con el mismo caudal de entrega se riegan sucesivamente diferentes áreas en la propiedad que requieren un tiempo de riego,  $tr_1$ ,  $tr_2$ ,  $tr_3$ , respectivamente, entonces:

$$H = \beta(tr_1 + tr_2 + tr_3)$$

Si en cambio se parte el caudal de entrega para atender las áreas de cada cultivo que requiere el mismo  $tr$ , o sea:

$$\beta tr_1 = \beta tr_2 = \beta tr_3$$

en tal caso,  $H = \beta tr$ .

El caudal de entrega de agua a una propiedad, tiene que oscilar entre valores razonables de acuerdo al método de riego, grado de sistematización de los terrenos, velocidad de infiltración del agua en el suelo y disponibilidad de mano de obra; debe ser un módulo o un múltiplo del módulo. El caudal "módulo" para riego por superficie, oscila entre 50 y 200 l/s, aún cuando se señalan valores extremos de 20 a 400 l/s. En riego por aspersion, en cambio, según Poiree y Ollier (1965), el caudal módulo puede variar entre 2,5 y 8,0 l/s.

La ecuación que relaciona el caudal de entrega a la propiedad, con el horario de riego y el turno o intervalo administrativo, se escribe:

$$Q_e = \frac{a_c \cdot q_t \cdot T_e \cdot 24}{H} \dots \dots \dots (8.3.6)$$

donde:

$Q_e$  es el caudal de entrega a la propiedad, en l/s

$a_c$  es el área cultivada de la propiedad, en ha

$q_t$  es el caudal ficticio en la cabecera del terciario, en l/s/ha

$T_e$  es el turno o intervalo entre entregas sucesivas, en días

$H$  es el horario de entrega de agua, en horas.

Dado que debe ser igual al caudal módulo, y como  $Q_e$  varía a lo largo del ciclo con  $a_c$  y  $q_t$ , se deben realizar ajustes de  $a_c$  y de  $H$ . Cuando  $Q_e$ , ecuación (8.3.6), resulta muy pequeño para regar eficientemente, conviene considerar el área de 2 ó 3 propiedades:  $2a_c$  ó  $3a_c$ , reduciendo al mismo tiempo  $H$  a  $1/2H$  ó  $1/3H$ , siempre y cuando la fracción de  $H$  adoptada sea igual o mayor que  $(tr_1 + tr_2 + \dots + tr_n)$ .

Sin embargo, dado las diferentes láminas a aplicar de acuerdo al cultivo, y atento a las diferentes capacidades de infiltración que pueden presentarse en una misma sección de riego y en una misma propiedad, se requiere comprobar la operación de riego en la propiedad. Esto tiene significación especial, cuando se trata de una agricultura diversificada, con cultivos que exploran diferentes profundidades de suelo y las características edáficas difieren sensiblemente.

El método "por rotación" o "turno", es el más comúnmente empleado en los proyectos de riego en los cuales se efectúa un parcelamiento de las tierras beneficiadas. Es posible lograr con el mismo, altas eficiencias de uso del agua, cuando se efectúan los ajustes necesarios de acuerdo a las exigencias del complejo suelo-planta-clima.

#### *Entrega de acuerdo a la demanda*

En este caso, el agua se entrega de acuerdo a los pedidos formulados por los agricultores, quienes deciden cuándo van a regar. Se trata de un sistema muy adecuado que transfiere a los regantes esta responsabilidad adaptándose principalmente al procedimiento de percepción del canon "por volumen de agua" recibido.

La posible simultaneidad en los pedidos constituye un problema que debe tenerse en cuenta para resolver la capacidad de diseño. Al respecto, se pueden simular diferentes combinaciones de área y cultivos, aunque en los casos de subdivisiones en parcelas uniformes en tamaño y similares valores de  $E_t$ , es posible aplicar el cálculo de probabilidades, siguiendo el procedimiento propuesto por Clement, según Poiree y Ollier (1965).

Sin duda, todos los agricultores que se abastecen por un determinado canal, pueden solicitar agua simultáneamente, pero la probabilidad que esto ocurra es mínima.

Ozal (1966), mediante la aplicación del cálculo de probabilidades, obtuvo la siguiente ecuación para calcular el caudal de diseño, en este caso de un terciario:

$$Q_t = \frac{A_t \cdot E_t \cdot \alpha}{8,64 \cdot E_{fr} \cdot E_{fc}} \left( 1 + b \sqrt{\frac{a_c (T_e - H \alpha)}{A_t \cdot H \cdot \alpha}} \right) \dots \dots \dots (8.3.7)$$

donde:

$A_t$  es el área bruta, en ha, servida por el terciario

$E_t$  es la evapotranspiración diaria, en mm/día

$\alpha$  es la proporción del área cultivada con respecto del área bruta, en décimas

$E_{fr}$  es la eficiencia del riego

$E_{fc}$  es la eficiencia de conducción del agua

$b$  es el coeficiente de calidad o probabilidad de funcionamiento normal

$a_c$  es el área promedio a regar en una propiedad

$H$  es el tiempo u horario para regar el área  $a_c$ , expresado en días.

El valor de  $b$  varía según la probabilidad de funcionamiento normal de la red, de la siguiente forma:

Probabilidad	Coficiente b
80	0.842
90	1.282
95	1.654
99	2.324

### *Capacidad de diseño de los canales de drenaje*

Tal como lo muestra el esquema, Fig. 2.0.0, en todo sistema de riego se produce un sobrante de agua, que en ausencia de problemas de salinidad, resulta de las pérdidas y desperdicios durante la conducción, distribución y aplicación del agua; y en presencia de problemas de suelos y/o aguas salinas, se debe además a los excesos para mantener los requerimientos de lixiviación de las sales.

Dicho sobrante, en determinadas condiciones, puede ser usado nuevamente, pero en otros casos debe ser evacuado. De todos modos se requiere determinar la capacidad de diseño de los canales, en base al canal incorporado al sistema, el consumido y el perdido. Sin embargo, pueden existir buenas condiciones naturales de drenaje, en cuanto a cauces superficiales y estratos acuíferos subterráneos, que aseguren medios de evacuación de los excedentes, aunque comúnmente se presenta el caso opuesto, agravado por la ruptura del equilibrio hídrico que comúnmente introduce una obra de riego.

Los excesos cuantificados al realizar el balance hídrico de una zona, nos permite estimar las láminas y caudales a evacuar mensualmente, como excedentes superficiales y subterráneos. En condiciones naturales dependen de las características de la precipitación: espesor, intensidad, duración, frecuencia, así como de las características de los terrenos desde el punto de vista físico, topográfico y de cobertura vegetal. Al nivelar los terrenos para riego, aumenta la eficiencia de la lluvia, disminuye la escorrentía, y como consecuencia, crece la necesidad de drenaje subterráneo. Este es el caso que comúnmente se presenta en proyectos de riego, para compensar períodos de sequía, pero que cuentan con un período lluvioso, durante el cual se realizan cultivos.

En el caso de los proyectos realizados en condiciones de aridez, los sobrantes de agua son el resultado de acciones del hombre; y la eficiencia de un proyecto es una medida de su capacidad de intervención en el uso y manejo de los recursos hídricos.

En ambas situaciones, se debe asimismo considerar el aporte de zonas veci-

nas: superficial o subterránea, que por efecto de las condiciones topográficas y/o geológicas, engrosan el caudal que representan los sobrantes del proyecto. Sin duda que una obra de riego controla los aportes superficiales, pero restan aún los del subsuelo.

De esta manera, la lámina de agua a drenar será:

$$d_{dr} = d_b (1 - E_{fp}) + (P - P_e) + d_l \quad \dots \dots (8.3.8)$$

donde:

$d_{dr}$  es la lámina de agua a drenar de un área determinada

$d_l$  es la lámina que representa el aporte lateral.

Por lo tanto, el caudal de drenaje,  $Q_{dr}$  en l/c, producirá un área bruta del proyecto  $A$  calculado para el mes de más alto valor de  $d_{dr}$ :

$$Q_{dr} = \frac{d_{dr} \cdot A}{t \cdot 8,64} \quad \dots \dots (8.3.9)$$

En tal caso,  $A$  en ha,  $d_{dr}$  en mm/mes y  $t$  el número de días del mes. La lámina  $d_l$  puede calcularse a partir de la ecuación de Darcy:

$$d_l = \frac{T \cdot L \cdot t}{A} \frac{dh}{dl} \quad \dots \dots (8.3.10)$$

donde:

$T$  es la transmisibilidad de los estratos acuíferos

$L$  es la longitud del estrato

$dh/dl$  es el gradiente hidráulico.

Para fijar finalmente la capacidad de diseño del sistema de drenaje, debe asimismo considerarse la capacidad natural de drenaje de acuerdo a la transmisibilidad de agua de los estratos y los gradientes hidráulicos disponibles, caudal éste que debe descontarse al obtenido por ecuación (8.3.9).

El problema principal en el diseño de un colector de drenaje, consiste no tanto en su capacidad de conducción, como en la profundidad, para asegurar el abatimiento de los niveles freáticos hasta una profundidad de unos dos metros de la superficie. Sin embargo, colectores de funcionamiento eficiente, pueden disminuir su efectividad por el aumento del tirante de agua, cuando se lo emplea para eliminar las aguas superficiales provenientes de sobrantes de riego. En tal caso, el diseño del colector debe proveer la capacidad de conducción de estos sobrantes, en una sección por debajo de la profundidad requerida para un efectivo drenaje de las aguas del subsuelo.

#### *Area total a beneficiar con el proyecto y área regable*

Comúnmente, al diseñar una obra de riego, debe decidirse el área que las mismas abarcarán, la que no siempre coincide con el área regable, de acuerdo a los recursos hídricos disponibles y a los requerimientos de los cultivos.

En primer término, parte del terreno tiene otro destino: calles, canales, estructuras, viviendas, patios, obras de embellecimiento, etc.; además, otra parte permanece inculta por baja calidad edáfica. En un programa bien concebido y prácticamente sin terrenos incultos, los desperdicios de terreno pueden representar un 15% del total.

Sin embargo, en determinadas circunstancias conviene incrementar el área bruta en espera de un aumento de las eficiencias de riego en un futuro, cuando los recursos hídricos de la zona se encuentren limitados para el área cultivada o cuando se prevea la instalación de equipos de bombeo, para aprovechar sobrantes de energía o para abatir los niveles freáticos. Dicho temperamento conduce a un mayor volumen de obra, pero permite aprovechar recursos hídricos que se pierden o desperdician, contribuyendo a solucionar al mismo tiempo potenciales problemas de drenaje.

En las áreas donde el régimen de precipitación pluvial y de evapotranspiración potencial asegura la realización de cultivos durante parte del año, y las obras de riego se realizan para el período de sequía, tal como ocurre en los climas tropicales y subtropicales; la decisión respecto al área de dominar

con las obras, depende a su vez de la intensidad de uso del recurso tierra y del programa de cultivos. Si predominan los cultivos permanentes, tales como frutales y forrajeras, las obras se realizan para compensar el déficit del período de sequía y en tal caso no habrá razón para aumentar el área bruta.

Con especies estacionales, la situación es diferente, ya que se presenta el caso de superposición de parte del ciclo y del lapso requerido para las labores de roturación y/o de cosecha, por lo que cada cultivo requerirá su respectiva área de terreno. También se presenta el caso de no coincidencia de los ciclos, lo que permitirá aprovechar el mismo terreno. En el primer caso, la obra deberá abarcar un área mayor, al incluir en cada propiedad, terreno sin derecho a riego, mientras que en el segundo caso, la red de canales estará limitada al área efectivamente irrigada.

El criterio a adoptar en cada caso, escapa un poco a las consideraciones estrictamente técnicas, ya que se trata de decisiones que entran en el marco de la economía y la política agraria y de uso de los recursos humanos, o sea de la planificación a nivel nacional o regional.

ooo

LITERATURA CITADA

- AHUJA, P. R. 1957. Hydrologic measurements and methods of hydrological analysis. Proceedings of the Development Centre on Watershed Management for Asia and the Far East, pp. 105-114, Bihar, India.
- AL BARRAK, A. H. 1964. Evaporation and potential evapotranspiration. Master of Science, Utah State University Library, Logan, Utah (unpublished).
- ANDERSON, B. H. 1963. A method for estimating evapotranspiration for use in determining water requirements of an irrigation project. Doctor of Engineering dissertation, University of California Library, Davis, California (unpublished).
- AZIZ, M. A. 1961. The influence of advective energy on evapotranspiration. Master of Science Thesis, Utah State University Library, Logan, Utah (unpublished).
- BISHOP, A. A. 1962. The relation of intake rate to length of run in surface irrigation. Transactions American Society of Civil Engineers, 127 (3): 282-293.
- BISTRAIN, P. 1959. Pérdidas de conducción de canales. Memorandum Técnico N° 155, Secretaría de Recursos Hidráulicos, Ciudad de México, México.
- BLANEY, H. F. and W. D. CRIDDLE. 1950. Determining water requirements in irrigated areas from climatological and irrigation data. U. S. Dept. of Agriculture, Soil Conservation Service, Technical Paper 96, Washington, D. C.
- BLANEY, H. F. and W. D. CRIDDLE. 1962. Determining consumptive use and irrigation water requirements. Technical Bulletin N° 1275, Agricultural Research Service, U. S. Dept. of Agriculture.
- BUREAU OF RECLAMATION. 1961. Canals and related structures, Chapter I. Canals and laterals, Denver, Colorado.
- CASTILLA PEREZ, O. 1965. Determinación práctica del uso consuntivo. Ingeniería Hidráulica en México, 19(4):39-62.
- CHRISTIANSEN, J. E. 1967. Salinidad. Material de enseñanza, Documento N° 16, Centro Interamericano de Desarrollo Integral de Aguas y Tierras. Mérida, Venezuela.
- CRIDDLE, W. D., K. HARRIS, and L. S. WILLARDSON. 1962. Consumptive use and water use requirements for Utah. Technical Publication N° 8, Office of State Engineer, Utah.

- DE FINA, A. L. y L. J. SABELLA. 1960. Cálculo de las temperaturas de localidades montañosas carentes de observaciones termométricas. Publicación N° 66, Instituto de Suelos y Agrotecnia, Buenos Aires, Argentina.
- DE ORDANIZ, J. 1966. Pérdidas por conducción en canales, su medición y control. II Jornadas Venezolanas de Riego, 22 al 28 de mayo, Caracas, Venezuela.
- EAGLEMAN, J. R. 1967. Pan evaporation, potential and actual evapotranspiration. *Journal of Applied Meteorology* 6:482-488.
- ETCHEVERRY, B. A. and S. T. HARDING. 1933. *Irrigation practice and engineering*. Vol. I. McGraw-Hill Book Company, Inc., New York.
- GARDNER, W. R. 1960. Dynamic aspects of water availability to plants. *Soil Science* 89(2):63-73.
- GRASSI, C. J. 1964. Estimation of evapotranspiration from climate formulas. Master of Science Thesis, Utah State University Library, Logan, Utah, (unpublished).
- GRASSI, C. J. 1966. Criterios básicos para determinar el coeficiente de evapotranspiración relativa. Cuarto Seminario Latinoamericano de Irrigación, Octubre 3-14, Bogotá, Colombia.
- GRASSI, C. J. 1967. Factors affecting irrigation efficiency and the contribution of agricultural engineering in the improvement of water use in Latin American irrigation projects. International Conference on Water for Peace, May 23-31, Washington, D. C.
- GRASSI, C. J. y J. CHAMBOULEYRON. 1965. Influencia de la altura del cultivo en la evapotranspiración relativa de la alfalfa. Informes Científicos Técnicos N° 3. Instituto de Suelos y Riego, Universidad Nacional de Cuyo, Mendoza, Argentina.
- HANSEN, V. E. 1963. A unique consumptive use curve related to irrigation practice. *Journal of the Irrigation and Drainage Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers* 89(1):43-50.
- HARGREAVES, G. H. 1956. Irrigation requirements based on climatic data. *Journal of Irrigation and Drainage Division, American Society of Civil Engineers, Proceeding Paper* 1105:1-10.
- HOUK, I. 1951. *Irrigation Engineering, Vol I*. John Wiley & Sons, Inc., New York.
- ISRAELSEN, O. W. 1950. *Irrigation principles and practices*. John Wiley & Sons, Inc., New York.
- JENSEN, M. E. 1967. Evaluating irrigation efficiency. *Journal of Irrigation and Drainage Division, Proc. of the American Society of Civil Engineers* 93(1):83-97.

- JENSEN, M. E. and H. R. HAISE. 1962. Estimating evapotranspiration from solar radiation. A preliminary report. Agricultural Research Service, U. S. Department of Agriculture (unpublished).
- JENSEN, M. E. and H. R. HAISE. 1963. Estimating evapotranspiration from solar radiation. Journal of Irrigation and Drainage Division, Proc. of the American Society of Civil Engineers, 89(4):15-41.
- JENSEN, M. E., L. R. SWARNER, and J. T. PHELAN. 1967. Improving irrigation efficiencies. Irrigation of Agricultural Lands, Chapter 61, pp. 1120-1142. American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin.
- KELLER, J. 1965. Effect of irrigation method on water conservation. Journal of Irrigation and Drainage Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, 91(2):61-72.
- KELLER J. and A. W. MacCOLLOCH. 1962. Ames Irrigation Handbook, Second ed., Section II:SMF-3. W. R. Ames Company, Milpitas, California.
- KIJNE, J. W. 1961. Variation of consumptive use with evaporation during growing season. Master of Science Thesis, Utah State University Library, Logan, Utah (unpublished).
- KOHLER, M. A., T. J. NORDENSON, and W. E. FOX. 1955. Evaporation from pans and lakes. Research Paper N° 38, U. S. Department of Commerce, Weather Bureau, Washington.
- MATHISON, K. J. 1963. The use of climatological and related factors for estimating evaporation. Master of Science Thesis, Utah State University Library, Logan, Utah (unpublished).
- OCHOA PILE, J. M. 1966. Ejercicios de estadística hidrológica. Notas sumarias Curso Breve del CIDIAT, Mérida, Venezuela (inédito).
- ORIOLANI, M. J. y C. J. GRASSI. 1963. Eficiencia del riego por aspersión. IDIA N° 180, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Buenos Aires, Argentina.
- OZAL, K. 1966. Irrigation system design by probability model. Sixth Near East-South Asia Regional Irrigation Practice Seminar, pp. 361-376, Amman, Jordan.
- PENMAN, H. L. and R. K. SCHOFIELD. 1951. Some physical aspects of assimilation and transpiration. Society of Experimental Biology Symposium, 5:115-129.
- PENMAN, H. L. 1948. Natural evaporation from open water, bare soil, and grass. Proceeding of the Royal Society of London 193:120-145.
- PHILIP, J. E. 1957. The physical principles of soil water movement during the irrigation cycle. Transaction of the 3rd Congress on Irrigation and Drainage 3:125-154.

- PRUITT, W. O. 1960. Relation of consumptive use of water to climate. Reprint from the Special Soil and Water Edition, Transaction of the American Society of Agricultural Engineers, 3(1):9-13, 17.
- PRUITT, W. O. 1964. Procedures for estimating crop water requirements for use in water allocations and for improvement of irrigation efficiency. Water Resources Center, Annual Progress Report, University of California, Davis, California (unpublished).
- PRUITT, W. O. and F. J. LOURENCE. 1966. Test of aerodynamic energy balance and other evaporation equations over a grass surface. University of California, Davis, California (unpublished).
- REISS, L. A. 1939. Essai de détermination des quantités d'eau nécessaires aux champs cultivés en se basant sur les données météorologiques. Extrait Annales Agronomiques N° Dec., 7 pp.
- STANHILL, G. 1957. The effect of differences in soil moisture status on plant growth. a review and analysis moisture regime experiments. Soil Science 84(3):205-208.
- STEPHENS, J. C. and W. L. STEWART. 1963. A comparison of procedures for computing evaporation and evapotranspiration. Extract of Publication N° 62 of the I. A. S. H. Committee for Evaporation, pp. 123-133.
- TANNER, C. B. and W. L. PELTON. 1960. Potential evapotranspiration estimates by the approximate energy balance method of Penman. Journal of Geophysical Research 65(10):3391-3413.
- TAYLOR, S. A. 1962. Irrigation Physics, Chapter XIV:1-48. Course Agronomy 165, Physical Edaphology, Utah State University, Logan, Utah.
- THORNTHWAITE, W. C. 1948. An approach toward a rational classification of climate. The Geographical Review, 38:55-94.
- THORNTHWAITE, W. C. and J. R. MATHER. 1957. Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance. Drexel Institute of Technology 10(3), New Jersey.
- U. S. SALINITY LABORATORY STAFF. 1954. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. Handbook 60, U. S. Department of Agriculture.
- U. S. DEPARTMENT OF AGRICULTURE, SOIL CONSERVATION SERVICE. 1948. Soil characteristics significant in evaluating permeability.
- TSCHAPEK, M. W. 1966. El agua en el suelo. Manuales de Ciencia, Actual N° 2, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Madrid.
- VAN VIJK, W. R. and D. A. DeVRIES. 1963. Potential evapotranspiration. Netherlands Journal of Agricultural Science, 1(1):35-39.

WILLARDSON, L. S. and A. A. BISHOP. 1967. Analysis of surface irrigation application efficiency. Journal of Irrigation and Drainage Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers. 93(2):21-36.

ooo

APENDICE

TABLA 5.1.1

VALORES MEDIOS MENSUALES DE LA RADIACION SOLAR EN AUSENCIA DE ATMOSFERA  
EXPRESADA EN ALTURA EQUIVALENTE DE AGUA EVAPORADA EN mm/día

(Criddle 1958)

	Hemisferio Norte					0°	Hemisferio Sur				
	50°	40°	30°	20°	10°		10°	20°	30°	40°	50°
Enero	3.6	6.0	8.5	10.8	12.8	14.5	15.8	16.8	17.3	17.3	17.1
Febrero	5.9	8.3	10.5	12.3	13.9	15.0	15.7	16.0	15.8	15.2	14.1
Marzo	9.1	11.0	12.7	13.9	14.8	15.2	15.1	14.6	13.6	12.2	10.5
Abril	12.7	13.9	14.8	15.2	15.2	14.7	13.8	12.5	10.8	8.8	6.6
Mayo	15.4	15.9	16.0	15.7	15.0	13.9	12.4	10.7	8.7	6.4	4.1
Junio	16.7	16.7	16.5	15.8	14.8	13.4	11.6	9.6	7.4	5.1	2.8
Julio	16.1	16.3	16.2	15.7	14.8	13.5	11.9	10.0	7.8	5.6	3.3
Agosto	13.9	14.8	15.3	15.3	15.0	14.2	13.0	11.5	9.6	7.5	5.2
Setiembre	10.5	12.2	13.5	14.4	14.9	14.9	14.4	13.5	12.1	10.5	8.5
Octubre	7.1	9.3	11.3	12.9	14.1	15.0	15.3	15.3	14.8	13.8	12.5
Noviembre	4.3	6.7	9.1	11.2	13.1	14.6	15.7	16.4	16.7	16.5	16.8
Diciembre	3.0	5.5	7.9	10.3	12.4	14.3	15.8	16.9	17.6	17.8	17.8

TABLA 5.1.2

VALORES DE  $\sigma T_a^4$  EN ALTURA EQUIVALENTE  
EVAPORADA, EN mm/día

Temp. °C	Temp. Absoluta Ta °K	Ta <sup>4</sup> mm/día
2	275	11.6
4	277	12.0
6	279	12.4
8	281	12.8
10	283	13.1
12	285	13.5
14	287	13.9
16	289	14.3
18	291	14.7
20	293	15.1
22	295	15.5
24	297	15.9
26	299	16.4
28	301	16.8
30	303	17.1

Calculada con:  $\sigma = 1,371 \cdot 10^{-12} \text{ cal/s/cm}^2/\text{°K}^4$

Calor latente de vaporización = 580 cal/g

TABLA 5.2.1

VALORES DE  $k$  PARA EMPLEAR EN LA FORMULA DE JENSEN Y HAISE (1963)

(a) Area de la cuenca de Columbia												
Cultivo	Período de crecimiento foliar: %					Después de alcanzar $E_{tp}$ : etapas en días						
	0-20	20-40	40-60	60-80	80-100	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70
Cultivos estacionales												
Maíz	0.15	0.21	0.31	0.42	0.55	0.59	0.56	0.52	0.47	0.42	0.37	-
Papas	0.13	0.19	0.28	0.44	0.59	0.61	0.61	0.60	0.59	0.58	-	-
Remolacha azucarera	0.12	0.21	0.33	0.47	0.57	0.58	0.58	0.57	0.56	0.54	0.52	0.50
	Estación de crecimiento: %											
Huertos frutales	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100		
Manzano con alfalfa	0.21	0.40	0.55	0.65	0.69	0.71	0.71	0.70	0.62	0.44		
(b) Estados de las llanuras del Norte												
Cultivo	Período de crecimiento foliar: %					Después de alcanzar $E_{tp}$ : etapas en días						
	0-20	20-40	40-60	60-80	80-100	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70
Cultivos estacionales												
Frijol	0.17	0.21	0.27	0.38	0.60	0.70	0.66	0.57	0.47	0.37	0.27	-
Maíz	0.16	0.19	0.28	0.40	0.53	0.57	0.53	0.48	0.43	0.38	-	-
Avena	0.07	0.10	0.21	0.42	0.62	0.67	0.65	0.52	0.52	-	-	-
Remolacha azucarera	0.14	0.17	0.23	0.36	0.53	0.57	0.57	0.55	0.53	0.51	0.47	-
(c) Estados de las llanuras del Sur												
Cultivo	Período de crecimiento foliar: %					Después de alcanzar $E_{tp}$ : etapas en días						
	0-20	20-40	40-60	60-80	80-100	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70
Cultivos estacionales												
Sorgo granífero	0.15	0.22	0.37	0.58	0.73	0.72	0.65	0.57	0.50	0.42	0.34	-

	Siembra a encañado					a espigazón		después de espigazón				
	0-20	20-40	40-60	60-80	80-100	0-50	50-100	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50
Trigo de invierno en Kansas	0.18	0.17	0.14	0.12	0.24	0.42	0.56	0.61	0.62	0.57	0.43	0.18
Trigo de invierno en Texas	0.18	0.19	0.20	0.22	0.39	0.42	0.56	0.61	0.62	0.57	0.43	0.18
(d) Estados del Sur												
Cultivo	Período de crecimiento foliar: %					Después de alcanzar $E_{tp}$ : etapas en días						
	0-20	20-40	40-60	60-80	80-100	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70
Cultivos estacionales												
Algodón	0.06	0.09	0.32	0.66	0.85	0.82	0.71	0.60	0.50	0.49	0.28	0.17
Sorgo granífero	0.15	0.33	0.54	0.74	0.95	0.95	0.80	0.67	0.53	0.39	0.25	0.13
	ene.	feb.	mar.	abr.	mayo	jun.	jul.	ago.	sep.	oct.	nov.	dic.
Huertos frutales												
Dátiles	0.53	0.55	0.57	0.59	0.63	0.69	0.75	0.78	0.74	0.64	0.57	0.54
Vides	0.06	0.05	0.10	0.21	0.37	0.53	0.62	0.60	0.49	0.36	0.24	0.12
Toronja	0.19	0.21	0.24	0.27	0.32	0.38	0.46	0.50	0.47	0.40	0.31	0.33
Limoneros y naranjos	0.16	0.16	0.18	0.21	0.25	0.30	0.35	0.38	0.38	0.35	0.30	0.22

TABLA 5.4.1

PORCENTAJE MENSUAL DE HORAS DE LUZ, p

Procedimiento de Blaney-Criddle, 1950

Latitud Norte												
	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	Mayo	Junio	Julio	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
40°	6.73	6.73	8.30	8.92	9.99	10.08	10.34	9.56	8.41	7.78	6.73	6.53
38°	6.87	6.79	8.34	8.90	9.92	9.95	10.10	9.47	8.38	7.80	6.82	6.66
36°	6.99	6.86	8.35	8.85	9.31	9.83	9.99	9.40	8.36	7.85	6.92	6.69
34°	7.10	6.91	8.36	8.80	9.72	9.70	9.88	9.33	8.36	7.90	7.02	6.92
32°	7.20	6.97	8.37	8.72	9.36	9.60	9.77	9.28	8.34	7.93	7.11	7.05
30°	7.30	7.03	8.38	8.72	9.53	9.49	9.67	9.22	8.34	7.99	7.19	7.14
28°	7.40	7.02	8.39	8.68	9.46	9.38	9.58	9.16	8.32	8.02	7.27	7.27
26°	7.49	7.12	8.40	8.64	9.37	9.30	9.49	9.10	8.32	8.06	7.36	7.35
24°	7.58	7.17	8.40	8.60	9.30	9.19	9.41	9.05	8.31	8.10	7.43	7.46
22°	7.76	7.22	8.41	8.57	9.22	9.12	9.31	9.00	8.30	8.13	7.50	7.56
20°	7.73	7.26	8.20	8.52	9.14	9.02	9.25	8.95	8.30	8.19	7.58	7.99
18°	7.88	7.26	8.40	8.46	9.06	8.99	9.20	8.81	8.29	8.24	7.67	7.80
16°	7.94	7.30	8.42	8.45	8.98	8.98	9.07	8.80	8.28	8.24	7.72	7.90
14°	7.08	7.39	8.43	8.44	8.90	8.73	8.99	8.79	8.28	8.28	7.85	8.04
12°	8.08	7.40	8.44	8.43	8.84	8.64	8.90	8.78	8.27	8.28	7.85	8.05
10°	8.11	7.40	8.44	8.43	8.81	8.57	8.84	8.74	8.26	8.29	7.89	8.08
8°	8.13	7.41	8.45	8.39	8.75	8.51	8.77	8.70	8.25	8.31	7.89	8.11
6°	8.19	7.49	8.45	8.39	8.73	8.48	8.75	8.69	8.25	8.41	7.95	8.19
4°	8.20	7.58	8.46	8.33	8.65	8.40	8.67	8.63	8.21	8.43	7.95	8.20
2°	8.43	7.62	8.47	8.22	8.51	8.25	8.52	8.50	8.20	8.45	8.16	8.42
0°	8.49	7.67	8.49	8.22	8.49	8.22	8.49	8.49	8.19	8.49	8.22	8.49

Latitud Sur												
	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	Mayo	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
0°	8.49	7.67	8.49	8.22	8.49	8.22	8.49	8.49	8.19	8.49	8.22	8.49
2°	8.55	7.71	8.49	8.19	8.44	8.17	8.43	8.44	8.19	9.52	8.27	8.55
4°	8.64	7.76	8.50	8.17	8.39	8.08	8.20	8.41	8.19	8.56	8.33	8.65
6°	8.71	7.81	8.50	8.12	8.30	8.00	8.19	8.37	8.18	8.59	8.38	8.74
8°	8.79	7.84	8.51	8.11	8.24	7.91	8.13	8.32	8.18	8.62	8.47	8.84
10°	8.85	8.76	8.52	8.09	8.18	7.84	8.11	8.28	8.18	8.65	8.52	8.90
12°	8.91	7.91	8.53	8.06	8.15	7.79	8.08	8.26	8.17	8.67	8.58	8.95
14°	8.97	7.97	8.54	8.03	8.03	7.70	7.08	8.19	8.16	8.69	8.65	9.01
16°	9.09	8.02	8.56	7.98	7.98	7.96	7.57	7.94	8.14	8.76	8.72	9.17
18°	9.18	8.06	8.57	7.93	7.99	7.50	7.88	8.90	8.14	8.80	8.80	9.24
20°	9.25	8.09	8.58	7.92	7.83	7.41	7.73	8.05	8.13	8.83	8.85	9.32
22°	9.36	8.12	8.58	7.89	7.74	7.30	7.76	8.03	8.13	8.86	8.90	9.38
24°	9.44	8.17	8.59	7.87	7.60	7.24	7.58	7.99	8.12	8.89	8.96	9.47
26°	9.52	8.28	8.00	7.81	7.56	7.07	7.49	7.87	8.11	8.94	9.10	9.61
28°	9.61	8.31	8.61	7.79	7.49	6.99	7.40	7.85	8.10	8.97	9.19	9.74
30°	9.69	8.33	8.63	7.75	7.43	6.94	7.30	7.80	8.09	9.00	9.24	9.80
32°	9.76	8.36	8.64	7.70	7.39	6.85	7.20	7.73	8.08	9.04	9.31	9.87
34°	9.88	8.41	8.65	7.68	7.30	6.73	7.10	7.69	8.06	9.07	9.38	9.99
36°	10.06	8.53	8.67	7.61	7.10	6.59	6.99	7.59	8.06	9.15	9.51	10.21
38°	10.14	8.61	8.68	7.59	7.03	6.46	6.87	7.51	8.05	9.19	9.69	10.34
40°	10.24	8.65	8.70	7.54	6.96	6.33	6.73	7.46	8.04	9.23	9.69	10.42
42°	10.39	8.72	8.71	7.49	6.85	6.20	6.60	7.39	8.01	9.27	9.79	10.57
44°	10.52	8.81	8.72	7.44	6.73	6.04	6.45	7.30	8.00	9.34	9.91	10.72
46°	10.68	8.88	8.73	7.39	6.61	5.87	6.30	7.21	7.98	9.41	10.03	10.90
48°	10.85	8.98	8.76	7.32	6.45	5.69	6.13	7.12	7.96	9.47	10.17	11.09
50°	11.03	9.06	8.77	7.25	6.31	5.48	5.98	7.03	7.95	9.53	10.32	11.30

TABLA 5.4.2

VALORES DE K

Método de Blaney-Criddle (1950)

Cultivo	K coeficiente estacional	(k) máximo mensual
Alfalfa	0,85	0,95 - 1,25
Algodón	0,70	0,75 - 1,10
Arroz	1,00	1,10 - 1,30
Cereales finos	0,75	0,85 - 1,00
Frutales cítricos	0,60	0,65 - 0,75
Frutales de hoja caduca	0,65	0,70 - 0,95
Habas	0,65	0,75 - 0,85
Maíz	0,75	0,80 - 1,20
Papas	0,70	0,85 - 1,00
Praderas naturales	0,75	0,85 - 1,15
Remolacha azucarera	0,70	0,85 - 1,00

TABLA 5.4.3

VALORES DEL COEFICIENTE  $k$  - FORMULA DE HARGREAVES (1966)

Estación de crecimiento %	Grupo A	Grupo B	Grupo C	Grupo D	Grupo E	Grupo F	Grupo G	Arroz
0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0.20	0.15	0.12	0.08	1.00	0.60	0.55	0.90
10	0.36	0.27	0.22	0.15	1.00	0.60	0.60	0.92
15	0.50	0.38	0.30	0.19	1.00	0.60	0.65	0.95
20	0.64	0.48	0.38	0.27	1.00	0.60	0.70	0.98
25	0.75	0.56	0.45	0.33	1.00	0.60	0.75	1.00
30	0.84	0.63	0.50	0.40	1.00	0.60	0.80	1.03
35	0.92	0.69	0.55	0.46	1.00	0.60	0.85	1.06
40	0.97	0.73	0.58	0.52	1.00	0.60	0.90	1.08
45	0.99	0.74	0.60	0.58	1.00	0.60	0.95	1.10
50	1.00	0.75	0.60	0.65	1.00	0.60	1.00	1.10
55	1.00	0.75	0.60	0.71	1.00	0.60	1.00	1.10
60	0.99	0.74	0.60	0.77	1.00	0.60	1.00	1.10
65	0.96	0.72	0.58	0.82	1.00	0.60	0.95	1.10
70	0.91	0.68	0.55	0.88	1.00	0.60	0.90	1.05
75	0.85	0.64	0.51	0.90	1.00	0.60	0.85	1.00
80	0.75	0.56	0.45	0.90	1.00	0.60	0.80	0.95
85	0.60	0.45	0.36	0.80	1.00	0.60	0.75	0.90
90	0.46	0.35	0.28	0.70	1.00	0.60	0.70	0.85
95	0.28	0.21	0.17	0.60	1.00	0.60	0.55	0.80
100	0	0	0	0	0	0	0	0

Grupo A: frijol, maíz, algodón, papas, remolacha azucarera y tomates

Grupo B: dátiles, olivo, durazno, ciruela y nogal

Grupo C: melón, cebada, zanahorias, vides y almendras

Grupo D: espárragos, cebada, apio, lino, avena, trigo y otros cereales menores y sorgo granífero

Grupo E: pasto pangola, trébol, huertos con cultivos de cobertura, bananas y plátanos

Grupo F: naranjo, limonero y toronja

Grupo G: caña de azúcar y alfalfa

TABLA 5.5.1

VALORES DEL COEFICIENTE, k, Y DEL AREA BAJO LAS CURVAS, A, EN FUNCION DE t% o Vc%

Vc% t%	K = 0,50		K = 0,55		K = 0,60		K = 0,65		K = 0,70	
	k	A	k	A	k	A	k	A	k	A
10	0,226	1,461	0,249	1,601	0,272	1,754	0,294	1,900	0,317	2,046
20	0,365	4,443	0,401	4,887	0,438	5,331	0,474	5,776	0,511	6,220
30	0,475	8,669	0,523	9,536	0,571	10,403	0,618	11,270	0,666	12,137
40	0,559	13,866	0,615	15,253	0,671	16,640	0,727	18,026	0,783	19,413
50	0,615	19,758	0,676	21,734	0,783	23,709	0,799	25,685	0,861	27,671
60	0,643	26,068	0,707	28,674	0,771	31,281	0,836	33,888	0,900	36,495
70	0,643	32,523	0,708	35,785	0,772	39,027	0,837	42,280	0,901	45,532
80	0,616	38,846	0,678	42,731	0,740	46,616	0,801	50,500	0,863	54,385
90	0,562	44,763	0,618	49,240	0,674	53,716	0,731	58,193	0,787	62,669
100	0,480	50,000	0,528	55,000	0,576	60,000	0,624	65,000	0,672	70,000
Vc% t%	K = 0,75		K = 0,80		K = 0,85		K = 0,90		K = 0,95	
	k	A	k	A	k	A	k	A	k	A
10	0,340	2,192	0,362	2,338	2,385	2,484	0,407	2,630	0,430	2,777
20	0,547	6,664	0,584	7,108	0,620	7,553	0,657	7,997	0,639	8,441
30	0,713	13,004	0,761	13,871	0,809	14,738	0,856	15,605	0,904	16,472
40	0,839	20,800	0,895	22,186	0,951	23,573	1,006	24,959	1,063	26,346
50	0,922	29,637	0,984	31,612	1,045	33,588	1,107	35,564	1,168	37,540
60	0,964	39,102	1,028	41,708	1,093	44,315	1,157	46,922	1,221	49,529
70	0,965	48,784	1,030	52,036	1,094	44,989	1,158	58,541	1,222	61,793
80	0,925	58,270	0,986	62,145	1,048	66,039	1,109	69,923	1,171	73,800
90	0,843	67,145	0,899	71,622	0,956	76,098	1,012	80,574	1,068	85,051
100	0,720	75,000	0,768	80,000	0,816	85,000	0,874	90,000	0,912	95,000

TABLA 6.1.1

LLUVIA ANUAL DE LA ESTACION AGUA BLANCA

m	Lluvia mm	y - $\bar{y}$	(y - $\bar{y}$ ) <sup>2</sup>	F = m/n + 1
19	1923	470	221.000	0,95
18	1817	364	132.500	0,90
17	1754	301	90.700	0,85
16	1656	203	41.200	0,80
15	1593	140	19.600	0,75
14	1556	103	10.600	0,70
13	1553	100	10.000	0,65
12	1549	96	9.220	0,60
11	1532	79	6.240	0,55
10	1511	58	3.370	0,50
9	1482	39	1.520	0,45
8	1412	41	1.680	0,40
7	1389	64	4.100	0,35
6	1374	79	6.240	0,30
5	1264	189	25.700	0,25
4	1163	285	81.200	0,20
3	1139	314	98.500	0,15
2	1064	389	151.300	0,10
1	879	574	330.000	0.05
			<u>330.000</u>	
			$\Sigma$ 1.254.670	

$$\bar{y} = \frac{\Sigma y}{n} = 1453 \quad n = 19 \text{ años}$$

$$\sigma = \frac{\Sigma(y - \bar{y})^2}{n - 1} = \frac{1.235.040}{19} = 258$$

$$\bar{y} + \sigma = 1711 \quad \bar{y} - \sigma = 1195$$

TABLA 6.2.1

RESUMEN DE LAS PROPIEDADES FISICAS DEL SUELO

Textura del Suelo	Filtración <sup>1</sup> y permeabilidad cm/hr	Total espacio poroso % W	Peso específico aparente a	Capacidad de campo Wc	Marchitez permanente % Wm	Humedad Total Utilizable <sup>2</sup>		
						Peso seco %	Volumen %	cm/m
Arenoso	5 (2,5 - 25,5)	38 (32-42)	1,65 (1,55-1,80)	9 ( 6-12)	4 ( 2- 6)	5 ( 4- 6)	8 ( 6-10)	8 ( 7-10)
Franco-arenoso	2,5 (1,3 - 7,6)	43 (40-47)	1,50 (1,40-1,60)	14 (10-18)	6 ( 4- 8)	8 ( 6-10)	12 ( 9-15)	12 ( 9-15)
Franco	13 (0,8 - 2,0)	47 (43-49)	1,40 (1,35-1,50)	22 (18-26)	10 ( 8-12)	12 (10-14)	17 (14-20)	17 (14-19)
Franco-arcilloso	0,8 (0,25- 1,5)	49 (47-51)	1,35 (1,30-1,40)	27 (23-31)	13 (11-15)	14 (12-16)	19 (16-22)	19 (17-22)
Arcillo-arenoso	0,25 (0,03- 0,5)	51 (49-53)	1,30 (1,25-1,35)	31 (27-35)	15 (13-17)	16 (14-18)	21 (18-23)	23 (18-23)
Arcilloso	0,5 (0,01- 0,1)	53 (51-55)	1,25 (1,20-1,30)	35 (31-39)	17 (15-19)	18 (16-20)	23 (20-25)	23 (20-25)

NOTA: Los intervalos normales son consignados entre paréntesis.

<sup>1</sup>Los intervalos de filtración real varían mucho con la estructura del suelo y su estabilidad estructural, incluso, aún más de lo indicado en esta columna.

<sup>2</sup>La humedad fácilmente utilizable representa un 75% de la totalmente utilizable.

TABLA 6.3.1

CAPACIDAD PROVISIONAL DE ALMACENAJE DE AGUA  
EN DIFERENTES COMBINACIONES DE SUELO Y VEGETACION  
(Según Thornthwaite-Mather 1957)

Tipo de Suelo	Zona Radicular (m)	Dispon. de agua (mm)
a) espinacas, arvejas, remolachas, zanahorias, etc.		
A - arena fina	0.50	50
B - franco arenoso fino	0.50	75
C - franco limoso	0.62	125
D - franco arcilloso	0.40	100
E - arcilloso	0.25	75
b) maíz, algodón, tabaco, cereales, granos.		
A - arena fina	0.75	75
B - franco arenoso fino	1.00	150
C - franco limoso	1.00	200
D - franco arcilloso	0.80	200
E - arcilloso	0.50	150
c) alfalfa, pastos, arbustos.		
A - arena fina	1.00	100
B - franco arenoso fino	1.00	150
C - franco limoso	1.25	250
D - franco arcilloso	1.00	250
E - arcilloso	0.67	200
d) montes frutales.		
A - arena fina	1.50	150
B - franco arenoso fino	1.67	250
C - franco limoso	1.50	300
D - franco arcilloso	1.00	250
E - arcilloso	0.67	200
e) bosques desarrollados.		
A - arena fina	2.50	250
B - franco arenoso fino	2.00	300
C - franco limoso	2.00	400
D - franco arcilloso	1.60	400
E - arcilloso	1.17	350

TABLA 6.4.1

BALANCE HIDRICO DE MORENA - VENEZUELA

	A	M	J	J	A	S	O	N	D	E	F	M	Año
ETP (mm)	154	122	101	106	109	104	102	106	117	139	152	186	1498
P (mm)	73	209	273	274	242	152	150	96	43	12	10	8	1542
di (mm)	0	87	100	100	100	100	100	90	16	0	0	0	
Exceso (mm)	0	0	159	168	133	48	48	0	0	0	0	0	556
Déficit (mm)	73	0	0	0	0	0	0	0	0	111	142	178	504

NOTA: ETP = 0,80 EV

TABLA 7.1.1

## EFICIENCIA DEL RIEGO POR SUPERFICIE

Según Manual AMES (1962)

TEXTURA DEL SUELO Y TOPOGRAFIA  ---	SISTEMA DE RIEGO			
	Melgas	Surco o co- rrugación	Melgas en contorno	Tazas (pa- langanas)
1. Arenoso				
a) bien nivelado	60	40-50	45	70
b) nivelación insuficiente	40-50	35	30	-
c) quebrado o pendiente	-	20-30	20	-
2. Medio, profundo				
a) bien nivelado	70-75	65	55	70
b) nivelación insuficiente	50-60	55	45	-
c) quebrado o pendiente	-	35	35	-
3. Medio, poco profundo				
a) bien nivelado	60	50	45	60
b) nivelación insuficiente	40-50	35	35	-
c) quebrado o pendiente	-	30	30	-
4. Pesado				
a) bien nivelado	60	65	50	60
b) nivelación insuficiente	40-50	55	45	-
c) quebrado o pendiente	-	35-45	30	-

TABLA 7.1.2

EFICIENCIAS DE RIEGO POR ASPERSION  
según Manual de Ames (1962)

LAMINA DE AGUA APLICADA	EVAPOTRANSPIRACION MAXIMA EN mm/día		
	5 mm o menos	5 - 7,5 mm	7,5 o más mm
mm	Velocidad de viento promedio 0,64 Km/h		
25	68%	65%	62%
50	70%	68%	65%
100	75%	70%	68%
125	80%	75%	70%
	Velocidad de viento promedio 6,4 - 16 Km/h		
25	65%	62%	60%
50	68%	65%	62%
100	70%	68%	65%
125	75%	70%	68%
	Velocidad de viento promedio 16 - 24 Km/h		
25	62%	60%	58%
50	65%	62%	60%
100	68%	65%	62%
125	70%	68%	65%

# DISTRIBUCION DEL AGUA DE RIEGO según Jensen (1967)

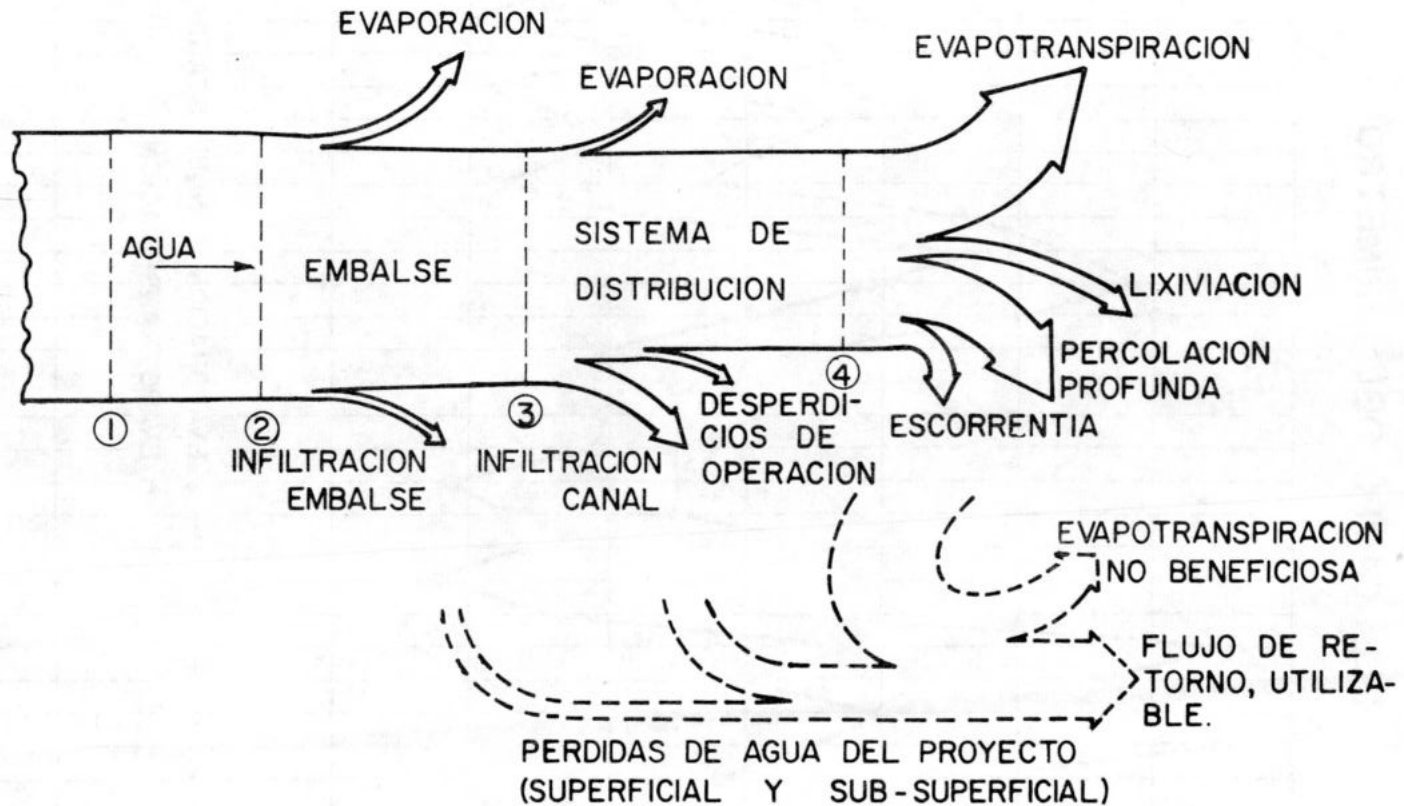


FIG. 2.0.0

# EVAPOTRANSPIRACION MAXIMA Y EVAPORACION TANQUE STANDARD "A" DEL CAMPO DEL LISIMETRO

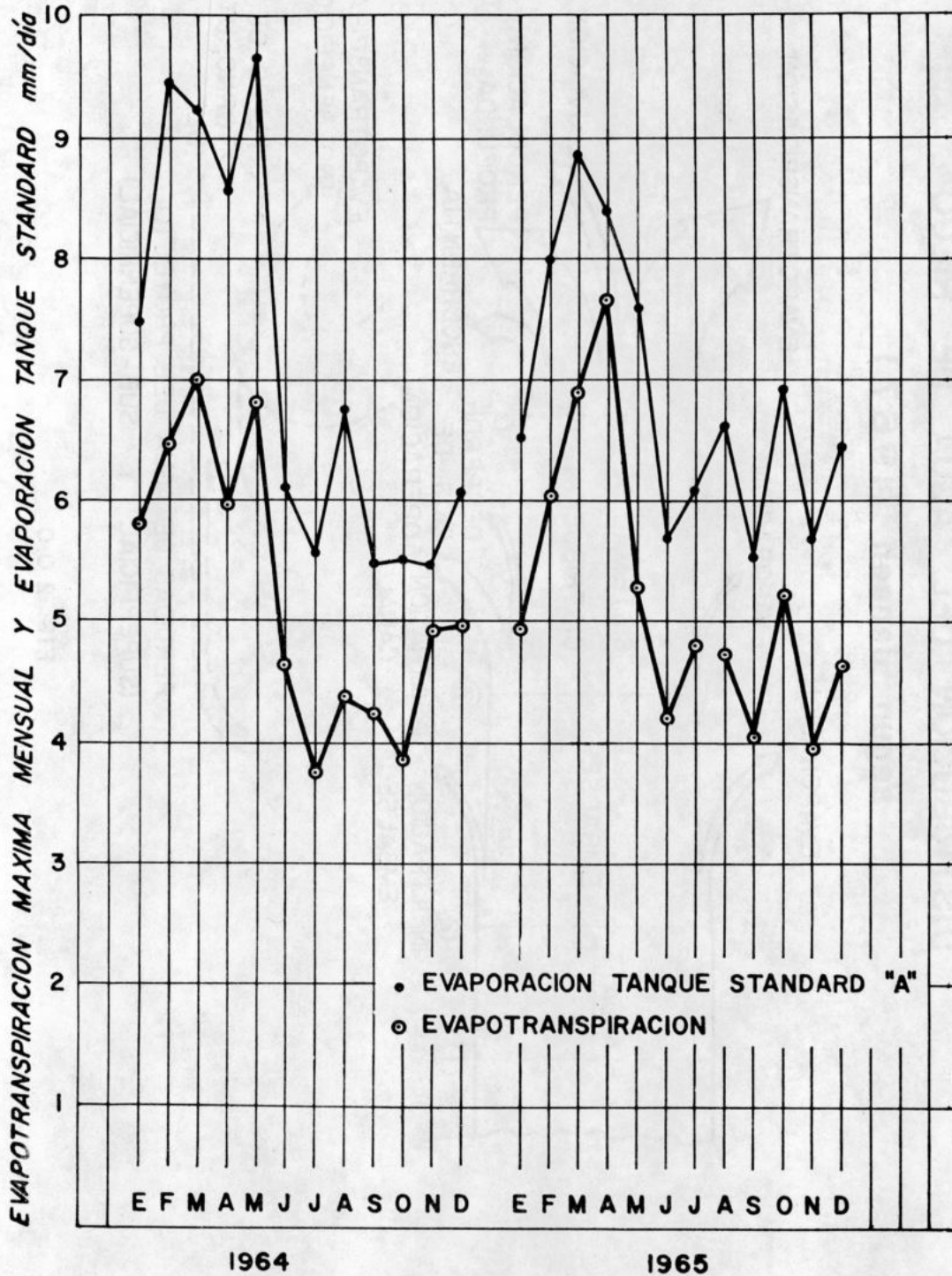
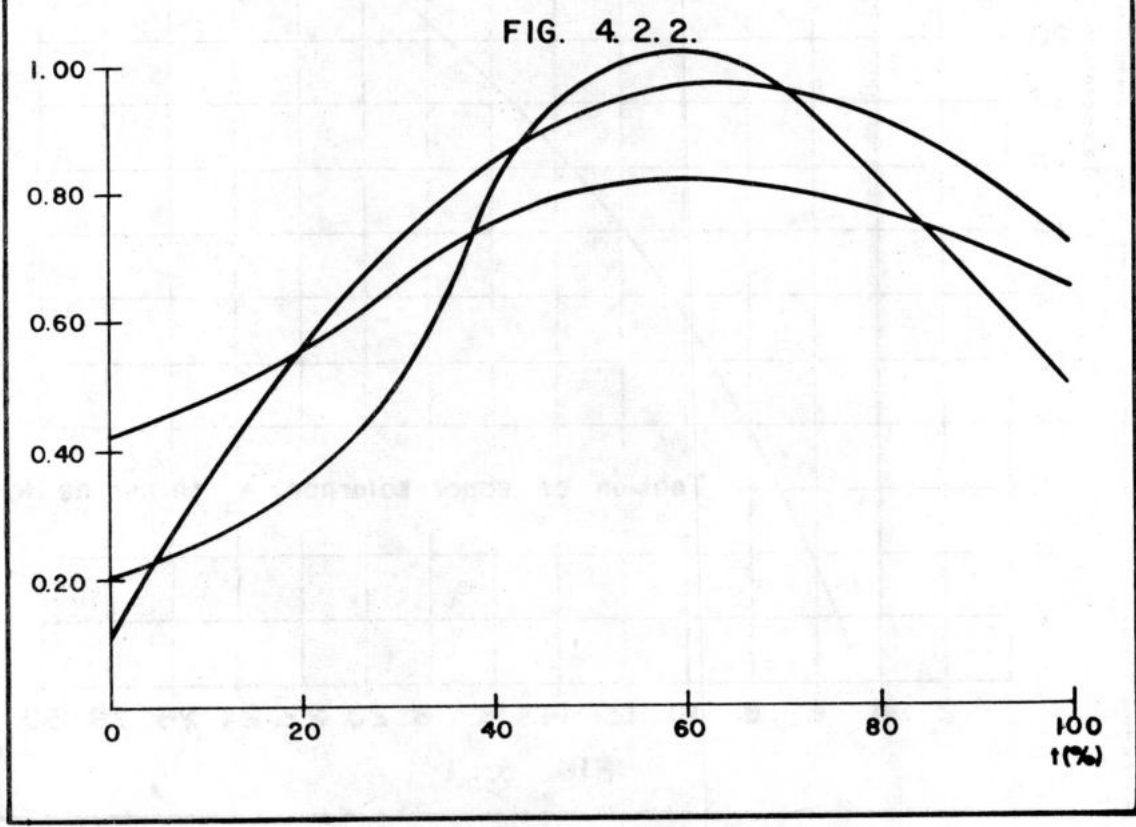
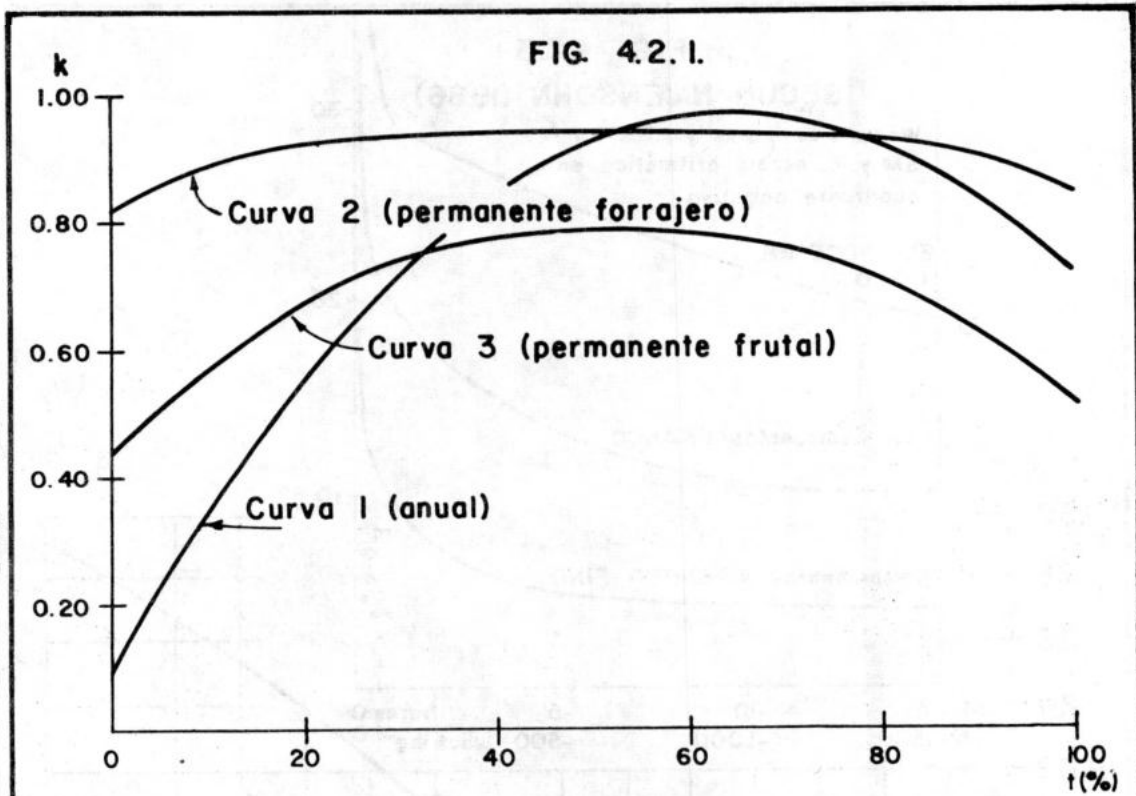
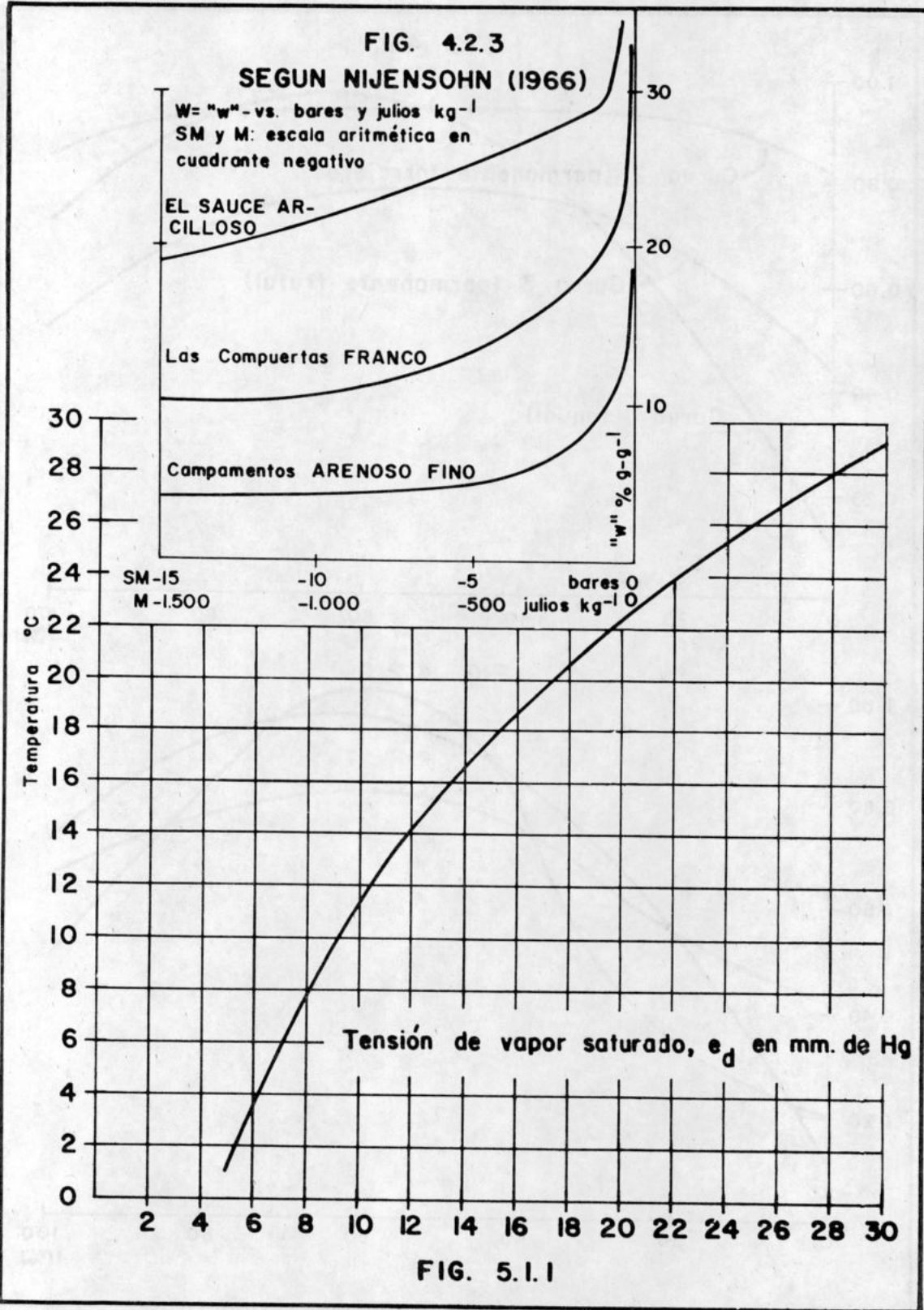


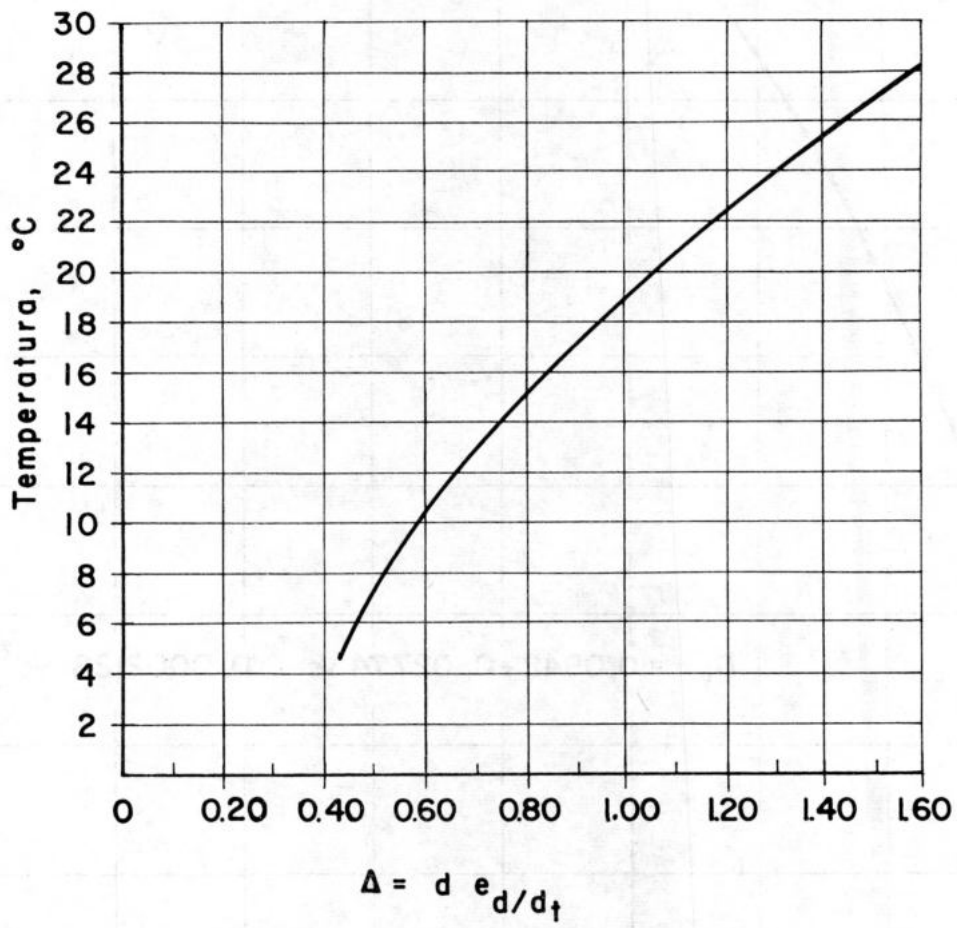
FIG. 4.11





**FIG. 5.1.1**

FIG. 5.1.2.



$C_{Vc}$ , FORMULA DE GRASSI - CHRISTIANSEN

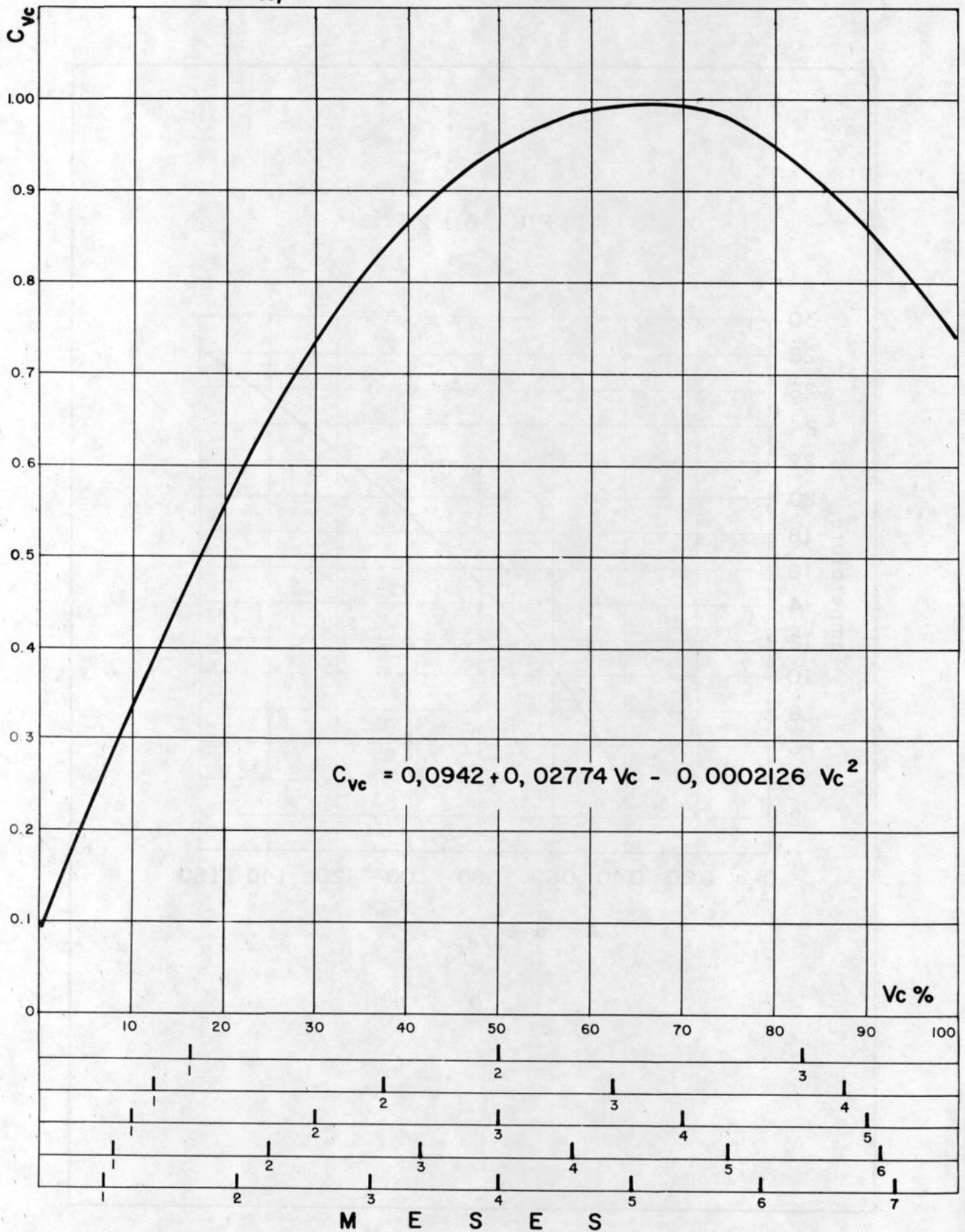


FIG. 5.3.1

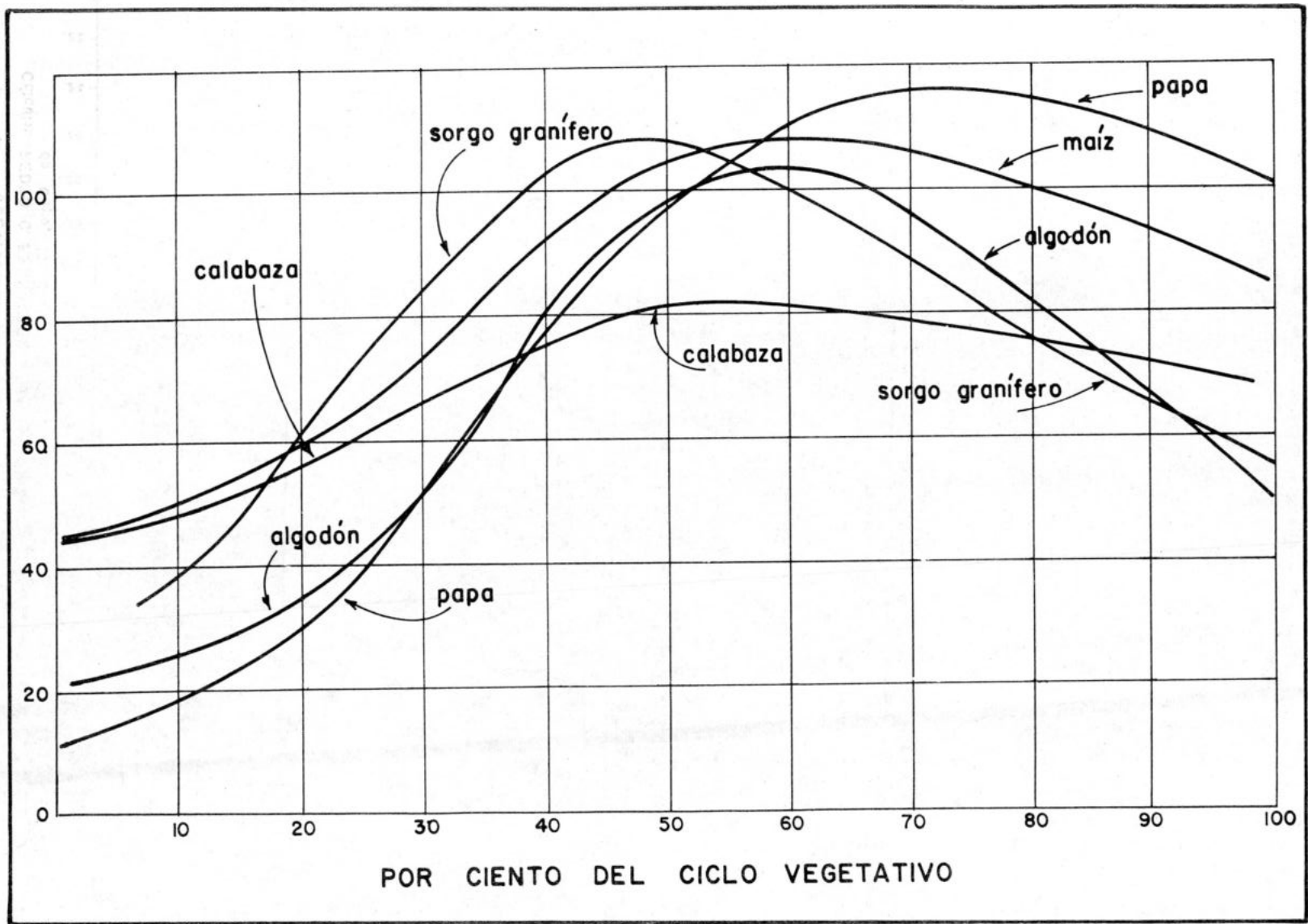


FIG. 5.4.1

FIG. 5. 4. 2. NOMOGRAMA PARA ESTIMAR LA EVAPOTRANSPIRACION DE LOS CULTIVOS POR LA FORMULA DE: GRASSI - CHRISTIANSEN

Cálculo: PEDRO C. FERNANDEZ, Instituto de Suelos y Riego, Universidad Nacional

da Cuyo, Mendoza, Argentina.-

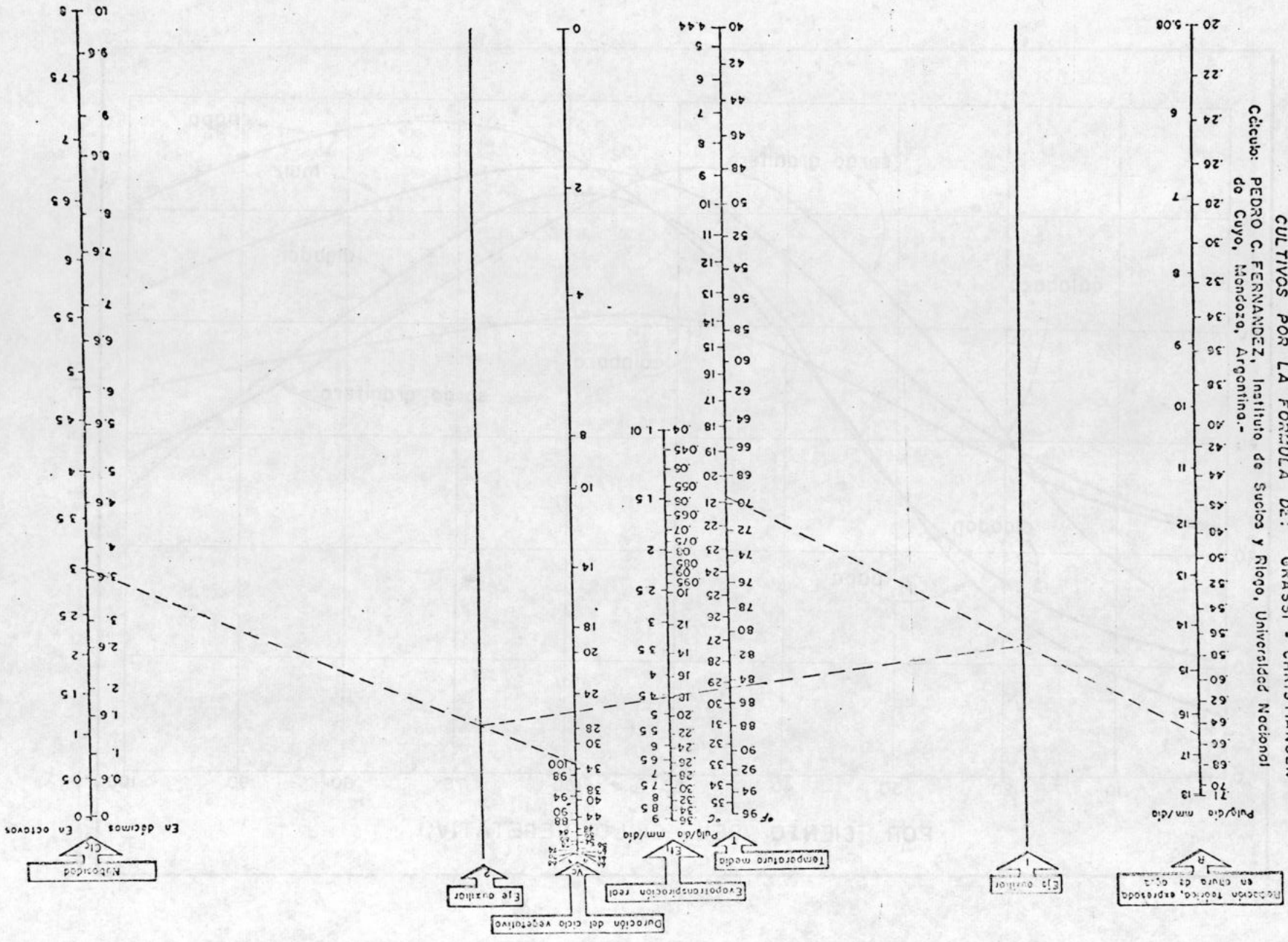
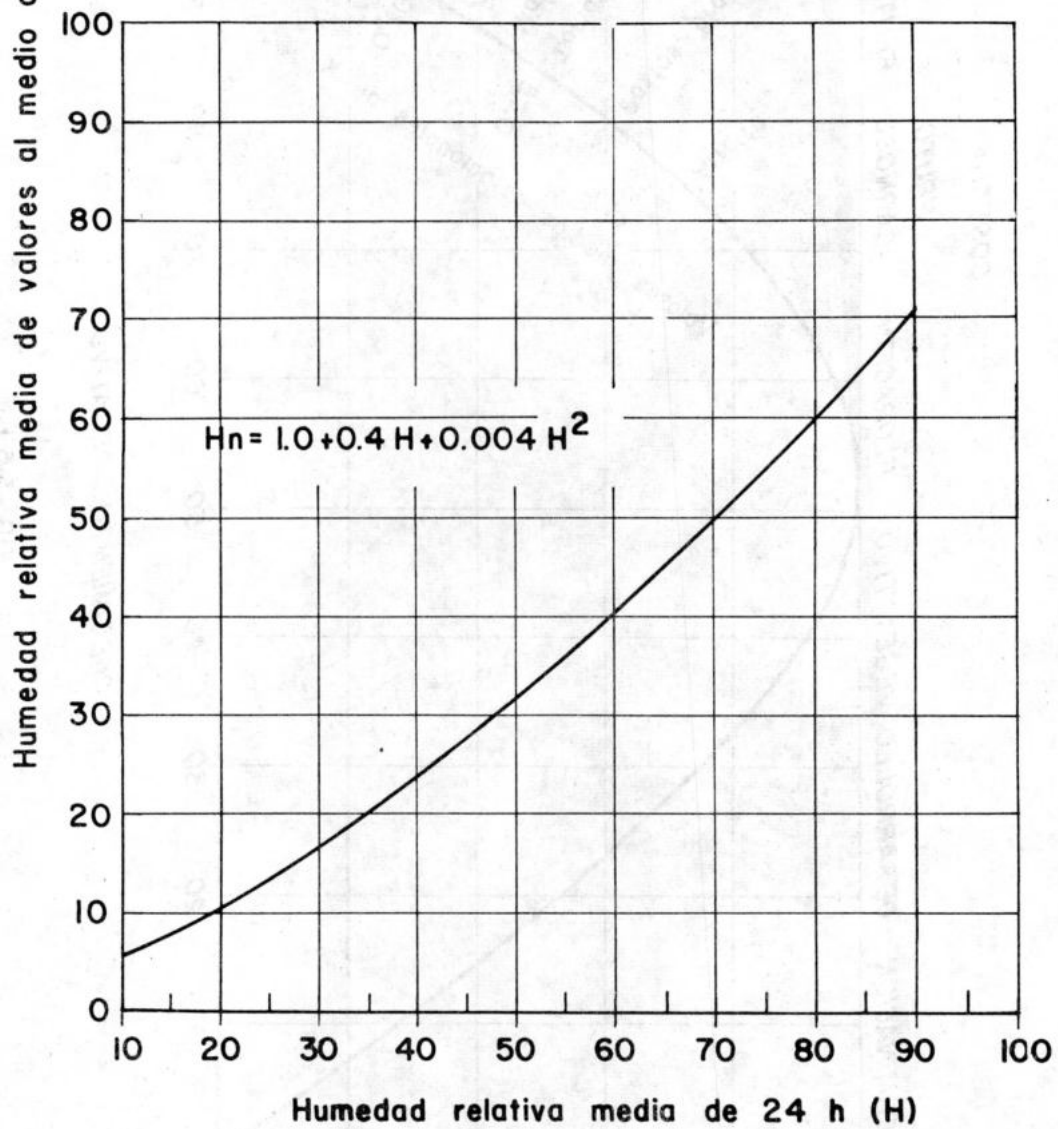


Fig. 5.4.3. Relación entre humedad relativa media diaria y la humedad relativa media al medio día.  
Según AL BARRAK (1964)



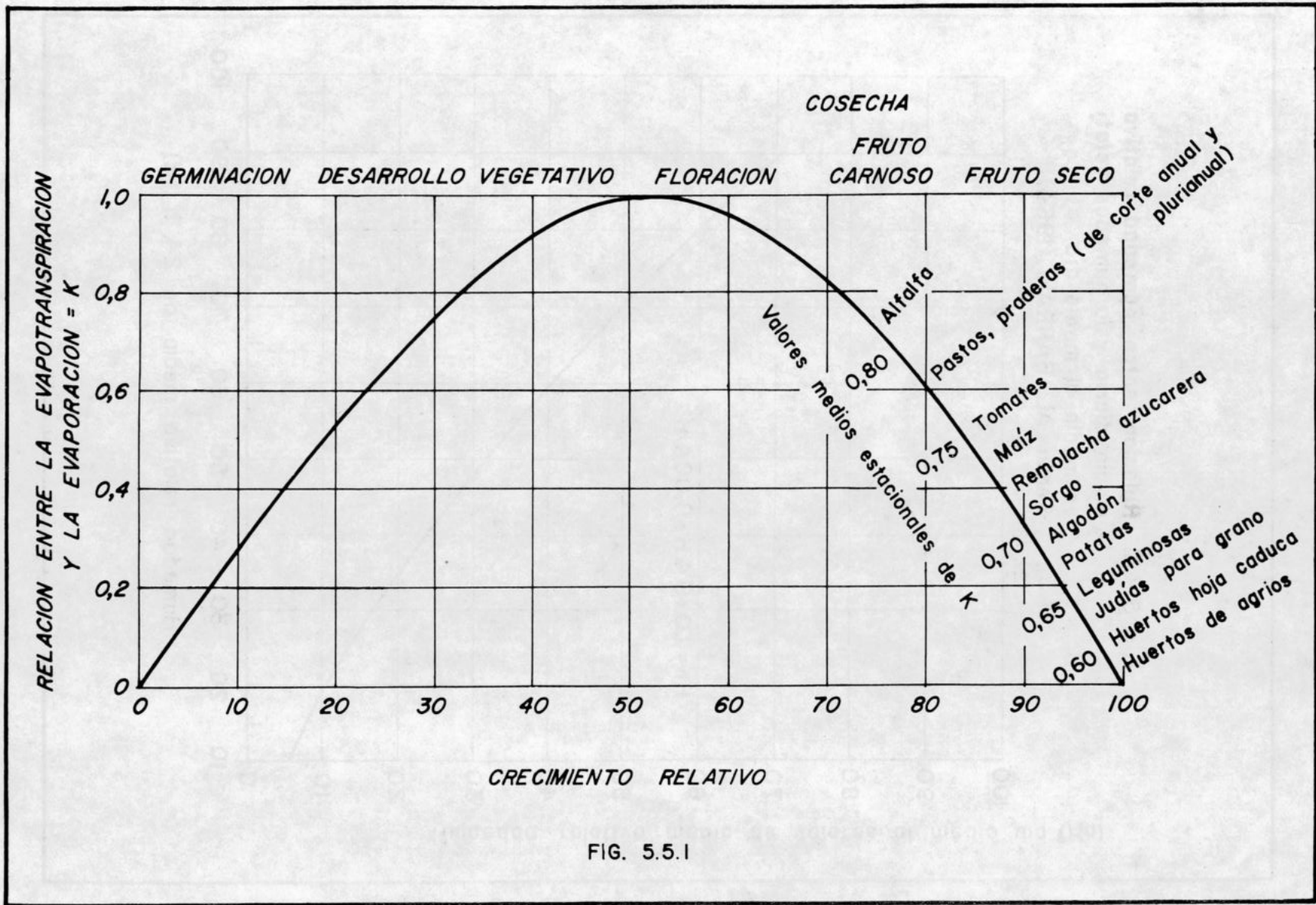


FIG. 5.5.1

FIG. 5.6.1.

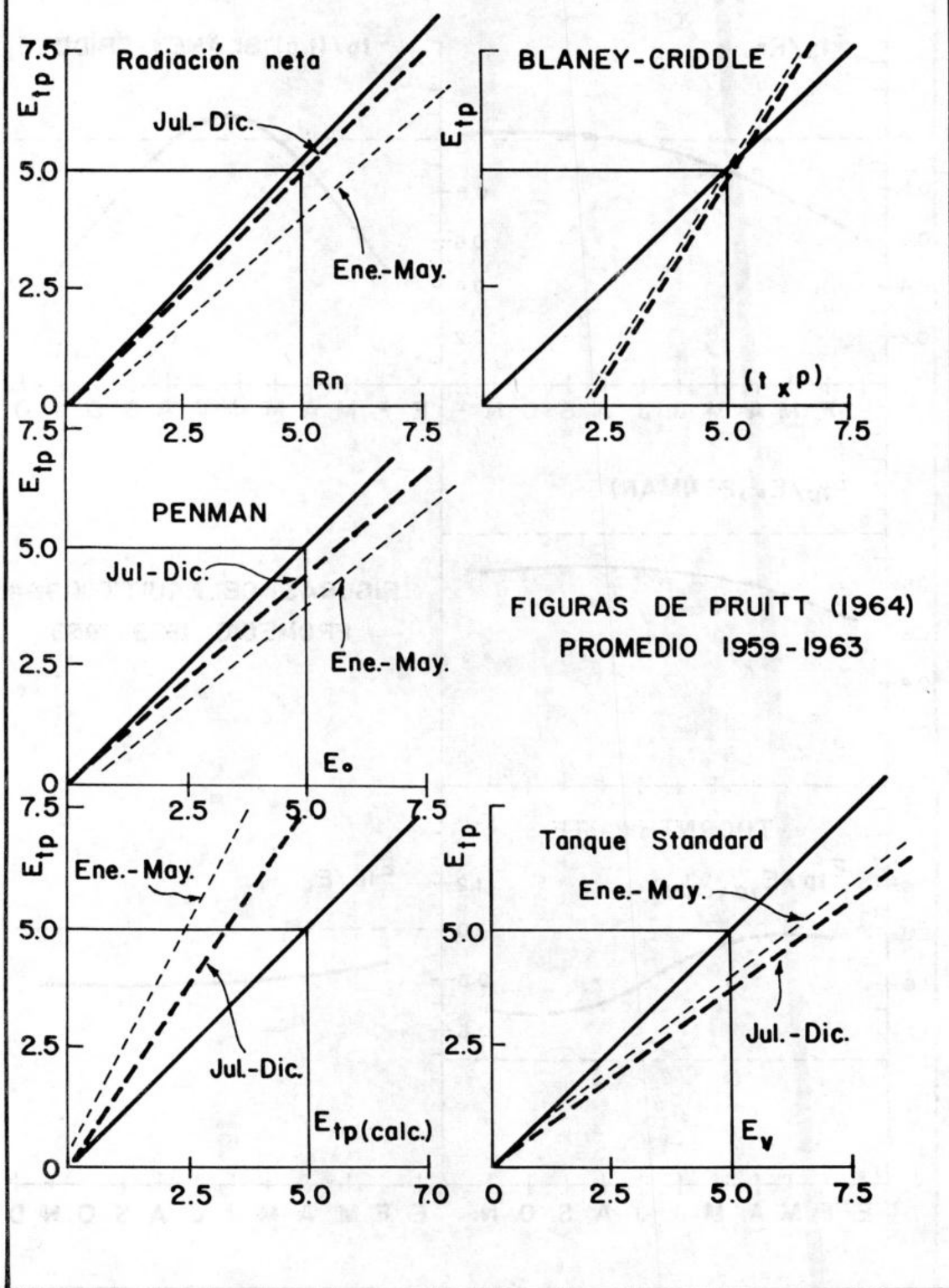
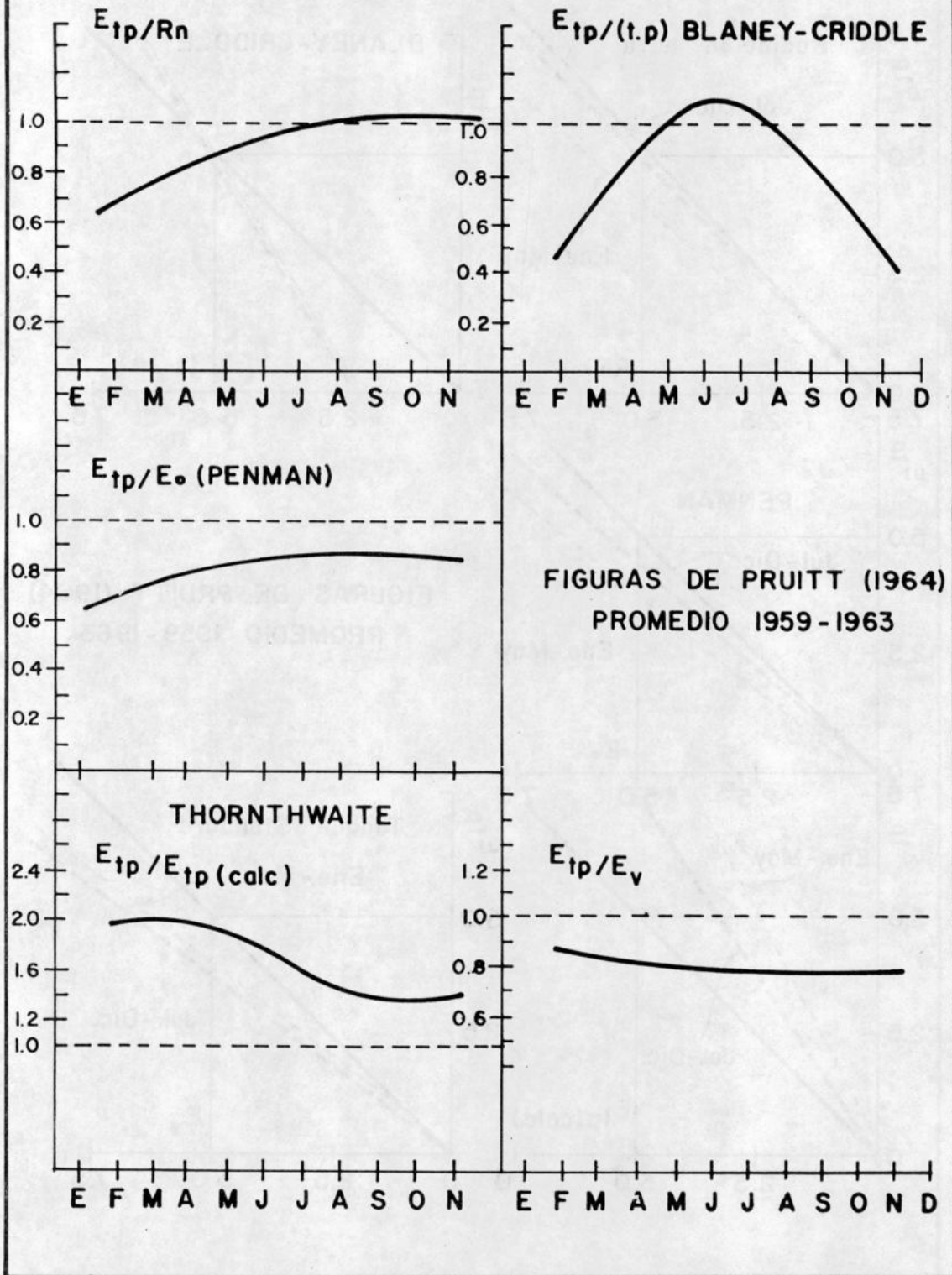


FIG. 5.6. 2.



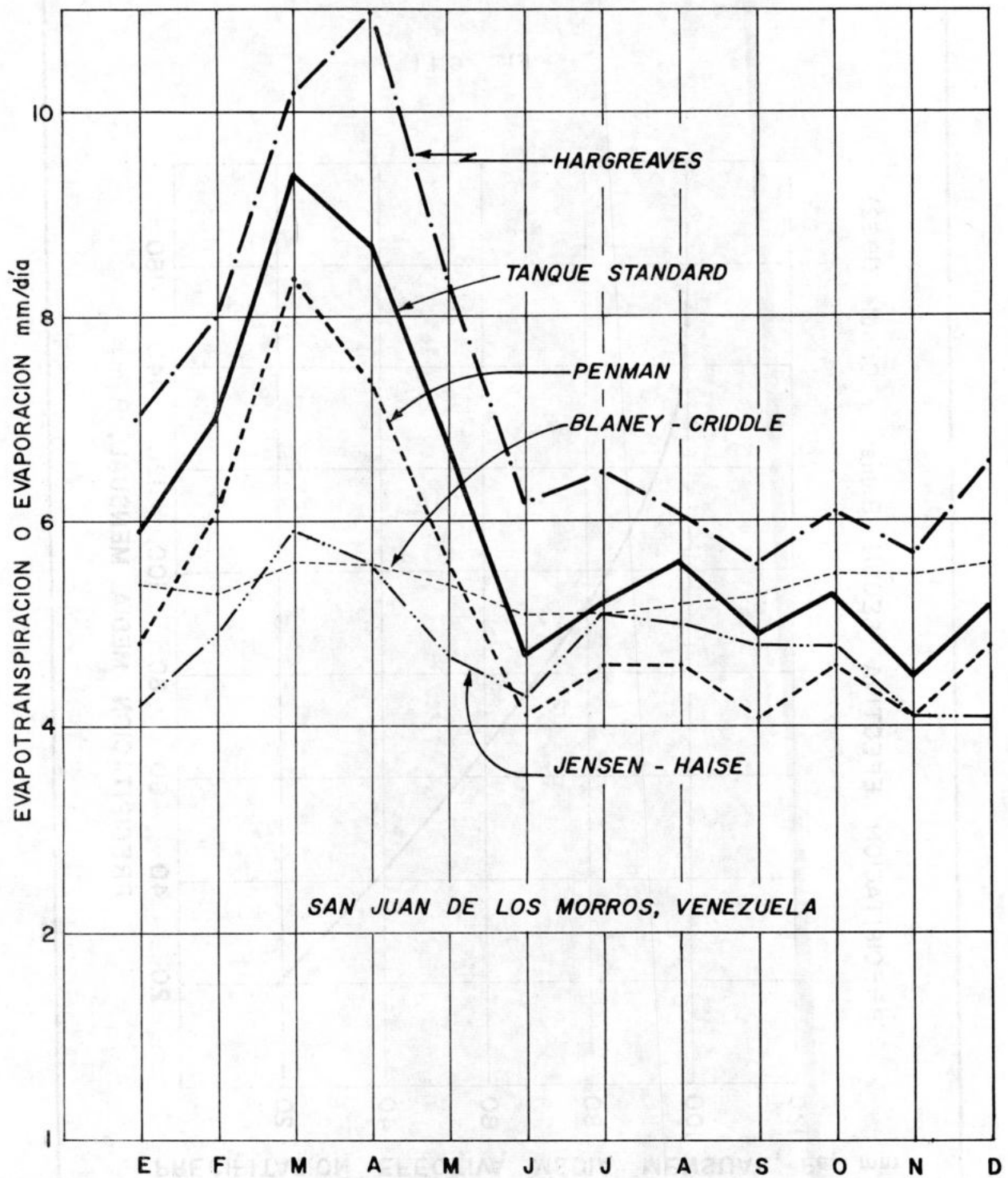


FIG. 5.63.

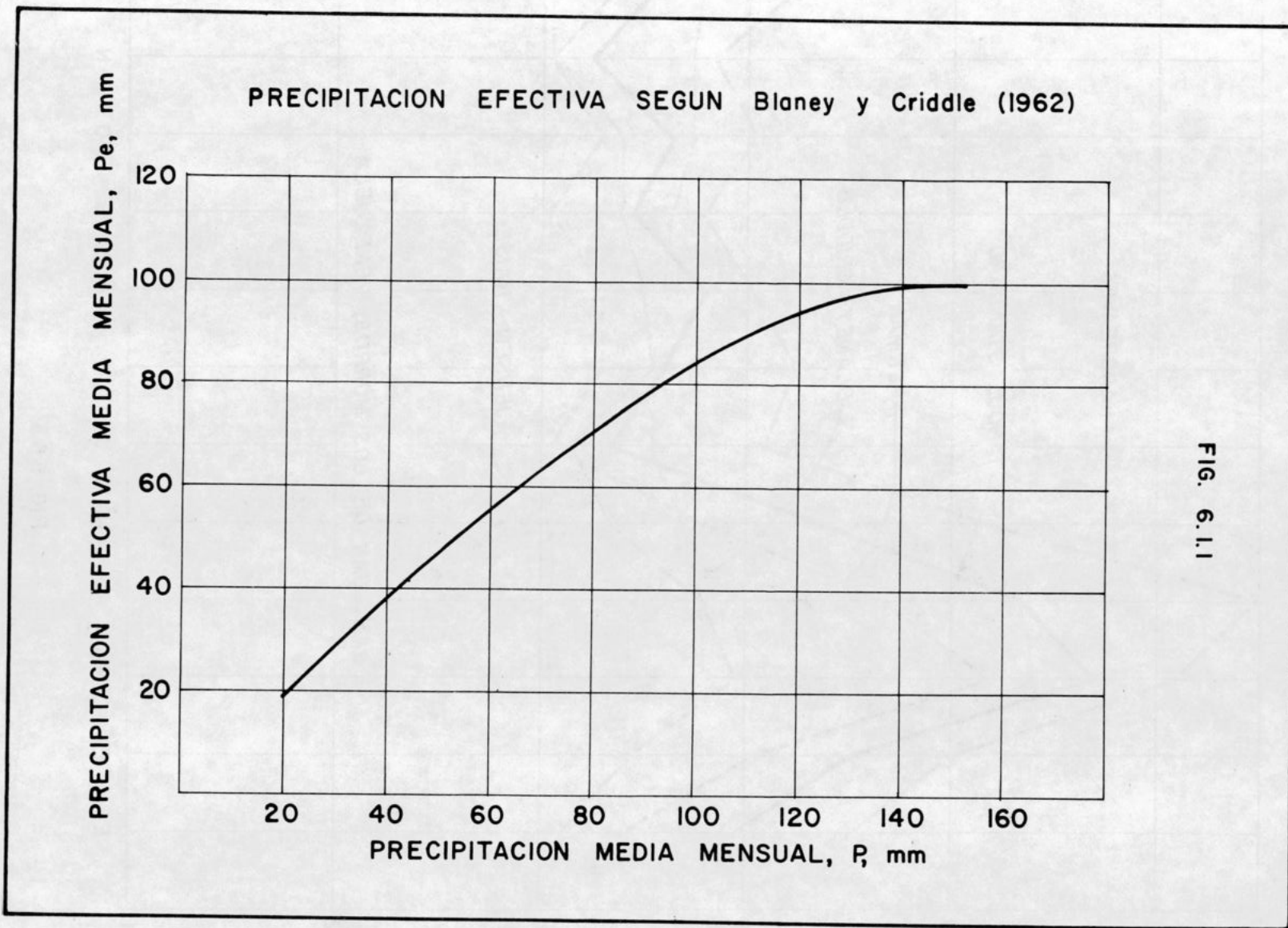


FIG. 6.1.1

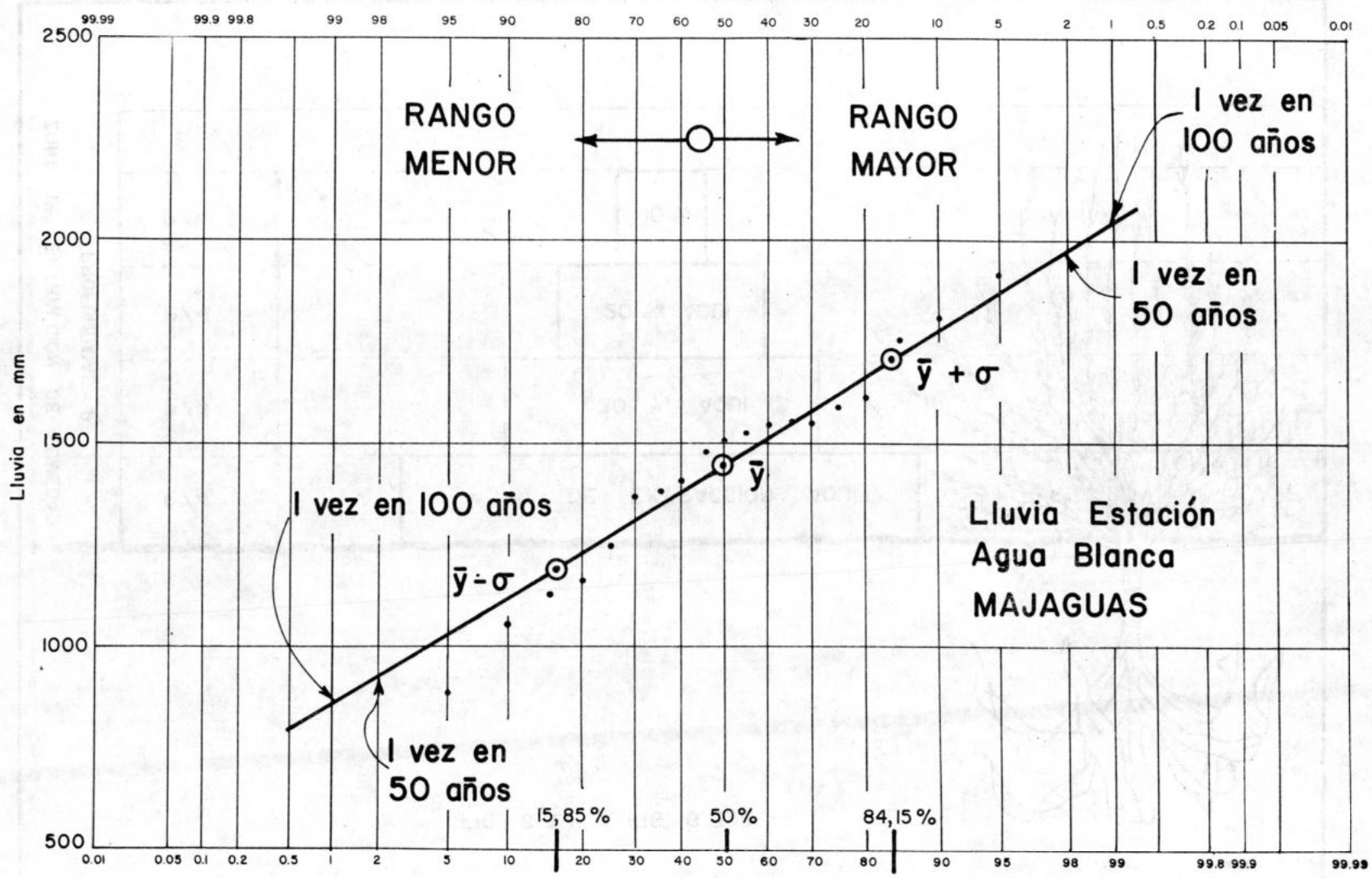


FIG. 6.1.2

FIG. 6.3.1 y FIG. 6.3.2

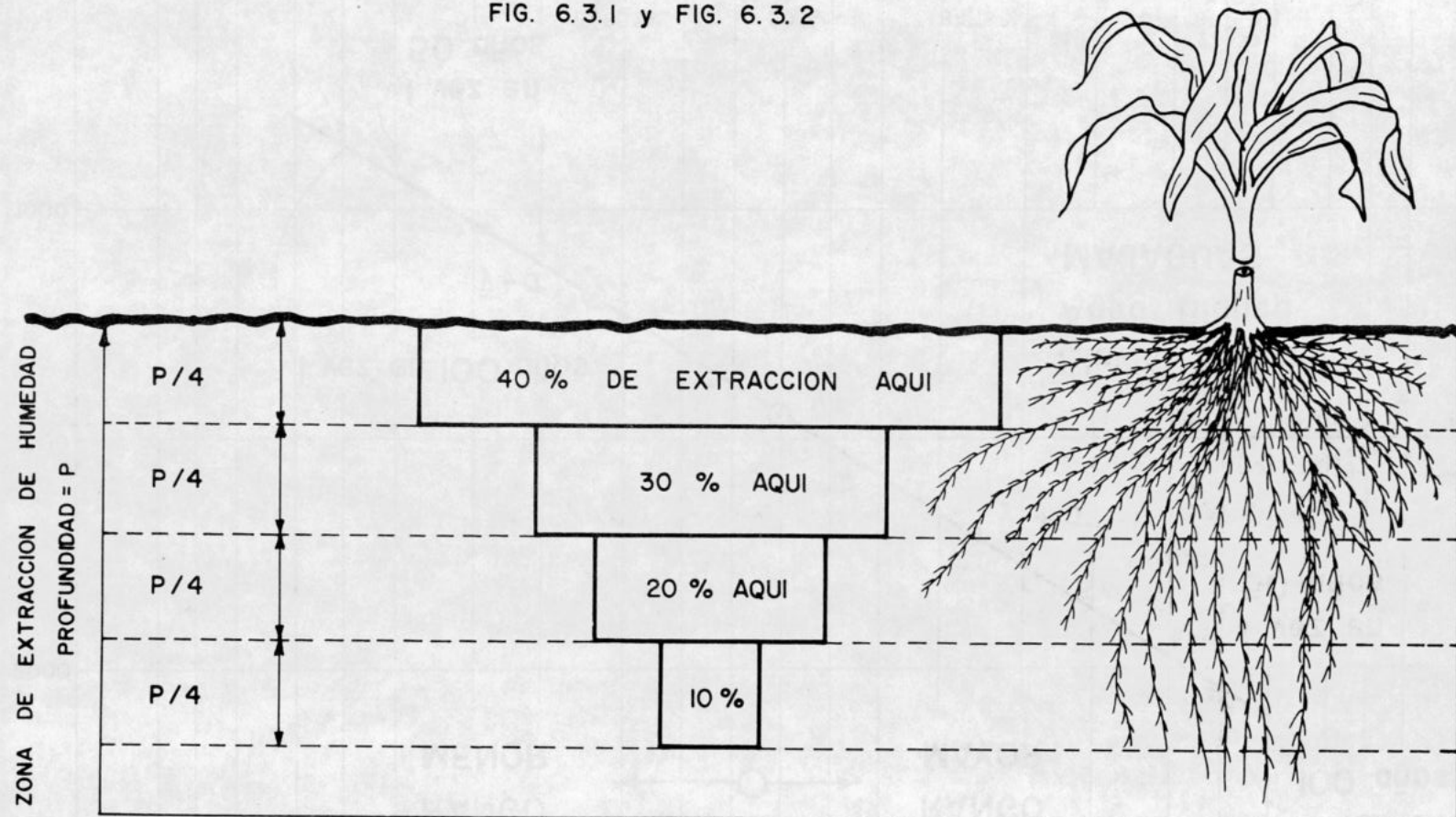
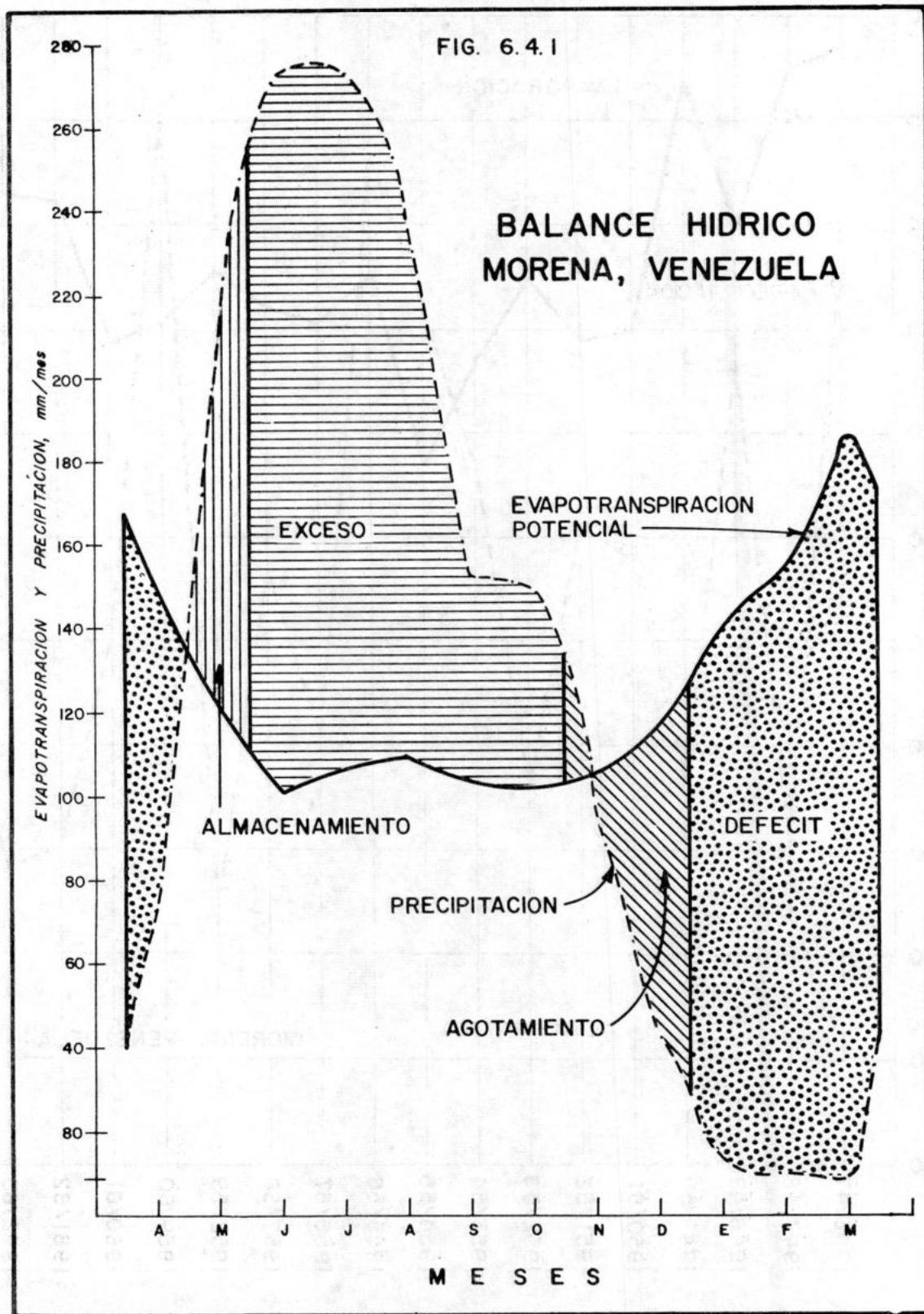


FIG. 6.4.1

### BALANCE HIDRICO MORENA, VENEZUELA



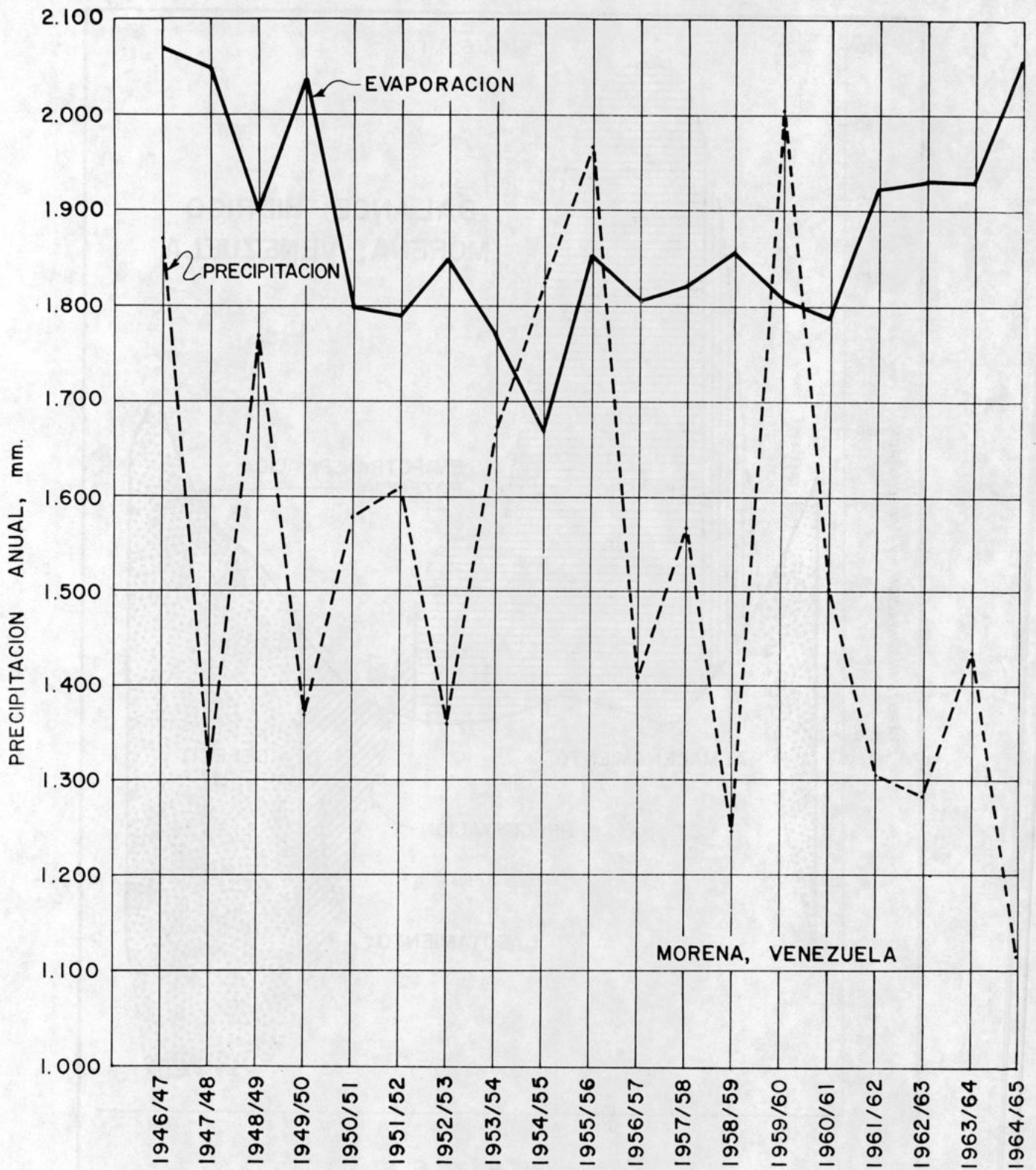


FIG. 6.4.2

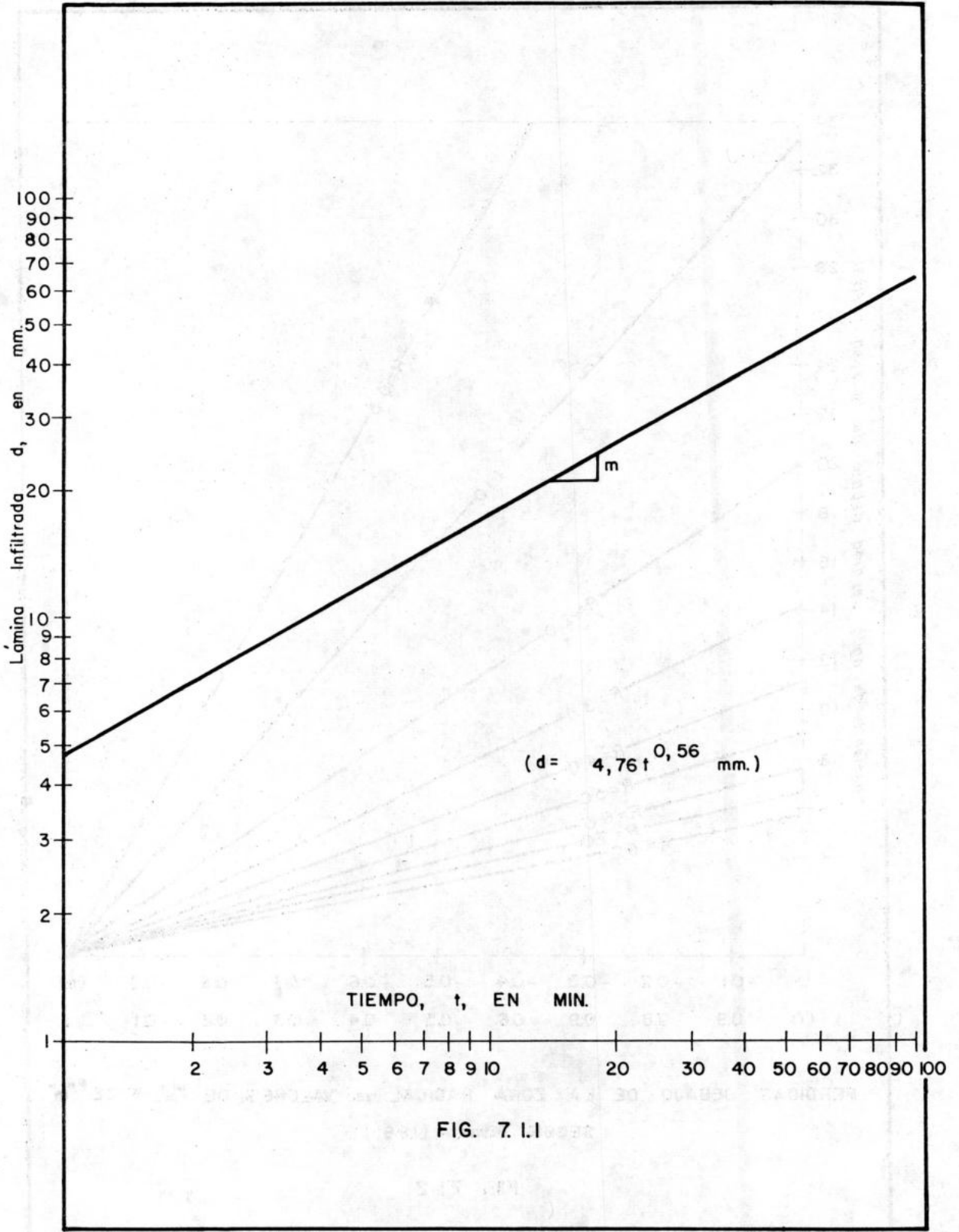
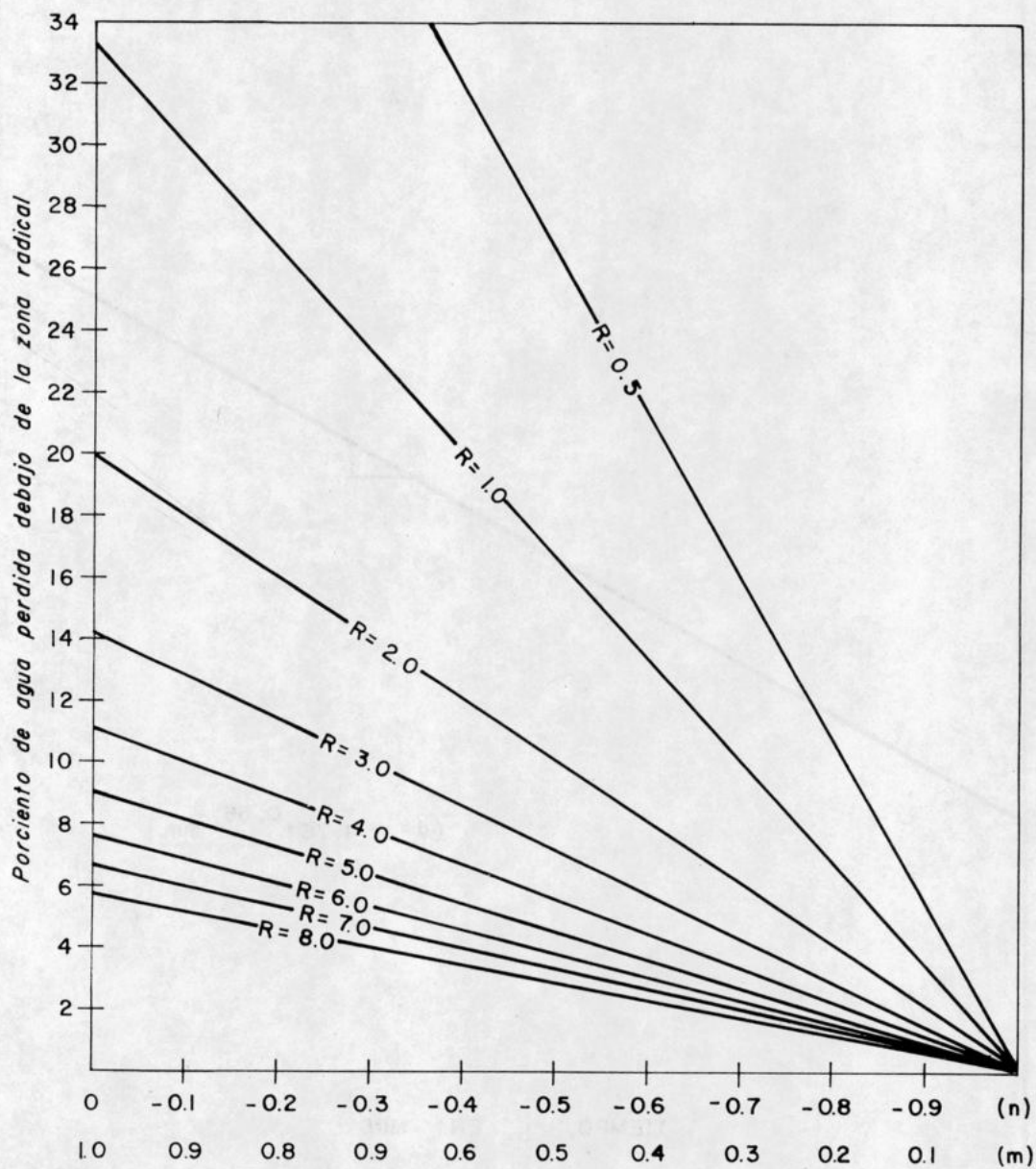


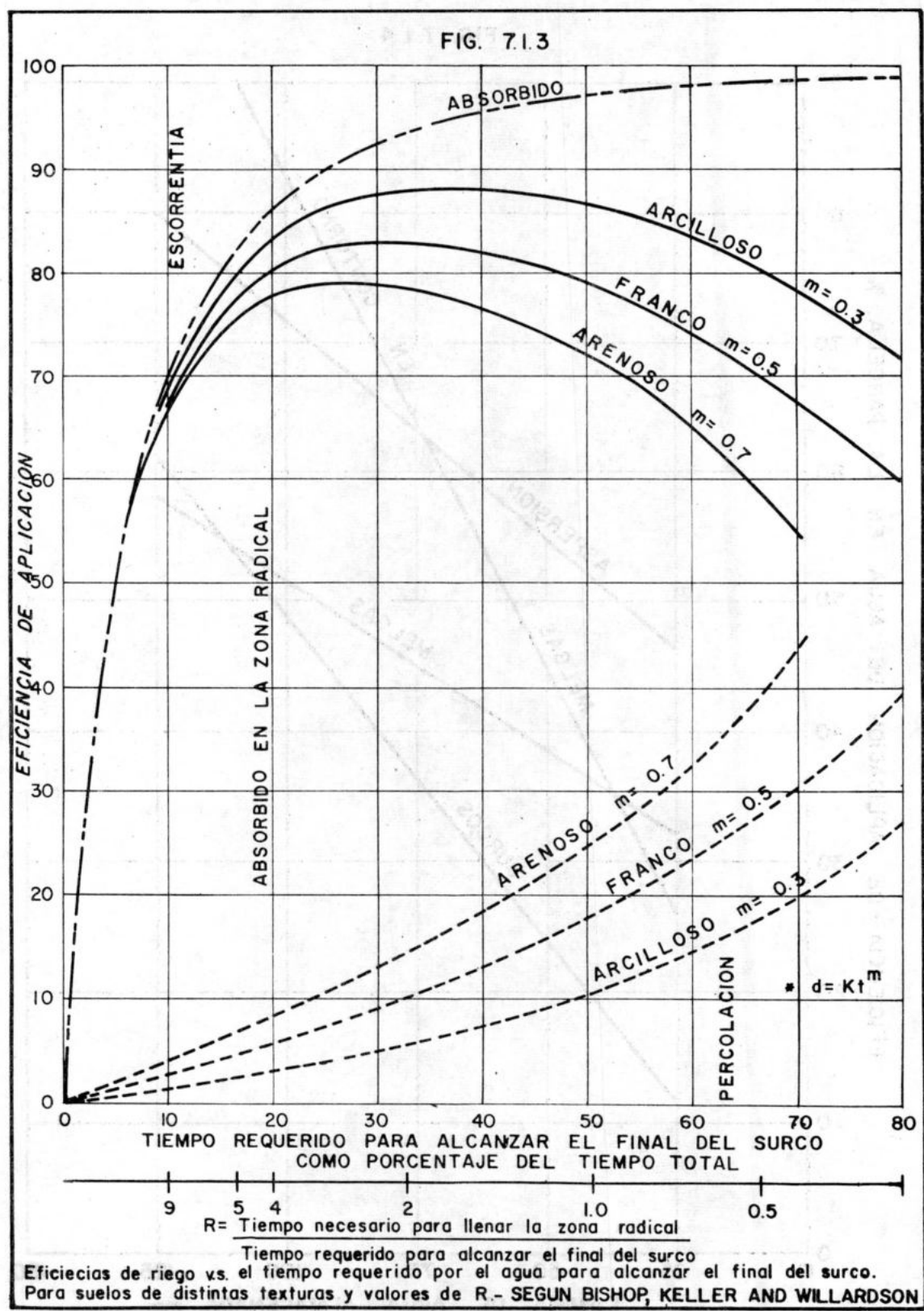
FIG. 7.1.1



PERDIDAS DEBAJO DE LA ZONA RADICAL vs. VALORES DE "n" Y DE "m"  
SEGUN Bishop (1961)

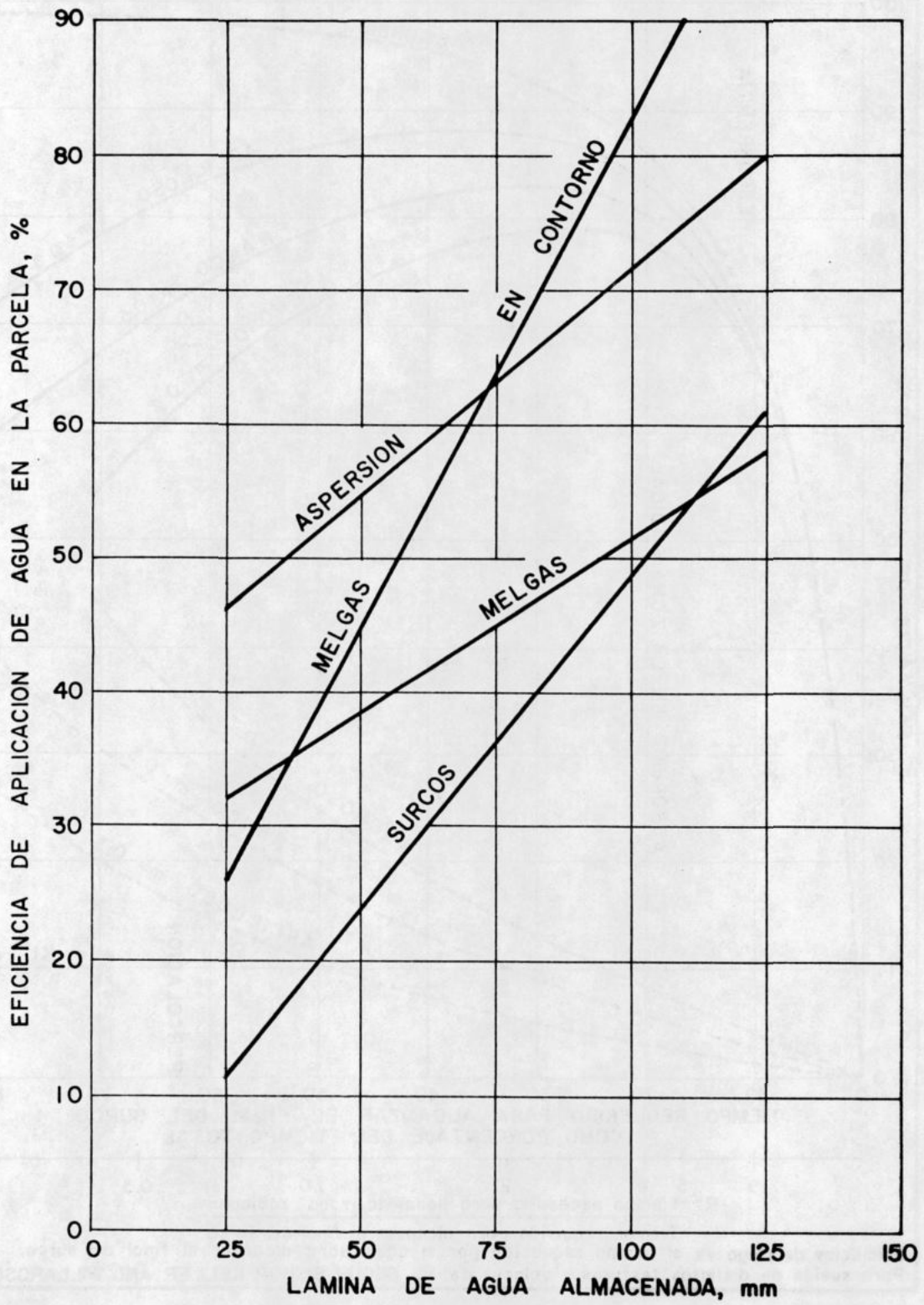
FIG. 7.1.2

FIG. 7.1.3



Eficiencias de riego vs. el tiempo requerido por el agua para alcanzar el final del surco.  
 Para suelos de distintas texturas y valores de R.- SEGUN BISHOP, KELLER AND WILLARDSON

FIG. 7.1.4



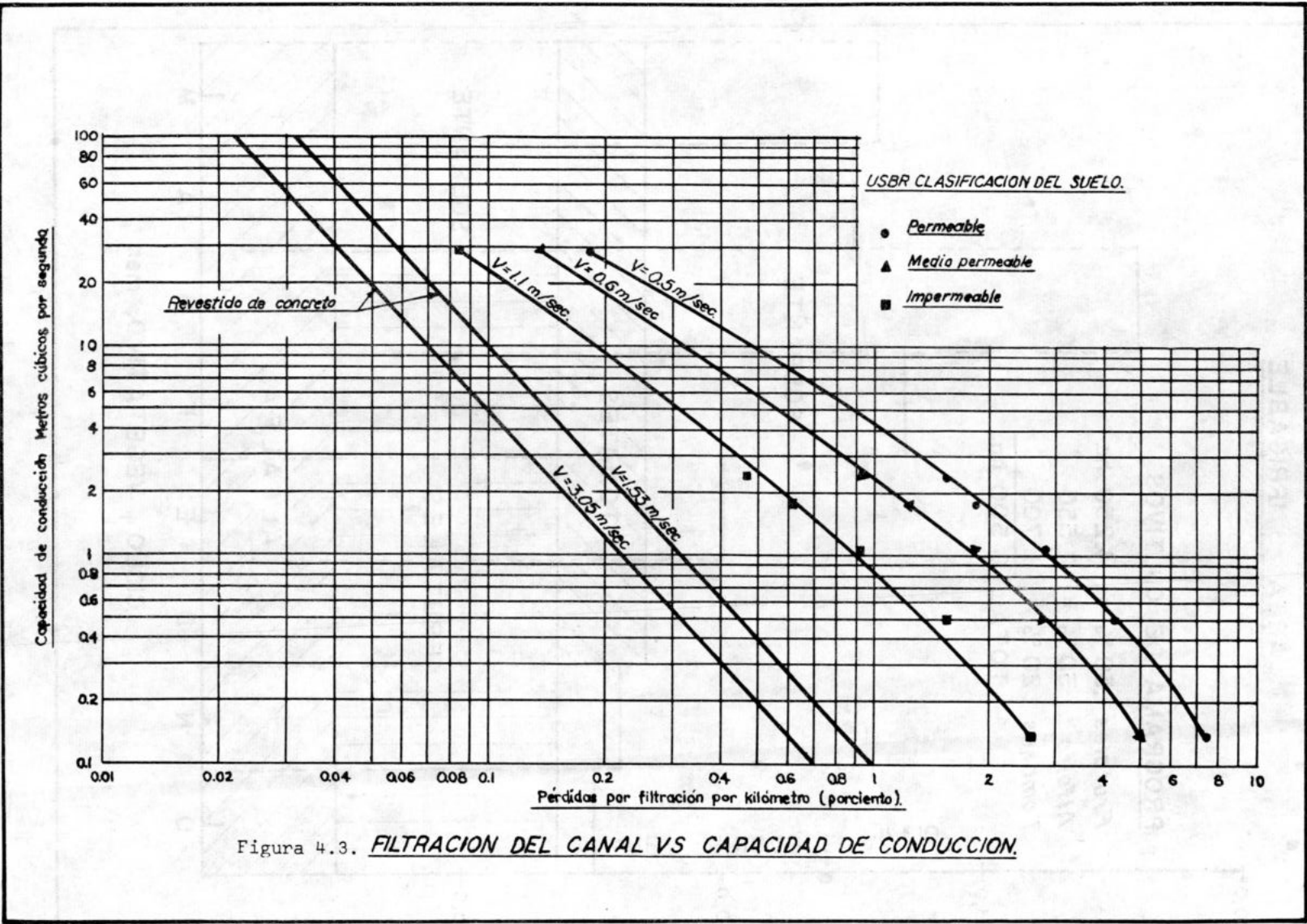


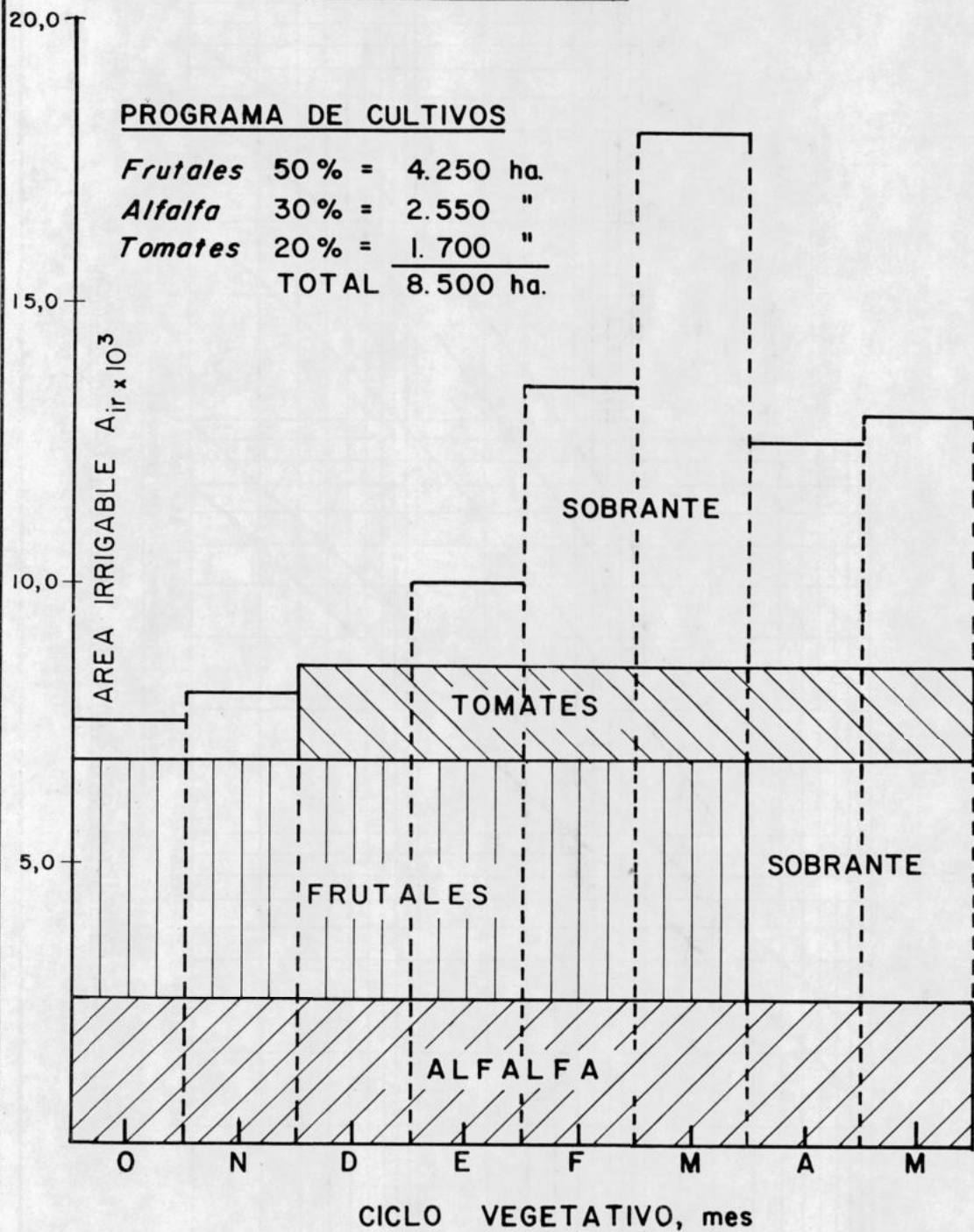
Figura 4.3. FILTRACION DEL CANAL VS CAPACIDAD DE CONDUCCION.

FIG. 8.2.1

AREA IRRIGABLE

PROGRAMA DE CULTIVOS

<i>Frutales</i>	50%	=	4.250 ha.
<i>Alfalfa</i>	30%	=	2.550 "
<i>Tomates</i>	20%	=	1.700 "
		TOTAL	8.500 ha.



SKEEDE CANAL  
Bureau of Reclamation

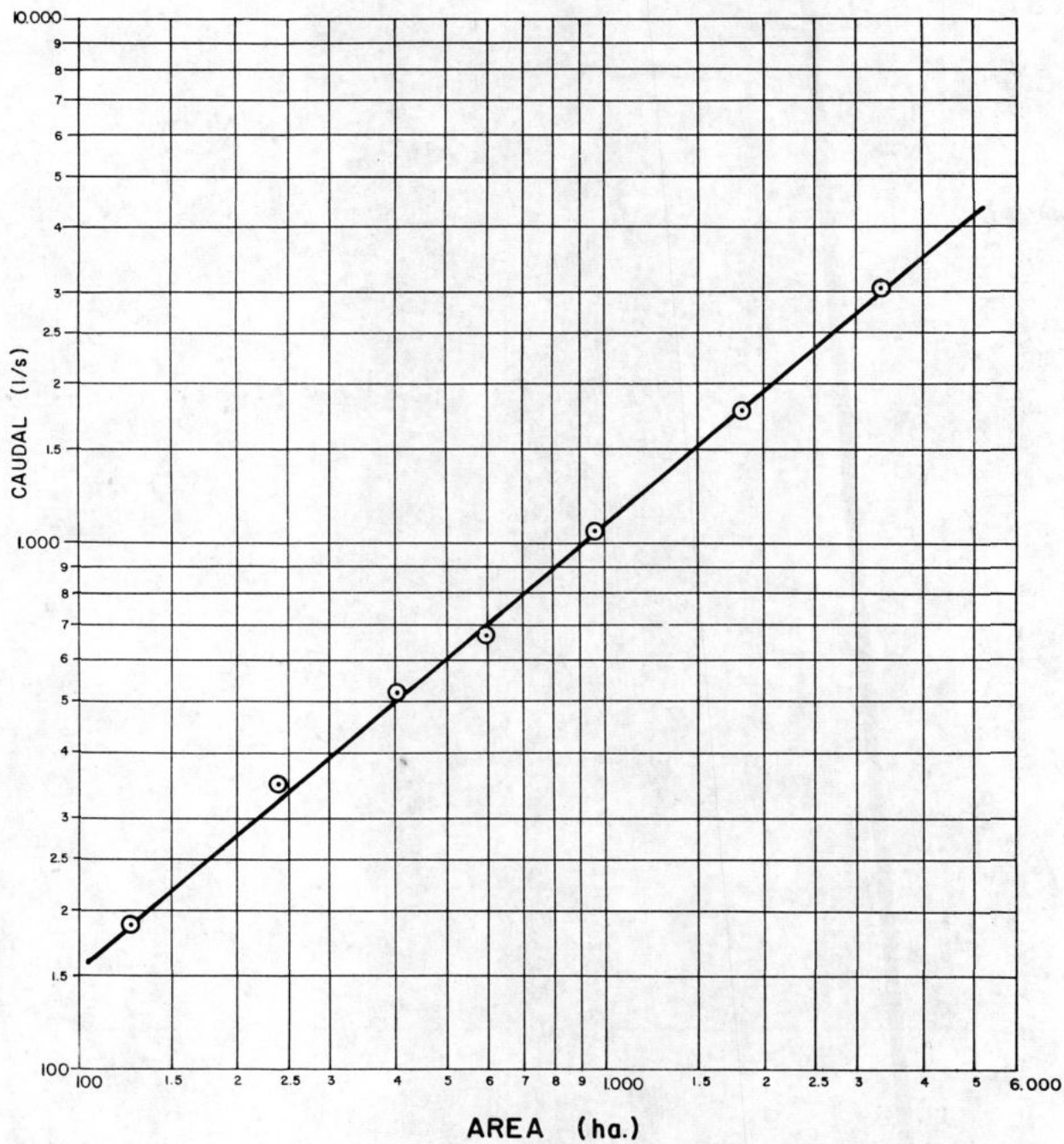


FIG. 8.3.2

